

**ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ
ТЕОРИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ
МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИИ
МАШИНОСТРОЕНИЯ**

*В десяти томах
под общей редакцией
Ф.В. Новикова и А.В. Якимова*

Том 10

**Концепции развития
технологии машиностроения**

Одесса 2005

УДК 621. 963

ББК 30.61

Н 73

Рецензенты: докт. техн. наук, проф., зав. кафедрой Одесского Национального политехнического университета Усов А.В.

докт. техн. наук, проф. Национального технического университета «ХПИ» Сизый Ю.А.

докт. техн. наук, проф. Харьковского государственного технического университета сельского хозяйства Коломиец В.В.

Рекомендовано к печати Ученым советом Одесского Национального политехнического университета.

Протокол № 10 от 26 апреля 2002 г.

Авторский **Новиков Ф. В.**, д.т.н. – введение, часть 1: гл. 1, 2, 3, 4, приложения;

коллектив: **Якимов А. В.**, д.т.н., проф. – часть 2: гл.1, приложения; **Новиков Г.В.**, к.т.н. – часть 1: гл.2; **Якимов А. А.**, к.т.н., доц. – часть 1: гл. 1; **Ларшин В.П.**, д.т.н., проф. – введение; часть 2: гл.1, 2; часть 3: гл.1 (§ 1.1.; 1.2.), приложения; **Шепелев А. А.**, д.т.н. - часть 3: гл. 1 (§ 1.3); **Лавриненко В. И.**, д.т.н. - часть 3: гл. 1 (§ 1.3); **Кривошапка Ю.Н.**, к.э.н. – часть 2: гл.1; **Ковальчук А. Н.** – часть 1: гл.1; **Яценко С. М.** – часть 1: гл.3; **Шкурупий В. Г.** – часть 1: гл.4; **Тигарев В.Н.**, к.т.н., доц. – часть 2: гл. 3.

Н 73 Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 10. “Концепции развития технологии машиностроения” – Одесса: ОНПУ, 2005.– 565 с.

Обоснованы перспективные научные направления развития технологии машиностроения на основе аналитических подходов и компьютерных технологий. Проанализированы этапы становления научных технологических школ.

Для специалистов машиностроительных предприятий, преподавателей и студентов высших учебных заведений.

Ил. 276, табл. 58, библиогр. 446 наим.

Обґрунтовано перспективні наукові напрямки розвитку технології машинобудування на основі аналітичних підходів і комп'ютерних технологій. Проаналізовано етапи становлення наукових технологічних шкіл.

Для фахівців машинобудівних підприємств, викладачів і студентів вищих навчальних закладів.

Іл. 276, табл. 58, бібліогр. 446 найм.

ББК 30.61

ISBN 966 – 7810 – 33 – X

ISBN 966 – 7810 – 64 – X

© Новиков Ф.В.

Якимов А.В.

Новиков Г.В. и др.

2005

ВВЕДЕНИЕ

Данным томом завершается большая работа над 10-ти томным изданием “Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения”, подготовленным в рамках Международной научно-технической конференции “Физические и компьютерные технологии”, проходящей в городе Харькове на базе Харьковской научно-производственной корпорации “ФЭД”. В подготовке издания приняли участие ведущие ученые-технологи Украины и России. В нем отражены последние достижения и сформулированы научные концепции развития процессов обработки материалов и технологии машиностроения.

Цель издания – новый физико-математический взгляд на проблемы механической, физико-технической обработки и технологии машиностроения; вооружение специалистов и ученых-технологов новыми фундаментальными знаниями для создания наукоемких технологий.

Основное содержание издания:

- Том 1. Механика резания материалов.
- Том 2. Теплофизика резания материалов.
- Том 3. Резание материалов лезвийными инструментами.
- Том 4. Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов.
- Том 5. Обработка металлов методами пластического деформирования.
- Том 6. Качество обработки деталей машин.
- Том 7. Точность обработки деталей машин.
- Том 8. Оптимизация технологических процессов в машиностроении.
- Том 9. Проектирование технологических процессов в машиностроении.
- Том 10. Концепции развития технологии машиностроения.

Настоящий 10-й том издания посвящен обоснованию перспективных научных направлений развития технологии машиностроения на базе аналитических подходов и компьютерных технологий. Большое внимание уделено методологии формирования операций обработки поверхностей деталей как основного элемента проектирования технологических процессов. Приведены решения оптимизационных технологических задач, полученных аналитическими методами. Теоретически обоснованы условия повышения эффективности технологии механической обработки, в особенности финишных методов с учетом

требований по точности и шероховатости обработки, ограничений по силовому и температурному факторам процесса, обеспечением оптических характеристик светоотражательных поверхностей и т.д.

Приведенные в работе результаты исследований могут быть использованы в учебном процессе. Как известно, присоединение Украины к Булонскому процессу требует коренного изменения структуры и организации учебного процесса в высшей школе, направленного на создание единого Европейского учебного и научного пространства. В соответствии с новой концепцией образования упор делается на увеличение доли самостоятельной работы студентов, позволяющей им в кратчайшие сроки приобрести навыки, знания и умения, которые будут необходимы, достаточны и востребованы при последующем трудоустройстве выпускников вузов. В этой связи возрастают требования к учебной литературе, призванной восполнить уменьшение доли аудиторной работы преподавателей. К числу этих требований относятся такие как: краткость и чёткость изложения материала; наличие большого количества примеров решения практических задач; применение компьютерных технологий моделирования и расчётов с квалифицированным анализом полученных результатов; увеличение доли лабораторного практикума с подробным описанием компьютерных моделей, экспериментальных работ и методик обработки экспериментальных данных; включения в учебные курсы новейших технологий упрочнения и обработки материалов, основанных на компьютерных технологиях программирования металлорежущих станков и системах автоматизированного проектирования технологических процессов. В данном томе содержатся, с одной стороны, новейшие сведения по современным технологиям компьютерного моделирования, микропроцессорным системам диагностики и управления в машиностроении, с другой стороны, материалы преимущественно учебного характера (исходная технологическая информация для компьютеризации соответствующих работ). В приложении приведены экспериментальные лабораторные работы по технологии машиностроения.

В заключительной части тома приведены сведения об основных этапах развития науки «Технология машиностроения» и известным научным школам, основанным и руководимым основоположниками тех или иных научных направлений в технологии машиностроения. Сформулированы перспективные направления развития технологии машиностроения.

ЧАСТЬ 1

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ В ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

ГЛАВА 1

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СЪЕМА ПРИПУСКА ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

1.1. ОБЩИЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПТИМИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СЪЕМА ПРИПУСКА ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

1.1.1. ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СЪЕМА ПРИПУСКА ПРИ ОБРАБОТКЕ В ДВА ПЕРЕХОДА

При исследовании механической обработки большое внимание уделено оптимизации параметров режимов резания и в меньшей мере – оптимизации структуры процесса съема припуска по его толщине. В научно-технической литературе фактически отсутствуют теоретические решения об изменении скорости съема припуска по его толщине, которые чрезвычайно важны для научно-обоснованного выбора количества операций и переходов с целью обеспечения требуемых параметров качества и точности обработки конкретных поверхностей деталей. В наших работах [242, 355, 381, 383] предложены теоретические подходы для решения данных задач. Целью настоящей работы является дальнейшее развитие этих подходов, получение аналитических зависимостей для определения оптимальной структуры съема припуска (по его толщине) при механической обработке.

Определим наиболее производительный вариант обработки прямолинейного образца по схеме врезного шлифования торцом круга с учетом ограничения по точности обработки δ , обусловленной упругими перемещениями в технологической системе.

Предположим, что величина упругого перемещения δ упрощенно выражается зависимостью

$$\delta = B \cdot V_0, \quad (1.1)$$

где V_0 – скорость радиальной подачи шлифовального круга, м/с; B –

размерный коэффициент, учитывающий характеристики круга и обрабатываемого материала, режимы резания.

При обработке в один переход основное время обработки τ определится

$$\tau = \frac{\Pi}{V_0} = B \cdot \frac{\Pi}{\delta} \quad (1.2)$$

где Π – величина снимаемого припуска, м.

При обработке в два перехода (после первого перехода шлифовальный круг выходит из контакта с обрабатываемым образцом и происходит восстановление упругих перемещений в технологической системе) основное время τ определится как сумма двух слагаемых (рис. 1.1)

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = \frac{\Pi_1}{V_1} + \frac{\Pi_2 + \delta_1}{V_2}, \quad (1.3)$$

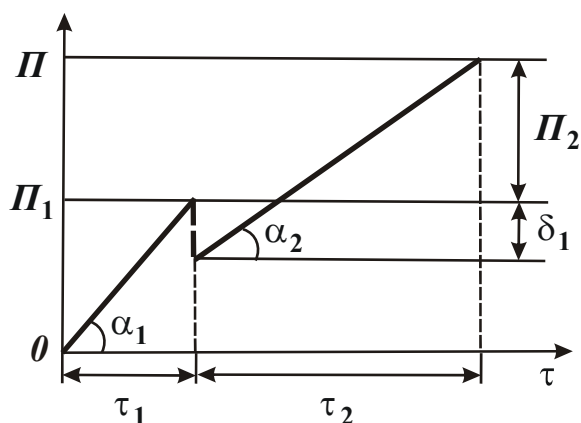


Рис. 1.1. Характер изменения величины снимаемого припуска с течением

времени обработки ($\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{\Pi_1}{\tau_1} = V_1$;

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{\Pi_2 + \delta_1}{\tau_2} = V_2).$$

где Π_1, Π_2 – соответственно величины снимаемых припусков на первом и втором переходах, м; V_1, V_2 – соответственно скорости радиальной подачи на первом и втором переходах, м/с; $\delta_1 = B \cdot V_1$ – величина упругого перемещения, возникающего на первом переходе, который затем удаляется на втором переходе; $\delta_2 = B \cdot V_2$ – величина упругого перемещения, возникающего на втором переходе, которая задана и определяет погрешность обработки.

Преобразуем зависимость (1.3) с учетом $\Pi_2 = \Pi - \Pi_1$, выражая скорости V_1 и V_2 через величины δ_1 и δ_2 :

$$\tau = B \cdot \left[\Pi_1 \cdot \left(\frac{1}{\delta_1} - \frac{1}{\delta_2} \right) + \frac{\Pi}{\delta_2} + \frac{\delta_1}{\delta_2} \right], \quad (1.4)$$

где Π – суммарная величина снимаемого припуска, м.

В данной зависимости параметры Π, B, δ_2 заданы, неизвестным параметром является величина δ_1 . Очевидно, с изменением δ_1

основное время обработки τ изменяется по экстремальной зависимости. Для определения точки экстремума функции τ приравняем первую производную τ'_{δ_1} нулю

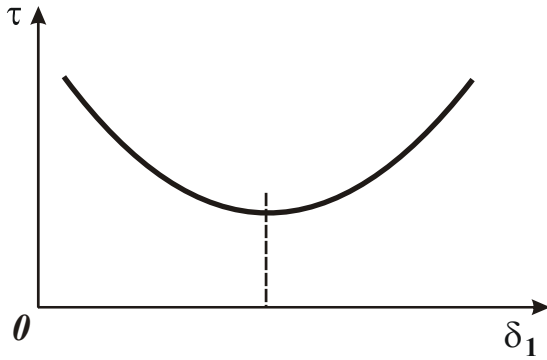


Рис. 1.2. Зависимость τ от δ_1 .

$$\tau'_{\delta_1} = B \cdot \left(-\frac{\Pi_1}{\delta_1^2} + \frac{1}{\delta_2} \right) = 0. \quad (1.5)$$

Откуда

$$\delta_1 = \sqrt{\Pi_1 \cdot \delta_2}. \quad (1.6)$$

Определим знак второй производной функции τ в точке экстремума:

$$\tau''_{\delta_1} = B \cdot \frac{2\Pi_1}{\delta_1^3} > 0. \quad (1.7)$$

Следовательно, в точке экстремума функция τ принимает минимальное значение, рис. 1.2.

Подставляя в (1.4) зависимость (1.6), определим минимальное основное время обработки

$$\tau_{min} = B \cdot \left[\sqrt{\frac{\Pi_1}{\delta_2}} + \sqrt{\frac{\Pi_1}{\delta_2}} + \frac{(\Pi - \Pi_1)}{\delta_2} \right]. \quad (1.8)$$

Первое слагаемое зависимости (1.8) определяет время первого перехода, а сумма второго и третьего слагаемых – время второго перехода. Как видно, в общем случае время второго перехода больше времени первого перехода.

Из зависимости (1.8) следует неоднозначное влияние величины Π_1 на основное время τ_{min} , т.е. существует экстремум функции τ_{min} от Π_1 . Для определения экстремума первую производную функции τ_{min} от Π_1 приравняем нулю:

$$(\tau_{min})'_{\Pi_1} = B \cdot \left(\sqrt{\frac{\delta_2}{\Pi_1}} \cdot \frac{1}{\delta_2} - \frac{1}{\delta_2} \right) = 0. \quad (1.9)$$

Откуда

$$\Pi_1 = \delta_2. \quad (1.10)$$

Определим знак второй производной функции τ_{min} от Π_1 в точке экстремума:

$$(\tau_{min})''_{\Pi_1} = -\frac{B}{2 \cdot \sqrt{\Pi_1 \cdot \delta_1 \cdot \Pi_1}} < 0. \quad (1.11)$$

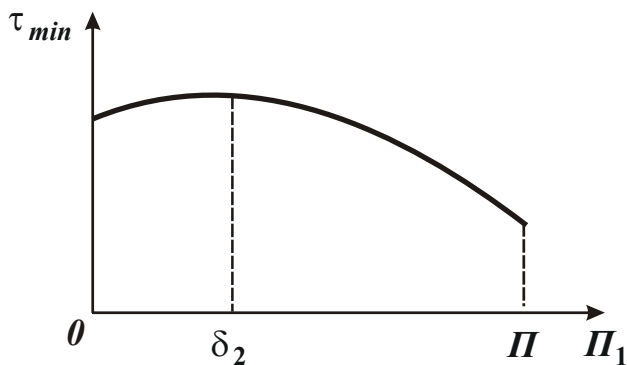


Рис. 1.3. Зависимость τ_{min} от Π_1 .

Следовательно, в точке экстремума функция τ_{min} принимает максимальное значение, рис. 1.3. Из этого вытекает, что добиться уменьшения τ_{min} можно двумя путями, выполняя условия: $\Pi_1=0$ и $\Pi_1 = \Pi$.

Очевидно, в первом случае обработка производится в один переход, а во втором случае – в два перехода и функция τ_{min} принимает значение

$$\tau_{min} = B \cdot \left(2 \cdot \sqrt{\frac{\Pi}{\delta_2}} \right). \quad (1.12)$$

По времени первый и второй переходы равны между собой (рис. 1.4), т.е.

$$\tau_1 = \tau_2 = B \cdot \left(\sqrt{\frac{\Pi}{\delta_2}} \right). \quad (1.13)$$

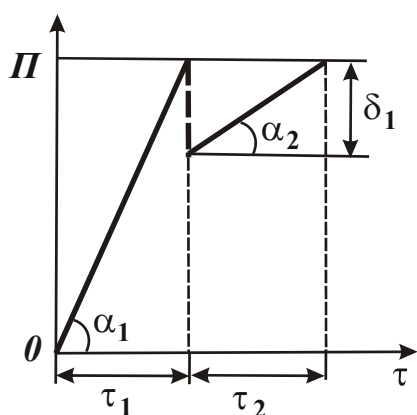


Рис. 1.4. Характер изменения величины снимаемого припуска с течением времени обработки ($\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{\Pi}{\tau_1} = V_1$;

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{\delta_1}{\tau_2} = V_2).$$

Из зависимости (1.8) также следует, что во втором случае ($\Pi_1 = \Pi$) основное время τ_{min} меньше, чем в первом случае ($\Pi_1=0$). Поэтому добиться наибольшего снижения основного времени τ_{min} с учетом ограничения по точности обработки δ_2 можно при условии $\Pi_1 = \Pi$.

1.1.2. ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ПРОЦЕССА СЪЕМА ПРИПУСКА ПРИ ОБРАБОТКЕ С БОЛЬШИМ КОЛИЧЕСТВОМ ПЕРЕХОДОВ

К полученному выше выводу можно прийти, анализируя преобразованную зависимость (1.3)

$$\tau = \left(\frac{\Pi_1}{V_1} + \frac{\Pi_2}{V_2} \right) + \frac{\delta_1}{V_2}. \quad (1.14)$$

Очевидно, сумма $\left(\frac{\Pi_1}{V_1} + \frac{\Pi_2}{V_2}\right) < \frac{\Pi_1 + \Pi_2}{V_1} = \frac{\Pi}{V_1}$, где $V_1 > V_2$. По-

этому с точки зрения уменьшения основного времени обработки τ целесообразно принять $\Pi_1 = \Pi$; $\Pi_2 = 0$.

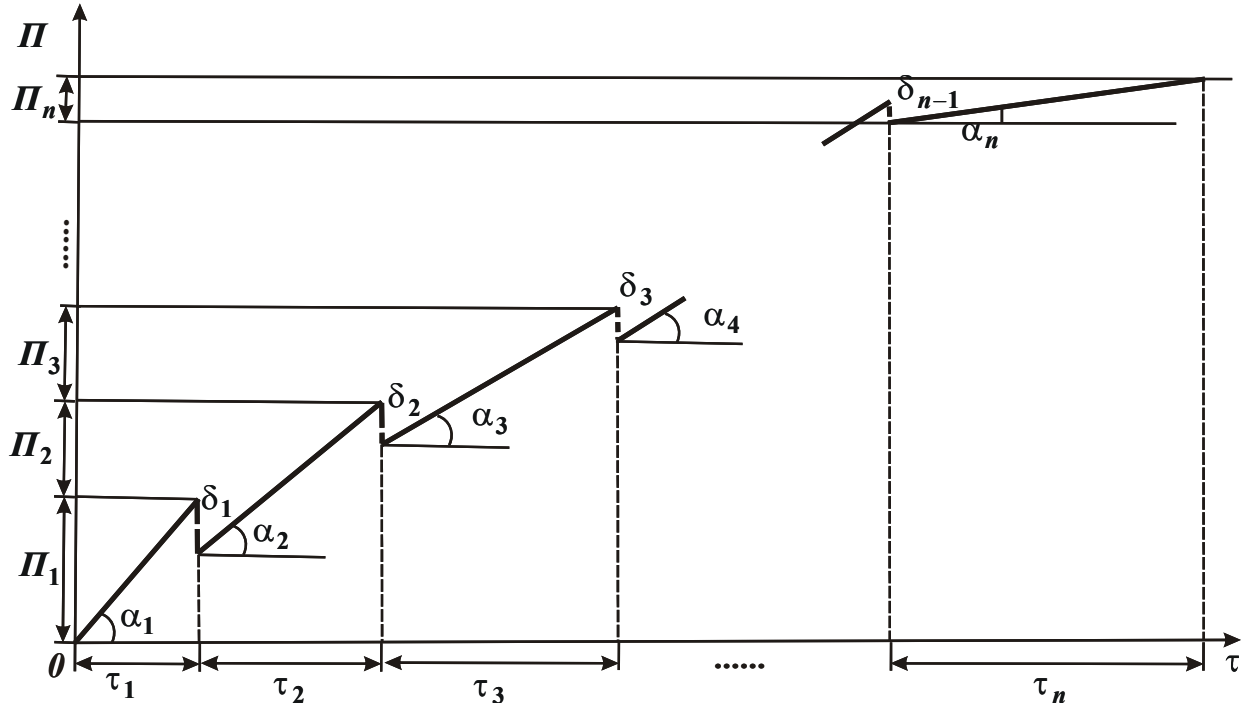


Рис. 1.5. Характер изменения величины снимаемого припуска с течением времени обработки ($\operatorname{tg}\alpha_1 = V_1$; $\operatorname{tg}\alpha_2 = V_2$; $\operatorname{tg}\alpha_3 = V_3$; ...; $\operatorname{tg}\alpha_n = V_n$).

К аналогичному результату придем, разбивая припуск Π на n элементарных припусков, снимаемых на каждом из n переходов (рис. 1.5). Для этого проведем анализ зависимости

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \dots + \tau_n = \\ &= \frac{\Pi_1}{V_1} + \frac{\Pi_2 + \delta_1}{V_2} + \frac{\Pi_3 + \delta_2}{V_3} + \dots + \frac{\Pi_n + \delta_{n-1}}{V_n} = \\ &= \left(\frac{\Pi_1}{V_1} + \frac{\Pi_2}{V_2} + \frac{\Pi_3}{V_3} + \dots + \frac{\Pi_n}{V_n}\right) + \left(\frac{\delta_1}{V_2} + \frac{\delta_2}{V_3} + \frac{\delta_3}{V_4} + \dots + \frac{\delta_{n-1}}{V_n}\right), \end{aligned} \quad (1.15)$$

где τ_n , Π_n , δ_n , V_n – соответственно основное время обработки, величина снимаемого припуска, величина упругого перемещения и скорость радиальной подачи на n -ном переходе.

Очевидно, сумма

$$\left(\frac{\Pi_1}{V_1} + \frac{\Pi_2}{V_2} + \frac{\Pi_3}{V_3} + \dots + \frac{\Pi_n}{V_n}\right) < \frac{\Pi_1 + \Pi_2 + \Pi_3 + \dots + \Pi_n}{V_1} = \frac{\Pi}{V_1},$$

где $V_1 > V_2 > V_3 > \dots > V_n$.

Поэтому с целью уменьшения основного времени обработки τ необходимо выполнить условия: $\Pi_1 = \Pi$; $\Pi_2 = \Pi_3 = \dots = \Pi_n = 0$,

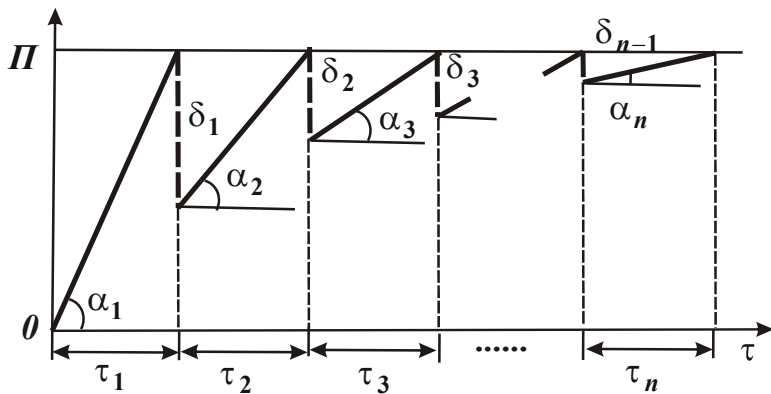


Рис. 1.6. Характер изменения величины снимаемого припуска с течением времени обработки ($\operatorname{tg} \alpha_1 = V_1$; $\operatorname{tg} \alpha_2 = V_2$; $\operatorname{tg} \alpha_3 = V_3$; ...; $\operatorname{tg} \alpha_n = V_n$).

что соответствует выводу, вытекающему из зависимостей (1.8) и (1.12). Характер изменения величины снимаемого припуска с течением времени обработки в данном случае показан на рис. 1.6.

Из зависимости (1.15) вытекает еще одно важное решение

по уменьшению основного времени обработки τ . Оно состоит в исключении второго слагаемого (заключенного в скобки) из зависимости (1.15), т.е. исключении той части времени обработки, которая затрачивается на устранение (съем) промежуточных значений упругого перемещения $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_{n-1}$. Это может быть достигнуто за счет осуществления не дискретной (рассмотренной выше), а непрерывной скорости радиальной подачи, когда в процессе обработки отсутствует восстановление упругих перемещений $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_{n-1}$ (в результате того, что инструмент постоянно находится в контакте с обрабатываемым образцом), рис. 1.7.

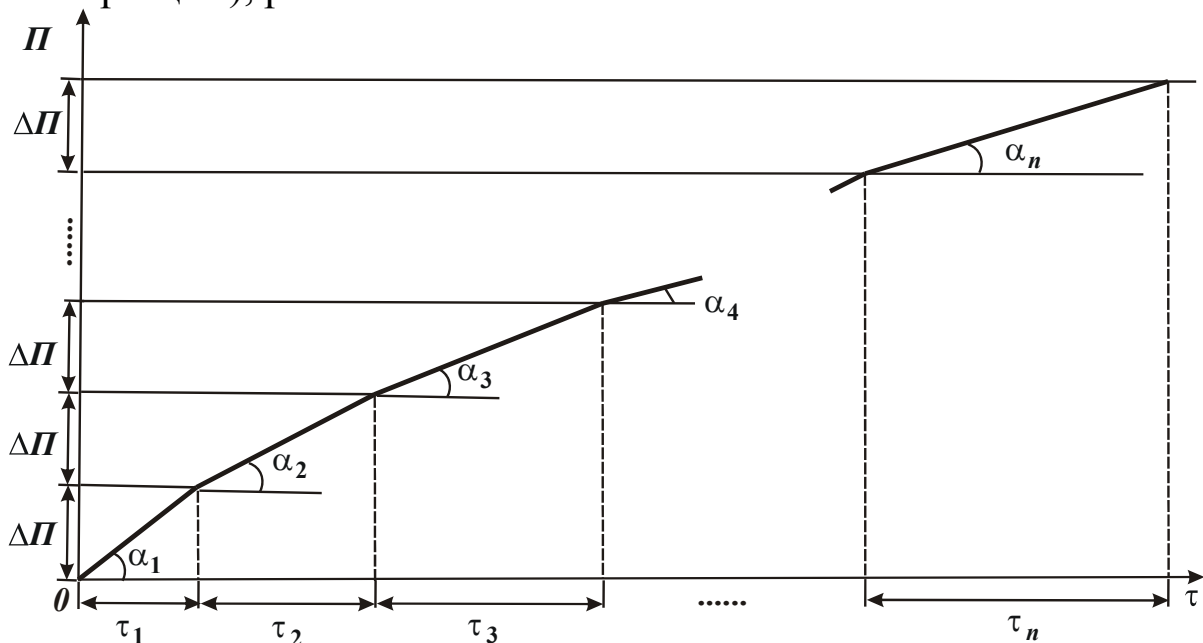


Рис. 1.7. Характер изменения величины снимаемого припуска с течением времени обработки ($\operatorname{tg} \alpha_1 = V_1$; $\operatorname{tg} \alpha_2 = V_2$; $\operatorname{tg} \alpha_3 = V_3$; ...; $\operatorname{tg} \alpha_n = V_n$).

Таким образом показано, что существуют два основные направления снижения основного времени обработки τ , описываемого зависимостью (1.15).

Первое направление состоит в том, что на первом переходе осуществляется радиальное перемещение режущего инструмента (шлифовального круга) на всю величину снимаемого припуска Π . Затем инструмент выводится из контакта с обрабатываемым образцом, что приводит к восстановлению возникшего упругого перемещения δ_1 .

На втором переходе производится радиальное перемещение инструмента на величину δ_1 со скоростью радиальной подачи V_2 , которая меньше скорости радиальной подачи V_1 . На третьем переходе производится радиальное перемещение инструмента на величину упругого перемещения δ_2 , возникшего на втором переходе, со скоростью радиальной подачи $V_3 < V_2$ и т.д.

Как видим, имеет место дискретный характер изменения скорости радиальной подачи во времени обработки. Исходя из зависимости (1.15), основное время обработки τ в данном (первом) случае описывается

$$\tau = \frac{\Pi}{V_1} + \left(\frac{\delta_1}{V_2} + \frac{\delta_2}{V_3} + \frac{\delta_3}{V_4} + \dots + \frac{\delta_{n-1}}{V_n} \right). \quad (1.16)$$

Используя данную зависимость, в следующем параграфе проведена оптимизация структуры процесса съема припуска с дискретной скоростью радиальной подачи.

Во втором случае, как отмечалось выше, скорость радиальной подачи изменяется непрерывно во времени, что приводит к исключению в зависимости (1.15) второго слагаемого (заклученного в скобки). В результате зависимость (1.15) принимает вид

$$\tau = \left(\frac{\Pi_1}{V_1} + \frac{\Pi_2}{V_2} + \frac{\Pi_3}{V_3} + \dots + \frac{\Pi_n}{V_n} \right). \quad (1.17)$$

Для анализа предположим, что $\Pi_1 = \Pi_2 = \Pi_3 = \dots = \Pi_n = \Delta\Pi = \frac{\Pi}{n}$, где n – количество переходов.

Тогда, очевидно, на каждом переходе, начиная со второго, будет удаляться припуск, равный $\Delta\Pi + \Delta\delta$, где $\Delta\delta = \delta_1 / n = \delta_n$ – заданная точность размера обработки; δ_1 – упругое перемещение, возникаю-

щее на первом переходе.

Исходя из этого, величина упругого перемещения, возникающего на первом переходе, выразится зависимостью $\delta_1 = n \cdot \Delta\delta$.

Величина упругого перемещения, возникающего на втором переходе, соответственно выразится зависимостью $\delta_2 = (n-1) \cdot \Delta\delta$; на третьем переходе – $\delta_3 = (n-2) \cdot \Delta\delta$ и т.д. На n -ном (последнем) переходе – $\delta_n = 1 \cdot \Delta\delta$.

Соответственно скорости радиальной подачи на каждом из i переходов выразятся:

$$V_1 = \frac{n \cdot \Delta\delta}{B}; \quad V_2 = \frac{(n-1) \cdot \Delta\delta}{B}; \quad \dots; \quad V_n = \frac{1 \cdot \Delta\delta}{B}.$$

Подставим выражения для определения параметров $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_n$ и $V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$ в зависимость (1.17)

$$\tau = B \cdot \frac{\Delta\Pi}{\Delta\delta} \cdot \left[\frac{1}{n} + \frac{1}{(n-1)} + \frac{1}{(n-2)} + \dots + 1 \right], \quad (1.18)$$

где $\Delta\Pi = \frac{\Pi}{n} = \Pi \cdot \frac{\Delta\delta}{\delta_1}$; $\frac{\Delta\Pi}{\Delta\delta} = \frac{\Pi}{\delta_1}$.

Окончательно зависимость (1.18) примет вид

$$\tau = B \cdot \frac{\Pi}{\delta_1} \cdot \left[1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{n} \right]. \quad (1.19)$$

Что собой представляет данный ряд?

В работе [60] показано, что функцию $\ln x$ можно разложить в ряд

$$\ln x = \frac{x-1}{1} - \frac{(x-1)^2}{2} + \frac{(x-1)^3}{3} - \frac{(x-1)^4}{4} + \dots \quad (1.20)$$

Для $x < 1$

$$\ln x = - \left[\frac{(1-x)}{1} + \frac{(1-x)^2}{2} + \frac{(1-x)^3}{3} + \frac{(1-x)^4}{4} + \dots \right]. \quad (1.21)$$

Если рассматривать δ весьма малой величиной ($x \ll 1$), то с определенными допущениями можно принять $(1-x) \approx 1$. Тогда зависимость (1.21) упростится

$$\ln x = - \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \dots \right). \quad (1.22)$$

В итоге приходим к ряду, описываемому зависимостью (1.19), рассматривая в ней в качестве величины x отношение $\delta_n / \delta_1 \ll 1$,

где δ_n заданная точность размера обработки; δ_1 – начальная величина упругого перемещения.

С учетом сказанного зависимость (1.19) примет вид

$$\tau = -B \cdot \frac{\Pi}{\delta_1} \cdot \ln \frac{\delta_n}{\delta_1} \quad (1.23)$$

или

$$\delta_n = \delta_1 \cdot e^{-\frac{\delta_1 \cdot \tau}{\Pi \cdot B}}. \quad (1.24)$$

Соответственно текущая скорость радиальной подачи выразится

$$V = \frac{\delta_n}{B} = \frac{\delta_1}{B} \cdot e^{-\frac{\delta_1 \cdot \tau}{\Pi \cdot B}}. \quad (1.25)$$

Как видим, параметры δ_n и V с течением времени обработки τ непрерывно уменьшаются по экспоненциальному закону, рис. 1.8. В начальный момент обработки ($\tau=0$, что соответствует началу условного второго перехода) величина упругого перемещения принимает значение $\delta_n = \delta_1$, а скорость радиальной подачи – $V = \frac{\delta_1}{B}$.

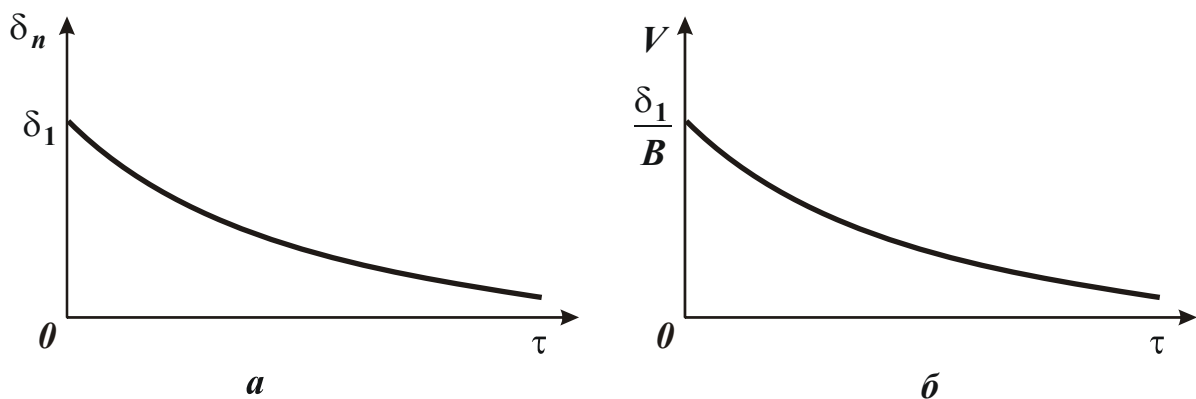


Рис. 1.8. Характер изменения параметров δ_n (а) и V (б) с течением времени обработки τ .

Проведем анализ зависимости (1.23), рассматривая в ней величину упругого перемещения δ_n заданной, определяющей точность размера обработки, и представляя в виде:

$$\tau = B \cdot \frac{\Pi}{\delta_1} \cdot (\ln \delta_1 - \ln \delta_n). \quad (1.26)$$

Как видим, величина δ_1 неоднозначно влияет на основное время обработки τ , т.е. существует экстремум функции τ от переменной величины δ_1 . Подчиним τ необходимому условию экстремума

$$\begin{aligned}\tau'_{\delta_1} &= B \cdot \Pi \cdot \left[-\frac{1}{\delta_1^2} \cdot (\ln \delta_1 - \ln \delta_n) + \frac{1}{\delta_1^2} \right] = \\ &= B \cdot \frac{\Pi}{\delta_1^2} \cdot [1 - (\ln \delta_1 - \ln \delta_n)] = 0.\end{aligned}\quad (1.27)$$

Откуда

$$\ln \frac{\delta_1}{\delta_n} = 1$$

или

$$\frac{\delta_1}{\delta_n} = e. \quad (1.28)$$

Определим знак второй производной функции τ

$$\tau''_{\delta_1} = -B \cdot \frac{\Pi}{\delta_1^3} \cdot \left(1 + 2 \cdot \ln \frac{\delta_1}{\delta_n} \right) < 0.$$

Знак “—” соответствует максимуму функции τ , рис. 1.9. Следовательно, уменьшить функцию τ (исходя из рис. 1.9) можно двумя путями:

- 1) $\delta_1 = \Pi$;
- 2) $\delta_1 \rightarrow 0$.

Однако, согласно условиям задачи $\frac{\delta_1}{\delta_n} = n > 1$. Поэтому второе

условие невыполнимо. Наименьшее значение функция τ будет принимать при $\delta_1 = \Pi$. Это означает, что на первом (условном) переходе необходимо обеспечить натяг в технологической системе, равный величине снимаемого припуска Π . В результате съём обрабатываемого материала будет осуществляться под действием упруго-восстанавливающей силы

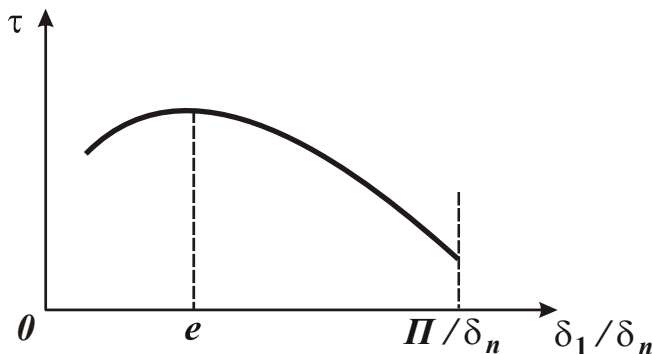


Рис. 1.9. Изменение функции τ в зависимости от отношения δ_1 / δ_n .

(обусловленной упругими перемещениями в технологической системе) при отключенной радиальной подаче станка.

Минимальное значение основного времени обработки τ_{min} определится из зависимости (1.26) при условии $\delta_1 = \Pi$

$$\tau_{min} = B \cdot \ln \frac{\Pi}{\delta_n}. \quad (1.29)$$

Как видим, величина τ_{min} тем меньше, чем меньше параметр B и соотношение Π / δ_n .

Рассматривая δ_n как переменную величину, определяющую текущее упругое перемещение, зависимости (1.24) и (1.25) с учетом $\delta_1 = \Pi$ примут вид

$$\delta_n = \Pi \cdot e^{-\frac{\tau}{B}}, \quad (1.30)$$

$$V = \frac{\Pi}{B} \cdot e^{-\frac{\tau}{B}}. \quad (1.31)$$

Зависимость (1.29) соответствует исходной зависимости (1.19), увязывающей основное время обработки τ с количеством переходов n . Определим количество переходов n , необходимое для обеспечения τ_{min} .

Из условия задачи известно, что $n = \frac{\delta_1}{\Delta\delta}$. Принимая $\delta_1 = \Pi$, $\Delta\delta = \delta_n$, имеем $n = \frac{\Pi}{\delta_n}$. Следовательно, количество переходов n

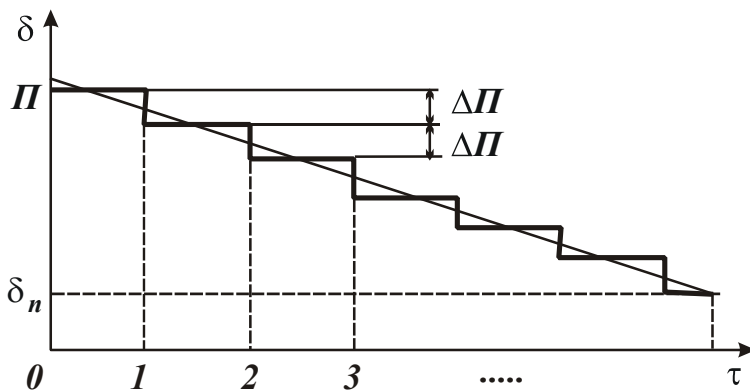


Рис. 1.10. Зависимость величины упругого перемещения δ от количества переходов n .

определяется отношением величины снимаемого припуска Π и заданной точности размера обработки δ_n . Например, при $\Pi=1000$ мкм, $\delta_n=10$ мкм необходимое количество переходов $n=100$. На каждом переходе снимается припуск величиной

$$\Delta\Pi + \Delta\delta = \frac{\Pi}{n} + \frac{\Pi}{n} = 2 \cdot \frac{\Pi}{n} = 20 \text{ мкм.}$$

Характер изменения при этом величины упругого перемещения δ показан на рис. 1.10.

Аналогичным будет характер изменения скорости радиальной подачи V . На первом переходе – $V_1 = \frac{\Pi}{B}$, на втором переходе – $V_2 = \frac{\Pi - \Delta\Pi}{B}$, на третьем переходе – $V_3 = \frac{\Pi - 2 \cdot \Delta\Pi}{B}$ и т.д. На последнем переходе – $V_n = \frac{\delta_n}{B}$.

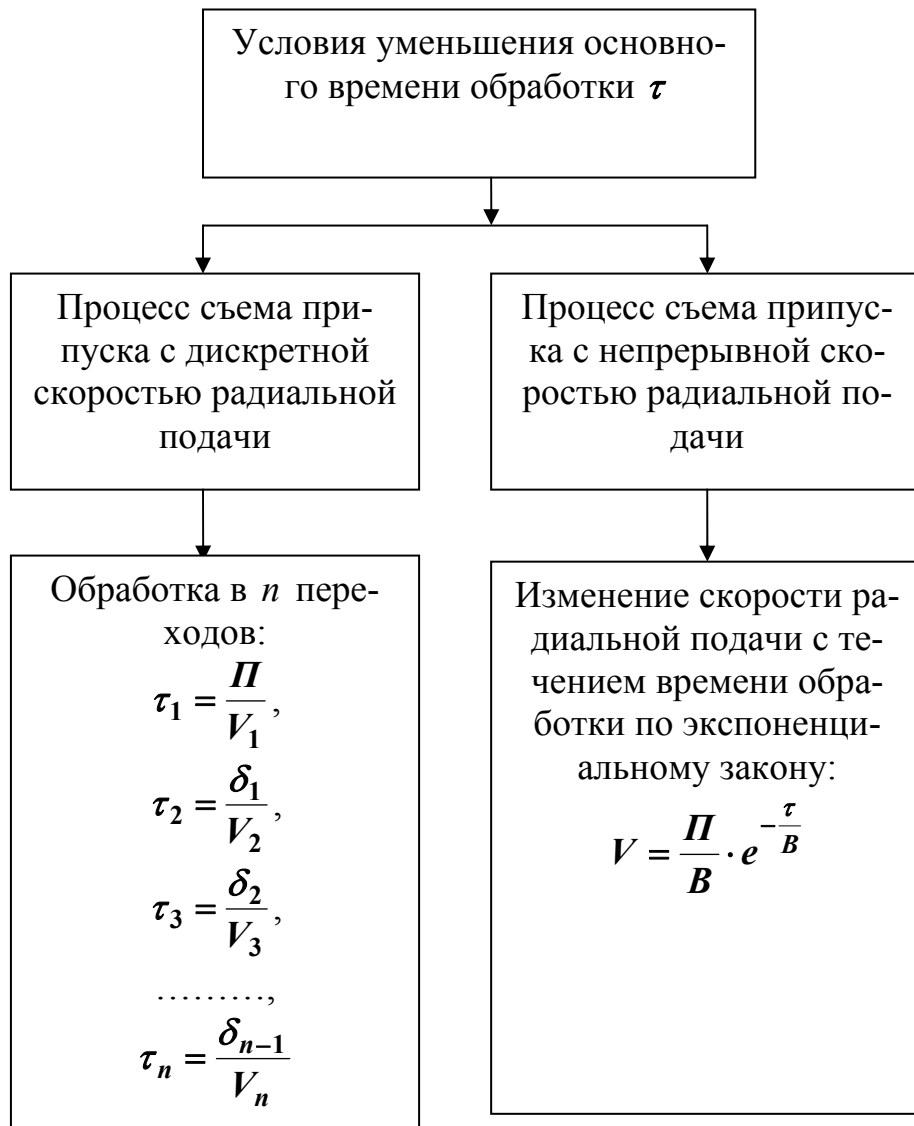


Рис. 1.11. Структурная схема условий уменьшения основного времени обработки τ .

На рис. 1.11 в обобщенном виде структурно показаны условия уменьшения основного времени обработки τ , вытекающие из зависимости (1.15).

1.2. ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ПРОЦЕССА СЪЕМА ПРИПУСКА С ДИСКРЕТНОЙ СКОРОСТЬЮ РАДИАЛЬНОЙ ПОДАЧИ

Проведем оптимизацию структуры процесса съема припуска с дискретной скоростью радиальной подачи, используя зависимость (1.16), в которой реализовано условие $\Pi_1 = \Pi$. Оценим влияние количества переходов n на основное время обработки τ .

В параграфе 1.1.1 проведена оптимизация структуры процесса съема припуска с дискретной скоростью радиальной подачи для обработки в два перехода. При обработке в три перехода основное время τ выразится:

$$\tau = \frac{\Pi}{V_1} + \frac{\delta_1}{V_2} + \frac{\delta_2}{V_3}. \quad (1.32)$$

В данном случае величина упругого перемещения $\delta_3 = B \cdot V_3$, возникающего на третьем переходе, определяет точность обработки и она задана. Задана также и величина снимаемого припуска Π . Выразим в зависимости (1.32) скорость радиальной подачи на каждом переходе (V_1, V_2, V_3) через соответствующие величины упругого перемещения на каждом переходе ($\delta_1, \delta_2, \delta_3$). Тогда зависимость (1.32) примет вид:

$$\tau = B \cdot \left(\frac{\Pi}{\delta_1} + \frac{\delta_1}{\delta_2} + \frac{\delta_2}{\delta_3} \right). \quad (1.33)$$

Величины δ_1 и δ_2 неоднозначно влияют на основное время τ , т.е. существуют экстремумы функции τ от переменных δ_1 и δ_2 . Для их определения вычислим первые производные функции τ от переменных δ_1, δ_2 и приравняем их нулю:

$$\tau'_{\delta_1} = B \cdot \left(-\frac{\Pi}{\delta_1^2} + \frac{1}{\delta_2} \right) = 0, \quad (1.34)$$

$$\tau'_{\delta_2} = B \cdot \left(-\frac{\delta_1}{\delta_2^2} + \frac{1}{\delta_3} \right) = 0. \quad (1.35)$$

Очевидно, вторые производные функции τ от переменных δ_1 и δ_2 будут положительными величинами. Поэтому в точках экстремума функция τ принимает минимальные значения.

Разрешая уравнения (1.34) и (1.35) относительно неизвестных величин δ_1 и δ_2 , имеем

$$\delta_2 = \sqrt[3]{\delta_3^2 \cdot \Pi}, \quad (1.36)$$

$$\delta_1 = \sqrt[3]{\delta_3 \cdot \Pi^2}. \quad (1.37)$$

Подставим выражения (1.36) и (1.37) в (1.33):

$$\tau_{min} = B \cdot \left(3 \cdot \sqrt[3]{\frac{\Pi}{\delta_3}} \right). \quad (1.38)$$

В итоге пришли к зависимости, аналогичной зависимости (1.12) для обработки в два перехода. По длительности все переходы равны между собой.

Определим основное время обработки в четыре перехода:

$$\tau = \frac{\Pi}{V_1} + \frac{\delta_1}{V_2} + \frac{\delta_2}{V_3} + \frac{\delta_3}{V_4}. \quad (1.39)$$

Здесь величина упругого перемещения $\delta_4 = B \cdot V_4$ определяет точность размера обработки и она задана. Выразим в зависимости (1.39) скорости V_1, V_2, V_3, V_4 через соответствующие значения величины упругого перемещения на каждом переходе $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$:

$$\tau = B \cdot \left(\frac{\Pi}{\delta_1} + \frac{\delta_1}{\delta_2} + \frac{\delta_2}{\delta_3} + \frac{\delta_3}{\delta_4} \right). \quad (1.40)$$

Как и в предыдущих случаях, величины δ_1, δ_2 и δ_3 неоднозначно влияют на основное время обработки τ , т.е. существуют экстремумы функции τ от величин δ_1, δ_2 и δ_3 . Подчиним функцию τ необходимому условию экстремума от трех переменных δ_1, δ_2 и δ_3 :

$$\tau'_{\delta_1} = B \cdot \left(-\frac{\Pi}{\delta_1^2} + \frac{1}{\delta_2} \right) = 0, \quad (1.41)$$

$$\tau'_{\delta_2} = B \cdot \left(-\frac{\delta_1}{\delta_2^2} + \frac{1}{\delta_3} \right) = 0, \quad (1.42)$$

$$\tau'_{\delta_3} = B \cdot \left(-\frac{\delta_2}{\delta_3^2} + \frac{1}{\delta_4} \right) = 0. \quad (1.43)$$

Очевидно, вторые производные функции τ от переменных δ_1, δ_2 и δ_3 будут положительными величинами. Поэтому функция τ в точках экстремумов принимает минимальные значения.

Разрешая уравнения (1.41), (1.42) и (1.43) относительно переменных δ_1, δ_2 и δ_3 , имеем:

$$\delta_1 = \sqrt[4]{\Pi^3 \cdot \delta_4}, \quad (1.44)$$

$$\delta_2 = \sqrt[4]{\Pi^2 \cdot \delta_4^2}, \quad (1.45)$$

$$\delta_3 = \sqrt[4]{\Pi \cdot \delta_4^3}. \quad (1.46)$$

Подставляя выражения (1.44), (1.45), (1.46) в зависимость (1.40), определим минимальное основное время обработки τ_{min} :

$$\tau_{min} = B \cdot \left(4 \cdot \sqrt[4]{\frac{\Pi}{\delta_4}} \right). \quad (1.47)$$

Из зависимости (1.47) вытекает, что по длительности все переходы одинаковы. Исходя из зависимости (1.40) это означает, что отношение величин упругих перемещений, возникающих на предшествующем и последующем переходах, одинаково и равно

$$\left(\sqrt[4]{\frac{\Pi}{\delta_4}} \right).$$

Следовательно, с каждым последующим переходом величина упругого перехода убывает по геометрической прогрессии. Знаменателем убывающей прогрессии является приведенное выше отношение величин упругих перемещений, возникающих на предшествующем и последующем переходах.

Полученные зависимости (1.12), (1.38) и (1.47) позволяют установить общую закономерность изменения функции τ_{min} при обработке с большим количеством переходов n :

$$\tau_{min} = B \cdot n \cdot \left(\frac{\Pi}{\delta_n} \right)^{\frac{1}{n}}. \quad (1.48)$$

Как следует из зависимости (1.48), параметр n неоднозначно влияет на функцию τ_{min} , т.е. существует экстремум функции τ_{min} от n . Для определения экстремального значения n возьмем первую производную от функции τ_{min} по n и полученное выражение приравняем нулю

$$\left(\tau_{min} \right)'_n = B \cdot z^{\frac{1}{n}} \cdot \left(1 - \frac{\ln z}{n} \right) = 0, \quad (1.49)$$

где $z = \frac{\Pi}{\delta_n} > 1$ – относительная величина.

Откуда экстремальное значение n равно

$$n = \ln z \quad (1.50)$$

или

$$z = e^n.$$

Для определения характера экстремума функции τ_{min} получим вторую производную $(\tau_{min})''_n$

$$(\tau_{min})''_n = B \cdot z^n \cdot \frac{\ln^2 z}{n^3} > 0. \quad (1.51)$$

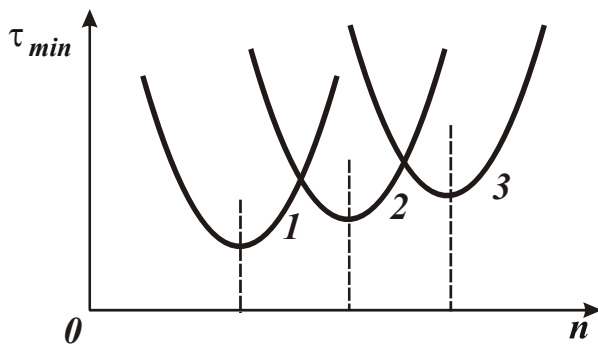


Рис. 1.12. Зависимость τ_{min} от n для разных значений z ($z_1 < z_2 < z_3$).

Вторая производная – положительная величина, следовательно, в точке экстремума имеет место минимум функции τ_{min} , рис. 1.12. Значение $(\tau_{min})_{min}$ определим, подставляя зависимость (1.50) в (1.48)

$$(\tau_{min})_{min} = B \cdot \ln z \cdot z^{\frac{1}{\ln z}},$$

или с учетом зависимости (1.50)

$$(\tau_{min})_{min} = B \cdot n \cdot (e^n)^{\frac{1}{n}} = B \cdot n \cdot e = B \cdot \ln z \cdot e, \quad (1.52)$$

где число $e \approx 2,72$.

Количественно связь между экстремальным значением n и относительной величиной z показана в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Расчетные значения z и $(\tau_{min})_{min}$ в зависимости от количества переходов n

i	1	2	3	4	5	6	7	8
z	2,72	7,4	20,1	54,7	148,9	405	1101	3000
$(\tau_{min})_{min}$	2,72	5,4	8,1	10,8				

Как видно из табл. 1.1, с увеличением относительной величины z количество переходов n увеличивается, однако не существенно. Например, в диапазоне изменения $z=2,72\dots 54,7$ (что имеет место на практике) количество переходов n изменяется в диапазоне $1\dots 4$. Следовательно, обеспечить наибольшую производительность (т.е. наименьшее время обработки) с учетом ограничения по точности обработки δ_n можно за $1\dots 4$ перехода (в зависимости от относительной величины z).

Данный вывод справедлив и в случае, если рассматривать вместо переходов операции. Этим, в частности, можно объяснить то, что на практике технологический процесс механической обработки конкретной поверхности детали включает, как правило, до 4–5 операций. Дальнейшее увеличение количества операций увеличивает основное время обработки (снижает производительность), рис. 1.12.

В табл. 1.1 приведены также значения $(\tau_{min})_{min}$, рассчитанные по зависимости (1.52) при $B=1$. С увеличением относительной величины z минимум основного времени увеличивается, что связано с необходимостью обеспечения более высокой точности обработки.

Из приведенной зависимости (1.48) вытекает, что при обработке в n переходов отношение величин упругого перемещения, возникающих на предшествующем δ_{n-1} и последующем δ_n переходах, равно

$$\frac{\delta_{n-1}}{\delta_n} = \left(\frac{\Pi}{\delta_n} \right)^{\frac{1}{n}}.$$

В табл. 1.2 приведены расчетные значения отношения

$$\frac{\delta_{n-1}}{\delta_n} = \left(\frac{\Pi}{\delta_n} \right)^{\frac{1}{n}}$$

в зависимости от количества переходов n для $z = \frac{\Pi}{\delta_n} = 100$.

Таблица 1.2

Расчетные значения отношения $\frac{\delta_{n-1}}{\delta_n} = \left(\frac{\Pi}{\delta_n} \right)^{\frac{1}{n}}$

n	1	2	3	4	5	6
$\frac{\delta_{n-1}}{\delta_n}$	100,0	10,0	4,65	3,15	2,52	2,15

Как следует из табл. 1.2, с увеличением n отношение $\frac{\delta_{n-1}}{\delta_n}$ уменьшается, причем наиболее интенсивно при $n < 4$. Зная отношение $\frac{\delta_{n-1}}{\delta_n}$, можно рассчитать все значения δ_{n-1} .

Например, для исходных данных: $n=2$ и $\delta_2=10$ мкм из табл. 1.2 выбираем $\frac{\delta_{n-1}}{\delta_n}=10$. Тогда величина упругого перемещения на пер-

где $z = \frac{\Pi}{\delta_4} > 1$.

Пример расчета. Примем $z=49$.

$$\begin{aligned} \frac{\Pi_{тек}}{\Pi} &= (1-0,38)+(0,38-0,14)+(0,14-0,054)+(0,054-0,02)= \\ &= 0,62+0,24+0,086+0,034=0,98. \end{aligned}$$

В сумме $\frac{\Pi_{тек}}{\Pi} + \frac{1}{z} = 0,98+0,2=1,0$, т.е. расчеты выполнены пра-

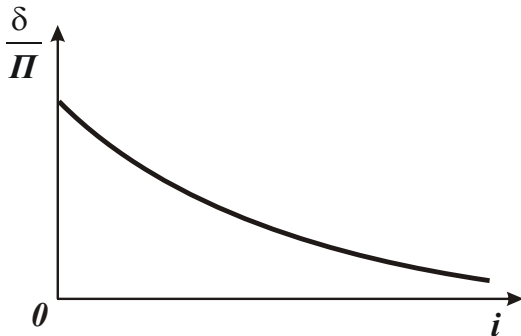


Рис. 1.13. Зависимость δ / Π от текущего количества переходов i .

вильно.

Как видим, относительная величина снятого припуска на каждом последующем переходе уменьшается по закону геометрической прогрессии. Нетрудно видеть, что отношение снятого припуска на предыдущем и последующем переходах остается одинаковой величиной.

Суммарная величина упругого перемещения определяется зависимостью

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4 = \sqrt[4]{\Pi^3 \cdot \delta_4} + \sqrt[4]{\Pi^2 \cdot \delta_4^2} + \sqrt[4]{\Pi \cdot \delta_4^3} + \delta_4. \quad (1.56)$$

Относительная величина δ / Π равна

$$\begin{aligned} \frac{\delta}{\Pi} &= \sqrt[4]{\frac{\delta_4}{\Pi}} + \sqrt[4]{\left(\frac{\delta_4}{\Pi}\right)^2} + \sqrt[4]{\left(\frac{\delta_4}{\Pi}\right)^3} + \sqrt[4]{\left(\frac{\delta_4}{\Pi}\right)^4} = \\ &= \left(\frac{1}{z}\right)^{\frac{1}{4}} + \left(\frac{1}{z}\right)^{\frac{2}{4}} + \left(\frac{1}{z}\right)^{\frac{3}{4}} + \left(\frac{1}{z}\right)^{\frac{4}{4}} \end{aligned} \quad (1.57)$$

Относительная величина упругого перемещения на каждом последующем переходе уменьшается. Соответственно суммарный фактически снятый припуск увеличивается:

$$\left(1 - \frac{\delta}{\Pi}\right) = 1 - \left(\frac{1}{z}\right)^{\frac{1}{4}} - \left(\frac{1}{z}\right)^{\frac{2}{4}} - \left(\frac{1}{z}\right)^{\frac{3}{4}} - \left(\frac{1}{z}\right)^{\frac{4}{4}}. \quad (1.58)$$

Приведенные решения (1.57), (1.58) можно распространить для анализа обработки с n переходами:

$$\frac{\delta}{\Pi} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{z}\right)^{\frac{i}{4}}. \quad (1.59)$$

По мере увеличения количества переходов i (при обработке в n переходов) слагаемые ряда (1.59) уменьшаются (рис. 1.13).

Таким образом, аналитически описан процесс съема припуска при обработке с дискретной скоростью радиальной подачи. Для сравнения рассмотрим процесс съема припуска при обработке с непрерывной скоростью радиальной подачи.

1.3. ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ПРОЦЕССА СЪЕМА ПРИПУСКА ПРИ ОБРАБОТКЕ С НЕПРЕРЫВНОЙ СКОРОСТЬЮ РАДИАЛЬНОЙ ПОДАЧИ

В параграфе 1.1.2 приведено приближенное решение задачи о характере распределения съема припуска при обработке с непрерывной скоростью радиальной подачи. Уточним данное решение. Для этого преобразуем зависимости (1.53) с учетом соотношений $\delta_1 = B \cdot V_1, \dots, \delta_n = B \cdot V_n$

$$\begin{cases} \Pi_1 = \Pi - B \cdot V_1, \\ \Pi_2 = B \cdot (V_1 - V_2), \\ \Pi_3 = B \cdot (V_2 - V_3), \\ \dots, \\ \Pi_n = B \cdot (V_{n-1} - V_n). \end{cases} \quad (1.60)$$

Предположим, что разности скоростей радиальной подачи, входящие в правые части зависимости (1.60), бесконечно малые величины, т.е. $(V_n - V_{n-1}) = -dV$. Снятый на n -ном переходе припуск представим: $\Pi_n = V \cdot d\tau$, где V – средняя скорость радиальной подачи на n -ном переходе; $d\tau$ – время n -го перехода. Тогда последняя зависимость системы (1.60) запишется

$$V \cdot d\tau = -B \cdot dV$$

или

$$-\frac{d\tau}{B} = \frac{dV}{V}. \quad (1.61)$$

В результате пришли к дифференциальному уравнению. Проинтегрируем левую и правую части данного уравнения

$$-\frac{\tau}{B} = \ln V + \ln C,$$

тогда

$$V = \frac{1}{C} \cdot e^{-\frac{\tau}{B}}, \quad (1.62)$$

где C – постоянная интегрирования.

Таким образом установлен закон изменения непрерывной скорости радиальной подачи V с течением времени обработки τ .

Используя зависимость (1.62), определим упругое перемещение в технологической системе $\delta = \delta_n$

$$\delta = B \cdot V = \frac{B}{C} \cdot e^{-\frac{\tau}{B}}. \quad (1.63)$$

Постоянную интегрирования C установим из начального условия: $\delta(\tau = 0) = \delta_1$. Тогда

$$C = \frac{B}{\delta_1}. \quad (1.64)$$

Подставим полученное выражение (1.64) в зависимости (1.62) и (1.63):

$$V = \frac{\delta_1}{B} \cdot e^{-\frac{\tau}{B}}, \quad (1.65)$$

$$\delta = \delta_1 \cdot e^{-\frac{\tau}{B}}. \quad (1.66)$$

Как следует из зависимостей (1.65) и (1.66), скорость радиальной подачи V и упругое перемещение δ с течением времени обработки τ уменьшаются по экспоненциальному закону, рис. 1.14.

Полученные зависимости аналитически описывают процесс съема припуска с непрерывной (уменьшающейся во времени обработки) скоростью радиальной подачи V . Они отличаются от аналогичных зависимостей (установленных ранее) при съеме припуска с дискретной скоростью радиальной подачи. Если в первом случае параметры V и δ уменьшаются по экспоненциальному закону, то во втором случае – по закону убывающей прогрессии.

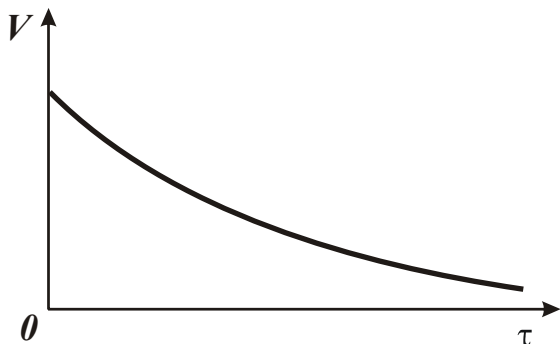


Рис. 1.14. Зависимость скорости V от времени обработки τ .

Используя зависимость (1.66), определим время обработки τ , за которое упругое перемещение в технологической системе уменьшится от начального значения δ_1

Используя зависимость (1.66), определим время обработки τ , за которое упругое перемещение в технологической системе уменьшится от начального значения δ_1

до требуемого значения δ , определяющего точность размера обработки

$$\tau = -B \cdot \ln \frac{\delta}{\delta_1}. \quad (1.67)$$

Время τ условно равно времени выполнения $2, \dots, n$ переходов и не включает время первого перехода, на котором формируется величина упругого перемещения δ_1 . Поэтому суммарное время осуществления всех n переходов будет равно сумме времени первого перехода $\frac{\Pi}{V_1}$ и времени всех последующих $(n-1)$ переходов, которое определяется зависимостью (1.67)

$$\tau = \frac{\Pi}{V_1} - B \cdot \ln \frac{\delta}{\delta_1} = B \cdot \left(\frac{\Pi}{\delta_1} - \ln \delta + \ln \delta_1 \right), \quad (1.68)$$

где Π – величина снимаемого припуска, м; $\delta_1 = B \cdot V_1$.

Как видно, величина δ_1 неоднозначно влияет на время обработки τ , т.е. существует экстремум функции τ от величины δ_1 . Для его определения подчиним функцию τ необходимому условию экстремума

$$\tau'_{\delta_1} = B \cdot \left(-\frac{\Pi}{\delta_1^2} + \frac{1}{\delta_1} \right) = 0, \quad (1.69)$$

откуда

$$\delta_1 = \Pi. \quad (1.70)$$

Таким образом показано, что на первом (условном) переходе съём припуска не происходит, а формируется лишь натяг в технологической системе, равный величине снимаемого припуска Π .

Вторая производная функции τ в точке экстремума

$$\tau''_{\delta_1} = \frac{B}{\Pi^2} > 0$$

– положительная величина. Следовательно, в точке экстремума имеет место минимум функции τ , рис. 1.15.

Минимальное значение времени τ_{min} равно

$$\tau_{min} = B \cdot \left(1 + \ln \frac{\Pi}{\delta} \right). \quad (1.71)$$

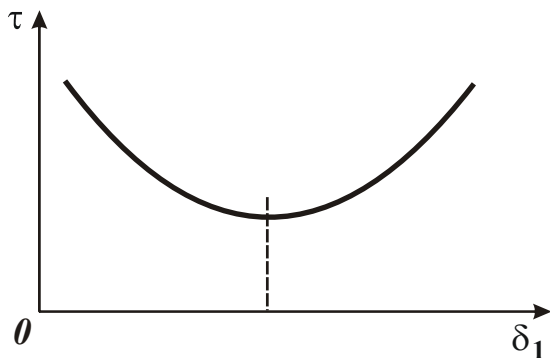


Рис. 1.15. Зависимость τ от δ_1 .

В данном случае отношение $\frac{\Pi}{\delta} = z > 1$. Тогда

$$\tau_{min} = B \cdot (1 + \ln z). \quad (1.72)$$

В результате получена аналитическая зависимость для определения минимального значения времени обработки τ_{min} с непрерывной скоростью радиальной подачи.

Сравним данную зависимость с аналогичной зависимостью (1.52), полученной для процесса обработки с дискретной скоростью радиальной подачи.

Нетрудно видеть, что время, рассчитанное по зависимости (1.72), будет всегда меньше времени, рассчитанного по зависимости (1.52). Этим показано, что процесс съема припуска с непрерывной скоростью радиальной подачи более производительный по сравнению с процессом съема припуска с дискретной скоростью радиальной подачи, выполняемой за определенное количество переходов.

Необходимо отметить, что, поскольку на первом (условном) переходе обработки с непрерывной скоростью радиальной подачи съем припуска не происходит, а формируется лишь натяг в технологической системе, равный величине снимаемого припуска Π , то скорость V_1 можно принять относительно большой и первым слагаемым в зависимости (1.49) пренебречь. Тогда зависимость (1.72) упростится и примет вид

$$\tau_{min} = B \cdot \ln z. \quad (1.73)$$

В результате время τ_{min} уменьшается и становится однозначно меньше времени, определяемого зависимостью (1.71), в 2,72 раза. Следовательно, производительность обработки с непрерывной скоростью радиальной подачи в 2,72 раза превышает производительность обработки с дискретной скоростью радиальной подачи. Это достаточно существенное превосходство, что указывает на эффективность применения обработки с непрерывной скоростью радиальной подачи. Поэтому в дальнейшем рассмотрим условия, позволяющие повысить производительность обработки с дискретной скоростью радиальной подачи, поскольку данный вид обработки наиболее применим на практике.

Прежде чем перейти к решению этих задач, проведем анализ полученных зависимостей (1.65) и (1.66) с аналогичными зависимостями, известными в научно-технической литературе применительно к процессу выхаживания при шлифовании.

В заключение следует отметить, что приведенное выше уточненное решение задачи о характере съема припуска при обработке с непрерывной скоростью радиальной подачи (полученное на основе дифференциального уравнения) соответствует приближенному решению данной задачи, приведенному в параграфе 1.1.2. Это свидетельствует о достоверности рассмотренных расчетных схем процесса съема припуска.

1.4. АНАЛИТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОПИСАНИЮ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ СЪЕМА ПРИПУСКА ПО СХЕМЕ ВЫХАЖИВАНИЯ

1.4.1. СРАВНЕНИЕ СХЕМ ВЫХАЖИВАНИЯ С ДИСКРЕТНОЙ И НЕПРЕРЫВНОЙ СКОРОСТЬЮ РАДИАЛЬНОЙ ПОДАЧИ

Характер изменения скорости радиальной подачи при выхаживании определим из следующего уравнения

$$P = P_T + \delta, \quad (1.74)$$

где P – снимаемый припуск при выхаживании, м; P_T – текущая величина снятого припуска, м; δ – величина упругого перемещения в технологической системе, м.

Предположим (условно), что съем припуска происходит дискретно за n переходов. На каждом переходе реализуется определенная скорость радиальной подачи V , определяемая в общем случае из соотношения $\delta = B \cdot V$.

Тогда на первом переходе величина снятого припуска равна

$$P_1 = P - \delta_1 = P - B \cdot V_1.$$

На втором переходе

$$P_2 = (P - P_1) - \delta_2 = B \cdot (V_1 - V_2).$$

На третьем переходе

$$P_3 = (P - P_1 - P_2) - \delta_3 = B \cdot (V_2 - V_3).$$

Аналогичным путем определяются величины снятого припуска на каждом из n переходов. В итоге приходим к зависимостям, описываемым системой (1.53).

Что это означает? Это означает то, что при дискретном изменении скорости радиальной подачи закон съема припуска по схеме, описываемой системой зависимостей (1.53), идентичен закону съема припуска по схеме выхаживания. При непрерывном изменении ско-

рости радиальной подачи (при обработке по схеме выхаживания) закон съема припуска иной и подчиняется зависимостям (1.65) и (1.66).

На основании этого можно заключить, что установленная в параграфе 1.3 оптимальная по структуре схема съема припуска является не чем иным как схемой выхаживания с дискретной скоростью радиальной подачи.

1.4.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНОГО ВРЕМЕНИ ОБРАБОТКИ ПО СХЕМЕ ВЫХАЖИВАНИЯ

Рассмотрим следующую расчетную схему выхаживания. Предположим, что в начальный момент обработки в технологической системе создан натяг (упругое перемещение), равный величине снимаемого припуска Π . Затем производится дискретное периодическое уменьшение натяга с шагом $\Delta\Pi$, т.е., по сути, осуществляется обработка в n переходов со съемом припуска на каждом переходе величиной $\Delta\Pi = \Pi / n$. Тогда основное время обработки τ определится

$$\tau = \frac{\Delta\Pi}{V_1} + \frac{\Delta\Pi}{V_2} + \dots + \frac{\Delta\Pi}{V_n} = B \cdot \left(\frac{\Delta\Pi}{\delta_1} + \frac{\Delta\Pi}{\delta_2} + \dots + \frac{\Delta\Pi}{\delta_n} \right), \quad (1.75)$$

где $\delta_1 = B \cdot V_1$, $\delta_2 = B \cdot V_2$, ..., $\delta_n = B \cdot V_n$ – упругие перемещения, возникающие на каждом из n (условных) переходов; V_1, V_2, \dots, V_n – соответственно скорости радиальной подачи на каждом из n (условных) переходов.

Значения $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ можно представить в виде

$$\begin{cases} \delta_1 = \Pi = n \cdot \Delta\Pi, \\ \delta_2 = (n-1) \cdot \Delta\Pi, \\ \delta_3 = (n-2) \cdot \Delta\Pi, \\ \dots, \\ \delta_n = 1 \cdot \Delta\Pi. \end{cases} \quad (1.76)$$

Зависимость (1.75) с учетом (1.76) опишется

$$\tau = B \cdot \left[\frac{1}{n} + \frac{1}{(n-1)} + \frac{1}{(n-2)} + \dots + 1 \right]. \quad (1.77)$$

Данный ряд был установлен в параграфе 1.1.2. Для его обоснования было рассмотрено разложение функции $\ln x$ в степенной

ряд [60]

$$\ln x = \frac{x-1}{1} - \frac{(x-1)^2}{2} + \frac{(x-1)^3}{3} - \frac{(x-1)^4}{4} + \dots \quad (1.78)$$

Для $x < 1$

$$\ln x = - \left[\frac{(1-x)}{1} + \frac{(1-x)^2}{2} + \frac{(1-x)^3}{3} + \frac{(1-x)^4}{4} + \dots \right]. \quad (1.79)$$

Если рассматривать $x \ll 1$, то с определенными допущениями можно принять $(1-x) \approx 1$. Тогда зависимость (1.79) упростится

$$\ln x = - \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \dots \right). \quad (1.80)$$

В итоге приходим к ряду, описываемому зависимостью (1.77), рассматривая в ней в качестве величины x отношение $\delta_n / \Pi \ll 1$, где δ_n заданная точность размера обработки; Π – величина снимаемого припуска.

С учетом сказанного зависимость (1.77) примет вид

$$\tau = -B \cdot \ln \frac{\delta_n}{\Pi} \quad (1.81)$$

или

$$\delta_n = \Pi \cdot e^{-\frac{\tau}{B}}, \quad (1.82)$$

что соответствует зависимости (1.66) для $\delta_1 = \Pi$.

Таким образом показано, что процесс съема припуска по схеме выхаживания можно представить как обработку с бесконечно большим количеством переходов n , на каждом из которых снимается бесконечно малый и одинаковый по величине припуск $\Delta\Pi = \Pi / n$ с уменьшающейся во времени скоростью радиальной подачи, обусловленной уменьшением упругого перемещения в технологической системе от значения Π до нуля. По сути, пришли к схеме выхаживания с непрерывной скоростью радиальной подачи.

1.4.3. СОСТАВЛЕНИЕ И РЕШЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ СЪЕМА ПРИПУСКА ПО СХЕМЕ ВЫХАЖИВАНИЯ С НЕПРЕРЫВНОЙ СКОРОСТЬЮ РАДИАЛЬНОЙ ПОДАЧИ

Уравнение (1.74) можно решить и другим методом. Для этого выразим величину Π_T зависимостью $\Pi_T = \frac{v}{S}$, где v – объем снятого

материала, м^3 ; S – площадь поперечного сечения обрабатываемого образца, м^2 .

Величину упругого перемещения δ выразим следующей зависимостью $\delta = B \cdot V = B \cdot \frac{Q}{S}$, где $Q = \frac{dv}{d\tau}$ – производительность обработки, $\text{м}^3/\text{с}$.

Подставляя выражение для определения параметров Π_T и δ в уравнение (1.74), имеем

$$\Pi = \frac{v}{S} + \frac{B}{S} \cdot \frac{dv}{d\tau}$$

или

$$\frac{dv}{d\tau} + N \cdot v = M, \quad (1.83)$$

где $N = \frac{1}{B}$; $M = \frac{\Pi \cdot S}{B}$.

Уравнение (1.83) представляет собой линейное дифференциальное уравнение первого порядка. Его решение

$$v = \left(\int d\tau \cdot M \cdot e^{\int N \cdot d\tau} + C_1 \right) \cdot e^{-\int N \cdot d\tau} = \frac{M}{N} + C_1 \cdot e^{-N \cdot \tau}, \quad (1.84)$$

где C_1 – постоянная интегрирования.

Производительность обработки определяется

$$Q = \frac{dv}{d\tau} = -C_1 \cdot N \cdot e^{-N \cdot \tau}. \quad (1.85)$$

Величина упругого перемещения равна

$$\delta = B \cdot \frac{Q}{S} = -\frac{C_1}{S} \cdot e^{-N \cdot \tau}. \quad (1.86)$$

Неизвестную постоянную C_1 определим из начального условия: $\delta(\tau = 0) = \Pi$, тогда из зависимости (1.86) вытекает

$$C_1 = -\Pi \cdot S. \quad (1.87)$$

Соответственно величина упругого перемещения окончательно примет вид

$$\delta = \Pi \cdot e^{-\frac{\tau}{B}}. \quad (1.88)$$

Как видим, с течением времени обработки τ величина δ непрерывно уменьшается.

По такому же закону будет уменьшаться и скорость радиальной подачи V

$$V = \frac{\delta}{B} = \frac{\Pi}{B} \cdot e^{-\frac{\tau}{B}}. \quad (1.89)$$

В итоге пришли к зависимостям (1.88) и (1.89), фактически идентичным выше полученным другим методом зависимостям (1.65) и (1.66) при $\delta_1 = \Pi$. Это свидетельствует о том, что дифференциальные уравнения (1.61) и (1.83), составленные из разных условий, описывают один и тот же по физической сути процесс съема припуска и их следует признать достоверными. На основе этого можно признать достоверным и вполне обоснованным методический переход от схемы обработки с дискретной скоростью радиальной подачи к схеме обработки с непрерывной скоростью радиальной подачи и полученные зависимости (1.65) и (1.66).

1.5. УСЛОВИЯ СНИЖЕНИЯ ОСНОВНОГО ВРЕМЕНИ ОБРАБОТКИ С ДИСКРЕТНОЙ СКОРОСТЬЮ РАДИАЛЬНОЙ ПОДАЧИ

Как показано выше, наиболее производительной схемой съема припуска при обработке с непрерывной скоростью радиальной подачи (при условии обеспечения требуемой точности обработки) является схема, осуществляемая лишь под действием возникающей упруговосстанавливающей силы в технологической системе, т.е. с отключенной радиальной подачей станка и предварительно созданным натягом в системе. Поэтому применим данную схему для съема припуска с дискретной скоростью радиальной подачи и определим основное время обработки за 2; 3; 4 и n переходов.

Предположим, что в начальный момент обработки в технологической системе создан начальный натяг, равный величине снимаемого припуска Π . Тогда основное время обработки в один переход определится:

$$\tau = \frac{\Pi - \delta_1}{V_1} = B \cdot \left(\frac{\Pi - \delta_1}{\delta_1} \right) = B \cdot \left(\frac{\Pi}{\delta_1} - 1 \right), \quad (1.90)$$

где $\delta_1 = B \cdot V_1$ – упругое перемещение, которое определяет точность обработки (заданная величина), м; V_1 – средняя скорость радиальной подачи, м/с.

Основное время обработки в два перехода равно

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = \frac{\Pi - \delta_1}{V_1} + \frac{\delta_1 - \delta_2}{V_2} = B \cdot \left(\frac{\Pi}{\delta_1} + \frac{\delta_1}{\delta_2} - 2 \right). \quad (1.91)$$

В данной зависимости параметры Π , B , δ_2 заданы, неизвестным параметром является величина δ_1 . Очевидно, с изменением δ_1 основное время обработки τ изменяется по экстремальной зависимости. Для определения точки экстремума функции τ приравняем первую производную τ'_{δ_1} нулю

$$\tau'_{\delta_1} = B \cdot \left(-\frac{\Pi_1}{\delta_1^2} + \frac{1}{\delta_2} \right) = 0. \quad (1.92)$$

Откуда

$$\delta_1 = \sqrt{\Pi_1 \cdot \delta_2}. \quad (1.93)$$

Определим знак второй производной функции τ в точке экстремума:

$$\tau''_{\delta_1} = B \cdot \frac{2\Pi_1}{\delta_1^3} > 0. \quad (1.94)$$

Следовательно, в точке экстремума функция τ принимает минимальное значение.

Подставляя в (1.91) зависимость (1.93), определим минимальное основное время обработки

$$\tau_{min} = B \cdot \left[\left(\sqrt{\frac{\Pi}{\delta_2}} - 1 \right) + \left(\sqrt{\frac{\Pi}{\delta_2}} - 1 \right) \right]. \quad (1.95)$$

Первое слагаемое зависимости (1.95) определяет время первого перехода, а второе слагаемое – время второго перехода. Как видно, первое и второе слагаемые равны между собой.

Зависимость (1.95) можно представить в виде

$$\tau_{min} = 2 \cdot B \cdot \left(\sqrt{\frac{\Pi}{\delta_2}} - 1 \right). \quad (1.96)$$

При обработке в три перехода основное время τ выразится:

$$\tau = \frac{(\Pi - \delta_1)}{V_1} + \frac{(\delta_1 - \delta_2)}{V_2} + \frac{(\delta_2 - \delta_3)}{V_3}. \quad (1.97)$$

В данном случае величина упругого перемещения $\delta_3 = B \cdot V_3$, возникающего на третьем переходе, определяет точность обработки и она задана. Задана также и величина снимаемого припуска Π . Выразим в зависимости (1.97) скорость радиальной подачи на каждом переходе (V_1 , V_2 , V_3) через соответствующие величины упругого перемещения на каждом переходе (δ_1 , δ_2 , δ_3). Тогда зависимость (1.97) примет вид:

$$\tau = B \cdot \left(\frac{\Pi}{\delta_1} + \frac{\delta_1}{\delta_2} + \frac{\delta_2}{\delta_3} - 3 \right). \quad (1.98)$$

Величины δ_1 и δ_2 неоднозначно влияют на основное время τ , т.е. существуют экстремумы функции τ от переменных δ_1 и δ_2 . Для их определения вычислим первые производные функции τ от переменных δ_1 , δ_2 и приравняем их нулю:

$$\tau'_{\delta_1} = B \cdot \left(-\frac{\Pi}{\delta_1^2} + \frac{1}{\delta_2} \right) = 0, \quad (1.99)$$

$$\tau'_{\delta_2} = B \cdot \left(-\frac{\delta_1}{\delta_2^2} + \frac{1}{\delta_3} \right) = 0. \quad (1.100)$$

Очевидно, вторые производные функции τ от переменных δ_1 и δ_2 положительные величины. Поэтому в точках экстремума функция τ принимает минимальные значения.

Из уравнения (1.100) следует

$$\delta_2 = \sqrt[3]{\delta_3^2 \cdot \Pi}. \quad (1.101)$$

Тогда

$$\delta_1 = \sqrt[3]{\delta_3 \cdot \Pi^2}. \quad (1.102)$$

Подставим выражения (1.101) и (1.102) в (1.98):

$$\tau_{min} = 3 \cdot B \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{\Pi}{\delta_3}} - 1 \right). \quad (1.103)$$

В итоге пришли к зависимости, аналогичной зависимости (1.96) для обработки в два перехода.

Определим основное время обработки в четыре перехода:

$$\tau = \frac{(\Pi - \delta_1)}{V_1} + \frac{(\delta_1 - \delta_2)}{V_2} + \frac{(\delta_2 - \delta_3)}{V_3} + \frac{(\delta_3 - \delta_4)}{V_4}. \quad (1.104)$$

Здесь величина упругого перемещения $\delta_4 = B \cdot V_4$ определяет точность обработки и она задана. Выразим в зависимости (1.104) скорости V_1 , V_2 , V_3 , V_4 через соответствующие значения величины упругого перемещения на каждом переходе δ_1 , δ_2 , δ_3 , δ_4 :

$$\tau = B \cdot \left(\frac{\Pi}{\delta_1} + \frac{\delta_1}{\delta_2} + \frac{\delta_2}{\delta_3} + \frac{\delta_3}{\delta_4} - 4 \right). \quad (1.105)$$

Как и в предыдущих случаях, величины δ_1 , δ_2 и δ_3 неодно-

значно влияют на основное время обработки τ , т.е. существует экстремум функции τ от величин δ_1 , δ_2 и δ_3 . Подчиним функцию τ необходимому условию экстремума:

$$\tau'_{\delta_1} = B \cdot \left(-\frac{\Pi}{\delta_1^2} + \frac{1}{\delta_2} \right) = 0, \quad (1.106)$$

$$\tau'_{\delta_2} = B \cdot \left(-\frac{\delta_1}{\delta_2^2} + \frac{1}{\delta_3} \right) = 0, \quad (1.107)$$

$$\tau'_{\delta_3} = B \cdot \left(-\frac{\delta_2}{\delta_3^2} + \frac{1}{\delta_4} \right) = 0. \quad (1.108)$$

Очевидно, вторые производные функции τ от переменных δ_1 , δ_2 и δ_3 положительные величины. Поэтому функция τ в точках экстремума принимает минимальные значения.

Разрешая уравнения (1.106), (1.107) и (1.108) относительно переменных δ_1 , δ_2 и δ_3 , имеем:

$$\delta_1 = \sqrt[4]{\Pi^3 \cdot \delta_4}, \quad (1.109)$$

$$\delta_2 = \sqrt[4]{\Pi^2 \cdot \delta_4^2}, \quad (1.110)$$

$$\delta_3 = \sqrt[4]{\Pi \cdot \delta_4^3}. \quad (1.111)$$

Подставляя выражения (1.109), (1.110), (1.111) в зависимость (1.105), определим минимальное основное время обработки τ_{min} :

$$\tau_{min} = 4 \cdot B \cdot \left(\sqrt[4]{\frac{\Pi}{\delta_4}} - 1 \right). \quad (1.112)$$

Из зависимости (1.112) вытекает, что по длительности все переходы одинаковы. Исходя из зависимости (1.105) это означает, что отношение величин упругих перемещений, возникающих на предшествующем и последующем переходах, одинаково. Следовательно, с каждым последующим переходом величина упругого перемещения убывает по геометрической прогрессии. Знаменателем убывающей прогрессии является отношение величин упругих перемещений, возникающих на предшествующем и последующем переходах.

Полученные зависимости (1.96), (1.103) и (1.111) позволяют установить общую закономерность изменения функции τ_{min} при обработке с большим количеством переходов n :

$$\tau_{min} = n \cdot B \cdot \left[\left(\frac{\Pi}{\delta_n} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] = n \cdot B \cdot \left(z^{\frac{1}{n}} - 1 \right), \quad (1.113)$$

где $z = \frac{\Pi}{\delta_n} > 1$ – относительная величина; δ_n – величина упругого перемещения, возникающего на n -ном переходе, и определяющая точность размера обработки.

В табл. 1.3 приведены расчетные значения τ_{min} для $B=1$ и $z = \frac{\Pi}{\delta_n} = 100$.

Таблица 1.3

Расчетные значения τ_{min}

n	1	2	3	4	5	6	10	20
τ_{min}	99,0	18,0	10,8	8,6	7,5	6,9	6,0	5,4

Как видно, с увеличением количества переходов n минимальное основное время τ_{min} непрерывно уменьшается. При этом наибольшее снижение функции τ_{min} достигается при изменении n от 1 до 4, т.е. эффективно обработку производить приблизительно в 4 перехода (для операции) или в такое же количество операций (для технологического процесса).

Зависимость (1.113) принципиально отличается от аналогичной зависимости (1.48), полученной без учета образования начального натяга в технологической системе. Так функция τ_{min} , описываемая зависимостью (1.48), имеет экстремум при изменении количества переходов, тогда как функция τ_{min} , описываемая зависимостью (1.113), не имеет экстремума – значения τ_{min} непрерывно уменьшаются при изменении количества переходов (табл. 1.3).

Сравнивая зависимости (1.48) и (1.113), нетрудно видеть, что значения τ_{min} , рассчитанные по зависимости (1.113), будут всегда меньше значений τ_{min} , рассчитанных по зависимости (1.48). Таким образом показано, что создание начального натяга в технологической системе при обработке с дискретной скоростью радиальной подачи позволяет уменьшить основное время обработки, т.е. обеспечивается увеличение производительности.

1.6. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ГЛУБИНЫ ШЛИФОВАНИЯ НА ЭТАПЕ ВЫХАЖИВАНИЯ

Предположим, в процессе механической обработки необходимо удалить припуск толщиной Π , используя схему плоского шлифования.

Определим характер изменения глубины шлифования при выхаживании (т.е. при шлифовании с отключенной радиальной подачей станка, когда съем материала происходит за счет возникающих в технологической системе упругих перемещений) в зависимости от числа проходов n .

При первом проходе (в продольном направлении) будет выполняться условие:

$$\Pi = t_1 + \delta, \quad (1.114)$$

где Π - снимаемый припуск при выхаживании, м; t_1 - глубина шлифования при первом проходе, м; δ - величина упругого перемещения в технологической системе, м.

Величину упругого перемещения δ определим из известной зависимости [242], представляя производительность обработки Q в виде $Q = B_1 \cdot V_{дет} \cdot t_1$:

$$\delta = \frac{\sigma}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot B_1 \cdot V_{дет} \cdot t_1, \quad (1.115)$$

где $V_{дет}$ - скорость детали, м/с; B_1 - ширина шлифования, м; σ - условное напряжение резания при шлифовании, Н/м²; $K_{ш}$ - коэффициент шлифования, равный отношению тангенциальной и радиальной составляющих силы резания; c - приведенная жесткость технологической системы в радиальном направлении, Н/м; $V_{кр}$ - скорость круга, м/с.

Подставляя зависимость (1.115) в условие (1.114), определим глубину шлифования при первом проходе t_1 :

$$t_1 = \Pi \cdot z_1, \quad (1.116)$$

где $z_1 = \frac{1}{(1+a)}$; $a = \frac{\sigma \cdot B \cdot V_{дет}}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}$.

При втором проходе условие (1.114) принимает вид:

$$\Pi - t_1 = t_2 + \delta, \quad (1.117)$$

где t_2 - глубина шлифования при втором проходе, м.

После несложных преобразований условия (1.117) с учетом зависимостей (1.115) и (1.116) глубина шлифования t_2 определится:

$$t_2 = \Pi \cdot (1 - z_1) \cdot z_1. \quad (1.118)$$

Аналогичным образом определяется глубина шлифования при n -ном проходе

$$t_n = \Pi \cdot (1 - z_1)^{n-1} \cdot z_1. \quad (1.119)$$

С увеличением количества проходов n глубина шлифования t_n непрерывно уменьшается, табл. 1.4.

Таблица 1.4

Расчетные значения глубины шлифования t_n ($\Pi = 1$ мм; $z_1 = 0,5$)

n	1	2	3	4	5
t_n , мм	0,5	0,25	0,125	0,0625	0,0312

Суммируя значения глубин шлифования t_1, t_2, \dots, t_n , приходим к геометрической прогрессии

$$\sum t_n = \Pi \cdot z_1 \cdot [1 + (1 - z_1) + (1 - z_1)^2 + (1 - z_1)^3 + \dots],$$

которая при условии $z_1 < 1$ сходится и равна

$$\sum t_n = \Pi \cdot z_1 \cdot \frac{1}{[1 - (1 - z_1)]} = \Pi. \quad (1.120)$$

Этим доказана правильность выполненных расчетов.

Из зависимости (1.120) вытекает экстремальный характер изменения t_n от величины z_1 . Поэтому определим оптимальное значение z_1 при съеме припуска Π за два прохода, исходя из условия

$$t_1 + t_2 = \Pi \cdot z_1 + \Pi \cdot (1 - z_1) \cdot z_1 \rightarrow \max. \quad (1.121)$$

Подчиним функцию $(t_1 + t_2)$ необходимому условию экстремума: $(t_1 + t_2)'_{z_1} = 0$, откуда $z_1 = 1$. Вторая производная функции

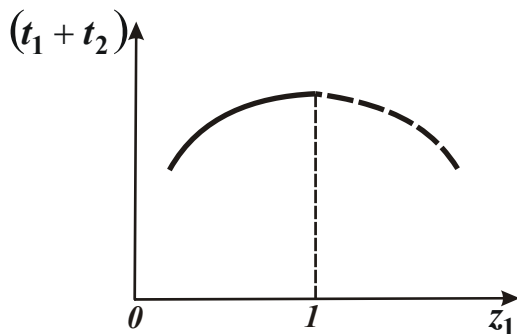


Рис. 1.16. Зависимость $(t_1 + t_2)$ от z_1 .

$(t_1 + t_2)$ в точке экстремума отрицательна. Следовательно, имеет место максимум функции $(t_1 + t_2)$, рис. 1.16.

Однако, условие $z_1 = 1$ выполняется при $a = 0$. Это предполагает отсутствие величины упругого перемещения δ , что физически невозможно. Поэтому в качестве оптимального (с

точки зрения обеспечения наибольшей производительности обработки) необходимо рассматривать значение z_1 , близкое к единице (в данном случае $a \rightarrow 0$).

К аналогичному решению придем, исследуя на экстремум функцию

$$t_1 + t_2 + t_3 = \Pi \cdot z_1 + \Pi \cdot (1 - z_1) \cdot z_1 + \Pi \cdot (1 - z_1)^2 \cdot z_1 \rightarrow \max. \quad (1.122)$$

Дифференцируя функцию $(t_1 + t_2 + t_3)$ по величине z_1 и приравнявая полученное выражение нулю, получено квадратное уравнение

$$z_1^2 - 2z_1 + 1 = 0. \quad (1.123)$$

Его решение: $z_1=1$. Вторая производная функции $(t_1 + t_2 + t_3)$ в точке экстремума отрицательна, т.е. имеет место максимум данной функции. В результате приходим к предыдущему решению.

Таким образом, получено аналитическое решение, определяющее характер изменения глубины шлифования с течением времени обработки.

ГЛАВА 2

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ ФИНИШНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

2.1. ЗАДАЧИ ТОЧНОСТИ И ШЕРОХОВАТОСТИ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

2.1.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Решению задач точности и шероховатости обработки во всех предыдущих томах настоящего 10-ти томного издания уделено большое внимание. Например, получено важное теоретическое решение, связывающее производительность обработки и упругие перемещения в технологической системе (определяющие в большинстве случаев точность обработки), что позволило выявить, обосновать и реализовать условия существенного повышения эффективности механической обработки, разработать новые методики проектирования и оптимизации структуры и параметров технологических процессов. Суть решения состоит в том, что на основе составленного дифференциального уравнения интенсивности съема материала при резании [381]:

$$\frac{dv}{d\tau} + M \cdot v = N \cdot \tau, \quad (2.1)$$

(где $M = \frac{V_{рез} \cdot K_{рез} \cdot c}{\pi \cdot D_{дет} \cdot l_{дет} \cdot \sigma}$; $N = \frac{V_{рез}^2 \cdot K_{рез} \cdot c \cdot t}{\pi \cdot D_{дет} \cdot \sigma}$; v – объем снятого материала, м³; τ – время обработки, с; $V_{рез}$ – скорость резания, м/с; $K_{рез} = P_z / P_y$ – коэффициент резания; P_z , P_y – соответственно тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, Н; σ – условное напряжение резания, Н/м²; c – приведенная жесткость технологической системы, Н/м; $D_{дет}$ – диаметр обрабатываемой детали, м; $l_{дет}$ – длина хода при продольном точении, м; t – глубина резания, м) установлены зависимости для определения производительности обработки Q , упругого перемещения в технологической системе y и радиальной составляющей силы резания $P_y = c \cdot y$:

$$Q = Q_0 - \left(Q_0 - \frac{y_0 \cdot V_{рез} \cdot K_{рез} \cdot c}{\sigma} \right) \cdot e^{-\frac{V_{рез} \cdot K_{рез} \cdot c \cdot \tau}{\pi \cdot D_{дет} \cdot l_{дет} \cdot \sigma}}, \quad (2.2)$$

$$y = \frac{\sigma \cdot Q_0}{V_{рез} \cdot K_{рез} \cdot c} - \left(\frac{\sigma \cdot Q_0}{V_{рез} \cdot K_{рез} \cdot c} - y_0 \right) \cdot e^{-\frac{V_{рез} \cdot K_{рез} \cdot c \cdot \tau}{\pi \cdot D_{дет} \cdot l_{дет} \cdot \sigma}} \quad (2.3)$$

$$P_y = \frac{\sigma \cdot Q_0}{V_{рез} \cdot K_{рез}} - \left(\frac{\sigma \cdot Q_0}{V_{рез} \cdot K_{рез}} - c \cdot y_0 \right) \cdot e^{-\frac{V_{рез} \cdot K_{рез} \cdot c \cdot \tau}{\pi \cdot D_{дет} \cdot l_{дет} \cdot \sigma}}, \quad (2.4)$$

где $Q_0 = t \cdot S_{прод} \cdot V_{рез}$ – номинальная производительность обработки при продольном точении, м³/с; $S_{прод}$ – продольная подача на оборот детали, м/об; y_0 – начальный натяг в технологической системе, м.

С учетом обозначений:

$$y_{уст} = \frac{\sigma \cdot Q_0}{V_{рез} \cdot K_{рез} \cdot c}, \quad \bar{\beta} = \frac{V_{рез} \cdot K_{рез} \cdot c}{\pi \cdot D_{дет} \cdot l_{дет} \cdot \sigma}$$

зависимости (2.2), (2.3) и (2.4) примут более простой вид:

$$Q = Q_0 - \left(Q_0 - \frac{y_0 \cdot V_{рез} \cdot K_{рез} \cdot c}{\sigma} \right) \cdot e^{(-\bar{\beta} \cdot \tau)}, \quad (2.5)$$

$$y = y_{уст} - (y_{уст} - y_0) \cdot e^{(-\bar{\beta} \cdot \tau)}, \quad (2.6)$$

$$P_y = c \cdot y_{уст} - c \cdot (y_{уст} - y_0) \cdot e^{(-\bar{\beta} \cdot \tau)}. \quad (2.7)$$

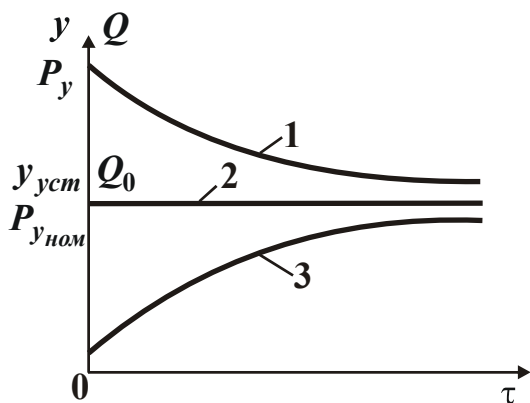


Рис. 2.1. Зависимости производительности обработки Q , величины упругого перемещения y и радиальной составляющей силы резания P_y от времени обработки τ : 1 - $y_0 > y_{ном}$; 2 - $y_0 = y_{ном}$; 3 - $y_0 < y_{ном}$.

Как следует из рис. 2.1, построенного на основе зависимостей (2.5), (2.6) и (2.7), характер изменения параметров Q , y и P_y с течением времени обработки τ может быть самым разнообразным. Все зависит от соотношения параметров $y_{уст}$ и y_0 . При условии $y_{уст} > y_0$ параметры Q , y и P_y увеличиваются во времени, асимптотически приближаясь соответственно к значениям: Q_0 , $y_{уст}$ и $P_{y_{ном}}$.

При условии $y_{уст} = y_0$ параметры Q , y и P_y остаются неизменными с течением времени обработки и принимают соответственно

значения Q_0 , $y_{уст}$ и $P_{уном}$.

При условии $y_{уст} < y_0$ параметры Q , y и P_y уменьшаются с течением времени обработки, асимптотически приближаясь соответственно к значениям Q_0 , $y_{уст}$ и $P_{уном}$.

Исходя из этого, все применяемые на практике схемы механической обработки можно классифицировать по признаку изменения радиальной составляющей силы резания P_y во времени:

- 1) схемы, характеризующиеся увеличением P_y с течением времени обработки (основанные на жесткой схеме обработки);
- 2) схемы, характеризующиеся постоянством P_y с течением времени обработки (основанные на упругой схеме обработки с фиксированным радиальным усилием);
- 3) схемы, характеризующиеся уменьшением P_y с течением времени обработки (основанные на упругой схеме обработки с начальным натягом в технологической системе).

Случай 1 реализуется на практике при механической обработке как лезвийными, так и абразивными инструментами, а случаи 2 и 3 – при механической обработке абразивными инструментами (так называемые упругие схемы шлифования и доводки, а также схема выхаживания – обработка с отключенной радиальной подачей станка).

Из зависимости (2.3) следует, что добиться существенного уменьшения параметра y (повышения точности обработки) можно за счет выполнения условия $y_0 > y_{уст} = 0$, т.е. производя обработку по упругой схеме с начальным натягом в технологической системе y_0 . При этом (рис. 2.1) обеспечивается наибольшая производительность обработки Q . Причем, с увеличением величины y_0 производительность обработки Q увеличивается.

Очевидно, чем выше режущая способность инструмента (больше коэффициент резания $K_{рез}$ и меньше условное напряжение резания σ), тем больше величина y_0 и соответственно производительность обработки Q .

В предыдущих томах настоящего 10-ти томного издания проведен подробный анализ зависимостей (2.2), (2.3), (2.4) и выявлен ряд новых решений. Поэтому представляются важными дальнейшие исследования уравнения (2.1) и зависимостей (2.2), (2.3), (2.4). Учитыв-

вая определенные сложности математических преобразований данных зависимостей, в связи с наличием в них экспоненциальной функции, получим упрощенное решение уравнения (2.1). В первом приближении примем $v = Q \cdot \tau$ и $\frac{dv}{d\tau} = Q$. Это позволяет перейти от дифференциального уравнения (2.1) к простому линейному алгебраическому уравнению:

$$Q + M \cdot Q \cdot \tau = N \cdot \tau. \quad (2.8)$$

Его решение:

$$Q = \frac{N}{\left(\frac{1}{\tau} + M\right)}. \quad (2.9)$$

Зная Q , несложно определить параметры y и P_y .

Ниже приводятся результаты исследований параметров Q , y и P_y на основе упрощенного подхода, разработанного Новиковым Г.В., Новиковым Ф.В. и развитого в ряде работ [246, 247].

2.1.2. ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ

2.1.2.1. СВЯЗЬ ВЕЛИЧИНЫ УПРУГОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ С ТОЧНОСТЬЮ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ ОБРАБОТКИ

Наличие упругих перемещений при механической обработке кардинальным образом изменяет физическую сущность процесса и приводит к снижению производительности и точности обработки. По сути, вся история развития теории и практики финишной механической обработки связана с решением проблемы управления упругими перемещениями для обеспечения высоких показателей точности и производительности обработки.

Сложность решения проблемы состоит в том, что необходимо соединить механику деформирования элементов технологической системы с механикой процесса резания абразивными и лезвийными инструментами и на этой основе провести оптимизационные расчеты для разработки оптимальных схем и условий обработки.

В настоящее время проблема в полной мере не решена, так как

отсутствуют общие математические решения. Имеющиеся частные решения получены в большинстве случаев опытным путем, а также с использованием эмпирических зависимостей.

В этом плане представляет интерес теоретический подход к решению задач точности и производительности в технологии машиностроения, учитывающий упругие перемещения в технологической системе, разработанный Новиковым Г.В. Впервые основы данного подхода были сформулированы им в кандидатской диссертации (защитенной в 1990 году в Одесском политехническом институте), которая посвящена проблеме алмазного шлифования деталей с недостаточно жестким креплением на станке [235]. Суть полученных решений сводится к тому, что при наличии упругих перемещений существует неустановившийся (переходной) процесс обработки, который по длительности соизмерим с продолжительностью обработки конкретной детали на станке. Поэтому, автором предложены пути «ухода» от переходного процесса, а также пути его рационального использования для повышения производительности и точности обра-

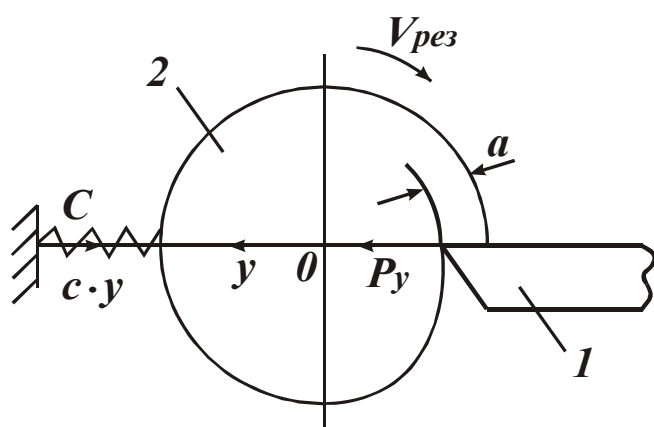


Рис. 2.2. Расчетная схема: 1 – резец;

2 – деталь.

перемещения лишь в радиальном направлении y , рис. 2.2. Уравнение равновесия от действия двух сил: радиальной составляющей силы резания P_y и упруго восстанавливающей силы $c \cdot y$, имеет вид:

$$c \cdot y = P_y, \quad (2.10)$$

где c - приведенная жесткость технологической системы, Н/м;

$$P_y = \frac{P_z}{K_{рез}} = \frac{\sigma \cdot S}{K_{рез}} = \frac{\sigma \cdot v \cdot (a - y)}{K_{рез}}; \quad (2.11)$$

P_z - тангенциальная составляющая силы резания, Н; σ - условное

ботки.

Используя основные положения данного подхода, в настоящей работе решаются задачи обоснования и выбора наиболее эффективных способов финишной механической обработки высокоточных поверхностей.

При решении задач с определенными допущениями будем рассматривать упругие

напряжение резания, Н/м²; $K_{рез}$ - коэффициент резания; a, b - соответственно толщина и ширина среза, м.

Преобразуем уравнение (2.10) и разрешим его относительно величины y :

$$y = \frac{a}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{рез}}{\sigma \cdot b}\right)} = \frac{a}{(1 + A)}. \quad (2.12)$$

Из зависимости (2.12) следует линейная связь между упругим перемещением y и толщиной среза a . Коэффициент $1/(1 + A)$, по сути, выполняет роль передаточной функции между параметрами y и a . По абсолютной величине он всегда меньше единицы, т.е. выполняется условие $y < a$. Уменьшить y можно увеличением параметра A за счет увеличения жесткости технологической системы c , соотношения

$K_{рез} / \sigma$ и уменьшения ширины среза b (рис. 2.3).

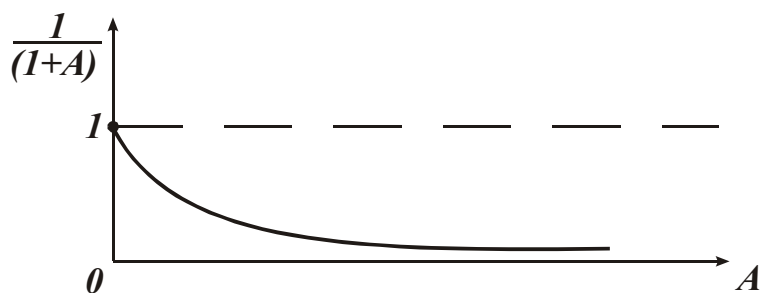


Рис. 2.3. Зависимость $1/(1 + A)$ от A .

Однако уменьшение b связано с уменьшением производительности обработки, что не эффективно. Увеличение параметра c также ограничено.

Следовательно, основным условием уменьшения упругого перемещения y (повышения точности обработки) является увеличение соотношения $K_{рез} / \sigma$, которое зависит от режущей способности инструмента. Чем острее инструмент и меньше его трение с обрабатываемым материалом, тем больше соотношение $K_{рез} / \sigma$ и эффективнее процесс обработки. Однако, таким путем полностью исключить упругие перемещения (т.е. выполнить условие $y = 0$), нельзя.

Исходя из уравнения (2.10), полностью исключить упругие перемещения ($y = 0$) при резании можно, если уравновесить силу P_y дополнительной силой $P'_y = P_y$. Тогда уравнение (2.10) примет вид:

$$c \cdot y = P_y - P'_y, \text{ откуда} \\ y = 0. \quad (2.13)$$

Вместе с тем, реализовать данное условие на практике доста-

точно сложно.

Из зависимости (2.11) следует, что величина $(a - y)$, равная фактической толщине среза, за счет упругого перемещения y меньше номинальной (заданной) толщины среза a . Это приводит к снижению производительности обработки. Для анализа путей увеличения фактической производительности уравнение (2.10) с учетом зависимости (2.11) представим в виде:

$$c \cdot y = \frac{\sigma \cdot v}{K_{рез}} \cdot a - \frac{\sigma \cdot v}{K_{рез}} \cdot y . \quad (2.14)$$

Если приложить к детали дополнительную силу, равную $\frac{\sigma \cdot v}{K_{рез}} \cdot y$ и направленную в сторону действия радиальной составляющей силы резания P_y , то уравнение (2.14) выразится:

$$c \cdot y = \frac{\sigma \cdot v}{K_{рез}} \cdot a - \frac{\sigma \cdot v}{K_{рез}} \cdot y + \frac{\sigma \cdot v}{K_{рез}} \cdot y \quad \text{или}$$

$$c \cdot y = \frac{\sigma \cdot v}{K_{рез}} \cdot a . \quad (2.15)$$

В этом случае фактическая толщина среза равна номинальной толщине среза a , соответственно фактическая и номинальная производительности обработки равны.

Если приложить к детали дополнительную силу $\frac{\sigma \cdot v}{K_{рез}} \cdot y_0$ (где y_0 отличается от значения y), то уравнение (2.14) примет вид:

$$c \cdot y = \frac{\sigma \cdot v}{K_{рез}} \cdot a - \frac{\sigma \cdot v}{K_{рез}} \cdot y + \frac{\sigma \cdot v}{K_{рез}} \cdot y_0 \quad \text{или}$$

$$c \cdot y = \frac{\sigma \cdot v}{K_{рез}} \cdot (a - y + y_0) . \quad (2.16)$$

При условии $y = y_0$ приходим к прежнему решению, вытекающему из уравнения (2.15). При условии $y_0 > y$ фактическая толщина среза, равная $(a - y + y_0)$, будет больше номинальной толщины среза a . При условии $y_0 < y$, наоборот, фактическая толщина среза меньше номинальной толщины среза a . Однако, в этом случае фактическая толщина среза больше, чем в случае $y_0 = 0$. Таким образом, создавая в технологической системе в начальный момент обработки натяг, мож-

но существенно повысить производительность обработки. На практике данное условие реализовано, например, в круглошлифовальных станках, за счет создания ускоренного врезания круга в обрабатываемую деталь с целью создания начального натяга в технологической системе.

Упругое перемещение y , исходя из зависимости (2.16), выразится:

$$y = \frac{(a + y_0)}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{рез}}{\sigma \cdot \nu}\right)}. \quad (2.17)$$

Величина y тем больше, чем больше y_0 . Как видим, увеличение производительности обработки (за счет увеличения y_0) сопровождается увеличением величины y (ухудшением точности обработки). Следовательно, полученное решение (2.16) направлено на повышение производительности обработки и может быть использовано на операциях предварительной обработки, когда не требуется обеспечение высокой точности. На финишных операциях, где формируется точность, необходимо использовать другие технические решения. Для их обоснования предположим, что в начальный момент обработки в технологической системе в радиальном направлении создан натяг, равный по величине снимаемому припуску Π , и обработка производится без радиальной подачи (реализуется процесс выхаживания).

Представим уравнение (2.10) с учетом зависимости (2.11) в виде:

$$c \cdot (\Pi - \Delta) = \frac{\sigma}{K_{рез}} \cdot \frac{Q}{V_{рез}}, \quad (2.18)$$

где $Q = S \cdot V_{рез}$ – производительность обработки, м³; $V_{рез}$ – скорость резания, м/с; Δ – линейный съём материала, м.

При радиальном точении цилиндрической детали с учетом средней производительности обработки Q величина Δ выразится:

$$\Delta = \frac{\nu}{\pi \cdot D_{дет} \cdot \nu} = \frac{Q \cdot \tau}{\pi \cdot D_{дет} \cdot \nu}, \quad (2.19)$$

где ν – объем снятого материала за время τ , м³; $D_{дет}$ – диаметр детали, м; ν – ширина резания, м.

Разрешая уравнение (2.18) с учетом зависимости (2.19) относительно Q , получим:

$$Q = \frac{\Pi}{\left(\frac{\tau}{\pi \cdot D_{дет} \cdot v} + \frac{\sigma}{c \cdot K_{рез} \cdot V_{рез}} \right)}. \quad (2.20)$$

С течением времени обработки τ производительность обработки Q непрерывно уменьшается. Наибольшее влияние на Q оказывает величина снимаемого припуска Π . Увеличить Q можно также уменьшением соотношения $\sigma / K_{рез}$ и увеличением параметров c , v , $V_{рез}$, $D_{дет}$.

Определим из уравнения (2.18) с учетом зависимости (2.20) величину упругого перемещения $y = \Pi - \Delta$:

$$y = \frac{\Pi}{\left(1 + \frac{\tau}{\pi \cdot D_{дет} \cdot v} \cdot \frac{c \cdot K_{рез} \cdot V_{рез}}{\sigma} \right)}. \quad (2.21)$$

Аналогично производительности обработки Q , величина упругого перемещения y с течением времени обработки τ уменьшается, что соответствует повышению точности обработки, рис. 2.4. Чем

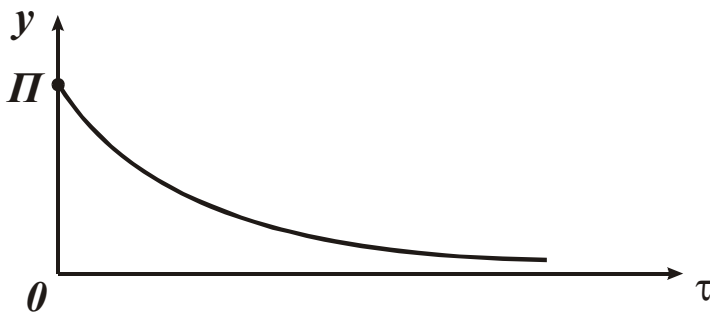


Рис. 2.4. Зависимость y от τ .

больше снимаемый припуск, тем продолжительнее процесс достижения заданной точности обработки (величины y). Уменьшить y , исходя из зависимости (2.21), можно увеличением параметров c , $V_{рез}$, соотношения $K_{рез} / \sigma$ и

уменьшением v .

Полученное решение согласуется с аналогичными решениями, полученными Новиковым Г.В. [233, 234], в которых уравнения типа

(2.18) решаются с учетом дифференцирования: $Q = \frac{dv}{d\tau}$. В результате

приходим к дифференциальному уравнению первого порядка. В нашем случае решение получено на основе приближенной зависимости $Q = v / \tau$, что, несомненно, упрощает решение уравнения, не изменяя его физической сути.

В полученные зависимости входит важнейший показатель про-

цесса резания $\sigma / K_{рез}$, от которого во многом зависит уровень значений Q и y . Данный показатель определяет физику процесса резания. На его величину влияют: геометрия режущей части инструмента, интенсивность трения инструмента с обрабатываемым инструментом (включая трение обрабатываемого материала со связкой алмазно-абразивного инструмента), степень затупления режущей кромки инструмента и т.д. Поэтому, для выработки окончательных решений необходимо знать функциональные связи соотношения $\sigma / K_{рез}$ с указанными выше параметрами.

Зависимости (2.20) и (2.21) могут быть использованы для анализа процесса шлифования. В этом случае параметр $V_{рез}$ необходимо рассматривать как скорость шлифовального круга $V_{кр}$, а параметр $v = B$, как ширину шлифования.

Таким образом, получены общие зависимости, позволяющие научно-обоснованно подойти к анализу и управлению упругими перемещениями при механической обработке ответственных деталей.

2.1.2.2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БАЛАНСА ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Приведенная зависимость (2.11) определяет величину упругого перемещения y в начальный момент обработки. Для более полного представления о возможностях управления величиной y в процессе резания важно располагать решением об изменении величины y с течением времени обработки. Рассмотрим процесс резания по жесткой схеме. Предположим, что в процессе резания обрабатываемый прямолинейный образец движется с фиксированной скоростью V_0 (равной скорости непрерывной поперечной подачи) по нормали к режущему инструменту. Вследствие возникновения упругого перемещения y в технологической системе, скорость движения образца уменьшится до величины V_ϕ . Уравнение баланса перемещений в технологической системе в упрощенном виде опишется

$$V_0 \cdot \tau = V_\phi \cdot \tau + y, \quad (2.22)$$

где τ – время обработки, с.

Представим: $V_\phi = Q_\phi / F$ (где Q_ϕ – фактическая производи-

тельность обработки, $\text{м}^3/\text{с}$; F – площадь поперечного сечения обрабатываемого образца, м^2). Величину упругого перемещения y выразим зависимостью

$$y = \frac{P_y}{c} = \frac{P_z}{c \cdot K_{рез}} = \frac{\sigma \cdot S}{c \cdot K_{рез}} = \frac{\sigma \cdot Q_{\phi}}{c \cdot K_{рез} \cdot V}, \quad (2.23)$$

где $S = Q_{\phi} / V$ – площадь поперечного сечения среза, м^2 ; V – скорость резания (при шлифовании $V = V_{кр}$ – скорость шлифовального круга), $\text{м}/\text{с}$.

С учетом зависимости $V_0 = Q_0 / F$ (где Q_0 – номинальная производительность обработки, $\text{м}^3/\text{с}$) разрешим уравнение (2.22) относительно величины Q_{ϕ}

$$Q_{\phi} = \frac{Q_0}{\left(1 + \frac{\sigma \cdot F}{c \cdot K_{рез} \cdot V \cdot \tau}\right)}. \quad (2.24)$$

Как видим, при резании по жесткой схеме фактическая производительность обработки Q_{ϕ} , во-первых, меньше номинальной производительности обработки Q_0 , во-вторых, увеличивается с течением времени обработки τ , асимптотически приближаясь к значению Q_0 ,

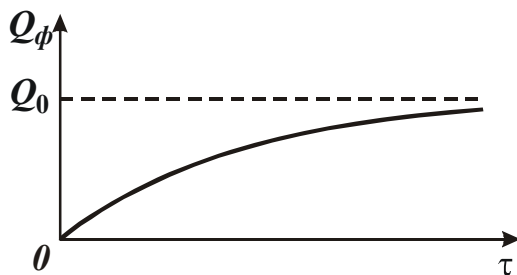


Рис. 2.5. Зависимость фактической производительности обработки Q_{ϕ} от времени обработки τ .

рис. 2.5. Произведение $V \cdot \tau$ в знаменателе зависимости (2.24) определяет длину пути резания L . При резании однолезвийным инструментом (например, при точении цилиндрической заготовки) величина L зависит от скорости вращения обрабатываемой заготовки (скорости резания), а при резании многолезвийным инструментом (фрезой, шлифовальным кругом и

т.д.) – от скорости вращения инструмента.

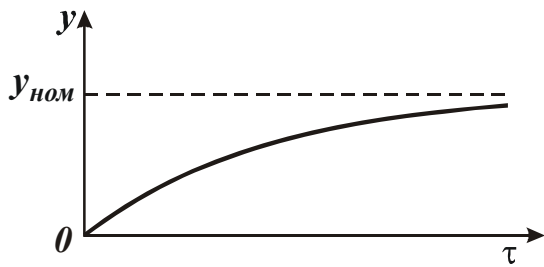
С учетом сказанного, зависимость (2.24) примет вид

$$Q_{\phi} = \frac{Q_0}{\left(1 + \frac{\sigma \cdot F}{c \cdot K_{рез} \cdot L}\right)}. \quad (2.25)$$

Кроме величины L , в знаменатель зависимости (2.25) входят соотношения $K_{рез} / \sigma$ и c / F . С их увеличением фактическая производительность обработки $Q_{ф}$ увеличивается. Соотношение c / F определяет жесткость технологической системы, приходящейся на единицу площади поперечного сечения обрабатываемого образца. Величина упругого перемещения y при этом описывается зависимостью (2.23) с учетом зависимости (2.25)

$$y = \frac{Q_0}{\left(\frac{c \cdot K_{рез} \cdot V}{\sigma} + \frac{F}{\tau} \right)}. \quad (2.26)$$

Исходя из зависимости (2.26), величина y изменяется по закону изменения фактической производительности обработки $Q_{ф}$ (рис. 2.5), т.е. с течением времени обработки величина y увеличивается, асимптотически приближаясь к своему номинальному значению (рис. 2.6)



$$y_{ном} = \frac{\sigma \cdot Q_0}{c \cdot K_{рез} \cdot V}. \quad (2.27)$$

Рис. 2.6. Зависимость величины упругого перемещения y от времени обработки τ .

Уменьшить $y_{ном}$ можно увеличением соотношения $K_{рез} / \sigma$, жесткости технологической системы c и уменьшением площади поперечного сечения среза $S = Q_0 / V$ (при шлифовании – площади поперечного сечения среза всеми одновременно работающими режущими зёрнами шлифовального круга).

С учетом зависимости (2.27) зависимость (2.26) примет вид:

$$y = \frac{y_{ном}}{\left(1 + \frac{\sigma \cdot F}{c \cdot K_{рез} \cdot V \cdot \tau} \right)}. \quad (2.28)$$

Приведенные расчетные зависимости справедливы при непрерывной поперечной подаче. При дискретной поперечной подаче время обработки τ необходимо представить в виде: $\tau = n \cdot \tau_0$, где n – число дискретных подач (количество проходов инструмента); τ_0 – длительность одной дискретной подачи (прохода), с. По сути, реше-

ние остается прежним.

Как известно, для того чтобы уменьшить величину упругого перемещения y и повысить фактическую производительность обработки Q_ϕ , необходимо в технологической системе перед началом обработки создать натяг. Оценим эффективность данного решения, используя уравнение (2.22).

Учсть начальный натяг y_0 можно, представив уравнение баланса перемещений (2.22) в виде

$$y_0 + V_0 \cdot \tau = V_\phi \cdot \tau + y. \quad (2.29)$$

Физически это означает, что в начальный момент обработки ($\tau = 0$) образец имеет не нулевое, а вполне конкретное перемещение $y_0 > 0$. При резании без поперечной подачи ($V_0 = 0$), при выхаживании, уравнение (2.29) упростится и примет вид

$$y_0 = V_\phi \cdot \tau + y. \quad (2.30)$$

Таким образом, пришли к весьма простым уравнениям (2.29) и (2.30), используя которые можно проанализировать поведение технологической системы для различных случаев обработки. После соответствующих преобразований из уравнения (2.29) определяется фактическая производительность обработки Q_ϕ

$$Q_\phi = \frac{\left(Q_0 + y_0 \cdot \frac{F}{\tau} \right)}{\left(1 + \frac{\sigma \cdot F}{c \cdot K_{рез} \cdot V \cdot \tau} \right)}. \quad (2.31)$$

В отличие от аналогичной зависимости (2.24), зависимость (2.31) имеет более сложный вид. Характер изменения фактической производительности обработки Q_ϕ во времени τ зависит от интенсивностей изменения числителя и знаменателя зависимости (2.31) во времени τ . Если преобладает интенсивность изменения знаменателя, то фактическая производительность обработки Q_ϕ с течением времени будет увеличиваться. Если же преобладает интенсивность изменения числителя, то наоборот, фактическая производительность обработки будет уменьшаться. При равенстве интенсивностей изменения числителя и знаменателя, фактическая производительность обработки Q_ϕ будет постоянна во времени. Последний случай возможен, если в преобразованной зависимости (2.31)

$$Q_{\phi} = Q_0 \cdot \frac{\left(1 + \frac{y_0 \cdot F}{Q_0 \cdot \tau}\right)}{\left(1 + \frac{\sigma \cdot F}{c \cdot K_{рез} \cdot V \cdot \tau}\right)} \quad (2.32)$$

выполняется условие

$$y_0 = \frac{\sigma \cdot Q_0}{c \cdot K_{рез} \cdot V}. \quad (2.33)$$

Как видим, зависимости (2.33) и (2.27) идентичны. Следовательно, для того чтобы фактическая производительность обработки Q_{ϕ} была равна номинальной производительности обработки Q_0 на протяжении всего времени обработки τ , необходимо в технологической системе создать начальный натяг y_0 , равный номинальному значению величины упругого перемещения $y_{ном}$.

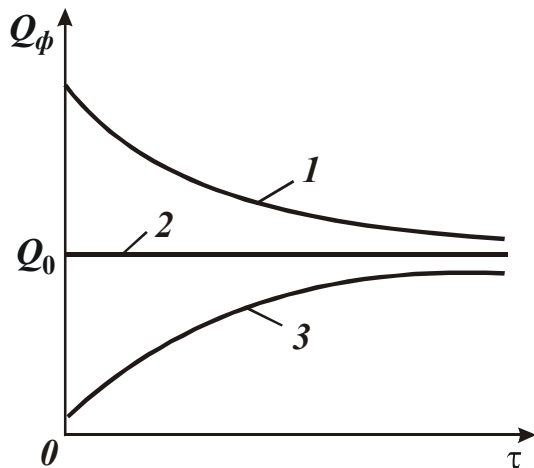


Рис. 2.7. Зависимость фактической производительности обработки Q_{ϕ} от времени обработки τ : 1 - $y_0 > y_{ном}$; 2 - $y_0 = y_{ном}$; 3 - $y_0 < y_{ном}$.

Очевидно, при $y_0 > y_{ном}$, исходя из зависимости (2.32), $Q_{\phi} > Q_0$. При $y_0 < y_{ном}$, наоборот, $Q_{\phi} < Q_0$. Графически характер изменения фактической производительности обработки Q_{ϕ} во времени показан на рис. 2.7.

При условии $y_0 > y_{ном}$ фактическая производительность обработки Q_{ϕ} уменьшается с течением времени обработки, асимптотически приближаясь к значению номинальной производительности обработки Q_0 . При условии $y_0 < y_{ном}$, наоборот, увеличивается, также асимптотически приближаясь к значению Q_0 . Причем, при условии $y_0 < y_{ном}$ в начальный момент обработки $Q_{\phi} > 0$, тогда как в случае $y_0 = 0$ (рис. 2.5) справедливо $Q_{\phi} = 0$.

Определим величину упругого перемещения y , исходя из общего решения, представленного зависимостью (2.31) с учетом зависимости (2.23)

$$y = y_0 \cdot \frac{\left(1 + \frac{Q_0 \cdot \tau}{y_0 \cdot F}\right)}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{рез} \cdot V \cdot \tau}{\sigma \cdot F}\right)}. \quad (2.34)$$

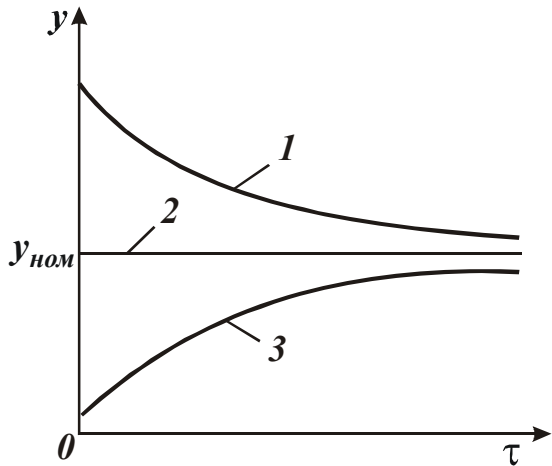


Рис. 2.8. Зависимость величины упругого перемещения y от времени обработки τ : 1 - $y_0 > y_{ном}$; 2 - $y_0 = y_{ном}$; 3 - $y_0 < y_{ном}$.

Величина упругого перемещения y , согласно зависимости (2.23), изменяется по закону фактической производительности обработки Q_ϕ , т.е. графики изменения Q_ϕ (рис. 2.7) и y (рис. 2.8) имеют один вид.

Как следует из зависимости (2.34), основным путем уменьшения величины y является исключение второго слагаемого, входящего в числитель зависимости, т.к. с увеличением времени обработки τ оно увеличивается. Реализовать это

условие можно при $Q_0 = 0$, т.е. используя цикл обработки, включающий лишь этап выхаживания.

Из уравнения (2.29) не сложно определить оптимальный цикл обработки, реализующий максимально возможную производительность обработки с учетом ограничения по величине y (по точности обработки). Для этого в уравнении (2.29) выразим: $V_\phi = (y_0 - y) / \tau$, тогда

$$V_0 \cdot \tau = 0. \quad (2.35)$$

Условие (2.35) выполняется при $V_0 = 0$.

Следовательно, оптимальный цикл обработки включает лишь этап выхаживания (рис. 2.9), что согласуется с выводом, приведенным выше.

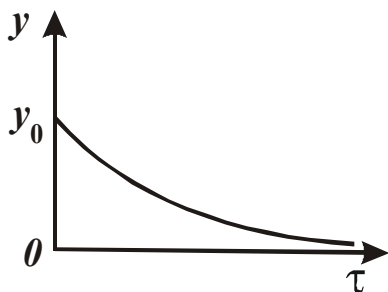


Рис. 2.9. Зависимость величины упругого перемещения y от времени обработки τ для случая $Q_0 = 0$ ($V_0 = 0$).

Вторым по эффективности следует рассматривать цикл обработки, включающий этап резания по жесткой схеме с предварительным натягом y_0 в технологической системе, определяемым по зависимости

(2.33), и этап выхаживания, рис. 2.10.

Данное решение соответствует аналогичным решениям, которые приведены в работах Новикова Г.В. и получены другими методами. Достоинство данного решения состоит в том, что оно получено на основе использования простых алгебраических уравнений, не требующих при решении применения сложного дифференциального и интегрального исчисления.

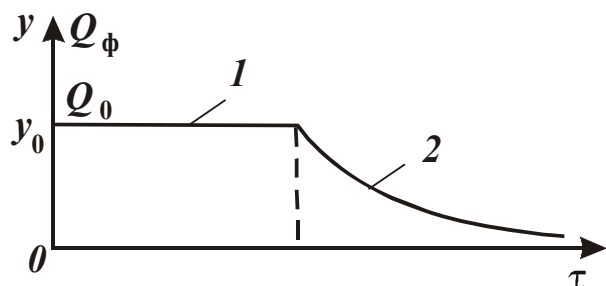


Рис. 2.10. Зависимость y и Q_ϕ от τ .

Проведем анализ процесса выхаживания (реализуемый при $Q_0=0$), преобразуя зависимость (2.32)

$$Q_\phi = \frac{y_0}{\left(\frac{\sigma}{c \cdot K_{рез} \cdot V} + \frac{\tau}{F} \right)} \quad (2.36)$$

или

$$Q_\phi = \frac{Q_0}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{рез} \cdot V \cdot \tau}{\sigma \cdot F} \right)}. \quad (2.37)$$

Сравнивая зависимости (2.37) и (2.24), нетрудно видеть, что они отличаются лишь вторым слагаемым в знаменателе. Причем, это слагаемое определяется лишь одной величиной $\alpha = \frac{c \cdot K_{рез} \cdot V}{\sigma \cdot F}$, которая входит в знаменатель зависимости (2.24) в степени -1 , а в знаменатель зависимости (2.37) – в степени $+1$. Следовательно, в первом случае фактическая производительность обработки во времени увеличивается, а во втором случае – уменьшается.

Представим зависимости (2.37) и (2.24) в виде:

$$\beta_1 = \frac{Q_\phi}{Q_0} = \frac{1}{(1 + \alpha \cdot \tau)}, \quad (2.38)$$

$$\beta_2 = \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{\alpha \cdot \tau} \right)}, \quad (2.39)$$

где β_1 и β_2 – относительные значения фактической производительности обработки.

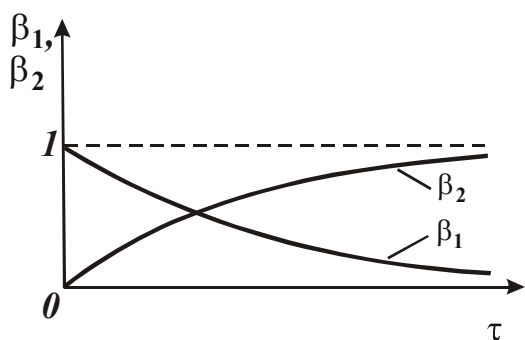


Рис. 2.11. Общий вид функций β_1 и β_2 .

Графически характер изменения функций β_1 и β_2 от времени обработки τ показан на рис. 2.11. Предположим, что функции β_1 и β_2 связаны зависимостью

$$\beta_2 = 1 - \beta_1. \quad (2.40)$$

Подставляя в (2.40) зависимость (2.38), имеем

$$\beta_2 = \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{\alpha \cdot \tau}\right)}, \quad (2.41)$$

т.е. приходим к зависимости (2.39). Это указывает на то, что функции β_1 и β_2 являются противоположными, и для них справедливо соотношение (2.40).

С физической точки зрения это означает, что процесс резания по жесткой схеме, осуществляемой с непрерывной поперечной подачей и описываемый зависимостью (2.24) или в относительных величинах зависимостью (2.39), является противоположным процессу выхаживания, описываемому соответственно зависимостями (2.37) и (2.38). При этом должно выполняться условие (2.33).

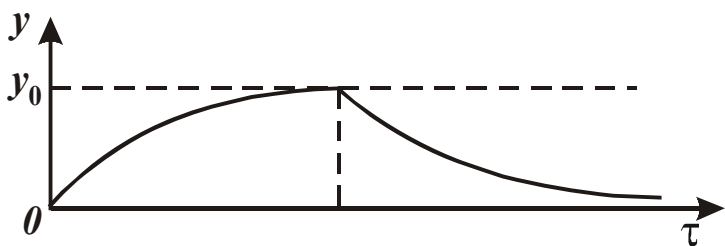


Рис. 2.12. Изменение величины y на этапах врезания и выхаживания.

По длительности оба рассматриваемых процесса одинаковы, т.е. время, затрачиваемое на создание соответствующего натяга в технологической системе, равно времени на его устранение в процессе выхаживания, рис. 2.12.

Поскольку оба процесса математически взаимосвязаны, располагая данными об одном из них, можно расчетным путем установить характеристики второго процесса.

Анализ зависимости (2.32) и графика, приведенного на рис. 2.7, показывает, что стабилизировать процесс резания во времени по производительности обработки можно при выполнении условия (2.33), т.е. при одном вполне конкретном значении y_0 . При других значениях y_0 фактическая производительность обработки Q_f , а соответ-

ственно и величина упругого перемещения y , будут изменяться во времени и процесс будет протекать в неустановившемся режиме, что мало эффективно. Это следует рассматривать как существенный недостаток жесткой схемы обработки, в особенности, если по длительности переходный процесс превышает время обработки заготовки на станке.

Каким же путем можно добиться стабилизации процесса обработки во времени для различных условий обработки? Для ответа на поставленный вопрос обратимся к зависимости (2.33). Производительность обработки Q_0 будет постоянна при обеспечении постоянства во времени величин y_0 и $K_{рез} / \sigma$. Величина упругого перемещения y_0 (или y), как следует из зависимости (2.23), определяется радиальной составляющей силы резания P_y . Поэтому, используя упругую схему резания с фиксированным значением силы P_y , можно стабилизировать во времени величину y , а, следовательно, производительность и другие параметры обработки. Сделанный вывод подтверждается практикой резания, особенно практикой абразивной и алмазно-абразивной обработки, где широко используется упругая схема резания.

Использование упругой схемы является необходимым, но не достаточным условием повышения эффективности обработки в плане стабилизации параметров процесса во времени. Достаточным условием следует рассматривать стабилизацию во времени соотношения $K_{рез} / \sigma$, определяющего режущую способность инструмента. Как известно, данное соотношение по мере износа и затупления инструмента уменьшается во времени, что ведет к уменьшению производительности обработки Q_0 , исходя из зависимости (2.33). При абразивной и алмазно-абразивной обработке стабилизировать во времени данное соотношение можно, реализуя режим самозатачивания абразивного (алмазно-абразивного) инструмента или применяя эффективные методы его правки. При лезвийной обработке важно обеспечить более высокую стойкость режущего инструмента, используя, например, инструменты из синтетических сверхтвердых материалов и т.д.

При резании по упругой схеме с фиксированным значением силы P_y производительность обработки Q_0 и величина упругого перемещения y определяются главным образом значением этой силы.

Чем больше P_y , тем больше Q_0 и y . Поэтому, уменьшить величину y можно уменьшением P_y , реализуя на финишных операциях весьма малые значения P_y . Однако, это приводит к существенному снижению производительности обработки. Более целесообразно в этих случаях, как установлено выше, использовать схему выхаживания, т.е. схему резания с начальным натягом в технологической системе y_0 .

При резании по жесткой схеме, исходя из зависимости (2.32), фактическая производительность обработки Q_ϕ во многом определяется

произведением $\frac{K_{рез}}{\sigma} \cdot \tau$. Экспериментально установлено, что со-

отношение $K_{рез} / \sigma$ изменяется по закону τ^{-z} , где $0 < z < 1$. Следова-

тельно, произведение $\frac{K_{рез}}{\sigma} \cdot \tau$ увеличивается во времени, что в ко-

нечном итоге ведет к увеличению фактической производительности обработки Q_ϕ .

Данная закономерность справедлива для процесса резания с непрерывной поперечной подачей. При дискретной поперечной подаче, как отмечалось выше, время обработки τ следует рассматривать в виде $\tau = n \cdot \tau_0$, где n – количество проходов, τ_0 – длительность одно-

го прохода. В этом случае произведение $\frac{K_{рез}}{\sigma} \cdot n$ с увеличением n ,

при достижении определенного значения τ_0 , может увеличиваться, что приведет к уменьшению фактической производительности обработки Q_ϕ . Например, установлено, что при круглом наружном продольном шлифовании длинных заготовок алмазным кругом на металлической связке происходит существенное снижение режущей способности круга за один его продольный ход. В результате произведе-

ние $\frac{K_{рез}}{\sigma} \cdot n$ уменьшается с увеличением количества проходов n , что снижает производительность обработки и увеличивает упругие перемещения в технологической системе.

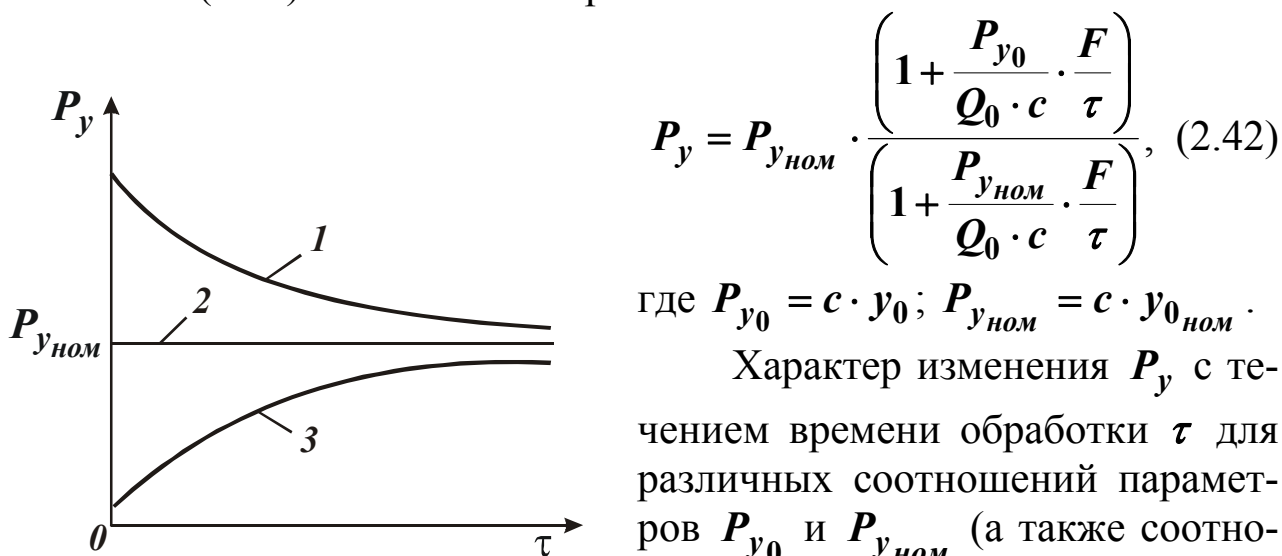
Следовательно, для обеспечения более высокой производительности обработки необходимо использовать жесткую схему резания с непрерывной поперечной подачей, увеличивая ширину резания за счет применения многолезвийных инструментов. Подтверждением

тому являются разнообразные процессы абразивной и алмазно-абразивной обработки, широко применяемые на практике и основанные на использовании схемы обработки с непрерывной поперечной (радиальной) подачей, например, процессы врезного шлифования, процессы доводки плоских поверхностей деталей и т.д.

Увеличение площади контакта инструмента с обрабатываемой заготовкой так же способствует достижению более высокой плоскостности и параллельности обработки, т.е. повышению точности обработки.

2.1.2.3. КЛАССИФИКАЦИЯ СХЕМ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПО ХАРАКТЕРУ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ P_y И y

Радиальная составляющая силы резания $P_y = c \cdot y$ с учетом зависимости (2.34) может быть выражена зависимостью



где $P_{y_0} = c \cdot y_0$; $P_{y_{ном}} = c \cdot y_{ном}$.

Характер изменения P_y с течением времени обработки τ для различных соотношений параметров P_{y_0} и $P_{y_{ном}}$ (а также соотношений параметров y_0 и $y_{ном}$) показан на рис. 2.13. Данный характер изменения P_y аналогичен характеру изменения величины упругого перемещения y , показанному на рис. 2.8, что связано с линейной зависимостью величин P_y и y , т.к. $P_y = c \cdot y$.

Рис. 2.13. Зависимость параметра P_y от времени обработки τ :

- 1 - $P_{y_0} > P_{y_{ном}}$ ($y_0 > y_{ном}$);
- 2 - $P_{y_0} = P_{y_{ном}}$ ($y_0 = y_{ном}$);
- 3 - $P_{y_0} < P_{y_{ном}}$ ($y_0 < y_{ном}$).

чин P_y и y , т.к. $P_y = c \cdot y$.

Исходя из рис. 2.13, можно сделать важные выводы:

1. При обработке по жесткой схеме ($Q_0 = const$) радиальная состав-

ляющая силы резания P_y с течением времени обработки будет увеличиваться или в самом лучшем случае оставаться постоянной в зависимости от характера изменения отношения $K_{рез} / \sigma$. Поэтому, жесткую схему обработки следует рассматривать как схему с увеличивающейся во времени радиальной составляющей силы резания P_y и соответственно величиной упругого перемещения y .

2. Схему выхаживания в связи с уменьшением во времени производительности обработки следует рассматривать как схему с уменьшающимися во времени параметрами P_y и y .

На основании сказанного, все возможные схемы обработки можно классифицировать по признаку характера изменения во времени параметров P_y и y :

- 1) схемы, характеризующиеся увеличением во времени параметров P_y и y (для $P_{y_0} < P_{y_{ном}}$; $y_0 < y_{ном}$);
- 2) схемы, характеризующиеся постоянством во времени параметров P_y и y (для $P_{y_0} = P_{y_{ном}}$; $y_0 = y_{ном}$);
- 3) схемы, характеризующиеся уменьшением во времени параметров P_y и y (для $P_{y_0} > P_{y_{ном}}$; $y_0 > y_{ном}$).

Для первой схемы зависимость (2.42) с учетом $P_{y_0} = 0$ принимает вид

$$P_y = \frac{P_{y_{ном}}}{\left(1 + \frac{P_{y_{ном}} \cdot F}{Q_0 \cdot c \cdot \tau}\right)}. \quad (2.43)$$

Для второй схемы зависимость (2.42) с учетом $P_y = P_{y_{ном}}$ принимает вид

$$P_{y_0} = \frac{\sigma \cdot Q_0}{K_{рез} \cdot V}. \quad (2.44)$$

Как показано выше, реализовать условие $y = y_0$ целесообразно за счет применения упругой схемы обработки с фиксированным радиальным усилием P_{y_0} . Проанализируем технологические возможности данной схемы, используя зависимость (2.44).

С течением времени обработки по мере снижения режущей спо-

способности инструмента отношение $\sigma / K_{рез}$ будет увеличиваться. При условии $P_{y_0} = c \cdot y_0 = const$ это приведет к уменьшению производительности обработки. Следовательно, в зависимости (2.44) вместо номинальной производительности Q_0 необходимо рассматривать фактическую производительность Q_ϕ , которая, исходя из зависимости (2.44), выразится

$$Q_\phi = \frac{K_{рез}}{\sigma} \cdot V \cdot P_{y_0}. \quad (2.45)$$

Для того чтобы стабилизировать величину Q_ϕ на определенном уровне, например, на уровне $Q_\phi = Q_0$ в связи с затуплением инструмента и уменьшением отношения $K_{рез} / \sigma$, исходя из зависимости (2.45), необходимо увеличить скорость резания V при условии $P_{y_0} = c \cdot y_0 = const$. Однако, более эффективным путем следует рассматривать стабилизацию во времени отношения $K_{рез} / \sigma$, что достигается при лезвийной и абразивной (алмазно-абразивной) обработке различными методами.

Как показано выше, с точки зрения обеспечения параметров точности и качества обработки более эффективно применение третьей схемы обработки, характеризующейся уменьшением во времени параметров P_y и y_0 , т.е. схемы выхаживания.

Проведем анализ уравнений баланса перемещений в технологической системе для трех схем, которые имеют вид:

$$1) \quad (V_0 - V_\phi) \cdot \tau = y;$$

$$2) \quad \frac{P_y}{c} = y;$$

$$3) \quad y_0 - V_\phi \cdot \tau = y.$$

Из курса физики известно, что при взаимодействии движущейся массы m (приведенной массы технологической системы) с телом бесконечно большой массы справедливо соотношение: $m \cdot (V_0 - V_\phi) = P_y \cdot \tau$, где V_0, V_ϕ – начальная и конечная скорости движения массы m ; $P_y = c \cdot y$ – возникающая при взаимодействии сила, равная радиальной составляющей силы резания; c – приведенная жесткость технологической системы; τ – время взаимодействия.

Тогда, с учетом $k^2 = c / m$ (где k – собственная частота колеба-

ний технологической системы) уравнения баланса перемещений для трех схем выразятся:

$$1) \quad \frac{P_y \cdot \tau}{m} \cdot \tau = y \rightarrow \frac{c \cdot \tau^2}{m} = 1 \rightarrow k^2 \cdot \tau^2 = 1;$$

$$2) \quad \frac{V_\phi \cdot m}{c \cdot \tau} = y \rightarrow \frac{1}{k^2 \cdot \tau} = \frac{y}{V_\phi} \rightarrow k^2 \cdot \tau^2 = 1;$$

$$3) \quad y_0 - y = V_\phi \cdot \tau \rightarrow \frac{P_y}{c} = V_\phi \cdot \tau \rightarrow \frac{V_\phi \cdot m}{c \cdot \tau} = V_\phi \cdot \tau \rightarrow k^2 \cdot \tau^2 = 1.$$

В результате, после несложных преобразований, пришли к одному уравнению, описывающему колебательный процесс технологической системы, рассматривая параметр τ как период собственных колебаний технологической системы: $\tau = 1/k$. Из этого вытекает, что при обработке всегда будут возникать собственные колебания с частотой k и амплитудой, зависящей от условий обработки.

2.1.2.4. РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ

2.1.2.4.1. РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ДЛЯ СХЕМЫ С УВЕЛИЧИВАЮЩИМИСЯ ВО ВРЕМЕНИ ПАРАМЕТРАМИ P_y И y

Используя полученные аналитические зависимости, произведем расчет и анализ параметров точности обработки: точность размера и точность формы. Следует отметить, что данные параметры обусловлены лишь упругими перемещениями в технологической системе и не учитывают влияния других факторов: термоупругих деформаций элементов технологической системы, неточности установки элементов технологической системы и т.д. При выполнении расчетов мы исходим из предположения, что определяющим фактором в формировании параметров точности механической обработки на финишных операциях является упругое (силовое) деформирование элементов технологической системы.

Первоначально рассмотрим схему с увеличивающимися во времени параметрами P_y и y при условиях: $y_0 = 0$; $P_{y_0} = 0$. Упругое перемещение y (определяющее точность размера обрабатываемой детали) для данной схемы обработки описывается зависимостью (2.28). С учетом зависимости (2.33), рассматривая в ней вместо пара-

метров y_0 и Q_0 параметры y и Q , зависимость (2.28) примет вид

$$y = \frac{y_{ном}}{\left(1 + y_{ном} \cdot \frac{F}{Q \cdot \tau}\right)}. \quad (2.46)$$

Согласно уравнения (2.22), отношение Q/F равно скорости радиальной подачи V_ϕ . Тогда произведение V_ϕ и времени обработки τ будет определять величину снятого припуска Π_{max} , т.е.

$$\Pi_{max} = V_\phi \cdot \tau = \frac{Q}{F} \cdot \tau.$$

Преобразуем зависимость (2.46) с учетом данного выражения

$$\begin{aligned} y &= \frac{y_{ном}}{\left(1 + \frac{y_{ном}}{\Pi_{max}}\right)} = \frac{1}{\left(\frac{1}{y_{ном}} + \frac{1}{\Pi_{max}}\right)} = \\ &= \frac{1}{\frac{1}{\Pi_{max}} \cdot \left(1 + \frac{\Pi_{max}}{y_{ном}}\right)} = \frac{\Pi_{max}}{\left(1 + \frac{\Pi_{max}}{y_{ном}}\right)}. \end{aligned} \quad (2.47)$$

Как следует из зависимости (2.47), величина упругого перемещения y (определяющая точность размера обрабатываемой детали) тем меньше, чем меньше параметры $y_{ном}$ и Π_{max} .

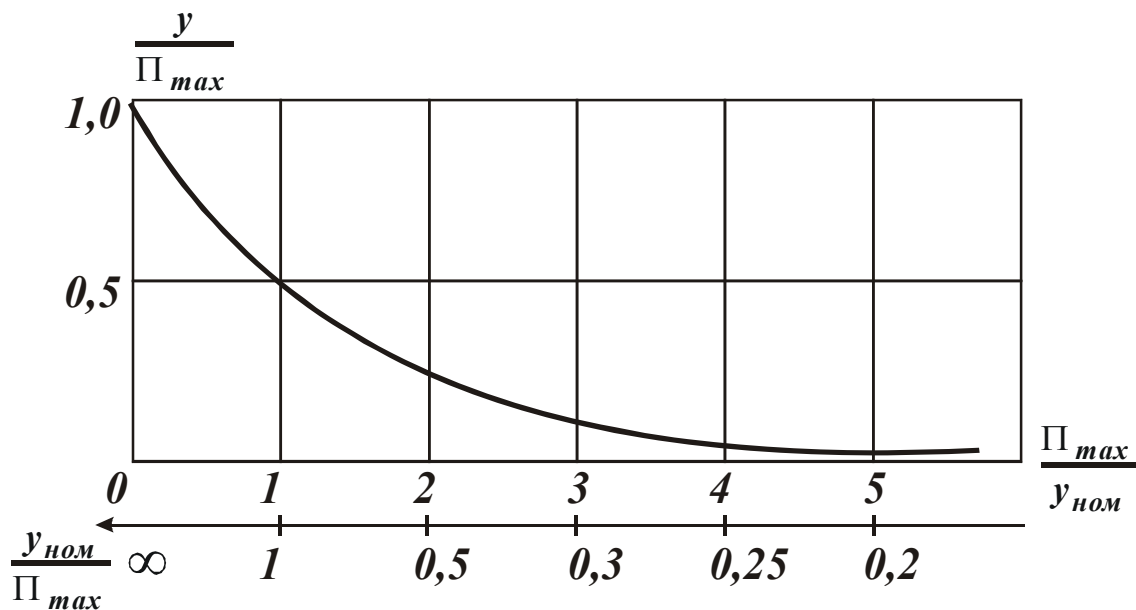


Рис. 2.14. Зависимость безразмерной величины $\frac{y}{\Pi_{max}}$ от безразмерной вели-

чины $\frac{\Pi_{max}}{y_{ном}}$.

На рис. 2.14 графически показан характер изменения безразмерной величины $\frac{y}{\Pi_{max}}$ с увеличением безразмерной величины $\frac{\Pi_{max}}{y_{ном}}$.

Получим расчетные зависимости для определения точности формы обрабатываемой детали. С физической точки зрения она обусловлена неравномерностью снимаемого припуска (погрешностью формы обработки на предшествующей операции).

Предположим, что наибольший снимаемый припуск равен Π_{max} , а наименьший – Π_{min} . Тогда разность припусков $\Delta\Pi = \Pi_{max} - \Pi_{min}$ будет определять погрешность формы заготовки. Погрешность формы обрабатываемой детали получим как разность величин упругих перемещений, возникающих в моменты обработки участков детали с наибольшим Π_{max} и наименьшим Π_{min} припусками. Тогда, с учетом зависимости (2.47), погрешность формы обрабатываемой детали (обозначим её как Δy) определится:

$$\begin{aligned} \Delta y = y_{max} - y_{min} &= \frac{1}{\left(\frac{1}{y_{ном}} + \frac{1}{\Pi_{max}}\right)} - \frac{1}{\left(\frac{1}{y_{ном}} + \frac{1}{\Pi_{min}}\right)} = \\ &= \frac{1}{\frac{1}{\Pi_{max}} \cdot \left(1 + \frac{\Pi_{max}}{y_{ном}}\right)} - \frac{1}{\frac{1}{\Pi_{min}} \cdot \left(1 + \frac{\Pi_{min}}{y_{ном}}\right)} = \\ &= \frac{\Delta\Pi}{\left(1 + \frac{\Pi_{max}}{y_{ном}}\right) \cdot \left(1 + \frac{\Pi_{min}}{y_{ном}}\right)} \end{aligned} \quad , \quad (2.48)$$

где $\Delta\Pi = \Pi_{max} - \Pi_{min}$.

В результате пришли к довольно сложной по структуре зависимости, в которой параметры Π_{max} и Π_{min} входят как в числитель, так и в знаменатель.

С одной стороны, точность формы обрабатываемой детали (определяемой параметром Δy) связана линейной зависимостью с параметром $\Delta\Pi$, который определяет точность формы исходной заготовки. С другой стороны, входящие в знаменатель зависимости параметры Π_{max} и Π_{min} приводят к уменьшению параметра Δy .

При выполнении условий $\Pi_{max}, \Pi_{min} > y_{ном}$ зависимость (2.48) упростится

$$\Delta y = \frac{y_{ном}^2 \cdot \Delta \Pi}{\Pi_{max} \cdot \Pi_{min}} = y_{ном}^2 \cdot \left(\frac{1}{\Pi_{min}} - \frac{1}{\Pi_{max}} \right). \quad (2.49)$$

В данном случае на параметр Δy существенное влияние оказывает величина $y_{ном}$. Однако, основное влияние на Δy оказывает разность параметров Π_{max} и Π_{min} , т.е. параметр $\Delta \Pi$. Чем он меньше, тем меньше параметр Δy и меньше погрешность формы обрабатываемой детали.

Пользуясь классическими понятиями технологии машиностроения, отношение параметров $\Delta \Pi$ и Δy определяет уточнение ε . Аналитическая зависимость для его определения с учетом зависимости (2.48) принимает вид

$$\varepsilon = \frac{\Delta \Pi}{\Delta y} = \left(1 + \frac{\Pi_{max}}{y_{ном}} \right) \cdot \left(1 + \frac{\Pi_{min}}{y_{ном}} \right). \quad (2.50)$$

Как следует из зависимости (2.50), уточнение ε тем больше, чем больше параметры Π_{max} , Π_{min} и меньше величина $y_{ном}$.

При выполнении условий $\Pi_{max}, \Pi_{min} > y_{ном}$ с учетом зависимости (2.50) величина уточнения ε определится

$$\varepsilon = \frac{\Delta \Pi}{\Delta y} = \frac{\Pi_{max} \cdot \Pi_{min}}{y_{ном}^2}. \quad (2.51)$$

Из данной зависимости следует вполне однозначная связь между параметрами ε и $y_{ном}$, Π_{max} , Π_{min} .

Если $\Pi_{max} = \Pi_{min} = \Pi$, то зависимость (2.51) упрощается

$$\varepsilon = \left(\frac{\Pi}{y_{ном}} \right)^2. \quad (2.52)$$

Из зависимости (2.52) вытекает, что уточнение ε связано с отношением $\frac{\Pi}{y_{ном}}$ квадратичной зависимостью.

Из курса технологии машиностроения известно, что величина, обратная уточнению ε , называется коэффициентом уменьшения погрешности и обозначается как K_y .

Тогда зависимость для определения коэффициента уменьшения погрешности K_y с учетом зависимости (2.50) примет вид

$$K_y = \frac{1}{\varepsilon} = \frac{\Delta y}{\Delta \Pi} = \frac{1}{\left(1 + \frac{\Pi_{max}}{y_{ном}}\right) \cdot \left(1 + \frac{\Pi_{min}}{y_{ном}}\right)}. \quad (2.53)$$

Коэффициент уменьшения погрешности K_y тем меньше, чем больше параметры Π_{max} , Π_{min} и меньше величина $y_{ном}$.

На рис. 2.15 графически показан характер изменения коэффициента уменьшения погрешности K_y и уточнения ε с увеличением от-

ношений $\frac{\Pi_{max}}{y_{ном}}$ и $\frac{\Pi_{min}}{y_{ном}}$.

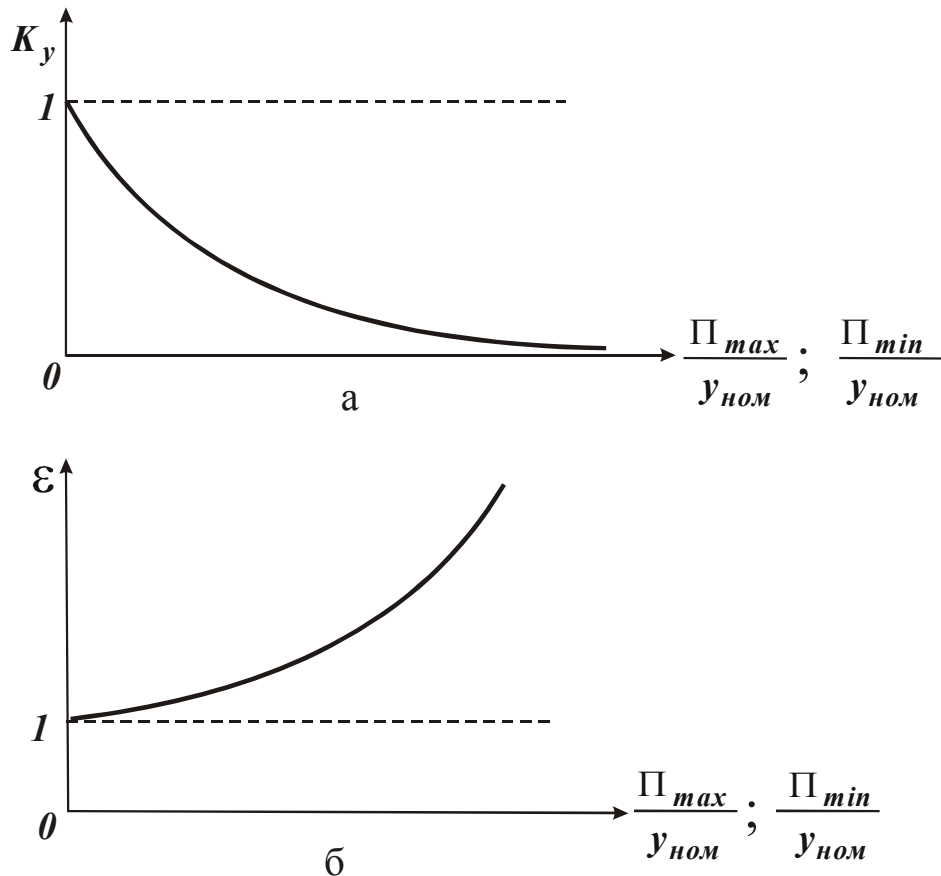


Рис. 2.15. Зависимости коэффициента уменьшения погрешности K_y (а) и уточнения ε (б) от отношений $\frac{\Pi_{max}}{y_{ном}}$ и $\frac{\Pi_{min}}{y_{ном}}$.

Таким образом, получены аналитические зависимости для определения двух важнейших параметров технологии машиностроения – коэффициента уменьшения погрешности K_y и уточнения ε . Это открывает новые возможности анализа и прогнозирования путей повышения точности механической обработки.

Проведем анализ условий уменьшения параметров y и Δy . Из

приведенных выше зависимостей нетрудно видеть, что основным путем уменьшения параметров y и Δy является уменьшение величины

$$y_{ном} = \frac{\sigma}{K_{рез}} \cdot \frac{Q_0}{c \cdot V}.$$

Уменьшение этой величины предполагает увеличе-

ние параметров c, V и уменьшение параметров Q_0 и $\frac{\sigma}{K_{рез}}$, рис. 2.16.

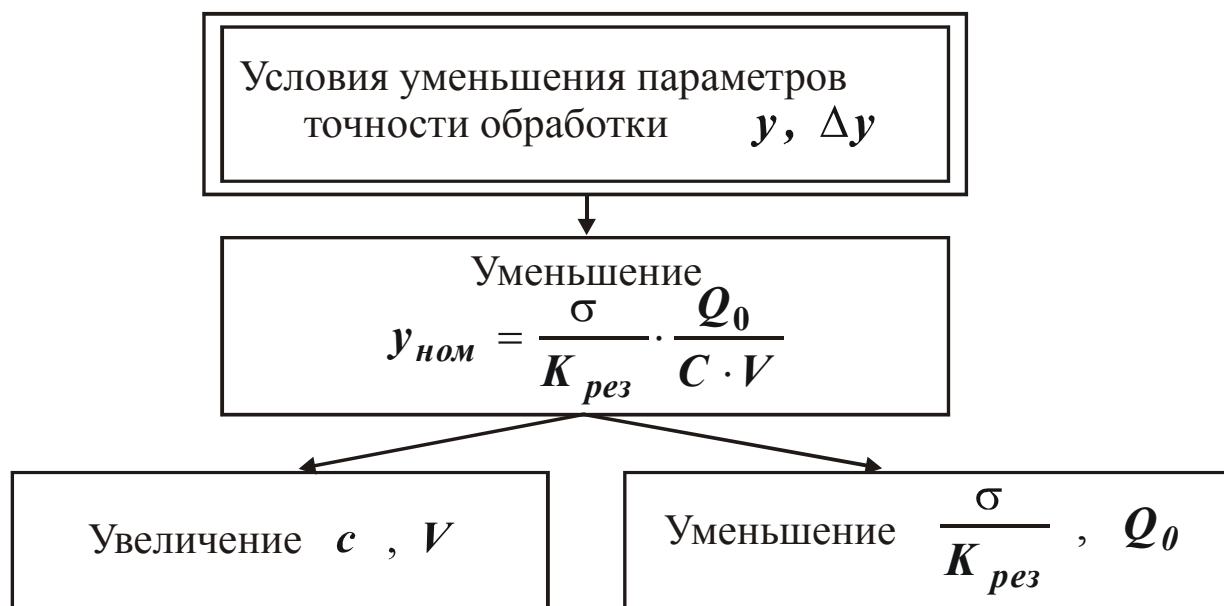


Рис. 2.16. Структурная схема условий уменьшения параметров y и Δy .

Выше приведена общая методика расчета параметров точности обработки $y, \Delta y, \varepsilon$ и K_y . Данную методику можно упростить, если учесть, что при условии $\frac{\Pi_{max}}{y_{ном}} > 3$ зависимость (2.28) принимает простой вид

$$y \approx y_{ном}. \quad (2.54)$$

Тогда параметр Δy определится зависимостью (2.49), параметр ε – зависимостью (2.51), а параметр K_y – следующей зависимостью

$$K_y = \frac{1}{\varepsilon} = \frac{y_{ном}^2}{\Pi_{max} \cdot \Pi_{min}}. \quad (2.55)$$

Используя зависимости (2.54) и (2.49), можно предложить следующие алгоритмы расчета оптимальных условий обработки, обес-

печивающие требуемые значения параметров точности обработки y и Δy :

$$\begin{cases} y = y_{ном} = \frac{\sigma}{K_{рез}} \cdot \frac{Q_0}{c \cdot V}, \\ \Delta y = \frac{\Delta \Pi}{\Pi_{max} \cdot \Pi_{min}} \cdot y_{ном}^2, \end{cases} \quad (2.56)$$

- 1) для заданных значений y и Δy на основе системы уравнений (2.56) производится выбор значений $Q_0, c, V, \frac{\sigma}{K_{рез}}$ и соответственно значений Π_{max} и Π_{min} ;
- 2) для заданных значений $y, \Delta y$ и Π_{max}, Π_{min} производится выбор значений $Q_0, c, V, \frac{\sigma}{K_{рез}}$.

В общем виде величина упругого перемещения y для первой схемы обработки (схемы, характеризующейся увеличивающимися во времени параметрами P_y и y) определяется зависимостью (2.34). Преобразуем данную зависимость с учетом зависимости (2.33), рассматривая в ней вместо Q_0 параметр Q :

$$y = \frac{y_0 + Q \cdot \frac{\tau}{F}}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{рез} \cdot V \cdot \tau}{\sigma \cdot F}\right)} = \frac{y_0 + Q \cdot \frac{\tau}{F}}{\left(1 + \frac{1}{y_{ном}} \cdot \frac{Q \cdot \tau}{F}\right)}. \quad (2.57)$$

Соотношение Q/F , как показано выше, равно скорости радиальной подачи V_ϕ . Тогда с учетом зависимости $V_\phi \cdot \tau = \Pi_{max}$ зависимость (2.57) примет вид:

$$y = \frac{y_0 + \Pi_{max}}{\left(1 + \frac{\Pi_{max}}{y_{ном}}\right)}. \quad (2.58)$$

Уменьшить величину упругого перемещения y для данной схемы обработки и тем самым повысить точность обработки можно за счет выполнения условия $y_0 = 0$, т.е. исключая начальный натяг y_0 в технологической системе.

2.1.2.4.2. РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ДЛЯ СХЕМ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХСЯ ПОСТОЯНСТВОМ И УМЕНЬШЕНИЕМ ВО ВРЕМЕНИ ПАРАМЕТРОВ P_y И y

Для второй схемы обработки, характеризующейся постоянством во времени параметров P_y и y , справедливы соотношения:

$$y = y_0 = y_{ном} = \frac{\sigma}{K_{рез}} \cdot \frac{Q_0}{c \cdot V} = \frac{P_{y_{ном}}}{c}. \quad (2.59)$$

Условия уменьшения величины упругого перемещения y для данной схемы показаны на рис. 2.17.

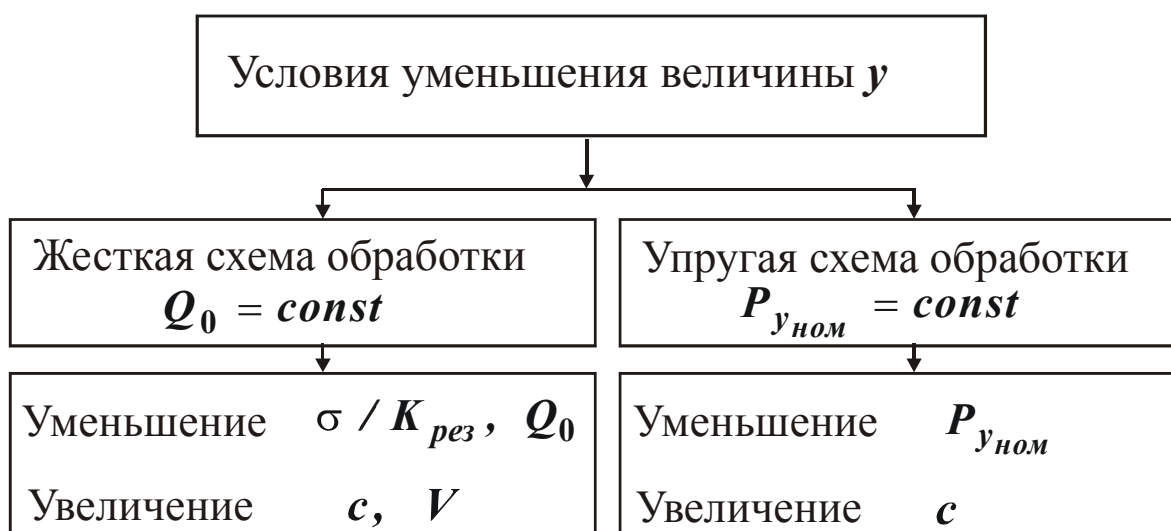


Рис. 2.17. Структурная схема условий уменьшения величины y .

Для третьей схемы, характеризующейся уменьшением во времени параметров P_y и y (схемы выхаживания), справедливы соотношения: $y_0 = \Pi_{max} > y_{ном}$ и $Q_0 = 0$. Величина упругого перемещения y (точность размера обрабатываемой детали) определяется зависимостью

$$y = \frac{\Pi_{max}}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{рез} \cdot V \cdot \tau}{\sigma \cdot F}\right)}. \quad (2.60)$$

Точность формы обрабатываемой детали Δy определяется разностью максимального y_{max} и минимального y_{min} значений упругих перемещений. Тогда с учетом зависимости (2.60), получим

$$y = \frac{\Pi_{max}}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{рез} \cdot V \cdot \tau}{\sigma \cdot F}\right)}, \quad (2.61)$$

где $\Delta\Pi = \Pi_{max} - \Pi_{min}$.

Разрешая зависимость (2.61) относительно знаменателя и подставляя полученное выражение в зависимость (2.60), имеем

$$\Pi_{max} = y \cdot \frac{\Delta\Pi}{\Delta y} \quad (2.62)$$

или

$$\frac{\Pi_{max}}{y} = \frac{\Delta\Pi}{\Delta y}. \quad (2.63)$$

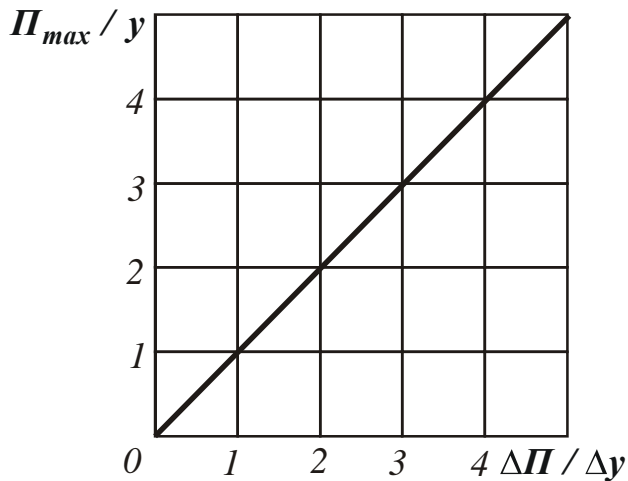


Рис. 2.18. Зависимость безразмерной величины Π_{max} / y от безразмерной величины $\Delta\Pi / \Delta y$.

Характер изменения безразмерной величины $\frac{\Pi_{max}}{y}$ с увеличением безразмерной величины $\frac{\Delta\Pi}{\Delta y}$ графически показан на рис. 2.18. Как видно, между величинами $\frac{\Pi_{max}}{y}$ и $\frac{\Delta\Pi}{\Delta y}$ существует линейная связь.

Разрешая зависимости (2.60) и (2.61), определим время процесса выхаживания τ :

$$\tau = \frac{\sigma \cdot F}{c \cdot K_{рез} \cdot V} \cdot \left(\frac{\Delta\Pi}{\Delta y} - 1 \right). \quad (2.64)$$

Наряду с параметрами $F, c, V, \frac{\sigma}{K_{рез}}$, характеризующими процесс резания, зависимость (2.64) содержит параметры точности обработки y и Δy . Чем больше отношение $\Delta\Pi / \Delta y$, тем продолжительнее должен быть процесс выхаживания с целью обеспечения требуемого параметра точности обработки Δy .

2.1.2.4.3. ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ВЫХАЖИВАНИЯ

Зависимость (2.60), аналогично зависимости (2.61), можно разрешить относительно времени обработки τ :

$$\tau = \frac{\sigma \cdot F}{c \cdot K_{рез} \cdot V} \cdot \left(\frac{\Pi_{max} - y}{y} \right). \quad (2.65)$$

Создать начальный натяг в технологической системе, равный величине снимаемого припуска Π_{max} (особенно если припуск Π_{max} является относительно большой величиной), не всегда представляется возможным. В этом случае схема выхаживания практически нереализуема. Какой может быть выход из данной ситуации? Вполне очевидным решением может быть разбиение припуска $(\Pi_{max} - y)$ на n частей и осуществление съема каждой части припуска, равной $(\Pi_{max} - y)/n$, по схеме выхаживания. Оценим суммарное время τ съема припуска $(\Pi_{max} - y)$ согласно предложенного решения.

Пусть время τ_1 съема части припуска величиной $(\Pi_{max} - y)/n$ равно

$$\tau_1 = \frac{\sigma \cdot F}{c \cdot K_{рез} \cdot V} \cdot \left(\frac{\Pi_{max} - y}{n \cdot y} \right). \quad (2.66)$$

Тогда суммарное время τ съема припуска величиной $(\Pi_{max} - y)$ определится

$$\tau = n \cdot \tau_1 = \frac{\sigma \cdot F}{c \cdot K_{рез} \cdot V} \cdot \left(\frac{\Pi_{max} - y}{y} \right). \quad (2.67)$$

В итоге пришли к зависимости, идентичной зависимости (2.65). Следовательно, суммарное время обработки τ не зависит от того, за сколько этапов выхаживания производится съем общего припуска $(\Pi_{max} - y)$. Данный результат свидетельствует о том, что можно с одинаковой эффективностью производить съем как относительно больших, так и небольших по величине припусков.

Уточним полученное решение. В зависимость (2.65) входит переменная во времени величина – отношение $K_{рез} / \sigma$, определяющее режущую способность инструмента. Как известно, с течением времени обработки в связи с затуплением инструмента коэффициент резания $K_{рез}$ уменьшается, а условное напряжение резания σ увеличива-

ется. В результате отношение $K_{рез} / \sigma$ уменьшается.

Оценим влияние уменьшения во времени данного отношения на величину τ . Для этого представим отношение $K_{рез} / \sigma$ в виде:

$$\frac{K_{рез}}{\sigma} = A \cdot \tau^{-z}, \quad (2.68)$$

где A, z – некоторые заданные величины; $0 < z < 1,0$.

Подставим зависимость (2.68) в зависимость (2.65):

$$\tau = \frac{F}{c \cdot V \cdot A} \cdot \left(\frac{\Pi_{max} - y}{y} \right)^{\frac{1}{1-z}}. \quad (2.69)$$

Общий припуск $(\Pi_{max} - y)$ рассмотрим в виде $(\Pi_{max} - y) / n$. Тогда время τ_1 съема припуска величиной $(\Pi_{max} - y) / n$, исходя из зависимости (2.69), определится

$$\tau_1 = \frac{F}{c \cdot V \cdot A} \cdot \left(\frac{\Pi_{max} - y}{n \cdot y} \right)^{\frac{1}{1-z}}. \quad (2.70)$$

Суммарное время τ съема припуска $(\Pi_{max} - y)$ выразится

$$\tau = n \cdot \tau_1 = \frac{F}{c \cdot V \cdot A} \cdot \left(\frac{\Pi_{max} - y}{y} \right)^{\frac{1}{1-z}} \cdot \left(\frac{1}{n} \right)^{\frac{1}{1-z}}. \quad (2.71)$$

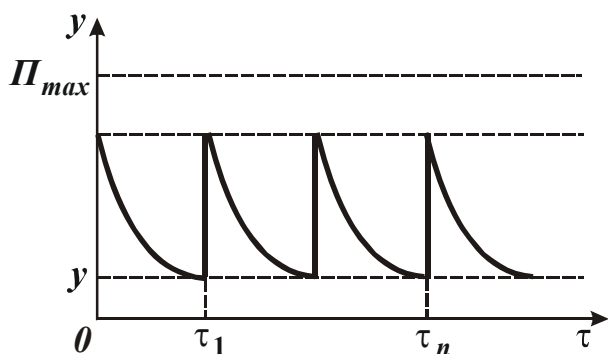


Рис. 2.19. Зависимость величины y от времени обработки τ .

Как следует из зависимости (2.71), в данном случае время τ зависит от количества этапов выхаживания n . С увеличением n время τ уменьшается, т.е. эффективно съем общего припуска осуществлять за несколько этапов выхаживания (с относительно небольшими припусками), рис. 2.19.

Таблица 2.1

Расчетные значения показателя степени

z	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,8
$\frac{z}{(1-z)}$	0	0,11	0,25	0,43	0,67	1,0	4,0

Как следует из табл. 2.1, при значениях $z < 0,5$ показатель степени $\frac{z}{(1-z)}$, с которым входит параметр n в зависимость (2.71), относительно небольшой и влияние n на время τ не столь существенно. При $z > 0,5$ влияние n на τ весьма большое, т.к. показатель степени $\frac{z}{(1-z)}$ при этом существенно увеличивается.

Таким образом, теоретически обосновано условие повышения производительности обработки по схеме выхаживания, состоящее в том, что съём припуска с периодическим созданием натяга в технологической системе, по величине кратному общему снимаемому припуску ($\Pi_{max} - y$). Причем, с уменьшением натяга суммарное время обработки уменьшается.

По-видимому, этим фактором можно объяснить то, что на практике при абразивной обработке широко применяются схемы съема припуска за счет периодического создания натяга в технологической системе на величину, кратную снимаемому припуску. Например, при плоском шлифовании по жесткой схеме периодически устанавливается определенная глубина шлифования, которая по физической сути определяет величину создаваемого натяга в технологической системе. Этот натяг в течении одного или двойного (прямого и обратного) продольных ходов стола станка срезается шлифовальным кругом. Иными словами, так называемая “жесткая схема плоского шлифования” с физической точки зрения является многоэтапной схемой выхаживания, осуществляемой в результате создания в технологической системе натяга, равного глубине шлифования. При этом в пределах каждого этапа (одного или двух проходов стола станка) не ставится

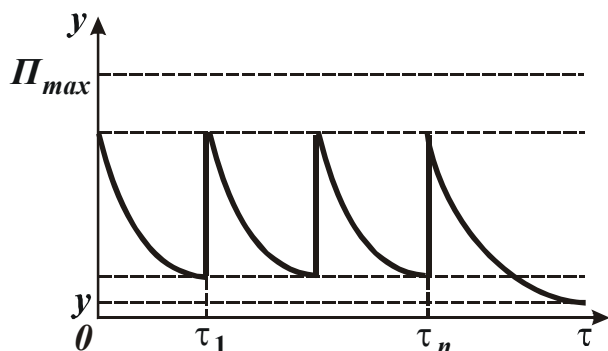


Рис. 2.20. Общий вид зависимости величины y от времени обработки τ при плоском шлифовании с поперечной подачей.

задача обеспечить требуемое значение величины y (точности размера). Его обеспечивают на последнем этапе выхаживания.

Принципиальная схема изменения величины y в процессе плоского шлифования показана на рис. 2.20.

Аналогичный характер съема припуска имеет место также при круглом наружном и

внутреннем шлифовании с поперечной подачей и в других процессах абразивной обработки с дискретной радиальной (поперечной) подачей.

При обработке (шлифовании) с непрерывной радиальной подачей схема выхаживания не реализуется. Реализуются схемы (согласно нашей классификации, приведенные в предыдущем параграфе) с увеличивающимися или постоянными во времени параметрами P_y и y .

Таким образом, проведенный анализ показал, что полученные теоретические решения относительной эффективности использования схемы выхаживания (выполняемой в один или большее число этапов) раскрывают физическую сущность применяемых на практике процессов абразивной обработки (шлифования) с дискретной радиальной подачей.

2.1.3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИЛОВОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ НА ТОЧНОСТЬ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ОБРАБОТКИ

2.1.3.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ НА ЭТАПЕ ВЫХАЖИВАНИЯ

2.1.3.1.1. ОБЩИЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ ТОЧНОСТИ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ С УЧЕТОМ ПАРАМЕТРОВ СИЛОВОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

Анализируя зависимость (2.21) нетрудно видеть, что с течением времени обработки величина упругого перемещения y уменьшается вплоть до нулевого значения. Выполнение данного условия означает достижение практически идеальной точности обработки. Однако, реализовать это условие затруднено. Что же является причиной? В зависимость (2.21) входит отношение $K_{рез} / \sigma$, которое определяет силовую напряженность процесса резания и которое при резании с небольшими толщинами срезов (соизмеримыми с радиусом округления режущей кромки инструмента) уменьшается вплоть до нуля. Это приводит к тому, что знаменатель зависимости (2.21) приближается к единице, в результате чего $y \rightarrow \Pi$.

Поэтому первоначально проведем анализ отношения $K_{рез} / \sigma$ применительно к процессам абразивной обработки, используя анали-

тические решения, приведенные в работах [124, 235, 383].

Как известно, в процессе шлифования отношение $K_{рез} / \sigma$ изменяется в зависимости от режущей способности шлифовального круга и толщин единичных срезов. Например, по мере затупления круга отношение $K_{рез} / \sigma$ уменьшается. Это при определенных условиях может привести к тому, что произведение τ и $K_{рез} / \sigma$ в зависимости (2.21) будет оставаться постоянным и исправления погрешности обработки (уменьшения величины y) не произойдет. Чтобы обеспечить в процессе обработки уменьшение y , необходимо, во-первых, реализовать максимально возможное значение $K_{рез} / \sigma$, во-вторых, стабилизировать его во времени за счет применения эффективных методов непрерывной правки круга и других средств. Наибольший эффект будет достигаться при условии, если знаменатель зависимости (2.21) значительно больше единицы. Если знаменатель незначительно отличается от единицы (например, равен 1,1), то с течением времени величина y будет уменьшаться несущественно и процесс исправления погрешности обработки окажется весьма продолжительным.

Из этого следует, что для увеличения знаменателя зависимости (2.21) необходимо, наряду с увеличением времени обработки τ и отношения $K_{рез} / \sigma$, увеличивать параметры c и $V_{кр}$, уменьшать ширину шлифования $v = B$.

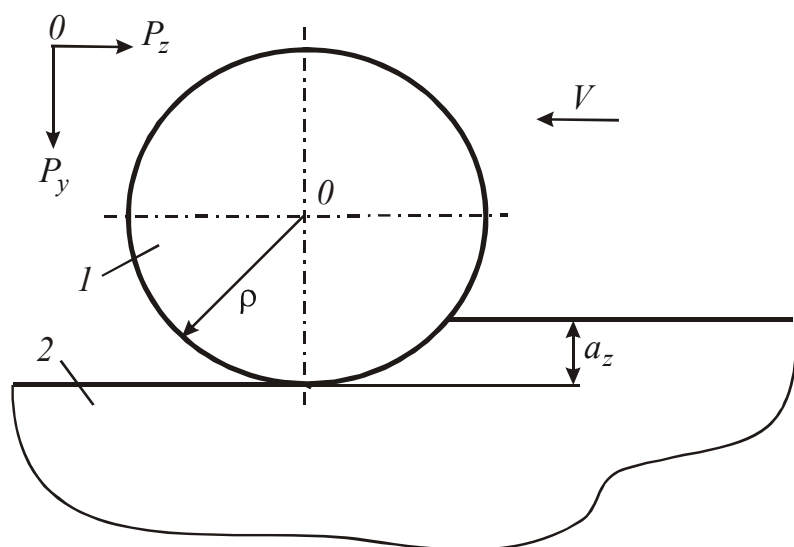


Рис. 2.21. Расчетная схема параметров микрорезания единичным зерном: 1 – зерно; 2 – обрабатываемый материал.

Для анализа влияния отношения $K_{рез} / \sigma$ на величину y рассмотрим полученную нами в работе [124] аналитическую зависимость для определения отношения $K_{рез} / \sigma$. Данная зависимость получена на основе расчетной схемы микрорезания единичным зерном (представленным в форме

диска), рис. 2.21:

$$\frac{K_{рез}}{\sigma} = \frac{1}{3} \cdot \sqrt[3]{\frac{2}{HV^2 \cdot \tau_{сдв}} \cdot \left(\frac{a_z}{\rho}\right)^2}, \quad (2.72)$$

где HV , $\tau_{сдв}$ – соответственно твердость (по Виккерсу) и предел прочности на сдвиг обрабатываемого металла, Н/м²; a_z – толщина среза при абразивной обработке, м; ρ – радиус округления режущей кромки инструмента, м.

В зависимость (2.72) входит известная величина a_z / ρ , определяющая условия перехода от упруго-пластического деформирования обрабатываемого металла к процессу резания. Процесс стружкообразования (процесс резания) начинается при $a_z / \rho \geq 0,04$ (по данным проф. Богомолова Н.И.). При меньших значениях a_z / ρ происходит лишь упруго-пластическое деформирование обрабатываемого металла без образования стружки.

Первоначально рассмотрим процесс выхаживания, реализуемый при радиальном точении (рис. 2.2). Выразим производительность обработки Q в виде $Q = a \cdot b \cdot V$, где $a = a_z$ – толщина среза, м; b – ширина среза, м; V – скорость резания, м/с. Тогда зависимость (2.20), с учетом зависимости (2.72), примет вид

$$\frac{\tau}{\pi \cdot D_{дет} \cdot b} \cdot Q + \frac{3}{c \cdot V} \cdot \sqrt[3]{HV^2 \cdot \tau_{сдв} (\rho \cdot b \cdot V)^2} \cdot Q^{\frac{1}{3}} - \Pi = 0. \quad (2.73)$$

В результате пришли к трансцендентному уравнению, относительно неизвестной величины Q . Решить данное уравнение можно лишь численным методом, задавая вполне конкретные значения всех входящих в уравнение величин и подбором определяя искомое значение Q . Однако, таким образом можно получить частные решения. Для того, чтобы получить общее решение, разрешим уравнение (2.73) относительно времени обработки τ :

$$\tau = \frac{1}{Q^{\frac{2}{3}}} \cdot \left[\frac{\pi \cdot D_{дет} \cdot b \cdot \Pi}{Q^{\frac{1}{3}}} - \frac{3}{c \cdot V} \cdot \sqrt[3]{HV^2 \tau_{сдв} \cdot (\rho \cdot b \cdot V)^2} \right].$$

В результате пришли к аналитической зависимости, связывающей между собой две переменные величины τ и Q . Нетрудно видеть, что с увеличением производительности обработки Q время обработ-

ки τ непрерывно уменьшается, рис. 2.22,а. Из этого можно сделать вывод: с увеличением времени обработки τ при выхаживании (т.е. с течением времени обработки) производительность обработки Q уменьшается. Следовательно, уменьшается и толщина среза $a = \frac{Q}{b \cdot V}$,

рис. 2.22,б.

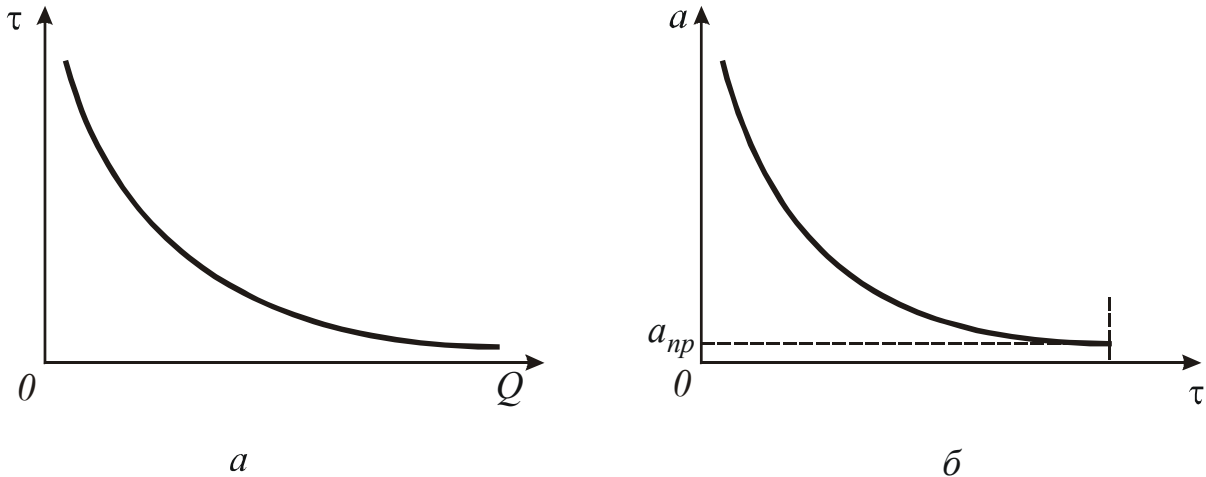


Рис. 2.22. Зависимости τ от Q (а) и a от τ (б).

Однако, как отмечалось ранее, существуют предельные значения отношения $a_z / \rho \geq 0,04$, ниже которых процесс резания (стружкообразования) неосуществим. Следовательно, должны существовать предельные значения толщины среза a_{np} (для заданных значений радиуса округления режущей кромки инструмента ρ), т.е. $a_{np} = 4 \cdot \rho$.

Учитывая важность данных результатов, получим аналитическое решение уравнения (2.73), принимая с определенными допущениями во втором слагаемом вместо Q^3 величину Q^2 . В результате получено квадратное уравнение:

$$M \cdot Q + N \cdot Q^2 - \Pi = 0$$

или

$$x^2 + \frac{N}{M} \cdot x - \frac{\Pi}{M} = 0, \quad (2.74)$$

где $x^2 = Q$; $M = \frac{\tau}{\pi \cdot D_{дет} \cdot b}$; $N = \frac{3}{c \cdot V} \cdot \sqrt[3]{HV^2 \cdot \tau_{сдв} \cdot (\rho \cdot b \cdot V)^2}$.

Его решение:

$$Q = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{N}{2 \cdot \Pi} + \sqrt{\frac{N^2}{4 \cdot \Pi^2} + \frac{M}{\Pi}}\right)}}. \quad (2.75)$$

С увеличением времени обработки τ (увеличением параметра M) производительность обработки Q уменьшается. Уменьшаются также толщина среза $a = \frac{Q}{b \cdot V}$, отношения a / ρ и $K_{рез} / \sigma$. При этом толщина среза a и отношение $K_{рез} / \sigma$ описываются зависимостями

$$a = \frac{1}{b \cdot V \cdot \sqrt{\left(\frac{N}{2 \cdot \Pi} + \sqrt{\frac{N^2}{4 \cdot \Pi^2} + \frac{M}{\Pi}}\right)}}, \quad (2.76)$$

$$\frac{K_{рез}}{\sigma} = \frac{1}{3} \cdot \sqrt[3]{\frac{2}{HV^2 \cdot \tau_{сдв}} \cdot \frac{1}{b^2 \cdot V^2 \cdot \rho^2 \left(\frac{N}{2 \cdot \Pi} + \sqrt{\frac{N^2}{4 \cdot \Pi^2} + \frac{M}{\Pi}}\right)}}. \quad (2.77)$$

Если подставить зависимость (2.77) в зависимость (2.21), то видим, что с течением времени обработки τ величина упругого перемещения y уменьшается. Следовательно, характер изменения отношения $K_{рез} / \sigma$ с течением времени обработки τ не вносит принципиальных изменений в закономерности изменения величины y . Вместе с тем, с уменьшением толщины среза a уменьшается отношение a / ρ . При уменьшении a / ρ до значения 0,04, процесс резания прекратится, что не позволит выполнить условие $y \rightarrow 0$, согласно зависимости (2.21). Из этого следует, что основным препятствием достижения высокой точности обработки является уменьшение отношения a / ρ ниже предельного значения, при котором процесс резания прекращается и сьем металла не происходит.

Поэтому важнейшим условием повышения точности и производительности обработки необходимо рассматривать увеличение отношения a / ρ . Так как толщина среза a с течением времени обработки непрерывно уменьшается, увеличить отношение a / ρ можно путем уменьшения радиуса округления режущей кромки инструмента ρ . Для этого необходимо применять инструментальные материалы, обеспечивающие высокую остроту режущей кромки и характеризу-

ющиеся высокой износостойкостью. В первую очередь, широко применяемые на практике, синтетические сверхтвердые материалы (синтетические алмазы и т.д.).

В процессе обработки необходимо, чтобы выполнялось условие $a / \rho \geq 0,04$ при уменьшении величины упругого перемещения y до значения предельной толщины среза, равного $a_{np} = 0,04 \cdot \rho$ (т.е. на протяжении всего времени обработки). Поэтому установим время обработки τ , за которое величина упругого перемещения y уменьшится до значения предельной толщины среза $a_{np} = 0,04 \cdot \rho$. Для этого в зависимость (2.21) подставим зависимость (2.72) с учетом $y = a_{np} = a$ и $a_{np} = 0,04 \cdot \rho$. Тогда

$$\tau = \frac{2 \cdot \pi \cdot D_{дет} \cdot b}{c \cdot V} \cdot \sqrt[3]{HV^2 \cdot \tau_{сдв}} \cdot \left(\frac{\Pi}{a} - 1 \right) \quad (2.78)$$

или

$$\tau = \frac{2 \cdot \pi \cdot D_{дет} \cdot b}{c \cdot V} \cdot \sqrt[3]{HV^2 \cdot \tau_{сдв}} \cdot \left(\frac{\Pi}{0,04 \cdot \rho} - 1 \right). \quad (2.79)$$

Из приведенных зависимостей следует, что время обработки τ тем меньше, чем меньше параметры $D_{дет}$, b , HV , $\tau_{сдв}$, Π и больше параметры c , V и a (или ρ). За данное время τ , при выполнении условия $\frac{a}{\rho} = \frac{y}{\rho} \geq 0,04$, величину упругого перемещения y можно уменьшить до значения $y = 0,04 \cdot \rho$.

Если в качестве радиуса округления режущей кромки инструмента ρ рассматривать радиус абразивного или алмазного режущего зерна R при абразивной или алмазно-абразивной обработке, то по формуле $y = 0,04 \cdot R$ можно рассчитать величину y в зависимости от зернистости $\bar{X} = 2 \cdot R$ абразивного или алмазного порошка. В табл. 2.2 приведены расчетные значения величины y .

Таблица 2.2

Расчетные значения величины y

\bar{X} , мкм	5	10	20	40	80
y , мкм	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6

Из зависимостей (2.76) и (2.79) следует, что с течением времени обработки τ величины a и y непрерывно уменьшаются, однако, с разной интенсивностью. Так, интенсивность уменьшения величины

y выше интенсивности уменьшения толщины среза a . Этим и объясняется возможность уменьшения величины y в процессе обработки вплоть до нуля.

По физической сущности параметр a при абразивной обработке определяет максимальную высоту микронеровностей на обрабатываемой поверхности или параметр шероховатости обработки R_{max} . Из этого следует, что с течением времени обработки параметр R_{max} должен уменьшаться, причем с меньшей интенсивностью, чем величина упругого перемещения y . Это хорошо согласуется с многочисленными экспериментальными данными, согласно которым параметры шероховатости обработки R_{max} и R_a с течением времени обработки уменьшаются, однако не достаточно интенсивно. Например, установлено, что в процессе выхаживания (при шлифовании) происходит довольно интенсивный съем неударенного металла (уменьшается величина y) во времени, тогда как параметр шероховатости обработки R_{max} уменьшается не существенно, а через определенное время обработки становится практически постоянным.

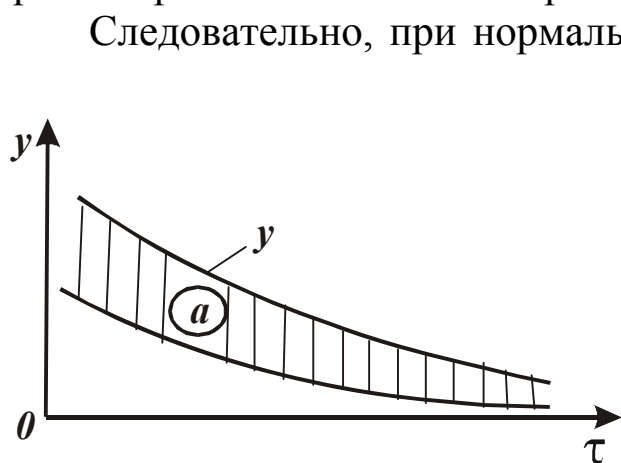


Рис. 2.23. Зависимость y от τ .

Следовательно, при нормальном протекании процесса обработки величина y стремится принять значение, равное толщине среза a , что равносильно параметру шероховатости обработки R_{max} , т.е. по сути, процесс выхаживания должен обеспечить равенство значений параметров y и R_{max} . Если процесс резания (по причине невыполнения условия $a_z / \rho \geq 0,04$) прекратится раньше, то справедливо неравенство $y > R_{max}$.

На рис. 2.23 показан характер изменения параметров y и $a = R_{max}$ с течением времени обработки. Заштрихованным на рис. 2.23 показана величина a .

Таким образом, установлено, что в конечном итоге величина упругого перемещения y и параметр шероховатости обработки R_{max} определяются из условия $a_z / \rho = 0,04$, рассматривая $a = R_{max} = y$. Уменьшить значение $a = R_{max} = y$ можно двумя путями: уменьшением радиуса округления режущей кромки ρ и предельного значения

a_z / ρ , при котором возможен процесс стружкообразования (процесс резания), рис. 2.24.

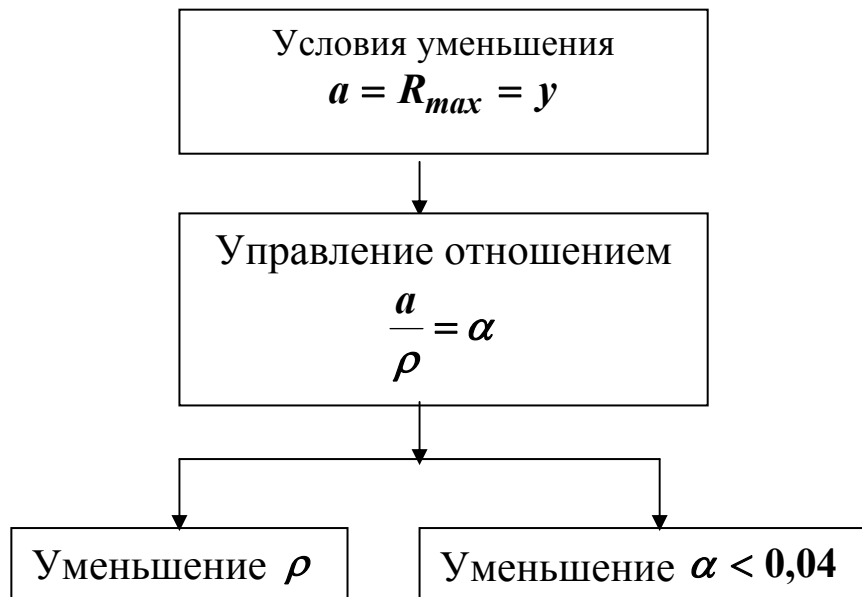


Рис. 2.24. Условия уменьшения $a = R_{max} = y$.

В первом случае необходимо использовать методы, обеспечивающие непрерывное микроразрушение режущих кромок абразивных или алмазных зерен в процессе обработки, исключая затупление зерен. Во втором случае необходимо использовать методы обработки, позволяющие уменьшить предельное значение a_z / ρ , при котором возможен процесс резания, т.е. методы обработки, расширяющие границы осуществления процесса резания.

2.1.3.1.2. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИЛОВОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ НА ТОЧНОСТЬ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ОБРАБОТКИ НА ЭТАПЕ ВЫХАЖИВАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

Выше приведено общее решение, справедливое для лезвийной и абразивной обработки. В данном решении в качестве параметра a для абразивной обработки рассматривалась средняя толщина среза. При шлифовании принято оперировать с максимальной толщиной среза. Поэтому уточним данное решение.

В качестве параметра a будем рассматривать максимальную толщину среза $a_z = a$ при шлифовании, которая описывается зависимостью:

$$a_z = \frac{315 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{t \cdot \left(\frac{1}{R_{кр}} + \frac{1}{R_{дет}} \right)}}{m \cdot V_{кр} \cdot \rho^2}, \quad (2.80)$$

где \bar{X} и m – зернистость и объемная концентрация зерен в алмазном круге; $V_{дет}$ – скорость детали, м/с; t – глубина шлифования, м; $R_{кр}$, $R_{дет}$ – радиусы круга и детали, м; ρ – радиус округления вершины режущего зерна, м.

Подставляя (2.80) в зависимость (2.72), имеем:

$$\frac{K_{рез}}{\sigma} = \frac{\bar{X}^2}{3 \cdot \rho^2} \cdot \sqrt[3]{\frac{2}{HV^2 \cdot \tau_{сдв}} \cdot \left[\frac{315 \cdot \pi \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{t \cdot \left(\frac{1}{R_{кр}} + \frac{1}{R_{дет}} \right)}}{m \cdot V_{кр}} \right]^2}. \quad (2.81)$$

Наибольшее влияние на отношение $K_{рез} / \sigma$ (рассматривая при шлифовании отношение $K_{ш} / \sigma$, где $K_{ш} = K_{рез}$ – коэффициент шлифования) оказывают параметры ρ и \bar{X} . По мере затупления зерен круга их радиусы ρ увеличиваются, что приводит к уменьшению отношения $K_{ш} / \sigma$. Следовательно, основным условием увеличения отношения $K_{ш} / \sigma$ и повышения эффективности шлифования необходимо рассматривать обеспечение высокой остроты режущих зерен круга. Исходя из зависимости (2.81), увеличением зернистости круга \bar{X} также можно добиться существенного увеличения отношения $K_{ш} / \sigma$. Однако, как известно, с увеличением \bar{X} увеличивается радиус ρ , что препятствует росту отношения $K_{ш} / \sigma$.

В рассматриваемом процессе выхаживания при шлифовании поперечная подача равна нулю. Съем металла происходит за счет упругих перемещений в технологической системе. Очевидно, фактическая глубина шлифования t с течением времени будет уменьшаться (вплоть до нуля) и, исходя из зависимости (2.81), будет приводить к уменьшению

отношения $K_{рез} / \sigma$ по закону $t^{\frac{1}{3}}$. Как видим, интенсивность уменьшения $K_{рез} / \sigma$ не столь существенна. Это не внесет принципиальных изменений в зависимость (2.21): величина упругого перемещения y с

течением времени обработки τ будет непрерывно уменьшаться. Однако, с меньшей интенсивностью, чем в случае $K_{рез} / \sigma = const$. Для обеспечения данной зависимости необходимо, чтобы знаменатель зависимости (2.21) был значительно больше единицы.

Произведем количественную оценку влияния изменения соотношения $K_{рез} / \sigma$ на показатели Q и y .

Для этого в зависимости (2.81) произведение параметров режима шлифования $V_{дет} \cdot t$ выразим через производительность обработки $Q = B \cdot V_{дет} \cdot t$. Если подставить преобразованную зависимость (2.81) в (2.21), то приходим к уравнению относительно неизвестной величины Q :

$$M \cdot Q + N \cdot Q^{\frac{2}{3}} - \Pi = 0, \quad (2.82)$$

где $M = \frac{\tau}{\pi \cdot D_{дет} \cdot B}$,

$$N = \frac{3 \cdot \rho^2}{c \cdot V_{кр} \cdot \bar{X}^2} \cdot \sqrt[3]{\frac{HV^2 \cdot \tau_{сдв}}{2} \left[\frac{m \cdot V_{кр}}{315 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{V_{дет}}{B} \cdot \left(\frac{1}{R_{кр}} + \frac{1}{R_{дет}} \right)}} \right]^2}.$$

Данное уравнение может быть решено лишь численным методом. Для наглядности решения упростим уравнение (2.82), рассматривая его в виде квадратного уравнения:

$$M \cdot Q + N \cdot Q^{\frac{1}{2}} - \Pi = 0$$

или

$$x^2 + \frac{N}{M} \cdot x - \frac{\Pi}{M} = 0, \quad (2.83)$$

где $x^2 = Q$.

Решая квадратное уравнение, после несложных преобразований, имеем:

$$Q = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{N}{2 \cdot \Pi} + \sqrt{\frac{N^2}{4 \cdot \Pi} + \frac{M}{\Pi}} \right)}}. \quad (2.84)$$

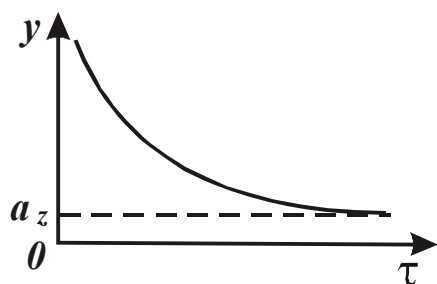


Рис. 2.25. Зависимость величины упругого перемещения y от времени обработки τ .

В итоге приходим к решению, аналогичному решению (2.75), графически показанном на рис. 2.25.

Из зависимости (2.84) следует, что увеличить производительность обработки Q можно увеличением величины снимаемого припуска Π и уменьшением параметров N и M . Уменьшение N предполагает уменьшение ρ , B , m и увеличение c , $V_{кр}$, $V_{дет}$, \bar{X} . Уменьшение N предполагает уменьшение времени обра-

ботки τ , т.е. с течением времени τ производительность обработки Q будет уменьшаться. Это согласуется с начальной зависимостью (2.20), рассматривая в ней отношение $K_{рез} / \sigma$ заданным. Однако, влияние времени обработки τ на производительность обработки Q в зависимости (2.75) значительно ниже, чем в зависимости (2.20). Следовательно, продолжительнее процесс устранения погрешности размера обрабатываемой детали. Чтобы усилить влияние времени обработки τ на производительность Q , необходимо в зависимости (2.84) существенно уменьшить параметр N , а параметр M , наоборот, увеличить.

Уменьшение параметра N связано в первую очередь с уменьшением радиуса округления вершины режущего зерна ρ и увеличением зернистости круга \bar{X} . Увеличить параметр M можно главным образом за счет уменьшения ширины шлифования B , так как диаметр детали $D_{дет}$ — заданная величина.

Если в зависимости (2.84) слагаемое $\frac{N^2}{4 \cdot \Pi^2}$ будет больше слагаемого $\frac{M}{\Pi}$, то влияние времени обработки τ на производительность обработки будет несущественно и процесс исправления погрешности обработки «растянется» во времени. Это подтверждается практикой шлифования, в особенности при резании затупленным инструментом, когда в процессе длительного выхаживания не удается добиться заметного уменьшения величины упругого перемещения y .

Данная закономерность имеет место и при шлифовании алмазным инструментом. В этом случае определяющим фактором является

существенное увеличение условного напряжения резания σ за счет увеличения трения связки круга (в особенности металлической связки) с обрабатываемым материалом. В результате отношение $K_{ин} / \sigma$ резко уменьшается и знаменатель зависимости (2.21) мало отличается от единицы, что не позволяет практически реализовать процесс выхаживания.

2.1.3.1.3. РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ШЕРОХОВАТОСТИ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ЭТАПЕ ВЫХАЖИВАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

Аналитически определим шероховатость обработанной поверхности на этапе выхаживания. Как показано выше, при обработке без поперечной подачи (т.е. при выхаживании) уравнение, описывающее баланс перемещений в технологической системе, имеет вид

$$y + V_{\phi} \cdot \tau = \Pi, \quad (2.85)$$

где V_{ϕ} – линейная скорость съема металла, м/с; Π – величина снимаемого припуска при выхаживании, м.

Величина упругого перемещения y определяется радиальной составляющей силы резания $P_y = c \cdot y$. Предположим, что при абразивной обработке в контакте с обрабатываемым материалом находится n_0 зерен. Если принять, что режущие зерна выступают над уровнем связки абразивного или алмазно-абразивного инструмента на одинаковую высоту и имеют конусообразную форму режущей части с углом при вершине $2 \cdot \gamma$, то для вдавливания режущих зерен в обрабатываемый металл необходимо приложить радиальную силу P_y , равную

$$P_y = \pi \cdot \operatorname{tg}^2 \gamma \cdot R_{max}^2 \cdot n_0 \cdot HV, \quad (2.86)$$

где R_{max} – глубина вдавливания режущего зерна в обрабатываемый металл (условно равна максимальной высоте микронеровностей обработанной поверхности – параметру шероховатости обработки R_{max}), м; $n_0 = S \cdot k$; S – площадь контакта инструмента с обрабатываемой деталью, м²; k – поверхностная концентрация зерен инструмента, шт/м².

Параметр шероховатости обработки R_{max} при шлифовании образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга со ско-

ростью $V'_{дет}$, определяется зависимостью

$$R_{max} = \sqrt{\frac{V'_{дет}}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{кр}}}, \quad (2.87)$$

где $V_{кр}$ - скорость круга, м/с.

Параметр $V'_{дет}$ равен V_{ϕ} . Разрешим зависимость (2.87) относительно скорости $V'_{дет} = V_{\phi}$ и подставим полученную зависимость в уравнение (2.85). Подставив в уравнение (2.85) также зависимость (2.86), имеем

$$R_{max} = \sqrt{\frac{\Pi \cdot c}{\operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot (\pi \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot S \cdot HV + 2 \cdot V_{кр} \cdot c \cdot \tau)}}. \quad (2.88)$$

Как видим, с течением времени обработки τ параметр шероховатости R_{max} уменьшается, что согласуется с предыдущим решением,

графически показанным на рис. 2.26.

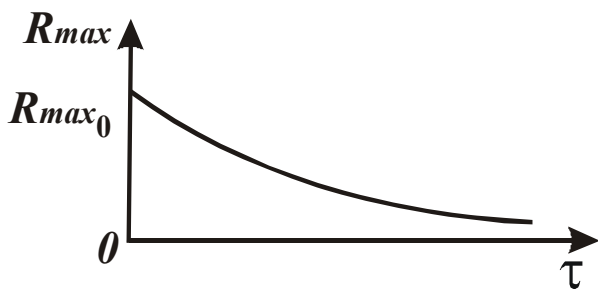


Рис. 2.26. Зависимость параметра шероховатости обработки R_{max} от времени обработки τ .

Более существенное влияние на параметр R_{max} оказывают параметры Π, γ, k . Важнейшим условием уменьшения параметра R_{max} следует рассматривать увеличение поверхностной концентрации зерен k , т.к. увеличение угла γ ведет к

уменьшению отношения a_z / ρ , увеличению силовой напряженности и ухудшению процесса резания.

Для сравнения определим параметр шероховатости обработки R_{max} при шлифовании по упругой схеме с фиксированным радиальным усилием P_y , определяемым зависимостью (2.86)

$$R_{max} = \sqrt{\frac{c \cdot y}{\pi \cdot \operatorname{tg}^2 \gamma \cdot HV \cdot k \cdot S}}. \quad (2.89)$$

При условии $\tau = 0$ зависимость (2.88) принимает вид зависимости (2.89), рассматривая при этом $y = \Pi$. Это означает, что обработка по упругой схеме с фиксированным радиальным усилием P_y приводит к большим значениям параметра шероховатости обработки R_{max} , чем обработка по упругой схеме с начальным натягом в технологиче-

ской системе. Значения R_{max} равны для двух рассматриваемых схем лишь в начальный момент обработки (при условии $\tau = 0$). Следовательно, с точки зрения уменьшения параметра шероховатости R_{max} эффективно обработку вести по упругой схеме с начальным натягом в технологической системе, т.е. реализуя процесс выхаживания.

2.1.3.2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ ДЛЯ УСТАНОВИВШИХСЯ ПРОЦЕССОВ РЕЗАНИЯ И ШЛИФОВАНИЯ

2.1.3.2.1. УСЛОВИЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ И ТОЧЕНИИ

Исходя из зависимости (2.21), на величину y наибольшее влияние оказывает снимаемый припуск Π , равный величине y_0 (в соответствии с зависимостями (2.18) и (2.33)). Следовательно, уменьшить величину y , а главным образом время процесса выхаживания, можно в первую очередь за счет уменьшения величины y_0 . Преобразуем зависимость (2.33), рассматривая при лезвийной обработке $S_0 = Q_0 / V = a \cdot b$ (где S_0 – номинальная площадь поперечного сечения среза; a и b – соответственно толщина и ширина среза) и учитывая зависимость (2.72):

$$y_0 = \frac{R \cdot b}{c} \cdot (4 \cdot HV)^{0,67} \cdot (\alpha \cdot \tau_{сдв})^{0,33}, \quad (2.90)$$

где $\alpha = a / R$; a – толщина среза, м; R – радиус округления вершины режущего инструмента, м; b – ширина резания, м; c – приведенная жесткость технологической системы, Н/м; HV , $\tau_{сдв}$ – соответственно твердость и предел прочности на сдвиг обрабатываемого материала, Н/м².

Условие стружкообразования при резании выполняется при значениях $\alpha > 0,04$.

Исходя из зависимости (2.90), основной путь уменьшения величины y_0 (повышения точности обработки) – это уменьшение радиуса R , осуществляя переход от лезвийной к абразивной обработке, рис. 2.27. Кроме того, уменьшить y_0 можно уменьшением ширины резания b и соотношения $\alpha = a / R$ (толщины среза a) до минимально

возможного значения, а также увеличением $c \rightarrow \infty$ (в том числе за счет применения методов пластического деформирования металлов, например, при обработке высокоточных отверстий).

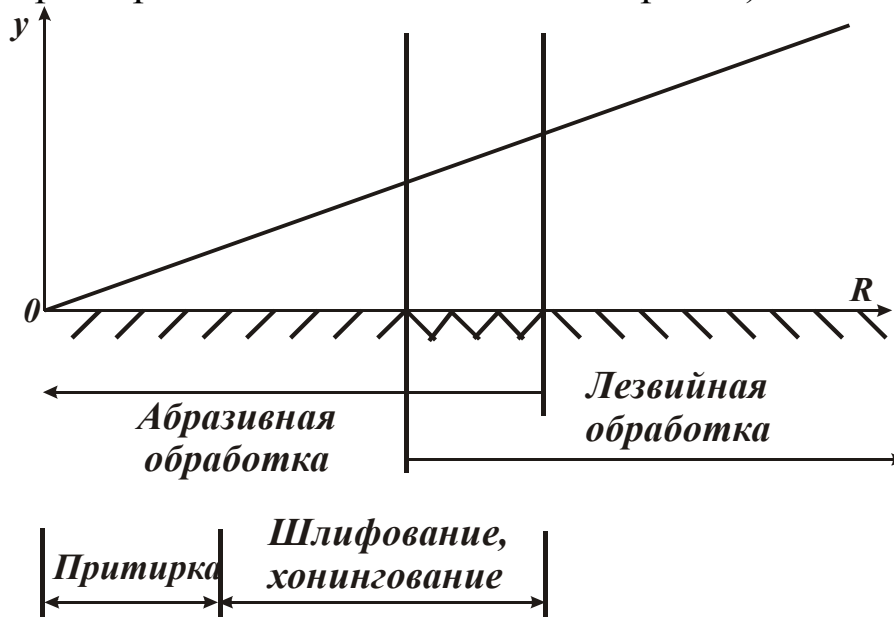


Рис. 2.27. Характер изменения величины упругого перемещения y от R при условии $\alpha = \text{const}$.

Проведем анализ зависимости для определения упругого перемещения в технологической системе при продольном (тонком) точении (рис. 2.28):

$$y_0 = \frac{t \cdot R}{c \cdot \cos \varphi} \cdot (4 \cdot HV)^{0,67} \cdot (\alpha \cdot \tau_{сдв})^{0,33}, \quad (2.91)$$

где t – глубина резания, м; φ – угол резца в плане; $a = S_0 \cdot \cos \varphi$; S_0 – продольная подача на один оборот детали, м/об.

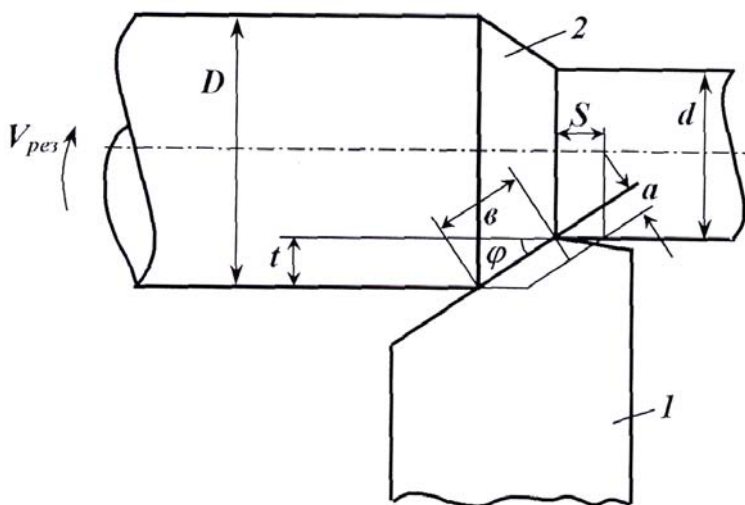


Рис. 2.28. Расчетная схема продольного точения: 1- резец, 2 – деталь.

Исходя из зависимости (2.91), уменьшить величину y_0 (повысить точность обработки) можно уменьшением параметров t , R и увеличением c . Однако уменьшение глубины резания t ведет к снижению производительности обработки. Следовательно, эффективно увеличивать жесткость

c и уменьшать радиус R . Так как величина c ограничена, основным путем уменьшения y следует рассматривать уменьшение R , т.е. необходимо обеспечить высокую остроту режущей кромки инструмента. Это достигается применением как лезвийных, так и абразивных инструментов. Большими возможностями в этом направлении располагают алмазно-абразивные инструменты благодаря высокой остроте режущих кромок алмазных зерен. При этом важно обеспечить своевременное удаление с рабочей поверхности алмазного круга затупившихся зерен, имеющих увеличенное значение радиуса R .

Приведенная, как пример, зависимость (2.91) открывает новые возможности анализа и выбора оптимальных способов финишной обработки. Например, по изменению радиуса R можно проанализировать с единых позиций все известные способы лезвийной и абразивной обработки с точки зрения обеспечения наибольшей точности и производительности обработки.

При этом важное значение имеет управление коэффициентом α путем установления правильного соотношения между толщиной среза a и радиусом округления режущей кромки инструмента R .

Как известно, с точки зрения улучшения процесса стружкообразования при резании коэффициент α необходимо увеличивать за счет увеличения толщины среза a и уменьшения радиуса R . Исходя из зависимости (2.91), с целью уменьшения упругого перемещения y_0 в технологической системе коэффициент α следует уменьшать до минимально возможной величины, при которой возможно стружкообразование. Например, экспериментально установлено, что процесс стружкообразования при микрорезании единичным зерном наиболее интенсивно протекает при значениях коэффициента $\alpha > 0,35$. Как отмечалось выше, при $\alpha < 0,04$ процесс стружкообразования прекращается, т.е. обрабатываемый металл подвергается лишь упругому и упруго-пластическому деформированию без отделения стружки.

Таким образом, существует оптимальное (с точки зрения обеспечения высокой точности обработки) значение коэффициента α . Однако, данный коэффициент входит в зависимость (2.91) с относительно небольшой степенью – 0,33. Поэтому, решать задачу уменьшения величины упругого перемещения y_0 необходимо, прежде всего, за счет изменения параметров, которые входят в зависимость (2.91) с большей степенью, – это параметры t , R , c . Как отмечалось выше, более эффективно – за счет уменьшения радиуса R . Однако, при этом

следует иметь в виду то, что с уменьшением R увеличивается коэффициент $\alpha = a / R$. Поэтому, для поддержания на заданном уровне коэффициента α необходимо уменьшать толщину среза a и соответственно продольную подачу S_0 и производительность обработки.

Из этого вытекает, что между параметрами, входящими в зависимость (2.91), существует сложная связь. С одной стороны, радиус R входит в числитель зависимости, а с другой стороны, в знаменатель зависимости, но с меньшей степенью – 0,33. В итоге радиус R входит в зависимость со степенью 0,67 и его необходимо уменьшать с целью уменьшения величины y_0 . Коэффициент α при этом будет увеличиваться, а производительность обработки останется неизменной.

При таком подходе не будет нарушаться условие стружкообразования $\alpha > 0,04$, так как коэффициент α будет увеличиваться с уменьшением R , усиливая интенсивность процесса стружкообразования.

Предложенный теоретический подход принципиально отличается от известных и описанных в научно-технической литературе, которые не учитывают коэффициент α в расчетных зависимостях. Из-за неучета коэффициента α в расчетных зависимостях рекомендуемые условия резания могут находиться в области $\alpha < 0,04$, в которой процесс резания (стружкообразования) неосуществим. Учет коэффициента α при расчетах, по сути, означает выполнение физического закона сохранения энергии.

Анализируя зависимость (2.91) следует обратить внимание на то, что параметры HV и $\tau_{сдв}$, определяющие твердость и прочность обрабатываемого материала, не в одинаковой степени влияют на величину упругого перемещения y_0 . Твердость HV в большей степени оказывает влияние на y_0 , чем предел прочности обрабатываемого материала на сдвиг $\tau_{сдв}$. Это означает, что упругие перемещения и точность обработки, в первую очередь определяет твердость материала, т.е. чем тверже материал, тем труднее добиться требуемой точности обработки.

Из зависимости (2.91) можно сделать еще один важный вывод. Уменьшая α до значений, ниже 0,04, мы переходим в область пластического деформирования металла (без отделения стружки), что приводит к уменьшению величины y_0 . Уменьшение коэффициента α следует обеспечить за счет уменьшения толщины слоя деформируемого металла a .

Соотношение $t / \cos \varphi$ в зависимости (2.91) равно ширине обработки. Чем меньше эта величина, тем меньше y_0 . В этом плане эффективна, например, обработка выглаживателем и другими инструментами для пластического деформирования обрабатываемого материала, обеспечивающими уменьшение ширины обработки. Данный процесс обработки может быть осуществлен с минимальными толщинами a , что предполагает выход практически на нулевые значения y_0 . Радиус R при этом не играет той определяющей роли в процессе, как при резании. Радиус R должен принимать значения, при которых $\alpha = \frac{a}{R} \rightarrow 0$ (за счет уменьшения толщины a).

Из этого вытекает эффективность применения различных инструментов для обработки металлов пластическим деформированием, в особенности обработки поверхностей отверстий, когда контактная жесткость c (входящая в зависимость (2.91)) неограниченно увеличивается $c \rightarrow \infty$ и приводит к выполнению условия $y_0 \rightarrow 0$.

Рассмотрим связь между производительностью обработки Q и величиной y_0 (при точении), исходя из зависимости

$$Q = (y_0 \cdot c)^3 \cdot \left(\frac{\cos \varphi}{4 \cdot t \cdot R \cdot HV} \right)^2 \cdot \frac{V_{рез}}{\tau_{сдв}}, \quad (2.92)$$

где $Q = a \cdot b \cdot V_{рез}$, м³/с; $V_{рез}$ – скорость резания, м/с; t – глубина резания, м; φ – угол резца в плане.

На рис. 2.29 приведена обобщенная структурная схема условий повышения производительности обработки Q .

Исходя из зависимости (2.92), наибольшее влияние на производительность обработки Q оказывают величины y_0 и c , входящие в третьей степени. Следовательно, уменьшение y_0 (т.е. повышение точности обработки) существенно снижает производительность обработки Q и требует применения технологического оборудования повышенной жесткости. Если возможности увеличения жесткости системы c ограничены, необходимо уменьшить параметры t , R и φ , которые входят в зависимость (2.92) во второй степени. Уменьшение R предполагает применение лезвийных инструментов из высокотвердых материалов, например, синтетических сверхтвердых материалов: синтетических алмазов, кубического нитрида бора и т.д. При этом инструмент должен обладать высокой стойкостью, т.е. длительное

время сохранять высокую остроту режущей кромки и производить резание с весьма малыми значениями R .

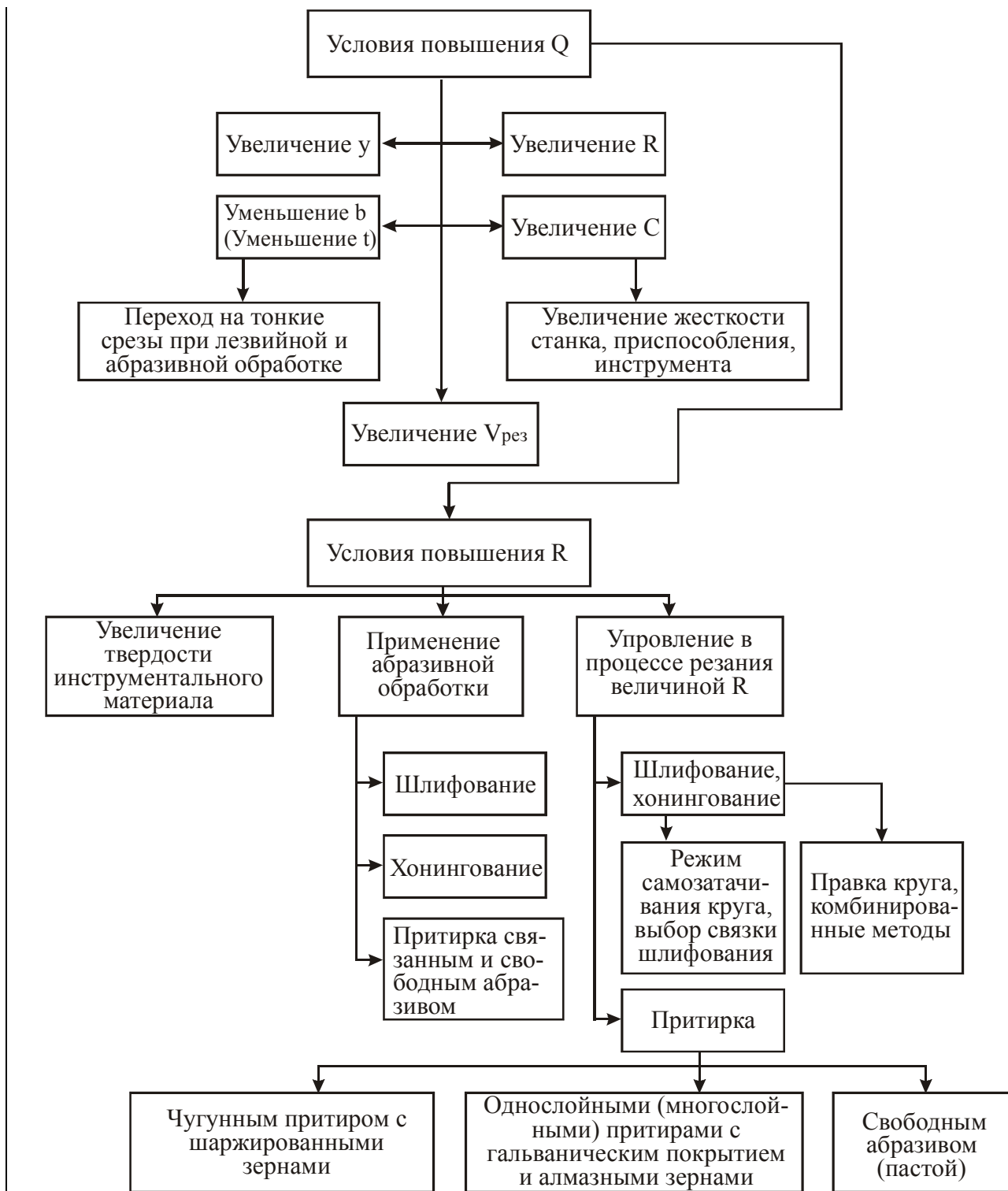


Рис. 2.29. Обобщенная структурная схема условий повышения производительности обработки Q .

Наибольшего эффекта от уменьшения R можно добиться при абразивной и главным образом алмазно-абразивной обработке, применяя мелкозернистые инструменты и процессы алмазного шлифова-

ния, хонингования, притирки и т.д. Например, для поддержания в процессе шлифования высокой остроты алмазного круга эффективно использовать бесконтактные электрофизикохимические методы правки круга на металлической связке или комбинированные процессы алмазного шлифования с введением в зону резания дополнительной электрической энергии в форме электроимпульсных разрядов или электрохимического растворения металлической связки и продуктов обработки.

Чрезвычайно большие возможности процессов шлифования в плане уменьшения величины R и соответственно обеспечения высокой производительности обработки Q при заданном значении y , предопределили их широкое практическое использование. В настоящее время существуют десятки различных кинематических схем шлифования, применяемых для обработки различной степени сложности поверхностей деталей и агрегатов. Для выявления их потенциальных возможностей важно с единых позиций на основе создания математических моделей провести сравнительную оценку, принимая в качестве целевой функции производительность, основного технологического ограничения – точность обработки.

Из зависимости (2.92) следует чрезвычайно большое влияние характеристик обрабатываемого материала на производительность обработки Q . С увеличением прочности $\tau_{сдв}$ и особенно твердости HV материала производительность обработки существенно уменьшается. Этим объясняются сложности финишной обработки деталей из высокотвердых материалов.

С увеличением скорости резания $V_{рез}$ при точении прямо пропорционально увеличивается производительность обработки Q . Однако рост $V_{рез}$ ограничен действием возникающих при резании тепловых процессов, которые приводят, во-первых, к ухудшению качества обрабатываемых поверхностей, во-вторых, к потере режущих свойств инструмента, его износу, затуплению и увеличению R , что согласно зависимости (2.92), снижает производительность обработки Q . Следовательно, уменьшение $V_{рез}$ требует применения инструментальных материалов, способных противостоять действию температурного фактора или обеспечить быстрый отвод тепла из зоны резания. К ним следует отнести синтетические сверхтвердые материалы. Уменьшить температуру резания можно также за счет использования эффективных смазочно-охлаждающих технологических сред.

Как видим, производительность обработки Q определяется механическими и тепловыми процессами, происходящими в зоне резания, обобщенно выражаемыми связью параметров $V_{рез}$ и R . Чем больше $V_{рез}$, тем больше (очевидно) параметр R , что в конечном итоге может привести к уменьшению производительности обработки Q . Исходя из этого, можно предположить о существовании оптимальных соотношений между параметрами $V_{рез}$ и R , при которых производительность обработки Q достигает максимального значения, т.е. поиск эффектов обработки необходимо производить на основе анализа соотношения параметров $V_{рез}$ и R , важного резерва интенсификации механической обработки. Для реализации предложенных путей повышения производительности обработки Q необходимо обеспечить условие стружкообразования при резании, т.е. заданное значение отношения $\alpha = a / R$, которое определяется из зависимости

$$\frac{a}{R} = \left(\frac{y_0 \cdot c \cdot \sin \varphi}{t \cdot R} \right)^3 \cdot \frac{1}{(4 \cdot HV)^2 \cdot \tau_{сдв}}. \quad (2.93)$$

На рис. 2.30 приведена структурная схема условий обеспечения заданного значения отношения a / R .

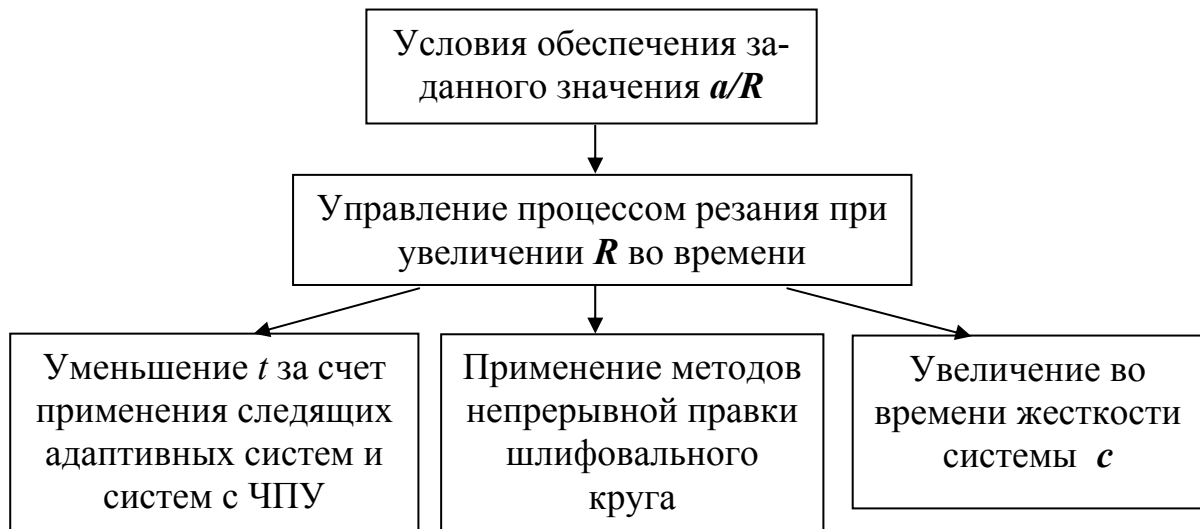


Рис. 2.30. Структурная схема условий обеспечения заданного значения отношения a / R .

Из зависимостей (2.92) и (2.93) следует одинаковый характер влияния параметров процесса на производительность обработки Q и отношение a / R , т.е. по сути, отношение a / R определяет производительность обработки. Большему значению a / R соответствует большее значение Q .

Проведенный теоретический анализ определяет основные пути решения задач повышения производительности и точности финишной обработки. Следуя предложенному научному подходу, появляется возможность вполне обоснованного выбора оптимальных способов и условий обработки сложных агрегатов авиационной техники, проведения научно обоснованной структурно-параметрической оптимизации обработки.

2.1.3.2.2. СРАВНЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ УПРУГОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ И ТОЧЕНИИ

На машиностроительных предприятиях при механической обработке деталей параметры точности формируются, как правило, на операциях шлифования. Наиболее распространенным методом шлифования является шлифование по жесткой схеме. В «идеале» при неограниченной жесткости технологической системы, этот метод может исключить погрешности обработки, связанные с упругими перемещениями в технологической системе.

Величина упругого перемещения y при шлифовании описывается зависимостями:

$$y = \frac{P_y}{c} = \frac{P_z}{c \cdot K_{ш}} = \frac{\sigma \cdot S_{сумм}}{c \cdot K_{ш}} = \frac{\sigma}{c \cdot K_{ш}} \cdot \frac{Q}{V_{кр}} = \frac{\sigma}{c \cdot K_{ш}} \cdot \frac{B \cdot V_{дет} \cdot (t - y)}{V_{кр}}, \quad (2.94)$$

где $K_{ш} = K_{рез}$ – коэффициент резания при шлифовании; $S_{сумм}$ – мгновенная суммарная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зернами круга, m^2 ; Q – производительность обработки, m^3/c ; σ – условное напряжение резания, H/m^2 ; B – ширина шлифования, m ; $V_{кр}$, $V_{дет}$ – соответственно скорости круга и детали, m/c ; t – глубина шлифования, m .

В результате получено уравнение относительно неизвестной величины y . Разрешая его относительно величины y , имеем:

$$y = \frac{t}{\left(1 + \frac{c}{B} \cdot \frac{V_{кр}}{V_{дет}} \cdot \frac{K_{ш}}{\sigma}\right)}. \quad (2.95)$$

Как видим, при условии $c \rightarrow \infty$ величина y неограниченно уменьшается $y \rightarrow 0$. Уменьшить величину y также можно увеличени-

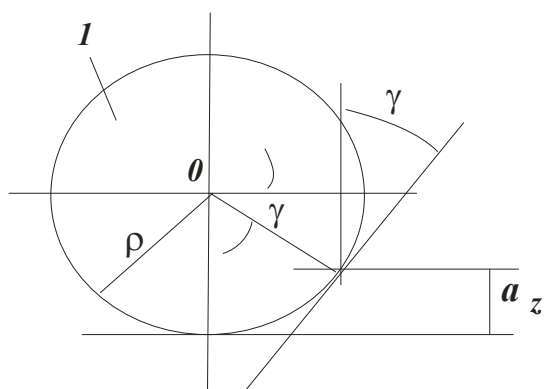


Рис. 2.31. Расчетная схема параметров процесса микрорезания единичным зерном (1).

ем соотношений c/B , $V_{кр}/V_{дет}$ и $K_{ш}/\sigma$. С физической точки зрения соотношение c/B определяет жесткость, приходящую на единицу ширины шлифования. Знаменатель зависимости (2.95) является передаточной функцией (раскрывающей физическую сущность «черного ящика») между параметрами y и t , рис. 2.31.

Разрешим зависимость (2.80) относительно соотношения $V_{кр}/V_{дет}$:

$$\frac{V_{кр}}{V_{дет}} = \frac{315 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot \sqrt{t \cdot \left(\frac{1}{R_{кр}} + \frac{1}{R_{дет}} \right)}}{m \cdot a_z \cdot \rho^2}. \quad (2.96)$$

Подставим зависимости (2.72) и (2.96) в зависимость (2.95):

$$y = \frac{t}{\left(1 + \frac{c}{B} \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho}{a_z}} \cdot \frac{105 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot \sqrt{t \cdot \left(\frac{1}{R_{кр}} + \frac{1}{R_{дет}} \right)}}{m \cdot \rho^3} \cdot \sqrt[3]{\frac{2}{HV^2 \cdot \tau_{сдв}}} \right)}. \quad (2.97)$$

Исходя из полученной зависимости, уменьшить величину y можно уменьшением известного отношения a_z/ρ , а также уменьшением параметров m , ρ , t и увеличением отношения c/B и зернистости круга \bar{X} .

Как известно (по данным проф. Богомолова Н.И.), процесс микрорезания единичным зерном осуществим при условии $\alpha = a_z/\rho > 0,04$. Поэтому соотношение a_z/ρ можно уменьшить до значения 0,04.

Если представить в первом приближении величину ρ в виде зависимости $\rho = 0,5 \cdot \bar{X}$, то окажется, что параметры ρ и \bar{X} , исходя из зависимости (2.97), не влияют на величину y . Однако, в результате износа зерна радиус округления его режущей части ρ может превы-

шать собственно радиус зерна $0,5 \cdot \bar{X}$. В этом случае, по мере затупления зерна (увеличения ρ) величина y будет увеличиваться. Следовательно, для уменьшения y необходимо регулировать степень затупления зерен – своевременно удалять их с рабочей поверхности круга путем выбора оптимальных связок круга или применением эффективных методов правки круга.

При шлифовании с заданной величиной $\alpha = a_z / \rho = 0,04$ необходимо регулировать соотношение $V_{кр} / V_{дет}$, которое описывается преобразованной зависимостью (2.96):

$$\frac{V_{кр}}{V_{дет}} = \frac{315 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot \sqrt{t \cdot \left(\frac{1}{R_{кр}} + \frac{1}{R_{дет}} \right)}}{m \cdot \rho^3 \cdot \alpha}. \quad (2.98)$$

Уменьшение α до значения 0,04 предполагает увеличение соотношения $V_{кр} / V_{дет}$, что может быть реализовано за счет увеличения $V_{кр}$ (применения высокоскоростного или сверх высокоскоростного шлифования) и за счет уменьшения $V_{дет}$. Однако, уменьшение $V_{дет}$ ведет к уменьшению производительности обработки. Поэтому более эффективно увеличивать соотношение $V_{кр} / V_{дет}$ за счет увеличения $V_{кр}$.

По мере затупления зерен круга (увеличения ρ), для выполнения условия $\alpha = 0,04$, соотношение $V_{кр} / V_{дет}$ необходимо уменьшать (т.е. уменьшать $V_{кр}$), что не всегда целесообразно. Гораздо эффективнее обеспечить поддержание в процессе шлифования минимально возможное значение ρ . Например, применяя в качестве абразивных материалов синтетические алмазы и другие сверхтвердые материалы, которые характеризуются высокой остротой режущих кромок. Уменьшение y за счет уменьшения концентрации зерен круга m , исходя из зависимости (2.97), также предполагает увеличение $V_{кр}$.

На первый взгляд может показаться, что соотношение $\alpha = a_z / \rho$ незначительно влияет на величину y по зависимости (2.97), так как входит с относительно небольшой степенью 0,3. Однако, существует дополнительная связь между α и y через соотношение $V_{кр} / V_{дет}$, описываемое зависимостью (2.98). Уменьшение α требует прямо

пропорционального увеличения $V_{кр} / V_{дет}$, т.е. между параметрами α и y существует более сложная и значимая связь.

Сравним величины упругого перемещения y при шлифовании и точении. В последнем случае величина y опишется:

$$y = \frac{P_y}{c} = \frac{\sigma \cdot S}{c \cdot K_{рез}} = \frac{\sigma}{c \cdot K_{рез}} \cdot B \cdot (a - y), \quad (2.99)$$

где $K_{рез} = P_z / P_y$ – коэффициент резания; S – площадь поперечного сечения среза, м²; B , a – соответственно ширина и толщина среза, м.

Разрешим зависимость (2.99) относительно величины y :

$$y = \frac{a}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{рез}}{\sigma \cdot B}\right)}. \quad (2.100)$$

Подставим в (2.100) зависимость (2.72), рассматривая $K_{ш} = K_{рез}$, $a_z = a$:

$$y = \frac{a}{\left[1 + \frac{c}{B} \cdot \frac{1}{3} \cdot \sqrt[3]{\frac{2}{HV^2 \cdot \tau_{сдв}} \cdot \left(\frac{a}{\rho}\right)^2}\right]}. \quad (2.101)$$

С учетом принятого обозначения $\alpha = a_z / \rho$, имеем:

$$y = \frac{\alpha \cdot \rho}{\left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{c}{B} \cdot \sqrt[3]{\frac{2 \cdot \alpha^2}{HV^2 \cdot \tau_{сдв}}}\right)}. \quad (2.102)$$

Уменьшить величину y можно уменьшением параметров α , ρ , B и увеличением c для заданных значений HV и $\tau_{сдв}$. Характер влияния указанных параметров на величину y такой же, как и при шлифовании, рассматривая зависимость (2.97). Сравним значения y для шлифовании и точения при одинаковой производительности обработки Q . Для этого представим зависимости (2.95) и (2.100) в виде:

$$y = \frac{Q}{B \cdot V_{кр} \cdot \left(1 + \frac{c}{B} \cdot \frac{V_{кр}}{V_{дет}} \cdot \frac{K_{ш}}{\sigma}\right)}, \quad (2.103)$$

$$y = \frac{Q}{B \cdot V_{рез} \left(1 + \frac{c}{B} \cdot \frac{K_{рез}}{\sigma}\right)}, \quad (2.104)$$

где $V_{рез}$ - скорость резания при точении, м/с.

Структурно зависимости (2.103) и (2.104) отличаются множителем $V_{кр}/V_{дет}$, входящим в зависимость (2.103). Поскольку $V_{кр} > V_{рез}$, а $V_{кр}/V_{дет} \gg 1$, то при заданных значениях производительности обработки Q и отношения $K_{ш}/\sigma$ (или отношения $K_{рез}/\sigma$) знаменатель зависимости (2.103) больше знаменателя зависимости (2.104). Следовательно, при шлифовании можно добиться меньших значений y . Однако, сделанный вывод справедлив для одинаковых значений $K_{ш}/\sigma$, определяемых зависимостью (2.72). Как известно, при точении соотношение a/ρ может быть больше, чем при шлифовании. Поэтому при шлифовании кругом с недостаточно высокой режущей способностью величина y может быть больше, чем при точении. Это приведет к увеличению $K_{ш}/\sigma$ и уменьшению величины y .

Оценим количественно знаменатель зависимости (2.100) с учетом зависимости (2.72). Для сталей $HV \cong 6 \cdot \tau_{сдв} = 3 \cdot \sigma_{сж}$, где $\sigma_{сж}$ - предел прочности стали на сжатие. Примем наименьшее значение $a/\rho = 0,04$; $c = 10^4$ Н/мм; $B = 10$ мм. Тогда для $\sigma_{сж} = 500$ Н/мм² отношение $K_{ш}/\sigma$, определяемое зависимостью (2.72), равно $6 \cdot 10^{-5}$ мм²/Н. Соответственно величина y равна:

$$y = \frac{a}{\left(1 + \frac{10^3}{10} \cdot 6 \cdot 10^{-4}\right)} = \frac{a}{1,06}. \quad (2.105)$$

Как видим, при $\alpha = 0,04$ величина y не существенно отличается от толщины среза a , т.е. съем обрабатываемого материала практически отсутствует. Увеличить знаменатель зависимости можно увеличением отношения c/B . Например, при увеличении B в 10 раз знаменатель увеличится до значения 1,6, а при дополнительном увеличении c в 10 раз знаменатель будет равен 7.

Пользуясь зависимостью (2.95), оценим количественно величину y при шлифовании. Для прежних исходных данных: $K_{ш}/\sigma = 6 \cdot 10^{-5}$ мм²/Н; $c = 10^4$ Н/мм; $B = 10$ мм и $V_{кр}/V_{дет} = 160$ - величина

y равна:

$$y = \frac{t}{7}. \quad (2.106)$$

В данном случае за счет соотношения $V_{кр} / V_{дет}$ можно в более широких пределах ($\gg 1$) изменять знаменатель зависимости (2.95), обеспечивая уменьшение величины y . Следовательно, процесс шлифования по жесткой схеме потенциально располагает большими возможностями в плане уменьшения величины упругого перемещения y в технологической системе и соответственно уменьшения погрешности обработки.

Наиболее существенно увеличить отношение $V_{кр} / V_{дет}$ и знаменатель зависимости (2.95) можно в условиях глубинного высокоскоростного шлифования ($V_{дет} \cong 0,1$ м/мин; $V_{кр} = 100$ м/с) – $V_{кр} / V_{дет} = 6 \cdot 10^4$. Здесь знаменатель зависимости (2.95) может быть равен $3,6 \cdot 10^3$. Однако, при этом существенно увеличивается глубина шлифования t , например, до значения 10 мм и более.

В результате величина y принимает небольшое значение: $y = 10$ мм / $(3,6 \cdot 10^3) \cong 3$ мкм, т.е. при глубинном высокоскоростном шлифовании можно добиться высоких показателей точности обработки. Это предполагает широкое практическое использование данного метода обработки, так как обеспечивается одновременное решение проблем высокопроизводительного съема относительно больших припусков и высокой точности обработки. Об эффективности использования данного метода обработки свидетельствует опыт создания и применения западноевропейскими фирмами шлифовальных станков, реализующих скорости круга свыше 300 м/с.

2.1.3.3. УСЛОВИЯ УМЕНЬШЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ОТНОШЕНИЯ a_z / ρ

Как показано выше, основным “магистральным” путем уменьшения параметров $a_z \approx R_{max}$ и y при обработке по упругим схемам является уменьшение радиусов округления вершин режущих зерен за счет уменьшения зернистости абразивного или алмазного порошка, обеспечивая при этом предельные значения $a_z / \rho \rightarrow 0,04$. Дополнительным условием уменьшения a_z следует рассматривать умень-

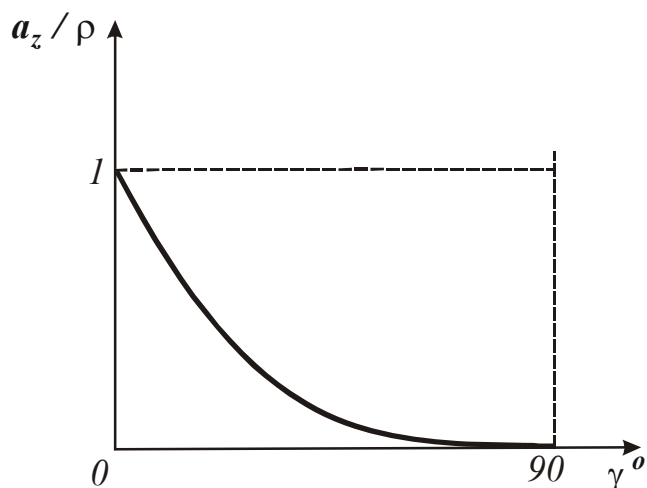


Рис. 2.32. Зависимость соотношения a_z / ρ от переднего угла γ .

шение предельных значений a_z / ρ за счет использования различных физических эффектов, т.е. обеспечение условий, при которых процесс резания переходит в процесс упруго-пластического деформирования обрабатываемого материала (без образования стружки) при значениях $a_z / \rho < 0,04$. Для решения данной задачи рассмотрим физическую сущ-

ность отношения a_z / ρ . Исходя из расчетной схемы, приведенной на рис. 2.31, отношение a_z / ρ аналитически описывается зависимостью

$$\frac{a_z}{\rho} = \frac{\rho - \rho \cdot \sin \gamma}{\rho} = 1 - \sin \gamma, \quad (2.107)$$

где γ – условный передний угол режущего зерна (отрицательный).

Рассчитанные по зависимости (2.107) значения a_z / ρ приведены на рис. 2.32 и в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Расчетные значения a_z / ρ

γ , град	0	30	45	60	90
a_z / ρ	1	0,5	0,3	0,14	0

Согласно приведенной зависимости (2.107) и табл. 2.3, увеличить отношение a_z / ρ и соответственно интенсифицировать процесс стружкообразования при микрорезании единичным зерном можно уменьшением условного отрицательного переднего угла γ . Процесс упруго-пластического деформирования обрабатываемого материала (без образования стружки) переходит в процесс резания при значениях $\gamma = 60 \dots 90^\circ$ (соответственно, предельные значения a_z / ρ равны приблизительно 0,04...0,08).

Таким образом показано, что соотношение a_z / ρ вполне однозначно определяется углом γ .

Проведем анализ условий формирования предельных значений a_z / ρ с учетом изменения угла сдвига материала β , определяемого

известной формулой проф. Зворыкина К.А. [43] (для отрицательного переднего угла γ)

$$\beta = 45^\circ + \frac{-\gamma - \psi}{2}, \quad (2.108)$$

где ψ – условный угол трения режущего зерна с обрабатываемым материалом ($\operatorname{tg} \psi = f$ – коэффициент трения).

При условии $\beta < 0$ процесс резания (процесс стружкообразования) неосуществим. Поэтому выбор предельного значения угла γ и соответственно предельного значения отношения a_z / ρ необходимо производить из условия $\beta = 0$. Тогда, с учетом зависимости (2.108), получим

$$\gamma = 90^\circ - \psi. \quad (2.109)$$

Подставим зависимость (2.109) в (2.107):

$$\frac{a_z}{\rho} = 1 - \sin(90^\circ - \psi) = 1 - \cos \psi. \quad (2.110)$$

Как видим, предельное значение отношения a_z / ρ зависит от условного угла трения ψ . При $\psi \rightarrow 0^\circ$ справедливо условие $a_z / \rho \rightarrow 0$, т.е. устраняя трение в зоне контакта режущего зерна с обрабатываемым материалом, можно добиться фактически нулевого предельного значения a_z / ρ .

При $\psi = 30^\circ$ (коэффициент трения $f = 0,577$) отношение a_z / ρ равно 0,134.

При $\psi = 20^\circ$ (коэффициент трения $f = 0,364$) отношение a_z / ρ равно 0,06.

При $\psi = 10^\circ$ (коэффициент трения $f = 0,176$) отношение a_z / ρ равно 0,015.

Из этого следует, что известное предельное значение $a_z / \rho = 0,04$ достигается при $\psi = 16^\circ$ (коэффициент трения $f = 0,287$).

Таким образом установлено, что предельное значение отношения a_z / ρ определяется условным углом трения ψ .

Таблица 2.4

Предельные значения a_z / ρ

ψ , град	0	10	16	20	30
f	0	0,176	0,287	0,364	0,577
a_z / ρ	0	0,015	0,04	0,06	0,134

В обобщенном виде связь значений ψ , f и a_z/ρ показана в табл. 2.4.

Основным путем уменьшения предельного значения a_z/ρ , рассчитанного по зависимости (2.110), может быть применение эффективных технологических сред, а также различных покрытий зерен, снижающих их трение с обрабатываемым материалом в процессе обработки. Эффективным может быть введение в зону обработки дополнительной энергии, например, в виде ультразвуковых колебаний инструмента или обрабатываемой детали, что приводит к снижению трения режущих зерен с обрабатываемым материалом.

Как отмечалось выше, по данным проф. Богомолова Н.И. процесс стружкообразования начинается при значениях $a_z/\rho = 0,04 \dots 0,08$, а по данным проф. Крагельского И.В. – при значениях

$a_z/\rho = 0,14 \dots 0,17$. Исходя из табл. 2.4, это соответствует следующим расчетным значениям угла трения ψ : в первом случае $\psi = 16 \dots 23^\circ$ (коэффициент трения $f = 0,287 \dots 0,424$); во втором случае – $\psi = 30 \dots 33^\circ$ (коэффициент трения $f = 0,577 \dots 0,65$). Данные значения угла трения ψ и соответственно коэффициента трения f могут быть реализованы на практике.

Следовательно, экспериментальные значения a_z/ρ , установленные проф. Богомоловым Н.И. и проф. Крагельским И.В., можно считать вполне достоверными, полученными при различных условиях проведения экспериментов по микрорезанию единичным абразивным зерном. Наблюдаемое различие экспериментальных значений a_z/ρ обусловлено различными коэф-

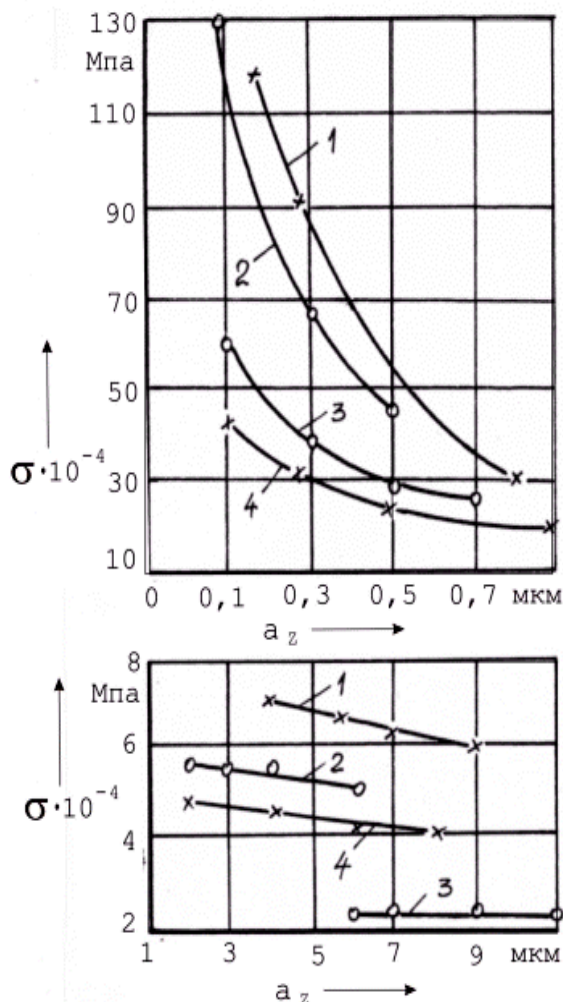


Рис. 2.33. Зависимость условного напряжения микрорезания σ для алмазов марок САМ (1,4) и АСБ (2,3) от толщины среза a_z : а - $a_z = 0,1 \dots 0,9$ МКМ; б - $a_z = 1 \dots 11$ МКМ.

фициентами трения абразивных зерен с обрабатываемым материалом.

В работе [266] приведены результаты экспериментальных исследований параметров процесса микрорезания единичными алмазными зернами разных марок размером 250/200, рис. 2.33. Установлено, что радиусы округления данных зерен равны $\rho=2/5$ мкм. Тогда при минимально установленной толщине среза $a_z=0,1$ мкм значения a_z / ρ будут равны 0,05...0,02, что меньше полученных значений a_z / ρ проф. Богомолвым Н.И.

Чем могут быть обусловлены такие небольшие значения a_z / ρ ? Это может быть связано с тем, что исследовались зерна из синтетических алмазов, которые из всех абразивных зерен имеют наименьший коэффициент трения – $f=0,07$. Соответственно угол трения ψ , который определяется зависимостью $tg\psi = f$, будет равен $\psi=4^\circ$. Исходя из зависимости (2.110), значение $a_z / \rho=0,0024$.

Как видим, полученное значение a_z / ρ меньше аналогичных значений, установленных проф. Богомолвым Н.И., приблизительно в 20 раз. Собственно, этим можно объяснить чрезвычайно низкие значения толщин срезов, реализуемых при микрорезании алмазными зернами. Радиус округления ρ режущего зерна для $a_z=0,1$ мкм с учетом $a_z / \rho=0,0024$ равен $\rho=41$ мкм. Данное значение ρ больше экспериментально установленных значений радиусов округления режущих алмазных зерен $\rho=2/5$ мкм.

Следовательно, полученные экспериментальные данные, харак-

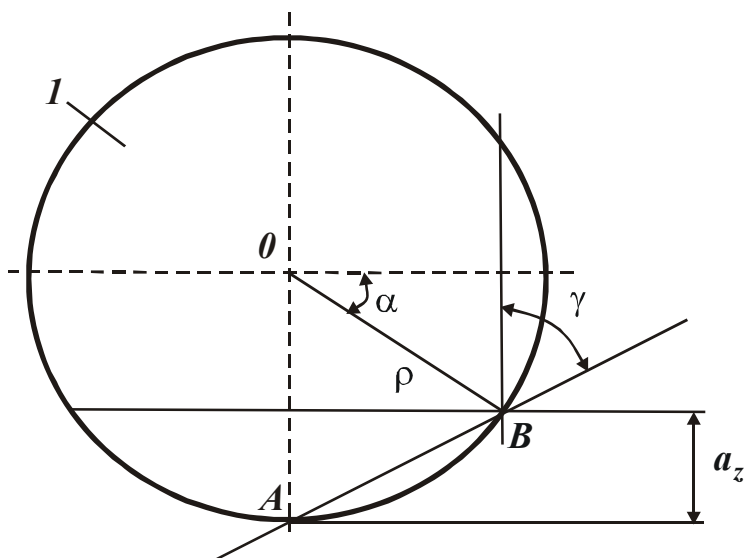


Рис. 2.34. Расчетная схема процесса микрорезания единичным зерном (1).

теризующие процесс микрорезания единичными алмазными зернами, хорошо согласуется с теоретическими данными, полученными на основе аналитической зависимости (2.110).

Для более полного анализа процесса микрорезания единичным зерном, будем считать, что в расчетной схеме (рис. 2.34) передний

угол γ определяется положением хорды, проведенной через точки А и В. Ранее считалось, что передний угол γ определяется положением касательной, проведенной через точку В.

Определим предельные значения отношения a_z / ρ в новой постановке.

Очевидно, угол γ равен углу $\angle OAB$. Поскольку треугольник OAB равнобедренный ($OA=OB=\rho$), то и углы $\angle OAB$ и $\angle OBA$ равны между собой. Тогда угол α , показанный на рис. 2.34, определится

$$\alpha = 2 \cdot \gamma - 90^\circ. \quad (2.111)$$

Определим отношение

$$\frac{a_z}{\rho} = \frac{\rho - \rho \cdot \sin \alpha}{\rho} = 1 - \sin \alpha = 1 + \cos 2\gamma. \quad (2.112)$$

С учетом зависимости (1.109), имеем

$$\frac{a_z}{\rho} = 1 + \cos(180^\circ - 2\psi) = 1 - \cos 2\psi. \quad (2.113)$$

Как видим, аналогичные зависимости (2.110) и (2.113) отличаются между собой.

Для количественной оценки зависимостей (2.110) и (2.113) в табл. 2.5 приведены расчетные значения отношения a_z / ρ , полученные на основе зависимости (2.113).

Таблица 2.5

Расчетные значения a_z / ρ

ψ , град	0	8	10	20	30
f	0	0,14	0,176	0,364	0,577
a_z / ρ	0	0,04	0,06	0,234	0,5

В данном случае предельное значение $a_z / \rho = 0,04$ достигается при значении угла трения $\psi = 8^\circ$, который в два раза меньше, чем в предыдущем случае (табл. 2.4). Следовательно, данное решение приводит к меньшим значениям угла трения ψ и соответственно коэффициента трения f режущего зерна с обрабатываемым материалом.

2.1.3.4. ВЛИЯНИЕ ДЛИНЫ СРЕЗА ЕДИНИЧНЫМ ЗЕРНОМ НА ПРЕДЕЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ОТНОШЕНИЯ a_z / ρ

Как показано в предыдущем параграфе, предельные значения отношения a_z / ρ достигаются при условии $\beta = 0^\circ$ (где β - угол сдвига материала в процессе стружкообразования). На рис. 2.35,а показана

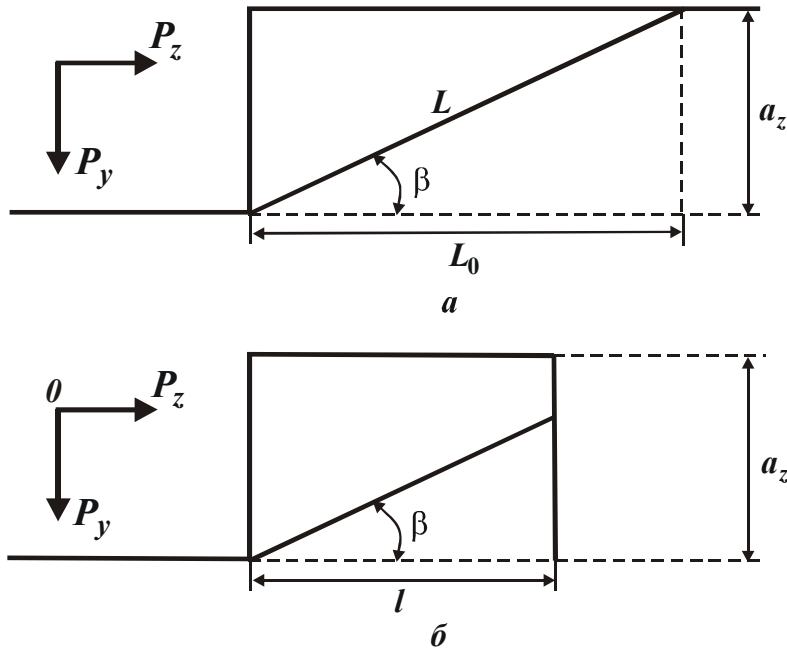


схема стружкообразования при резании, предложенная проф. Зворыкиным К.А. Используя данную схему и методику расчета параметров силовой напряженности процесса резания [381], проведем более детальный анализ условия $\beta = 0$.

Согласно приведенной расчетной схеме, отделение элементарных объемов материала происходит по плоскости сдвига от действия системы сил P_z и P_y со стороны отдельного зерна. Касательное напряжение τ в плоскости сдвига, расположенной под углом β к направлению движения зерна, определяется

Рис. 2.35. Расчетные схемы параметров стружкообразования.

риала происходит по плоскости сдвига от действия системы сил P_z и P_y со стороны отдельного зерна. Касательное напряжение τ в плоскости сдвига, расположенной под углом β к направлению движения зерна, определяется

$$\tau = \frac{(P_z \cdot \cos \beta - P_y \cdot \sin \beta)}{S} \cdot \sin \beta, \quad (2.114)$$

где $S = a_z \cdot b$ - площадь среза, m^2 ; a_z, b - соответственно толщина и ширина среза, м; β - угол сдвига материала.

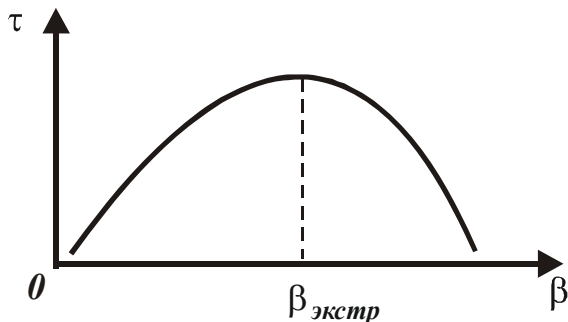


Рис. 2.36. Зависимость касательного напряжения τ от угла β .

Из зависимости (2.114) нетрудно видеть, что с увеличением угла β касательное напряжение τ изменяется по экстремальной зависимости: первоначально увели-

чивается до максимального значения, затем уменьшается, рис. 2.36.

Для определения положения плоскости сдвига, соответствующей экстремальному значению β , при котором касательное напряжение принимает максимум, продифференцируем функцию τ , описываемую зависимостью (2.114), по β и производную приравняем нулю. В результате получено

$$\operatorname{tg} 2\beta = K_{\text{ш}}, \quad (2.115)$$

где $K_{\text{ш}}$ – коэффициент шлифования.

Выполнить условие $\beta=0$ можно при условии $K_{\text{ш}} \rightarrow 0$. Это предполагает существенное превышение радиальной составляющей силы резания P_y над тангенциальной составляющей силы резания P_z , что естественно ведет к повышению силовой напряженности силы резания. Следовательно, выполнение условия $\beta=0$ по данной схеме стружкообразования предполагает повышение энергоемкости обработки.

Рассмотрим другую схему стружкообразования при резании, показанную на рис. 2.35,б. Она отличается от первой схемы тем, что производится прерывистое микрорезание. Причем, длина среза l меньше длины плоскости сдвига L_0 при обычном микрорезании (рис. 2.35,а). Касательное напряжение τ в плоскости сдвига в данном случае определяется зависимостью

$$\tau = \frac{(P_z \cdot \cos \beta - P_y \cdot \sin \beta)}{v \cdot l} \cdot \cos \beta. \quad (2.116)$$

Преобразуем зависимость (2.116) к виду

$$\tau = \frac{P_y \cdot (K_{\text{ш}} \cdot \cos^2 \beta - 0,5 \cdot \sin 2\beta)}{v \cdot l}. \quad (2.117)$$

На рис. 2.37 показан характер изменения двух слагаемых (функций): $K_{\text{ш}} \cdot \cos^2 \beta$ и $(-0,5 \cdot \sin 2\beta)$, а также характер изменения суммарной функции τ . Нетрудно видеть, что наибольшее (положительное) значение функции τ для различных значений $K_{\text{ш}}$ достигается при $\beta=0$. Это указывает на то, что сдвиг материала произойдет в плоскости, определяемой углом $\beta=0$.

В данном случае условие $\beta=0$ реализуется в процессе стружкообразования при резании, тогда как в предыдущем случае оно выполнялось в процессе упруго-пластического деформирования обрабатываемого материала, т.к. процесс стружкообразования неосуществим.

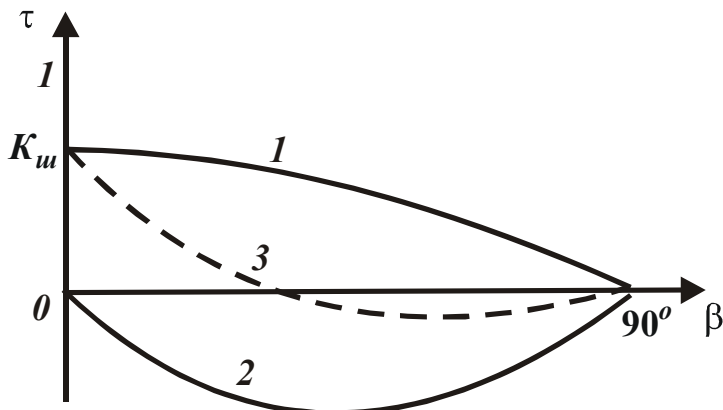


Рис. 2.37. Характер изменения функции $K_m \cdot \cos^2 \beta$ (кривая 1), функции $(-0,5 \cdot \sin 2\beta)$ (кривая 2) и суммарной функции τ (кривая 3).

убедиться, анализируя зависимость (2.117).

Принимая $\tau = \tau_{сдв}$ (где $\tau_{сдв}$ – предел прочности обрабатываемого материала на сдвиг, Н/м²), при $\beta=0$ зависимость (2.117) упростится

$$\tau_{сдв} = \frac{P_z}{v \cdot l} \quad (2.118)$$

или

$$P_z = \tau_{сдв} \cdot v \cdot l. \quad (2.119)$$

Из зависимости (2.119) следует, что условие сдвига материала в плоскости $\beta=0$ определяется лишь тангенциальной составляющей силы резания P_z , которая зависит от геометрических параметров v, l и предела прочности обрабатываемого материала на сдвиг $\tau_{сдв}$.

Радиальная составляющая силы резания P_y на выполнение условия $\beta=0$ не влияет, т.к. она не входит в зависимость (2.118) и, может принимать любые значения. В предыдущем случае для выполнения условия $\beta=0$ величина P_y должна была значительно превышать тангенциальную составляющую силы резания P_z . Из этого вытекает, что переход к схеме прерывистого микрорезания позволяет уменьшить радиальную и тангенциальную составляющие силы резания. При этом тангенциальная составляющая силы резания P_z , согласно зависимости (2.119), определяется длиной среза l . При $l \rightarrow 0$ можно существенно уменьшить P_z и соответственно P_y .

В данном случае степень затупления режущего зерна теоретически не влияет на тангенциальную составляющую силы резания P_z ,

По сути, пришли к принципиально новому решению, исключающему ограничения на отношение a_z / ρ . В результате предельные значения отношения a_z / ρ практически равны нулю и понятие “предельные значения отношения a_z / ρ ” теряет физический смысл. В этом нетрудно

она влияет на радиальную составляющую силы резания P_y – увеличивая ее и уменьшая коэффициент шлифования $K_{ш} = \frac{P_z}{P_y}$.

Таким образом, показано существование решения, позволяющего уменьшить предельные значения отношения a_z / ρ вплоть до нуля. Это открывает новые возможности интенсификации процессов финишной механической обработки, обеспечения чрезвычайно высоких показателей точности и шероховатости обработки. Практической реализацией данного решения является применение абразивной обработки (как связанным, так и свободным абразивом) с изменяющейся во времени траекторией образования микросрезов, в идеале обеспечивая взаимоперпендикулярное наложение микросрезов абразивными зернами. В результате приходим к прерывистому микрорезанию с длинами срезов, равными ширине образующихся микронеровностей на обрабатываемой поверхности.

Важным вопросом является определение условий перехода от первой схемы (рис. 2.35,а) ко второй схеме (рис. 2.35,б). Для этого, используя расчетную схему (рис. 2.35,а), определим длину плоскости сдвига L_0 :

$$\frac{a_z}{L_0} = \operatorname{tg} \beta, \quad (2.120)$$

откуда

$$L_0 = \frac{a_z}{\operatorname{tg} \beta}. \quad (2.121)$$

Выразим функцию $\operatorname{tg} \beta$ через функцию $\operatorname{tg} 2\beta$ и соответственно через коэффициент шлифования $K_{ш}$, используя известную тригонометрическую зависимость

$$\operatorname{tg} 2\beta = \frac{2 \cdot \operatorname{tg} \beta}{1 - \operatorname{tg}^2 \beta}. \quad (2.122)$$

Разрешая зависимость (2.122) относительно функции $\operatorname{tg} \beta$ с учетом зависимости (2.115), приходим к квадратному уравнению:

$$\operatorname{tg}^2 \beta + \frac{2 \cdot \operatorname{tg} \beta}{K_{ш}} - 1 = 0.$$

Решение квадратного уравнения с учетом несложных преобразований:

$$\operatorname{tg}\beta = -\frac{1}{K_m} + \sqrt{\frac{1}{K_m^2} + 1} = \frac{1}{\left(\sqrt{\frac{1}{K_m^2} + 1} + \frac{1}{K_m}\right)} \approx \frac{K_m}{2}. \quad (2.123)$$

Тогда, с учетом зависимости (2.120), имеем

$$L_0 = \frac{2 \cdot a_z}{K_m}. \quad (2.124)$$

Как видим, длина плоскости сдвига L_0 определяется параметрами a_z и K_m . Чем больше K_m , тем меньше L_0 . Следовательно, повышая режущую способность абразивного инструмента (увеличивая коэффициент K_m), можно уменьшить длину L_0 . При $K_m \rightarrow 0$ (при работе затупленным абразивным инструментом) длина $L_0 \rightarrow \infty$.

Условием перехода от первой схемы (рис. 2.35,а) ко второй схеме (рис. 2.35,б) является выражение $L_0 = l$. Тогда с учетом зависимости (2.124), получим

$$l = \frac{2 \cdot a_z}{K_m} \quad (2.125)$$

или

$$\frac{l}{a_z} = \frac{2}{K_m}. \quad (2.126)$$

Из зависимости (2.125) вытекает, что для реализации второй схемы (рис. 2.35,б) ширина микронеровностей, образующихся на обработанной поверхности, не должна превышать величину l .

В табл. 2.6 приведены расчетные значения отношения l/a_z в зависимости от коэффициента шлифования K_m .

Таблица 2.6

Расчетные значения отношения l/a_z

K_m	1,0	0,5	0,25	0,1
l/a_z	2	4	8	20

2.1.3.5. РАСЧЕТ ВЕЛИЧИНЫ УПРУГОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПРИ ПЕРЫВИСТОМ МИКРОРЕЗАНИИ

При микрорезании единичным зерном величина упругого перемещения y , согласно зависимостям (2.10) и (2.119), определяется

$$y = \frac{P_y}{c} = \frac{P_z}{c \cdot K_{рез}} = \frac{\tau_{сдв} \cdot \mathbf{v} \cdot l}{c \cdot K_{рез}}. \quad (2.127)$$

Входящий в зависимость (2.127) коэффициент резания $K_{рез}$ определим из расчетной схемы, приведенной на рис. 2.38

$$K_{рез} = \frac{P_z}{P_y} = \operatorname{tg}(90^\circ - \gamma) = \operatorname{ctg} \gamma, \quad (2.128)$$

где γ – условный (отрицательный) передний угол режущего зерна.

Угол γ выражается через отношение a_z / ρ в соответствии с зависимостью (2.107). Разрешим зависимость (2.107) относительно функции $\sin \gamma$ и подставим полученное выражение в зависимость (2.128), представляя последнюю в виде

$$K_{рез} = \frac{\cos \gamma}{\sin \gamma} = \frac{\sqrt{1 - \sin^2 \gamma}}{\sin \gamma} = \frac{\sqrt{x \cdot (2 - x)}}{(1 - x)}, \quad (2.129)$$

где $x = a_z / \rho$.

Учитывая то, что $x < 1$, в первом приближении примем: $(2 - x) \approx 2$; $(1 - x) \approx 1$. Тогда

$$K_{рез} = \sqrt{2 \cdot x} = \sqrt{2 \cdot \frac{a_z}{\rho}}. \quad (2.130)$$

Как следует из зависимости (2.130), коэффициент резания $K_{рез}$ вполне однозначно определяется отношением a_z / ρ . Чем больше a_z / ρ , тем больше $K_{рез}$. Данная зависимость по характеру влияния

a_z / ρ на $K_{рез}$ близка к аналогичной зависимости (2.72), однако не содержит параметров $\tau_{сдв}$ и HV , определяющих условия формирования угла сдвига материала $\beta > 0^\circ$ в процессе стружкообразования.

Входящий в зависимость (2.127) параметр \mathbf{v} (равный максимальной ширине среза), исходя из рис. 2.38, определяется

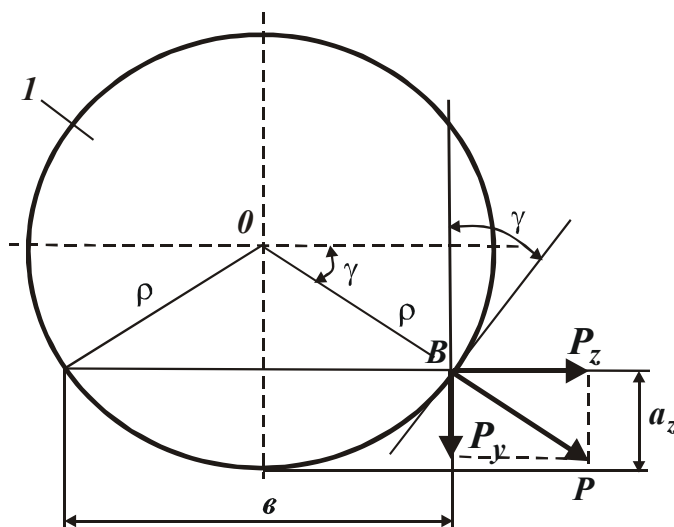


Рис. 2.38. Расчетная схема процесса микрорезания единичным зерном (1).

$$v = 2 \cdot \rho \cdot \cos \gamma. \quad (2.131)$$

Если подставить в зависимость (2.127) параметры $K_{рез}$ и v , определяемые зависимостями (2.128) и (2.131), то получим

$$y = \frac{2 \cdot \tau_{сдв} \cdot \rho \cdot l}{c} \cdot \sin \gamma. \quad (2.132)$$

Выражая функцию $\sin \gamma$ зависимостью (2.119), имеем

$$y = \frac{2 \cdot \tau_{сдв} \cdot \rho \cdot l}{c} \cdot \left(1 - \frac{a_z}{\rho}\right) = \frac{2 \cdot \tau_{сдв} \cdot l}{c} \cdot (\rho - a_z). \quad (2.133)$$

Учитывая то, что $\rho > a_z$, зависимость (2.133) можно упростить:

$$y = \frac{2 \cdot \tau_{сдв} \cdot \rho \cdot l}{c}. \quad (2.134)$$

Как видим, величина упругого перемещения y не зависит от отношения a_z / ρ . Это свидетельствует о том, что в процессе резания можно удалить слой материала, равный по толщине упруго-пластически деформируемому слою, определяемому предельным значением отношения $a_z / \rho = 0,04$.

Исходя из зависимости (2.134), величина y зависит главным образом от радиуса округления режущей кромки ρ и длины среза l (ширины микронеровности, образующейся на обрабатываемой поверхности). Чем меньше эти параметры, тем меньше величина y .

Зависимость (2.134) справедлива для условий прерывистого микрорезания единичным зерном. Для условий резания абразивным (или алмазно-абразивным) инструментом, содержащим на рабочей поверхности n зерен, величина y определится

$$y = \frac{2 \cdot \tau_{сдв} \cdot \rho \cdot l}{c} \cdot n. \quad (2.135)$$

Представим параметр n в виде: $n = k \cdot F$, где k – поверхностная концентрация зерен на рабочей поверхности алмазно-абразивного инструмента, шт/м²; F – площадь контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью, м².

Тогда зависимость (2.135) опишется

$$y = \frac{2 \cdot \tau_{сдв} \cdot \rho \cdot l}{c} \cdot k \cdot F. \quad (2.136)$$

Таким образом, получена аналитическая зависимость для расчета величины упругого перемещения y при резании с определенной (заданной) толщиной среза, т.е. для вполне конкретного момента об-

работки.

Рассмотрим характер изменения величины упругого перемещения y с течением времени обработки, аналогично результатам исследований, приведенных в параграфе 2.1.3.1.1.

Для этого определим отношение $K_{рез} / \sigma$. Как показано выше, коэффициент резания $K_{рез}$ определяется зависимостью (2.130).

Условное напряжение резания $\sigma = P_z / S$ с учетом зависимости (2.119) для определения тангенциальной составляющей силы резания P_z и зависимости для определения площади поперечного сечения среза $S = a_z \cdot v$ выразится:

$$\sigma = \tau_{сдв} \cdot \frac{l}{a_z}. \quad (2.137)$$

Как следует из зависимости (2.137), условное напряжение резания σ зависит от отношения l / a_z , т.е. чем больше толщина среза a_z , тем меньше σ .

Отношение $K_{рез} / \sigma$ с учетом зависимостей (2.130) и (2.137) аналитически опишется

$$\frac{K_{рез}}{\sigma} = \frac{a_z}{\tau_{сдв} \cdot l} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot a_z}{\rho}}. \quad (2.138)$$

Отношение $K_{рез} / \sigma$ тем больше, чем больше толщина среза a_z и меньше параметры $\tau_{сдв}, l, \rho$.

Сравнивая зависимость (2.138) с аналогичной зависимостью (2.72), справедливой для условий резания, при которых угол сдвига материала $\beta > 0^\circ$, можно отметить, что по структуре обе зависимости одинаковы. Роль параметра HV (твердость обрабатываемого материала), входящего в зависимость (2.72), выполняет длина среза l , входящая в зависимость (2.138).

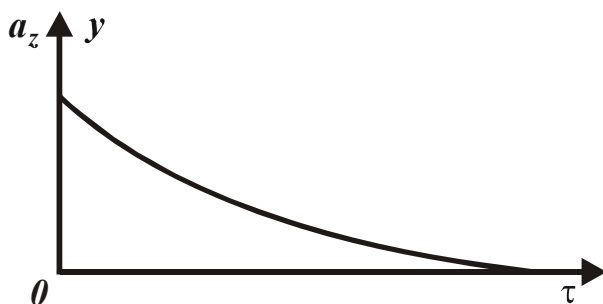


Рис. 2.39. Зависимости a_z и y от времени обработки τ .

В чем же принципиальное отличие зависимостей (2.72) и (2.138)? Оно состоит в том, что в зависимости (2.138) толщина среза a_z с течением времени обработки может уменьшаться вплоть до нуля, вызывая уменьшение до нуля величины упруго-

того перемещения y , рис. 2.39. В зависимости (2.72), из-за существования предельного значения отношения $a_z / \rho = 0,04$, толщина среза a_z (а соответственно и величина y) с течением времени обработки может уменьшаться лишь до предельного значения $a_{np} = 0,04 \cdot \rho$. Этот факт, как показано в параграфе 2.1.3.1.1, ограничивает достижение высокой точности обработки на финишных операциях.

2.1.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ УПРУГИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ АЛМАЗНОГО И АЛМАЗНО-ИСКРОВОГО ШЛИФОВАНИЯ ПО ЖЕСТКОЙ СХЕМЕ

Уравнение (2.22) представим в виде

$$V_0 - V_\phi = \frac{y}{\tau} \quad (2.139)$$

или

$$V_0 - V_\phi = V_y, \quad (2.140)$$

где $V_y = y / \tau$ – скорость изменения упругого перемещения в технологической системе, м/с.

Из уравнения (2.140) следует, что номинальная V_0 и фактическая V_ϕ скорости подачи обрабатываемого образца равны при условии $V_y = 0$. Если $V_y > 0$, то $V_0 > V_\phi$. Выразим величину y в уравнении (2.140) через радиальную составляющую силы резания $P_y = c \cdot y$:

$$V_0 \cdot \tau - V_\phi \cdot \tau = \frac{P_y}{c} \quad (2.141)$$

или

$$V_0 - V_\phi = \frac{P_y}{c \cdot \tau}. \quad (2.142)$$

По физической сути уравнение (2.141) является количественным выражением закона сохранения энергии, рассматривая левую часть уравнения ($V_0 \cdot \tau - V_\phi \cdot \tau$) как разность подводимой и отводимой из технологической системы энергии, а правую часть – как работу резания. Чем больше изменение энергии, тем больше работа резания.

В уравнении (2.142) разность $(V_0 - V_\phi)$ определяет радиальную составляющую силы резания P_y . Чем меньше эта разность, тем меньше P_y . Следовательно, основным условием повышения факти-

ческой производительности обработки, определяемой величиной V_{ϕ} , является уменьшение радиальной составляющей силы резания P_y .

Практикой установлено, что в связи с потерей режущей способности инструмента параметр P_y с течением времени обработки увеличивается. Это ведет к изменению разности $(V_0 - V_{\phi})$ во времени.

Предположим, в общем случае радиальная составляющая силы резания подчиняется зависимости $P_y \approx k \cdot \tau^m$, где k – некоторая постоянная, $m \geq 0$. Тогда, при $m = 1$ разность $(V_0 - V_{\phi})$ и соответственно величина V_{ϕ} будут оставаться постоянными с течением времени обработки. При $m = 2$ разность $(V_0 - V_{\phi})$ будет увеличиваться, а V_{ϕ} – уменьшаться. При $0 \leq m < 1$ разность $(V_0 - V_{\phi})$ будет уменьшаться, а V_{ϕ} – увеличиваться, неограниченно приближаясь к значению V_0 .

Случай $m = 0$ возможен при условии поддержания в процессе обработки постоянной режущей способности инструмента, что может быть реализовано при абразивной или алмазно-абразивной обработке, обеспечивая режим равномерного износа инструмента во времени, например, за счет применения непрерывной правки инструмента или осуществления режима его самозатачивания. Исходя из этого, можно предположить, что при шлифовании “мягкими” кругами показатель степени m будет принимать относительно небольшие значения, на уровне $m = 1$. Тогда разность $(V_0 - V_{\phi})$ и величина V_{ϕ} будут мало изменяться с течением времени обработки, т. е. будут оставаться почти постоянными. При шлифовании более твердыми кругами показатель степени будет больше $m > 1$, что приведет к увеличению разности $(V_0 - V_{\phi})$ и снижению величины V_{ϕ} .

В условиях стабилизированного процесса шлифования, когда радиальная составляющая силы резания неизменна во времени (например, при шлифовании алмазными кругами на металлических связках с их непрерывной электроэрозионной правкой), величина V_{ϕ} будет увеличиваться во времени, стремясь принять номинальное значение V_0 .

Полученное теоретическое решение хорошо согласуется с соответствующими экспериментальными данными. Например, с результатами экспериментальных исследований производительности обработки при внутреннем врезном шлифовании по жесткой схеме вста-

вок из твердого сплава ВК15, приведенными в первом томе настоящего 10-ти томного издания [381]. Так установлено, что при шлифовании алмазными кругами различных характеристик фактическая производительность обработки во времени уменьшается, рис. 2.40.

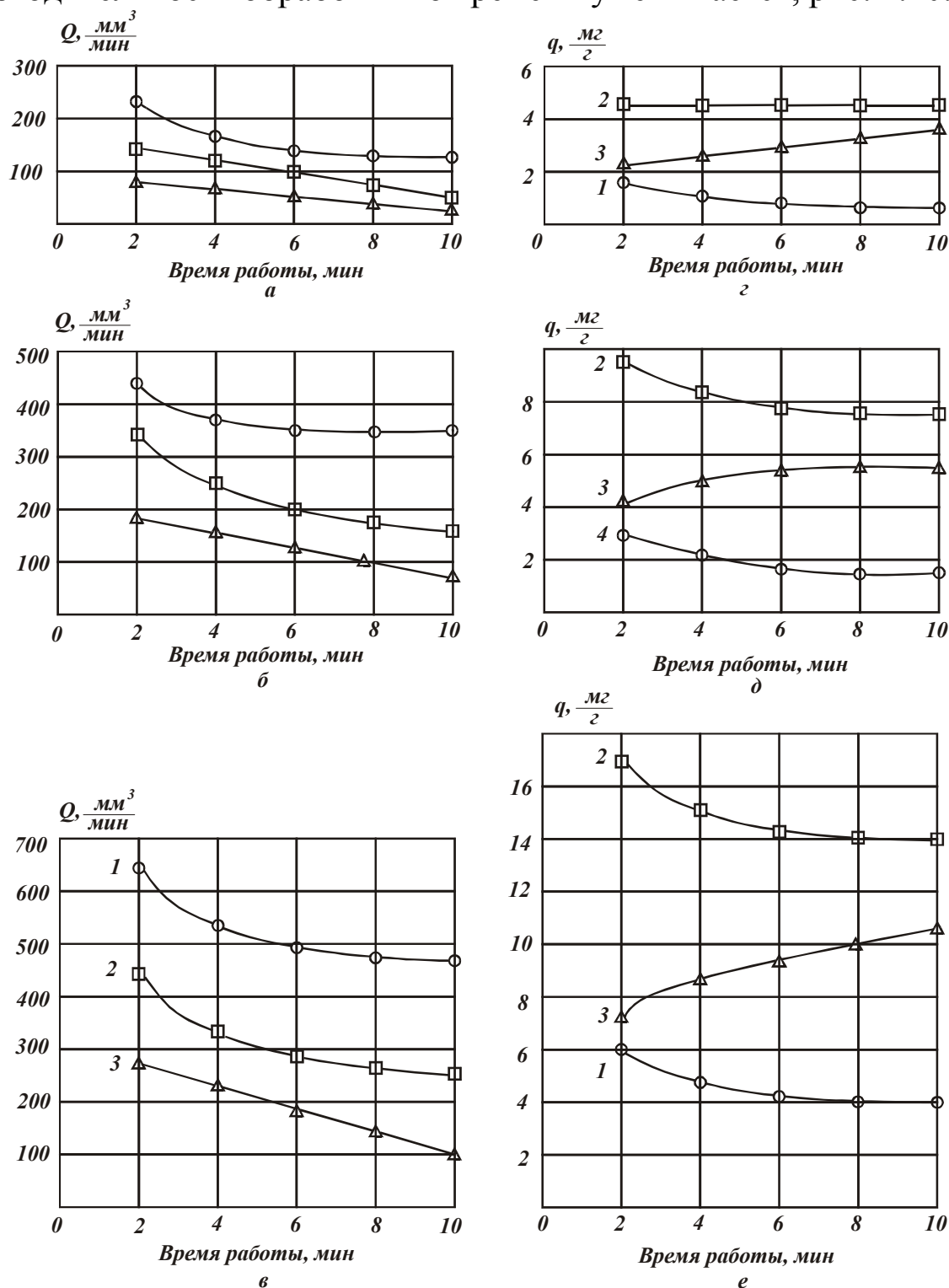


Рис. 2.40. Зависимость производительности обработки Q и удельного расхода алмаза q от времени работы: а, г - $S_{non} = 0,1$ мм/мин; б, д - $S_{non} = 0,2$ мм/мин; в, е - $S_{non} = 0,3$ мм/мин; 1 – алмазный круг АС6 160/125 К1 4; 2 – АС6 160/125 Б1 4; 3 – АС6 160/125 М2-01 4; $V_{кр} = 23$ м/с; $V_{дет} = 60$ м/мин; $S_{пр} = 3$ м/мин.

В наибольшей степени это проявляется при шлифовании алмазным кругом на металлической связке и в наименьшей степени – при шлифовании алмазным кругом на относительно “мягкой” керамической связке. Причем, данная закономерность имеет место для различных значений поперечной подачи.

Номинальная производительность обработки для случая $S_{non} = 0,1$ мм/мин равна $251,2$ мм³/мин, для случая $S_{non} = 0,2$ мм/мин равна $502,4$ мм³/мин, для случая $S_{non} = 0,3$ мм/мин равна $753,6$ мм³/мин. Согласно рис. 2.40, номинальная производительность обработки равна фактической производительности лишь в начальный момент шлифования алмазным кругом на керамической связке при $S_{non} = 0,1$ мм/мин. Во всех остальных случаях фактическая производительность обработки меньше номинальной производительности, например, для алмазного круга на металлической связке – до 10 раз.

Исходя из этого, можно заключить, что для данных условий шлифования рассмотренная выше разность $(V_0 - V_\phi)$ с течением времени обработки увеличивается, т.е. увеличивается радиальная составляющая силы резания P_y : в большей мере для алмазных кругов на металлической связке. Из приведенных графиков также следует, что при шлифовании алмазным кругом на керамической связке через определенное время обработки фактическая производительность практически стабилизируется.

Основной причиной такого изменения фактической производительности обработки необходимо рассматривать изменение режущей способности алмазных кругов в процессе шлифования.

На рис. 2.40 приведены экспериментально полученные результаты исследований удельного расхода алмаза q , равного отношению массы изношенных алмазных зерен к массе сошлифованного материала (соответствующей фактической производительности обработки) за определенное время обработки. Сопоставляя графики производительности обработки и удельного расхода алмаза q , видим, что с течением времени обработки масса изношенных алмазных зерен круга уменьшается. С физической точки зрения это связано с образованием на рабочей поверхности алмазного круга более сглаженного режущего рельефа и увеличением радиусов округления режущих кромок алмазных зерен, что ведет к повышению силовой напряженности процесса резания и снижению фактической производительности обработки.

Керамическая и органическая связки обеспечивают меньшую прочность удержания алмазных зерен, чем металлическая связка. Поэтому эти связки допускают меньший износ (меньшую степень затупления) алмазных зерен. Зерна выпадают из связки, практически не претерпев своего линейного износа, в результате чего на рабочей поверхности алмазного круга формируется и поддерживается в процессе развитый режущий рельеф, а процесс шлифования протекает с меньшей силовой напряженностью.

Металлическая связка в силу высокой прочности не обеспечивает в процессе шлифования восстановления режущих свойств алмазного круга, в связи с чем процесс протекает с высокой силовой напряженностью. Радиусы округления режущих кромок алмазных зерен с течением времени обработки непрерывно увеличиваются, выступание зерен над уровнем связки уменьшается, что в конечном итоге ведет к полной потере режущей способности алмазного круга. Для восстановления режущих свойств алмазного круга необходимо использовать эффективные методы правки или, например, алмазно-искровое шлифование, основанное на введении в зону резания дополнительной энергии в форме электрических разрядов.

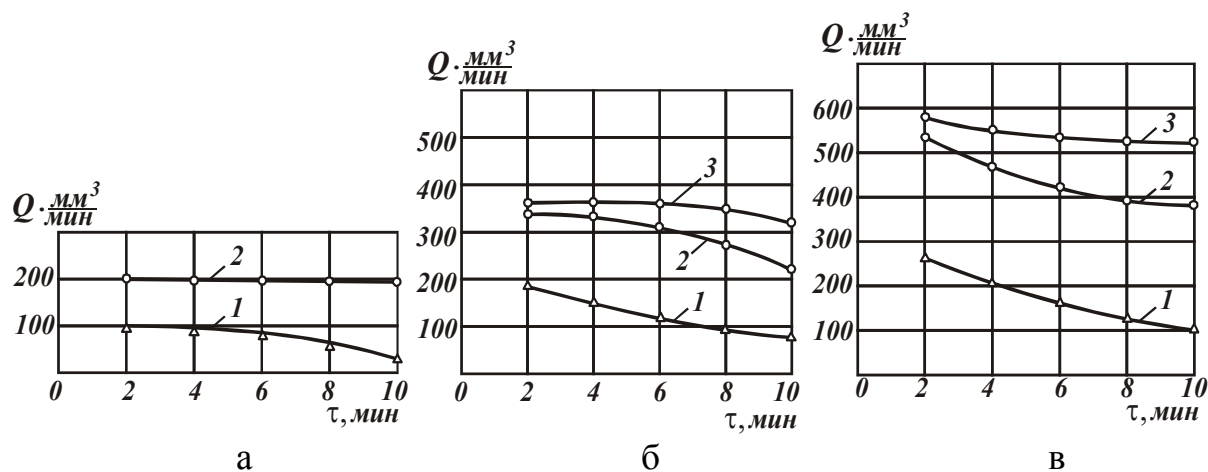


Рис. 2.41. Зависимость производительности Q от времени работы τ : обр. материал – ВК15; круг – АС6 160/125 М2-01 4; $V_{кр} = 23$ м/с; $V_{дет} = 60$ м/мин; $S_{пр} = 3$ м/мин; а - $S_{non} = 0,1$ мм/мин; б - $S_{non} = 0,2$ мм/мин; в - $S_{non} = 0,3$ мм/мин; 1 - $I = 0$; 2 - $I = 15$ А; 3 - $I = 20$ А; 4 - $I = 30$ А.

На рис. 2.41 приведены экспериментальные данные, полученные при алмазно-искровом внутреннем врезном шлифовании твердого сплава ВК15. В данном случае за счет введения в зону резания дополнительной энергии в форме электрических разрядов обеспечива-

ется высокая режущая способность алмазного круга на металлической связке. В результате фактическая производительность обработки практически стабилизируется во времени, в особенности при небольшой поперечной подаче $S_{non} = 0,1$ мм/мин. Чем больше сила тока, подводимого в зону резания от специального источника технологического тока, тем больше фактическая производительность обработки.

Так, при $S_{non} = 0,1$ мм/мин стабилизация во времени фактической производительности обработки происходит при силе тока $I = 15$ А. При $S_{non} = 0,2$ мм/мин стабилизация происходит при $I = 20$ А, а при $S_{non} = 0,3$ мм/мин – при силе тока $I = 30$ А.

Следует отметить, что несмотря на стабилизацию во времени фактической производительности обработки, она по абсолютной величине меньше номинальной производительности обработки, определяемой величиной поперечной подачи. Так, для $S_{non} = 0,1$ мм/мин номинальная производительность обработки равна $251,2$ мм³/мин. Соответственно фактическая производительность обработки, с которой происходит стабилизация процесса шлифования во времени, меньше и равна 200 мм³/мин.

Для $S_{non} = 0,2$ мм/мин номинальная производительность обработки равна $251,2$ мм³/мин, а фактическая производительность обработки – 470 мм³/мин.

Для $S_{non} = 0,3$ мм/мин номинальная производительность обработки равна $753,6$ мм³/мин, а фактическая производительность обработки – 580 мм³/мин.

Исходя из уравнения (2.142), это связано с присутствием правой части уравнения, т.к. радиальная составляющая силы резания P_y не равна нулю. Уменьшение разности $(V_0 - V_\phi)$ и радиальной составляющей силы резания P_y при алмазно-искровом шлифовании обусловлено непрерывным поддержанием на рабочей поверхности круга развитого режущего рельефа, уменьшением радиусов округления режущих кромок зерен.

На рис. 2.42 приведены результаты исследований удельного расхода алмаза q . Сопоставляя графики, нетрудно видеть, что масса изношенных алмазных зерен с течением времени обработки уменьшается. Это связано с увеличением радиусов округления режущих зерен, т.к. интенсивность износа более затупленных зерен меньше.

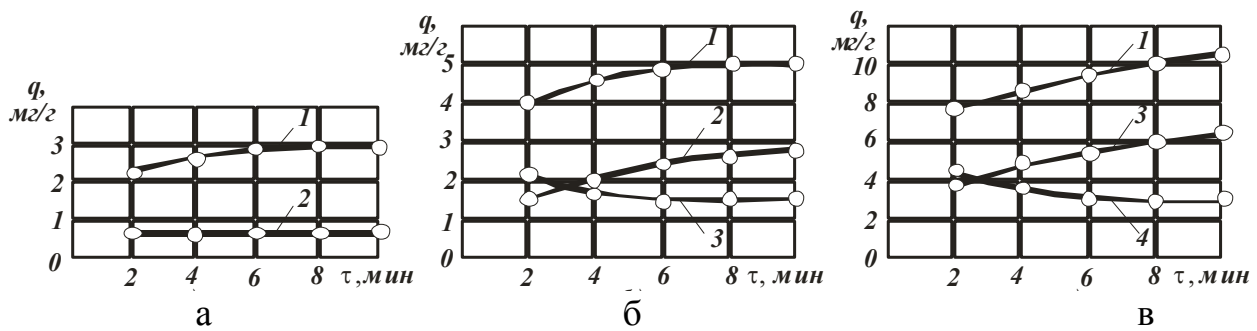


Рис. 2.42. Зависимость удельного расхода алмаза q от времени работы τ : обр. материал – ВК15; круг – АС6 160/125 М2-01 4; $V_{кр} = 23$ м/с; $V_{дет} = 60$ м/мин; $S_{np} = 3$ м/мин; а – $S_{non} = 0,1$ мм/мин; б – $S_{non} = 0,2$ мм/мин; в – $S_{non} = 0,3$ мм/мин; 1 – $I = 0$; 2 – $I = 15$ А; 3 – $I = 20$ А; 4 – $I = 30$ А.

Из приведенных графиков следует неодинаковый характер изменения удельного расхода алмаза q во времени. В одних случаях удельный расход алмаза увеличивается, а в других – уменьшается. Увеличение q обусловлено преобладанием знаменателя (рассматривая удельный расход алмаза q как отношение массы изношенных алмазных зерен к массе снятого материала или как отношение производительности съема алмазоносного слоя круга к производительности съема обрабатываемого материала). Уменьшение q во времени обусловлено преобладанием числителя, т.е. интенсивности износа алмазного круга. В случае $S_{non} = 0,1$ мм/мин при силе тока $I = 15$ А наблюдается стабилизация во времени удельного расхода алмаза q . Это означает, что интенсивность изменения числителя и знаменателя соотношения, определяющего удельный расход алмаза q , равны.

Подводя итоги, можно сделать вывод, состоящий в том, что при шлифовании алмазными кругами на относительно “мягких” керамической и органической связках рассмотренный выше показатель степени m несколько превышает значение, равное единице. При шлифовании алмазным кругом на металлической связке показатель степени m значительно больше единицы. В результате этого правая часть уравнения (2.142) с течением времени обработки увеличивается, что ведет к увеличению разности $(V_0 - V_\phi)$ и уменьшению фактической производительности обработки.

Увеличение радиальной составляющей силы P_y , исходя из зависимости (2.11), связано с уменьшением отношения $K_{рез} / \sigma$. Согласно зависимости (2.72), уменьшение отношения $K_{рез} / \sigma$ происходит

за счет уменьшения отношения a_z / ρ . Поскольку уменьшение отношения a_z / ρ ограничено его предельными значениями 0,04...0,08 (при которых процесс резания переходит в процесс упруго-пластического деформирования металла без образования стружки), правильнее зависимость (2.72) представить в виде

$$\frac{K_{рез}}{\sigma} = \frac{1}{3} \cdot 3 \sqrt{\frac{2}{HV^2 \cdot \tau_{сдв}} \cdot \left(\frac{a_z}{\rho} - 0,04 \right)^2}. \quad (2.143)$$

Тогда, при $a_z / \rho \rightarrow 0,04$ отношение $K_{рез} / \sigma \rightarrow 0$, а $P_y \rightarrow \infty, y \rightarrow \infty, (V_0 - V_\delta) \rightarrow \infty$. Из этого можно заключить, что рассматриваемый процесс шлифования алмазным кругом на металлической связке осуществляется со значениями a_z / ρ , близкими к предельным.

При алмазно-искровом шлифовании показатель степени m может быть уменьшен до значения, равного единице и ниже. В этом случае правая часть уравнения (2.142), а соответственно разность $(V_0 - V_\phi)$ и величина V_ϕ будут оставаться неизменными с течением времени обработки.

О возможности стабилизации во времени фактической производительности обработки при шлифовании по жесткой схеме также свидетельствуют экспериментальные данные, полученные на кафедре резания материалов Харьковского политехнического института под руководством проф. Беззубенко Н.К. при исследовании алмазно-искрового шлифования труднообрабатываемых материалов.

Таким образом, раскрыта физическая сущность характера изменения величин $(V_0 - V_\phi)$ и V_ϕ в процессе шлифования во времени. По величине $(V_0 - V_\phi) \cdot \tau = y$ можно довольно просто определить радиальную составляющую силы резания P_y , располагая данными о приведенной жесткости технологической системы c , Это не требует проведения достаточно сложных и трудоемких экспериментальных исследований процесса на основе тензометрирования для определения упругих перемещений в технологической системе и соответственно радиальной составляющей силы резания P_y .

Заслуживает внимания еще одна важная закономерность, установленная экспериментально и состоящая в том, что с течением времени обработки параметр шероховатости R_a при шлифовании алмаз-

ным кругом на металлической связке непрерывно увеличивается, рис. 2.43. Учитывая условие $R_{max} \approx a_z$, это равносильно увеличению толщины среза при шлифовании a_z .

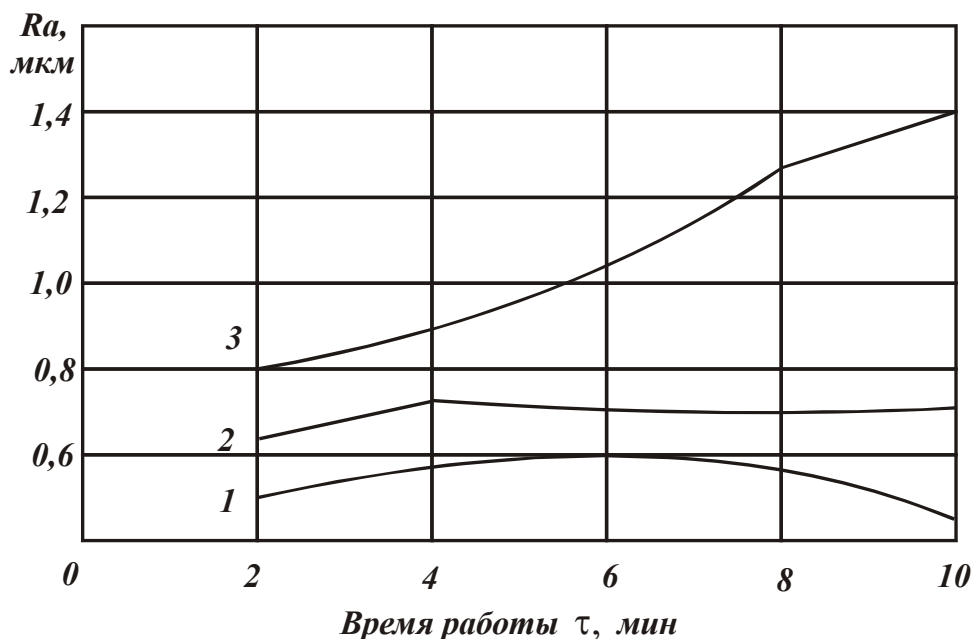


Рис. 2.43. Зависимость параметра шероховатости R_a от времени обработки: 1 – круг АС6 160/125 Б1 – 100%; 2 – круг АС6 160/125 К1 – 100%; 3 – круг АС6 160/125 М2-01 – 100%; $V_{кр}=23$ м/с; $V_{дет}=60$ м/мин; $S_{np}=3$ м/мин; $S_{non}=0,1$ мм/мин.

С чем это может быть связано? Очевидно, по мере затупления режущих зерен увеличиваются радиусы округления их режущих кромок ρ и уменьшается отношение a_z / ρ . При достижении предельного значения $a_z / \rho = 0,04 \dots 0,08$ (по данным проф. Богомолова Н.И.) зерна перестают резать. В результате часть зерен в резании не участвуют (в том числе и по причине их выпадения из связки круга). Резать будут лишь те зерна, для которых справедливо условие $a_z / \rho = 0,04 \dots 0,08$. Согласно этому условию, с увеличением параметра ρ во времени будет увеличиваться средняя толщина среза a_z , которая в первом приближении равна параметру шероховатости обработки R_{max} , определяемому зависимостью

$$R_{max} = (0,04 \dots 0,08) \cdot \rho. \quad (2.144)$$

Таким образом, показано, что увеличение параметра шероховатости обработки R_{max} с течением времени обусловлено, во-первых, достижением предельных значений a_z / ρ , во-вторых, увеличением во времени параметра ρ .

На основе зависимости (2.144) с использованием экспериментальных значений $R_{max} = 5 \cdot R_a$, приведенных на рис. 2.43, можно рассчитать значения ρ при шлифовании алмазным кругом на металлической связке, табл. 2.7.

Как следует из табл. 2.7, наибольшие значения ρ (соответствующие $a_z / \rho = 0,04$) превышают радиус зерна $R = \bar{X} / 2 = 160 \text{ мкм} / 2 = 80 \text{ мкм}$, где \bar{X} – зернистость алмазного круга. Это свидетельствует о том, что резание производится изношенными зернами.

Таблица 2.7

Значения параметров R_a и ρ

τ , мин	2	4	6	8	10
R_a , мкм	0,8	0,9	1,05	1,3	1,4
ρ , мкм	50–100	56–112	65–130	81–162	87–174

Для алмазного круга на органической связке Б1 радиус округления режущей кромки зерна ρ , рассчитанный по зависимости (2.144), для $R_a = 0,55 \text{ мкм}$, изменяется в пределах 34–68 мкм. Для алмазного круга на керамической связке К1 ($R_a = 0,7 \text{ мкм}$) радиус $\rho = 44 \dots 88 \text{ мкм}$. Как видим, для данных алмазных кругов справедливо условие $\rho \leq R$, т.е. отношение $a_z / \rho \geq 0,04 \dots 0,08$ принимает значения, превышающие предельные.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод о том, что существуют два условия формирования шероховатости поверхности: $a_z / \rho > 0,04 \dots 0,08$; $a_z / \rho \approx 0,04 \dots 0,08$. В первом случае формирование шероховатости поверхности происходит в устойчивом режиме процесса резания (стружкообразования). Во втором случае – при достижении предельных значений a_z / ρ , когда резание переходит в упруго-пластическое деформирование обрабатываемого материала и процесс характеризуется большой силовой напряженностью. Тогда, в первом случае формирование шероховатости поверхности можно рассматривать с кинематических позиций как процесс наложения и перекрытия проекций режущих зерен на условную плоскость, расположенную перпендикулярно направлению движения зерен. Во втором случае – с физических позиций, как процесс осуществления предельных значений a_z / ρ . В первом случае расчет параметров шероховатости обработки можно производить по аналитическим зависимостям, полученным на основе кинематических подходов, во втором случае – на основе зависимости (2.144).

ГЛАВА 3

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛИ ПРИ ЕЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

3.1. НОВЫЙ УПРОЩЕННЫЙ ПОДХОД К РАСЧЕТУ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛИ ПРИ ЕЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Основным ограничивающим фактором повышения производительности и качества механической обработки является возникновение высоких температур резания, которые снижают стойкость режущего инструмента и приводят к различного рода температурным дефектам поверхностного слоя обрабатываемой детали, ухудшающим ее эксплуатационные свойства. Изучению температуры резания в научно-технической литературе уделено очень большое внимание, как в экспериментальном, так и в теоретическом плане. Однако, до сих пор отсутствуют простые инженерные, полученные аналитическим путем, формулы для расчета температуры резания. Имеющиеся решения, как правило, сводятся к расчету сложных температурных полей на основе уравнения Лапласа, что не позволяет просто и понятно проследить ход формирования температуры резания и оценить влияние на нее различных технологических факторов: режимов резания, характеристик инструмента и т.д. Этим можно объяснить различный, установленный экспериментально, характер изменения температуры резания в зависимости от условий обработки. В одних случаях температура резания непрерывно увеличивается с изменением параметров режима резания, а в других – первоначально увеличивается, затем, фактически стабилизируется. Такой характер изменения температуры резания наблюдается как при абразивной, так и при лезвийной обработке. Вместе с тем, отсутствует единый подход к анализу изменения температуры резания для различных видов механической обработки, который, по-видимому, должен базироваться на едином представлении механизма формирования температуры резания независимо от вида обработки и режущих инструментов. Такого рода решения чрезвычайно важны для оценки технологических возможностей (в плане снижения температуры резания) различных процессов обработки, особенно с целью обоснования условий повышения качества обработки.

Вопросам исследования тепловых процессов при механической

обработке уделяется большое внимание. Эти процессы чрезвычайно сложны и требуют применения уравнений математической физики для аналитического описания тепловых полей в зоне резания. Вместе с тем, для инженерного расчета температуры резания важно располагать достаточно простыми решениями, позволяющими описать температуру в виде простых формул. Это требует разработки новых подходов к расчету и анализу температуры, в особенности, поверхностного слоя детали с целью определения условий ее бездефектной обработки.

Среди большого количества фундаментальных работ по теплофизике механической обработки следует особо выделить работы проф. Якимова А.В. [410, 411], которые в основном посвящены теплофизике процесса шлифования, но в которых также сформулированы общие подходы к расчету температуры поверхностного слоя обрабатываемой детали при механической обработке. В своих работах при исследовании тепловой напряженности процесса шлифования проф. Якимов А.В. удачно сочетает теоретические решения, полученные на основе расчета сложных температурных полей методами математической физики, и решения, полученные на основе упрощенных расчетных схем, например, рассматривая обрабатываемый материал в виде множества адиабатических прямолинейных стержней, на свободных торцах которых действует движущийся тепловой источник, моделирующий условия механического взаимодействия режущего инструмента с обрабатываемым материалом. В более поздних работах проф. Якимов А.В. предложил рассматривать процесс перерезания стержней, т.е. процесс движения теплового источника вдоль стержня, что позволяет приблизить расчетную схему теплообразования при резании к реальной и проследить механизм формирования температуры в более сложных условиях.

В большинстве случаев на практике процесс шлифования используется на операциях получистовой обработки для формирования параметров качества и точности к последующим операциям чистовой обработки [212]. К нему предъявляются высокие требования по обеспечению точности размера и шероховатости обработки, исключению температурных и механических дефектов поверхностного слоя обрабатываемой заготовки. Наиболее распространенным недостатком шлифования является появление прижогов на обрабатываемой поверхности, особенно при обработке материалов с повышенными физико-механическими свойствами.

Существует множество способов их устранения [213]. Вместе с тем, не изучив обстоятельно физику тепловых процессов при шлифовании, трудно кардинально решить проблему исключения температурных дефектов обработки. Поэтому ниже проведем теоретический анализ теплового баланса и температуры поверхностного слоя детали при ее механической обработке.

При расчете температуры при шлифовании традиционно исходят из расчетной схемы перемещения теплового источника по полуплоскости [410]. Данная схема фактически соответствует условиям трения шлифовального круга с обрабатываемым материалом и не учитывает процесс резания (процесс снятия припуска). Так, в классической упрощенной расчетной схеме, впервые предложенной проф. Якимовым А.В., поверхностный слой обрабатываемой детали представлен множеством адиабатических стержней, которые нагреваются до температуры шлифования за время контакта их с шлифовальным кругом. В последующих работах, чтобы учесть физику резания (съем припуска), проф. Якимов А.В. предложил рассматривать условия перерезания стержней (в пределах толщины снимаемого припуска). В этом случае предполагается, что стержни выступают над обработанной поверхностью на величину, равную глубине шлифования, и

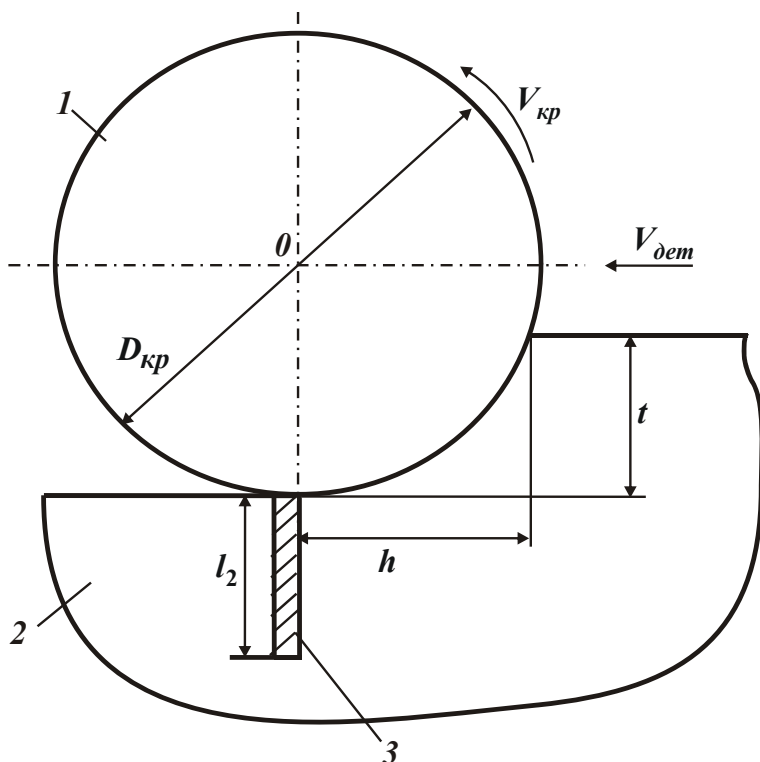


Рис. 3.1. Расчетная схема плоского шлифования: 1 – круг; 2 – обрабатываемая деталь; 3 – адиабатический стержень поверхностного слоя детали.

в процессе шлифования срезаются. В итоге пришли к задаче о нагревании стержня от действия приложенного на его свободном конце и движущегося с определенной скоростью вдоль стержня теплового источника. Поэтому ниже на основе нового упрощенного подхода проведем теоретический анализ параметров теплового процесса без учета и с учетом перерезания стержней.

Расчет температуры поверхностного слоя

детали при ее механической обработке произведем на примере плоского шлифования периферией круга. Обрабатываемую деталь представим в виде бесконечного множества прямолинейных стержней длиной l_2 и площадью поперечного сечения S , расположенных по нормали к обрабатываемой поверхности, рис. 3.1.

Рассмотрим теплопроводность данного стержня. Количество протекшего через стержень тепла Q при установившемся тепловом потоке определяется известной из курса физики формулой

$$Q = \lambda \cdot S \cdot \frac{\theta_2 - \theta_1}{l_2} \cdot \tau, \quad (3.1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/м·К; θ_1 и θ_2 – установившиеся температуры на концах стержня, К; τ – время действия теплового потока, с.

За это же время температура стержня выросла от θ_1 (равной температуре на свободном конце стержня) до значения θ_2 (равной температуре в месте контакта круга со стержнем). Тогда средняя температура стержня равна $\theta_{cp} = 0,5 \cdot (\theta_2 - \theta_1)$. Исходя из этого, количество тепла Q , соответствующее повышению стержня на температуру θ_{cp} , определится

$$Q = m \cdot c \cdot 0,5 \cdot (\theta_2 - \theta_1), \quad (3.2)$$

где $m = S \cdot l_2 \cdot \rho_m$ – масса стержня, кг; ρ_m – плотность обрабатываемого материала, кг/м³; c – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К).

Сравнивая значения Q , определяемые зависимостями (3.1) и (3.2), получим расчетную зависимость для установления длины стержня l_2 , т.е. толщины поверхностного слоя материала, в котором концентрируется тепло:

$$l_2 = \sqrt{\frac{2\tau \cdot \lambda}{c \cdot \rho_m}}. \quad (3.3)$$

Здесь $\theta = \theta_2$, а параметром θ_1 в силу его малости $\theta_1 = 0$ для упрощения расчетов пренебрегли.

С учетом соотношений $Q = N \cdot \tau$, $q = N / S$ (где N , q – соответственно мощность и плотность теплового источника) и зависимостей (3.1) и (3.3), имеем

$$\theta = \frac{q \cdot l_2}{\lambda} \quad (3.4)$$

или

$$\theta = q \cdot \sqrt{\frac{2\tau}{\lambda \cdot c \cdot \rho_m}}. \quad (3.5)$$

Таким образом, получена расчетная зависимость для определения температуры на торце свободного конца стержня, т.е. для определения температуры поверхностного слоя детали при ее механической обработке.

Среднюю скорость распространения тепла вглубь стержня (т.е. вглубь обрабатываемого материала) получим из соотношения l_2 / τ :

$$V_{\theta.cр} = \sqrt{\frac{2\lambda}{c \cdot \rho_m \cdot \tau}}. \quad (3.6)$$

Мгновенную скорость распространения тепла вглубь стержня получим путем дифференцирования по времени τ длины стержня l_2 :

$$V_{\theta} = \frac{dl_2}{d\tau} = \sqrt{\frac{\lambda}{2 \cdot c \cdot \rho_m \cdot \tau}}. \quad (3.7)$$

Как видим, средняя скорость распространения тепла $V_{\theta.cр}$ в два раза больше мгновенной скорости распространения тепла V_{θ} .

Рассчитаем параметры $\tau = h / V_{дет}$, l_2 и V_{θ} (где $V_{дет}$ – скорость детали, м/с; h – длина дуги контакта круга с деталью, м, определяется по зависимости [3]: $h = \sqrt{\frac{2 \cdot t}{\rho}}$; t – глубина шлифования, м;

$\rho = \frac{1}{R_{кр}} + \frac{1}{R_{дет}}$; $R_{кр}$, $R_{дет}$ – соответственно радиусы круга и детали, м), рис. 3.1.

Для плоского шлифования $R_{дет} \rightarrow \infty$, тогда $h = \sqrt{2 \cdot t \cdot R_{кр}}$; $\tau = \frac{\sqrt{2 \cdot t \cdot R_{кр}}}{V_{дет}} = \frac{t \cdot \sqrt{2 \cdot t \cdot R_{кр}}}{Q_{уд}}$, где $Q_{уд} = t \cdot V_{дет}$ – удельная производительность обработки, м²/с (т.е. приходящаяся на единицу ширины круга).

Принимая $2R_{кр} = 0,3$ м; $Q_{уд} = 600$ мм²/мин = 10^{-5} м²/с, $\lambda = 50$ Вт/(м·К); $c = 175,9$ Дж/(кг·К); $\rho_m = 15 \cdot 10^3$ кг/м³ (для алмазного шлифо-

вания твердого сплава ВК8) [242], определим время τ для двух случаев: многопроходного ($t_1=0,01 \cdot 10^{-3}$ м) и глубинного ($t_2=10^{-3}$ м) алмазного шлифования, табл. 3.1.

Таблица 3.1

Расчетные значения параметров τ , l_2 , V_θ , $V_{рез}$, θ

Вид шлифования	τ , с	$l_2 \cdot 10^{-3}$, м	$V_\theta \cdot 10^{-3}$, м/с	$V_{рез} \cdot 10^{-3}$, м/с	θ , К
Многопроходное	0,00173	0,255	74	5,8	470
Глубинное	1,73	8,1	2,34	0,58	1500

Параметры l_2 и V_θ для двух случаев определяются в соответствии с зависимостями (3.3) и (3.7), табл. 3.1.

При расчете температуры поверхностного слоя детали θ по зависимости (3.5) неизвестным параметром является плотность теплового потока:

$$q = \frac{P_z \cdot V_{кр}}{B \cdot h}, \quad (3.8)$$

где P_z – тангенциальная составляющая силы резания, Н; $V_{кр}$ – скорость круга, м/с; B – ширина шлифования (ширина круга), м.

Тангенциальную составляющую силы резания P_z получим из известного соотношения [420]:

$$\sigma \cdot K_{рез} = 2 \cdot \sigma_{сж} = const, \quad (3.9)$$

рассматривая условное напряжение резания σ в виде $\sigma = P_z / S_{сум} = P_z \cdot V_{кр} / Q$, где $K_{рез} = K_{ш} = P_z / P_y$ – коэффициент резания (шлифования); P_y – радиальная составляющая силы резания, Н; $\sigma_{сж}$ – предел прочности обрабатываемого материала на сжатие, Н/м²; $S_{сум}$ – суммарная мгновенная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зернами, м²; Q – производительность обработки, м³/с. Тогда P_z выразится

$$P_z = \frac{2 \cdot \sigma_{сж} \cdot Q}{K_{ш} \cdot V_{кр}}. \quad (3.10)$$

После подстановки зависимости (3.10) в (3.8), имеем

$$q = \frac{2 \cdot \sigma_{сж} \cdot Q}{B \cdot h \cdot K_{ш}} = \frac{2 \cdot \sigma_{сж} \cdot Q_{уд}}{h \cdot K_{ш}}, \quad (3.11)$$

где $Q_{уд} = Q / B$.

Следовательно, плотность теплового потока q тем больше, чем больше прочность обрабатываемого материала $\sigma_{сж}$, производительность обработки Q и чем меньше коэффициент резания при шлифовании $K_{ш}$ и длина дуги контакта круга с деталью h .

Для исходных значений: $\sigma_{сж}=4 \cdot 10^9$ Н/м²; $Q_{уд}=10^{-5}$ м²/с; $K_{ш}=0,5$ рассчитаем температуру поверхностного слоя детали θ в соответствии с зависимостью (3.5) с учетом зависимости (3.11) для двух рассматриваемых случаев, табл. 3.1. Температура поверхностного слоя детали при многопроходном алмазном шлифовании ниже, чем при глубинном алмазном шлифовании.

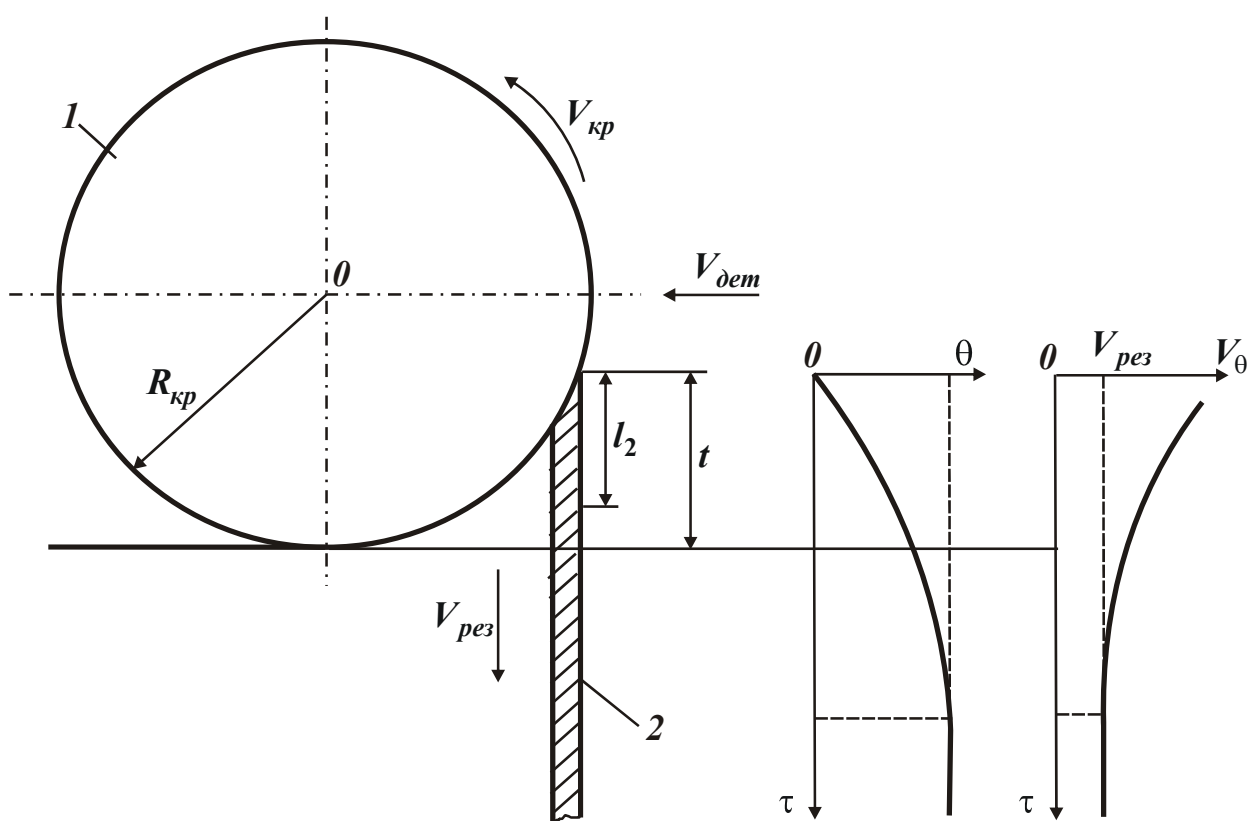


Рис. 3.2. Расчетная схема шлифования с учетом перерезания стержня: 1 – круг; 2 – стержень.

Определим теперь скорость $V_{рез}$ перерезания стержня длиной, равной глубине шлифования (рис. 3.2), т.е. $V_{рез} = t / \tau$. Результаты расчетов приведены в табл. 3.1 с учетом исходных данных для двух рассматриваемых случаев шлифования. Как видим, мгновенная скорость распространения тепла V_{θ} значительно больше скорости $V_{рез}$ перерезания стержня алмазным кругом. Поэтому для рассматриваемых условий шлифования процесс перерезания стержня при расчетах

можно не учитывать. Достаточно ограничиться упрощенной расчетной схемой, не учитывающей перерезания стержней, и полученными упрощенными аналитическими зависимостями (3.3), (3.5) и (3.7).

Однако, данные зависимости будут справедливы для условий обработки, обеспечивающих выполнение неравенства $V_{\theta} > V_{рез}$. Как следует из зависимости (3.7), с увеличением времени τ скорость распространения тепла вглубь стержня V_{θ} непрерывно уменьшается и при определенных условиях она станет равной скорости $V_{рез}$, т.е. $V_{\theta} = V_{рез}$. В этом случае произойдет стабилизация теплового процесса вследствие того, что количество тепла, подводимого к стержню, станет равным количеству тепла, отводимого от стержня (за счет его перерезания).

При $V_{\theta} > V_{рез}$ количество подводимого тепла превышает количество отводимого тепла, т.е. практически все тепло, которое подводится к стержню, остается в нем и идет на его нагревание. Отвод тепла от стержня в этом случае практически отсутствует.

Из условия стабилизации теплового процесса (т.е. процесса нагревания стержня) $V_{\theta} = V_{рез}$ с учетом зависимости (3.7) определим время τ , которое по физической сущности соответствует времени теплового насыщения стержня:

$$\tau = \frac{\lambda}{2 \cdot c \cdot \rho_m \cdot V_{рез}^2}. \quad (3.12)$$

Как видим, время τ тем меньше, чем больше скорость перерезания стержня $V_{рез}$.

Подставим зависимость (3.12) в зависимости (3.3) и (3.5):

$$l_2 = \frac{\lambda}{c \cdot \rho_m \cdot V_{рез}}, \quad (3.13)$$

$$\theta = \frac{q}{c \cdot \rho_m \cdot V_{рез}}. \quad (3.14)$$

Плотность теплового потока q , возникающего при перерезании стержня со скоростью $V_{рез}$, можно представить как

$$q = \frac{P_{z1} \cdot V_{кр}}{S} = \sigma \cdot \frac{Q}{V_{кр}} \cdot \frac{V_{кр}}{S} = \sigma \cdot V_{рез}, \quad (3.15)$$

где P_{z1} – тангенциальная составляющая силы резания, Н; $V_{кр}$ – ско-

рость круга, м/с; S – площадь поперечного сечения стержня, м²; σ – условное напряжение резания при шлифовании, Н/м²; $Q = S \cdot V_{рез}$ – производительность процесса перерезания стержня, м³/с.

Тогда зависимость (3.14) примет вид:

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho_m} \quad (3.16)$$

или с учетом соотношения (3.9):

$$\theta = \frac{2 \cdot \sigma_{сж}}{c \cdot \rho_m \cdot K_{ш}} \quad (3.17)$$

Из зависимостей (3.16) и (3.17) следует, что температура θ определяется лишь одним переменным параметром σ (или коэффициентом шлифования $K_{ш}$), т.е. зависит главным образом от режущей способности круга. Чем выше режущая способность круга, тем меньше температура θ и наоборот. В табл. 3.2 приведены расчетные значения параметров τ , l_2 и θ , полученные на основе зависимостей (3.12), (3.13) и (3.17) с учетом приведенных выше исходных данных для плоского алмазного шлифования твердого сплава ВК8.

Таблица 3.2
Расчетные значения параметров τ , l_2 , $V_{\theta}=V_{рез}$, θ

Вид шлифования	τ , с	$l_2 \cdot 10^{-3}$, м	$(V_{\theta}=V_{рез}) \cdot 10^{-3}$, м/с	θ , К
Многопроходное	0,28	3,27	5,8	6064
Глубинное	28,2	32,67	0,58	6064

Как видим, параметры τ , l_2 и θ принимают весьма большие значения, не свойственные процессу шлифования. Следовательно, в реальных условиях шлифования стабилизация теплового процесса (процесса нагревания стержня) не происходит, т.е. не достигается тепловое насыщение поверхностного слоя обрабатываемого материала детали в силу кратковременности контакта шлифовального круга с фиксированным стержнем. Процессы шлифования (так же как и все процессы резания) осуществляются в неустановившемся тепловом режиме, благодаря чему фактические значения температуры резания значительно меньше температуры θ установившегося теплового процесса, табл. 3.2.

Таким образом, в работе показано, что с увеличением времени контакта шлифовального круга увеличение температуры резания не беспредельно, оно ограничено, что в известных решениях по тепло-

физике резания и шлифования не раскрыто. Характер изменения скорости распространения тепла вглубь стержня V_θ и температуры θ с течением времени τ перерезания стержня со скоростью $V_{рез}$ показан на рис. 3.2. Как видим, первоначально скорость V_θ уменьшается, а температура θ увеличивается. При достижении условия $V_\theta = V_{рез}$ тепловой процесс стабилизируется: скорость V_θ и температура θ с течением времени τ остаются неизменными.

Таким образом показано, что при анализе теплового процесса при шлифовании можно пользоваться упрощенной расчетной схемой, не учитывающей перерезание стержней, и упрощенными аналитическими зависимостями (3.3), (3.5), (3.6) и (3.7), определяющими три основные теплофизические характеристики резания: θ , l_2 и V_θ . Анализ зависимости (3.5) показывает, что температура θ тем больше, чем больше параметры q и τ (при заданных постоянных λ , c и ρ_m). Следовательно, добиться снижения θ можно за счет уменьшения времени теплового воздействия на элементарную площадку обрабатываемой поверхности S и уменьшения плотности теплового источника q , являющегося обобщенной характеристикой параметров режима шлифования и т.д. Параметр l_2 определяет толщину «прогретого» поверхностного слоя материала. В отличие от температуры поверхностного слоя детали θ , длина стержня l_2 вполне однозначно определяется одним переменным параметром τ : чем он больше, тем больше l_2 .

Скорость распространения тепла V_θ с течением времени обработки τ уменьшается, что, собственно, является следствием нелинейности зависимости θ от τ .

Учитывая определяющую роль параметра τ в формировании теплофизических параметров резания, процессы шлифования могут быть классифицированы по длительности теплового воздействия на обрабатываемую деталь. Наиболее очевидный путь снижения τ – это увеличение скорости перемещения теплового источника, равного скорости детали $V_{дет}$, тогда время τ определится $\tau = h/V_{дет}$, где h – длина дуги контакта круга с деталью, м. Длина стержня l_2 , в соответствии с зависимостью (3.3), уменьшится, и вся теплота будет концентрироваться в небольшом объеме поверхностного слоя материала.

В связи с этим важно не допустить значительного повышения температуры резания θ за счет увеличения плотности теплового источника q , т.к., учитывая небольшой объем материала, в котором концентрируется тепло, это может привести к его значительному нагреву (а значит к линейному расширению) и появлению сетки микротрещин и других тепловых дефектов при охлаждении.

Таким образом показано, что первым основным путем управления временем τ и соответственно температурой резания θ является регулирование параметрами режима шлифования. Вторым путем, получившим широкое распространение в металлообработке, следует рассматривать искусственное прерывание процесса за счет использования специальных прерывистых кругов, рабочая поверхность которых выполнена в виде чередующихся выступов и впадин. Тогда при одинаковом (заданном) значении плотности теплового источника q за счет изменения τ можно в широких пределах изменять температуру θ , как это следует из зависимости (3.5). Следовательно, все процессы шлифования по тепловому признаку могут быть разделены на две группы. Первая группа будет включать процессы, в которых время теплового воздействия τ и плотность q взаимосвязаны режимом шлифования (процессы многопроходного, глубинного, скоростного шлифования и другие). Вторая группа – это процессы, в которых параметры τ и q не взаимосвязаны (это процессы прерывистого шлифования).

В плане снижения температуры θ процессы второй группы, несомненно, более прогрессивны, т.к. позволяют изменять параметры τ и q независимо друг от друга. Остановимся первоначально на анализе процессов, отнесенных к первой группе, т.е. процессов обычного шлифования. С учетом $\tau = h / V_{дет}$ зависимость (3.5) выразится:

$$\theta = q \cdot \sqrt{\frac{2h}{\lambda \cdot c \cdot \rho_m \cdot V_{дет}}} \quad (3.18)$$

Окончательно зависимость для определения температуры θ получим, подставляя вместо q в зависимость (3.18) выражение (3.11):

$$\theta = \frac{2 \cdot \sigma_{сж} \cdot Q}{B \cdot h \cdot K_{ш}} \cdot \sqrt{\frac{2h}{\lambda \cdot c \cdot \rho_m \cdot V_{дет}}} \quad (3.19)$$

Из зависимости (3.19) следует, что добиться уменьшения температуры θ при фиксированной производительности обработки Q можно путем увеличения параметров h , $K_{ш}$ и $V_{дет}$. Очевидно,

наибольшее влияние на θ при $Q = const$ будет оказывать коэффициент шлифования $K_{ш}$, входящий в зависимость (3.19) из всех переменных параметров с наибольшей степенью. Следовательно, применение кругов, работающих в режиме самозатачивания (алмазные круги на органических и керамических связках), или применение методов электрофизикохимической правки алмазных кругов на металлических связках, обеспечивающих их высокую режущую способность и увеличивающих коэффициент шлифования $K_{ш}$, будет способствовать снижению температуры резания.

Увеличение h предполагает увеличение глубины шлифования t по зависимости

$$h = \sqrt{\frac{2 \cdot t}{\rho}}, \quad (3.20)$$

где $\rho = \frac{1}{R_{кр}} + \frac{1}{R_{дет}}$; $R_{кр}$, $R_{дет}$ – соответственно радиусы круга и детали, м.

После подстановки зависимости (3.20) в зависимость (3.19), с учетом $Q = B \cdot V_{дет} \cdot t$, имеем

$$\theta = \frac{2 \cdot \sigma_{сж} \cdot Q}{B \cdot K_{ш}} \cdot \sqrt{\frac{1}{\lambda \cdot c \cdot \rho_m}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \rho \cdot B}{Q \cdot V_{дет}}}. \quad (3.21)$$

Как видим, при $Q = const$ с увеличением $V_{дет}$ температура θ уменьшается. Следовательно, эффективно обработку производить с небольшой глубиной шлифования и относительно высокой скоростью детали. В случае, если увеличением параметров $K_{ш}$ и $V_{дет}$ невозможно достичь снижения температуры резания до требуемого уровня, следует уменьшать производительность обработки, которая почти прямо пропорционально связана с температурой θ .

Таким образом показано, что при обычном шлифовании задача снижения температуры θ решается практически двумя путями – увеличением $K_{ш}$ и снижением производительности обработки. Третьим, но менее эффективным, путем следует рассматривать увеличение $V_{дет}$ до предельного значения, реализуемого на станке, при пропорциональном уменьшении глубины шлифования.

В расчетную зависимость (3.21) не входит скорость круга $V_{кр}$. Ее влияние на температуру θ проявляется через коэффициент шли-

фования $K_{ш}$. Экспериментально установлено, что с увеличением $V_{кр}$ коэффициент шлифования $K_{ш}$ уменьшается. Следовательно, с увеличением $V_{кр}$ температура θ будет увеличиваться.

В обобщенном виде зависимость (3.21) с учетом зависимости (3.9) применительно к плоскому шлифованию примет вид:

$$\theta = \sigma \cdot t^{0,75} \cdot \left(\frac{2 \cdot V_{дет}}{\lambda \cdot c \cdot \rho_m \cdot \sqrt{D_{кр}}} \right)^{0,5}, \quad (3.22)$$

где $D_{кр}$ – диаметр круга, м.

Из зависимости следует, что из переменных параметров наибольшее влияние на θ оказывает условное напряжение резания σ и в меньшей мере – глубина шлифования t и скорость детали $V_{дет}$.

Анализируя приведенные зависимости для определения температуры θ , видим, что добиться ее существенного уменьшения можно за счет увеличения коэффициента шлифования $K_{ш}$. Вместе с тем, как известно, этот коэффициент не превышает значения 1. В этом ограниченность технологических возможностей шлифования. Существенно увеличить коэффициент $K_{ш}$ можно в условиях резания лезвийным инструментом. Коэффициент $K_{ш}$ в этом случае называют коэффициентом резания $K_{рез}$ и он принимает значения в пределах 1...10. Тогда, следуя зависимости (3.17), температура θ перерезаемого стержня (которыми условно представлен обрабатываемый материал) уменьшится в 10...20 раз и будет принимать значения, изменяющиеся приблизительно в пределах до 1000°C, что соответствует практике резания. График изменения температуры θ от времени нагревания перерезаемого стержня τ показан на рис. 3.3.

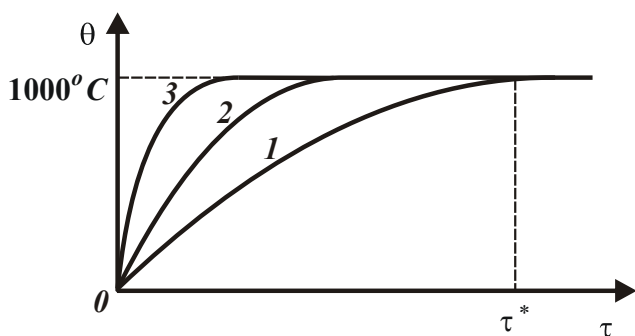


Рис. 3.3. Примерная зависимость θ от τ для разных скоростей резания V ($V_1 < V_2 < V_3$).

Из соотношения (3.9) следует, что увеличение коэффициента резания в 10...20 раз предполагает уменьшение в такое же количество раз условного напряжения резания σ , т.е. эффект снижения температуры θ обусловлен существенным уменьшением σ (по сути уменьшением энергоемкости процесса резания).

3.2. РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛИ ПРИ РЕЗАНИИ ЛЕЗВИЙНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Рассмотрим, как изменятся параметры τ и l_2 , определяемые зависимостями (3.12) и (3.13), при резании лезвийным инструментом. Входящую в обе зависимости скорость перерезания стержня $V_{рез}$ определим как:

$$V_{рез} = \frac{a}{\tau_1} = a \cdot \frac{V}{h} = V \cdot \operatorname{tg} \beta, \quad (3.23)$$

где a – толщина среза, м; τ_1 – время перерезания стержня, с; V – скорость резания, м/с; β – условный угол сдвига обрабатываемого материала; h – длина зоны резания, охваченной плоскостью сдвига материала ОА, рис. 3.4.

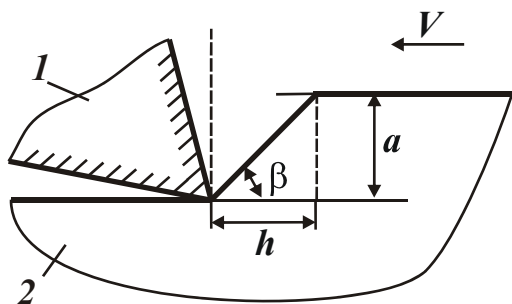


Рис. 3.4. Расчетная схема процесса резания: 1 – резец; 2 – обрабатываемый материал.

Как видим, скорость $V_{рез}$ почти пропорционально зависит от скорости V , считая, что функция $\operatorname{tg} \beta$ при этом изменяется мало. При $V=2$ м/с и $\beta=45^\circ$, имеем $V_{рез}=2$ м/с, т.е. скорость перерезания стержня $V_{рез}$ при резании многократно (до 1000 раз и более) превышает аналогичную скорость при шлифовании.

Это соответствует такому же уменьшению параметра l_2 и еще более существенному уменьшению времени τ (времени теплового насыщения обрабатываемого материала). Параметры τ и l_2 для условий резания лезвийным инструментом опишутся:

$$\tau = \frac{\lambda}{2 \cdot c \cdot \rho_m \cdot V^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \beta}, \quad (3.24)$$

$$l_2 = \frac{\lambda}{c \cdot \rho_m \cdot V \cdot \operatorname{tg} \beta}. \quad (3.25)$$

Чем больше скорость резания V , тем меньше параметры τ и l_2 .

Таким образом, при резании лезвийным инструментом полностью реализуются условия теплового насыщения обрабатываемого материала, т.е. справедлив график, показанный на рис. 3.3. При изменении времени от 0 до значения τ^* , определяемого по сути зависимостью (3.24), температуру θ необходимо рассчитывать по зависимости

(3.4), а при $\tau > \tau^*$ – по зависимости (3.16). Преобразуем зависимость (3.4) применительно к резанию лезвийным инструментом, рассматривая в ней $\tau = \tau_1 = h/V$. Плотность теплового потока q определится

$$q = \frac{N}{F} = \frac{P_z \cdot V}{b \cdot h} = \sigma \cdot a \cdot b \cdot \frac{V}{b \cdot h} = \frac{\sigma \cdot a \cdot V}{h}, \quad (3.26)$$

где b – ширина среза, м.

Тогда

$$\theta = \sigma \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot a \cdot V \cdot \text{tg} \beta}{\lambda \cdot c \cdot \rho_m}}. \quad (3.27)$$

Как видим, температура θ в одинаковой степени зависит от толщины среза a и скорости резания V . С их увеличением температура θ будет увеличиваться (в пределах действия зависимости (3.27)), а затем будет оставаться неизменной (в пределах действия зависимости (3.16)). Данный характер изменения температуры θ от параметров a и V соответствует практическим результатам.

Таким образом, в работе предложен новый упрощенный инженерный подход к расчету и анализу температуры поверхностного слоя обрабатываемой детали при ее механической обработке.

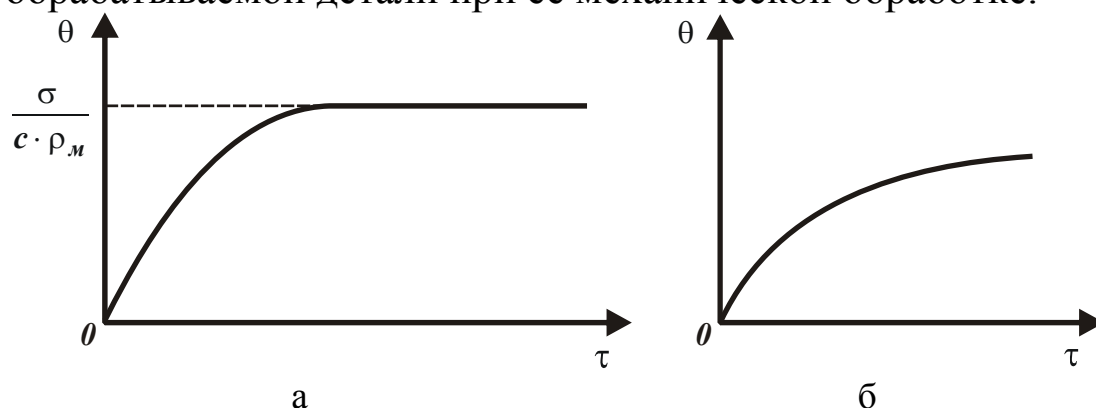


Рис. 3.5. Примерные зависимости изменения температуры θ от времени τ .

На основе проведенных исследований можно заключить, что при лезвийной обработке более типичным будет график изменения температуры θ от времени перемещения теплового источника вдоль перерезаемого адиабатического стержня τ , показанный на рис. 3.5,а, а при шлифовании – график, показанный на рис. 3.5,б. Это связано с тем, что во втором случае стабилизация температуры будет происходить при ее относительно больших значениях вследствие увеличенных значений условного напряжения резания σ , обусловленных как процессом “чистого резания”, так и весьма интенсивным процессом трения круга с обрабатываемым материалом (в результате его затуп-

ления и засаливания).

Проведем анализ параметра l_2 . Очевидно, при $l_2 < t$ или $l_2 < a$ (где t – глубина шлифования, м; a – толщина среза при точении, м) будет справедлива зависимость, показанная на рис. 3.5,а. При $l_2 > t$ или $l_2 > a$ – наоборот, будет справедлива зависимость, показанная на рис. 3.5,б.

Определим условия обработки, при которых $l_2 < t$ (или $l_2 < a$). Как показано выше, при шлифовании скорость перерезания стержня $V_{рез}$ определяется по зависимости

$$V_{рез} = V_{дет} \cdot \sqrt{\frac{t \cdot \rho}{2}}, \quad (3.28)$$

где $V_{дет}$ – скорость детали, м/с; $\rho = \frac{1}{R_{кр}} + \frac{1}{R_{дет}}$; $R_{кр}, R_{дет}$ – соответственно радиусы круга и детали, м.

При точении скорость перерезания стержня $V_{рез}$ определяется по зависимости (3.23).

Из условия $l_2 < t$, с учетом зависимости (3.13), имеем

$$V_{дет} > \frac{\lambda}{c \cdot \rho_m \cdot t} \cdot \sqrt{\frac{2}{t \cdot \rho}}. \quad (3.29)$$

Как видим, чем больше глубина шлифования t , тем меньше скорость детали $V_{дет}$, табл. 3.3.

Таблица 3.3

Расчетные значения $V_{дет}$ для плоского шлифования твердого сплава ВК8 ($\lambda = 50$ Вт/(м·К); $c = 175,9$ Дж/(кг·К); $\rho_m = 15 \cdot 10^3$ кг/м³; $R_{кр} = 0,15$ м; $R_{дет} = 0$)

$t \cdot 10^{-3}$, м	0,01	0,05	0,1	0,5	1,0	10,0
$V_{дет}$, м/с	327,8	29,2	10,8	0,9	0,3	0,01
$V_{дет}$, м/мин	19668	1752	648	54	18	0,6

Однако, значения, которые принимает скорость детали $V_{дет}$, практически не реализуются при шлифовании. Исключением может быть лишь скорость детали $V_{дет} = 0,6$ м/мин при глубине шлифования $t = 10$ мм, т.е. при глубинном шлифовании. Из этого можно сделать вывод, что при шлифовании справедлива зависимость изменения температуры резания, показанная на рис. 3.5,б, и лишь при глубинном шлифовании возможна зависимость, показанная на рис. 3.5,а.

Определим предельные значения скорости резания V при точе-

нии. Из условия $l_2 < a$, с учетом зависимостей (3.13) и (3.23), имеем:

$$V > \frac{\lambda}{c \cdot \rho_m \cdot a \cdot \operatorname{tg} \beta}. \quad (3.30)$$

Условный угол сдвига β при оценочных расчетах (в первом приближении) примем равным 20° ($\operatorname{tg} 20^\circ = 0,364$).

Таблица 3.4

Расчетные значения $V_{дет}$ для плоского шлифования твердого сплава ВК8
($\lambda = 50$ Вт/(м·К); $c = 175,9$ Дж/(кг·К); $\rho_m = 15 \cdot 10^3$ кг/м³)

$a \cdot 10^{-3}$, м	0,01	0,05	0,1	0,2	0,5	1,0
$V_{дет}$, м/с	5,2	1,0	0,5	0,3	0,1	0,05
$V_{дет}$, м/мин	312	60	30	12	6	3

Как следует из табл. 3.4, во всем рассматриваемом диапазоне изменения толщины среза a скорость резания V принимает значения, которые могут быть реализованы в процессе точения. Следовательно, при точении типичной зависимостью, определяющей характер изменения температуры резания будет зависимость, показанная на рис. 3.5,а.

Полученные результаты хорошо согласуются с практическими данными. Так, в научно-технической литературе приведенные экспериментальные графики изменения температуры резания при шлифовании подчиняются зависимости, показанной на рис. 3.5,б. Исключением являются приведенные в работе [335] графики, полученные при глубинном шлифовании, в которых температура резания изменяется по зависимости, близкой к зависимости, показанной на рис. 3.5,а.

Если же проанализировать работы, посвященные экспериментальному исследованию температуры резания при точении, то практически во всех случаях обработки изменение температуры резания от параметров режимов резания подчиняется зависимости, показанной на рис. 3.5,а. К сожалению, в научно-технической литературе не обоснованы физические причины такого характера изменения температуры резания и отсутствуют аналитические зависимости, по которым можно рассчитать условия формирования температуры резания в зависимости от вида механической обработки. Поэтому изучение теплофизики резания на основе предложенного в работе подхода, позволяющего (за счет учета перерезания адиабатических стержней, которыми условно представлен обрабатываемый материал заготовки) раскрыть физическую сущность формирования температуры резания

при абразивной и лезвийной обработке, представляет определенный интерес и требует проведения дальнейших исследований.

Представляет также теоретический и практический интерес вопрос о распределении количества тепла, которое уходит на нагревание образующихся стружек и поверхностного слоя обрабатываемого материала заготовки. Для этого составим уравнение теплового баланса при механической обработке. В случае $l_2 > a$ при точении (или $l_2 > t$ при шлифовании), исходя из приведенных в работе решений, уравнение теплового баланса для процесса точения примет вид:

$$a + (l_2 - a) = l_2 \quad (3.31)$$

или в относительных величинах

$$\frac{a}{l_2} + \frac{(l_2 - a)}{l_2} = 1. \quad (3.32)$$

Первое слагаемое в уравнении (3.32) определяет количество тепла, которое уходит на нагревание образующихся стружек. Второе слагаемое определяет количество тепла, которое уходит на нагревание поверхностного слоя обрабатываемого материала. К такому же уравнению приходим и при шлифовании:

$$\frac{t}{l_2} + \frac{(l_2 - t)}{l_2} = 1. \quad (3.33)$$

В случае $l_2 < a$ уравнение теплового баланса для процесса точения видоизменится:

$$\frac{a}{(l_2 + a)} + \frac{l_2}{(l_2 + a)} = 1. \quad (3.34)$$

В приведенных уравнениях правая часть определяет общее количество тепла, образующееся при обработке. Как показано выше, при точении выполняется условие $l_2 < a$, поэтому основная часть тепла будет уходить на нагрев образующейся стружки, в деталь будет уходить значительно меньшее количество тепла. При шлифовании, наоборот, в деталь может уходить больше тепла, чем в стружку. Этим объясняются многочисленные проблемы, возникающие в связи с образованием прижогов на обработанной поверхности и других температурных дефектов обработки, и необходимостью их устранения за счет применения различных эффективных технологических методов (например, за счет применения прерывистого шлифования, СОЖ).

Таким образом, в работе на основе предложенного подхода раскрыта физическая сущность формирования температуры поверхност-

ного слоя обрабатываемой детали при резании и шлифовании, приведены аналитические зависимости для расчета температуры.

3.3. РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛИ НА ОСНОВЕ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

При расчете теплового баланса при плоском шлифовании первоначально предположим, что вся работа резания $N \cdot \tau$ затрачивается на нагревание образующихся стружек $c \cdot m \cdot \theta$, т.е.

$$N \cdot \tau = c \cdot m \cdot \theta, \quad (3.35)$$

где $N = P_z \cdot V_{кр}$ – мощность теплового источника (мощность шлифования), Вт; P_z – тангенциальная составляющая силы резания, Н; $V_{кр}$ – скорость круга, м/с; τ – время шлифования, с; c – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К); m – масса образующихся стружек, кг; θ – температура резания при шлифовании, К.

Тангенциальную составляющую силы резания P_z представим в виде [242]:

$$P_z = \sigma \cdot S_{сум} = \sigma \cdot \frac{Q}{V_{кр}} = \sigma \cdot \frac{B \cdot t \cdot V_{дет}}{V_{кр}}, \quad (3.36)$$

где σ – условное напряжение резания, Н/м²; $S_{сум}$ – суммарная мгновенная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зернами круга, м²; Q – производительность обработки, м³/с; B – ширина шлифования (ширина круга), м; t – глубина шлифования, м; $V_{дет}$ – скорость детали, м/с.

Массу образующихся стружек m выразим:

$$m = \rho_m \cdot V = \rho_m \cdot B \cdot t \cdot V_{дет} \cdot \tau, \quad (3.37)$$

где ρ_m – плотность обрабатываемого материала, кг/м³; V – объем образующихся стружек (объем снятого материала), м³.

Тогда из уравнения теплового баланса (3.35) следует:

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho_m}. \quad (3.38)$$

В результате пришли к зависимости (3.16).

Из зависимости (3.38) вытекает, что температура θ однозначно зависит от условного напряжения резания σ , которое является обобщенным параметром процесса и определяется режимом шлифования,

режущей способностью шлифовального круга, характеристиками обрабатываемого материала, трением круга с обрабатываемым материалом и т.д. Все факторы, способствующие снижению σ , также способствуют снижению температуры θ .

С учетом соотношения (3.9) зависимость (3.38) принимает вид зависимости (3.17).

Проведем численный расчет температуры θ применительно к плоскому алмазному шлифованию твердого сплава ВК8. Исходные данные: $c=175,9$ Дж/(кг·К); $\rho_m=15 \cdot 10^3$ кг/м³. Предел прочности на сжатие твердого сплава ВК8 равен $\sigma_{сж} = 4 \cdot 10^9$ Н/м².

Принимая в первом приближении $K_{ин} = 0,5$ и используя зависимость (3.17), имеем: $\theta = 6064$ К. Такое же значение температуры приведено в табл. 3.2.

Как видим, полученное значение температуры шлифования θ существенно превышает значения температуры шлифования, достигаемые на практике (в пределах 1000°С). Это может быть связано с тем, что при расчете не учитывалось количество тепла, затрачиваемое на нагревание поверхностных слоев обрабатываемого материала заготовки и на нагревание шлифовального круга, в данном случае алмазного круга на металлической связке. Поэтому при составлении уравнения теплового баланса учтем тепло, затрачиваемое на нагревание образующихся стружек массой m и на нагревание поверхностного слоя обрабатываемого материала толщиной l_2 вследствие его теплопроводности.

Представим зависимость (3.3) для определения параметра l_2 в виде:

$$l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta\tau \cdot \lambda}{c \cdot \rho_m}}, \quad (3.39)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К; $\Delta\tau$ – время, за которое обрабатываемая деталь, движущаяся со скоростью $V_{дет}$, переместится на величину, равную длине контакта круга с обрабатываемым материалом $h = \sqrt{D_{кр} \cdot t}$, тогда $\Delta\tau = \sqrt{D_{кр} \cdot t} / V_{дет}$, где $D_{кр}$ – диаметр круга, м.

Уравнение теплового баланса с учетом нагревания образующихся стружек и поверхностного слоя обрабатываемого материала толщиной l_2 примет вид:

$$N \cdot \tau = c \cdot \rho_m \cdot B \cdot t \cdot V_{дет} \cdot \tau \cdot \theta + 0,5 \cdot c \cdot \rho_m \cdot B \cdot l_2 \cdot V_{дет} \cdot \tau \cdot \theta. \quad (3.40)$$

Коэффициент 0,5 во втором слагаемом правой части уравнения введен для того, чтобы учесть неравномерность нагрева поверхностного слоя обрабатываемого материала по толщине l_2 , т.к. температура изменяется от значения θ до нуля. Тогда среднее значение температуры будет равно $0,5 \cdot \theta$.

С учетом выражения $N = P_z \cdot V_{кр}$, зависимости (3.36) и уравнения (3.40), температура θ определится:

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho_m} \cdot \frac{t}{(t + 0,5 \cdot l_2)} = \frac{\sigma}{c \cdot \rho_m} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{l_2}{2t}\right)}. \quad (3.41)$$

По данным численных расчетов, приведенных в предыдущем параграфе, справедливо неравенство $l_2 > t$. Например, для $t=0,01$ мм параметр $l_2=0,255$ мм; для $t=1$ мм параметр $l_2=8,1$ мм (при фиксированной удельной производительности обработки $Q_{уд} = t \cdot V_{дет} = 10^{-5}$ м²/с), т.е. параметр l_2 больше глубины шлифования t в 8,1...25,5 раз. Поэтому в первом приближении можно принять $(t + l_2) \approx l_2$. Тогда зависимость (3.41) выразится:

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho_m} \cdot \frac{2 \cdot t}{l_2}. \quad (3.42)$$

Наличие в зависимости (3.42) множителя $t/l_2 \ll 1$ позволяет существенно уменьшить весьма большое значение $\theta=10107$ К, рассчитанное выше, и приблизить теорию к практике шлифования. Так, уменьшая установленное по зависимости (3.17) значение $\theta=6064$ К в 8,1...25,5 раз, имеем $\theta=(475,6...1497)$ К, что хорошо согласуется с практикой шлифования.

Выразим в зависимости (3.42) параметр l_2 зависимостью (3.39):

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho_m} \cdot t \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot c \cdot \rho_m}{\lambda} \cdot \frac{V_{дет}}{\sqrt{D_{кр} \cdot t}}} = \sigma \cdot t^{0,75} \cdot \left(\frac{2 \cdot V_{дет}}{\lambda \cdot c \cdot \rho_m \cdot \sqrt{D_{кр}}} \right)^{0,5}. \quad (3.43)$$

Как следует из полученной зависимости (3.43), наибольшее влияние на температуру θ оказывает условное напряжение резания σ . Затем, в порядке убывания, глубина шлифования t и скорость детали $V_{дет}$.

С увеличением глубины шлифования t температура θ увеличивается по закону $t^{0,75}$. Однако такой характер изменения температуры θ будет справедлив при изменении глубины шлифования t до

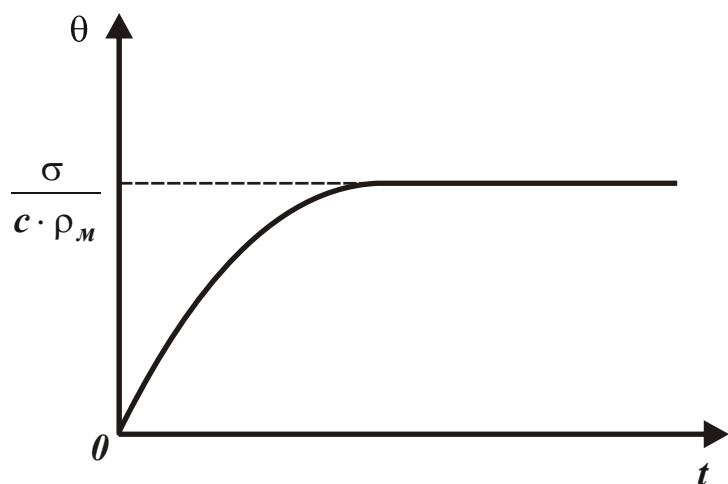


Рис. 3.6. Примерная зависимость температуры θ от глубины шлифования t .

же закону будет изменяться температура θ с увеличением скорости детали $V_{дет}$.

Определить количество тепла, которое уходит на нагревание алмазного круга на металлической связке, можно следующим образом. Представим рабочую поверхность круга в виде множества адиабатических прямолинейных стержней, расположенных по нормали к

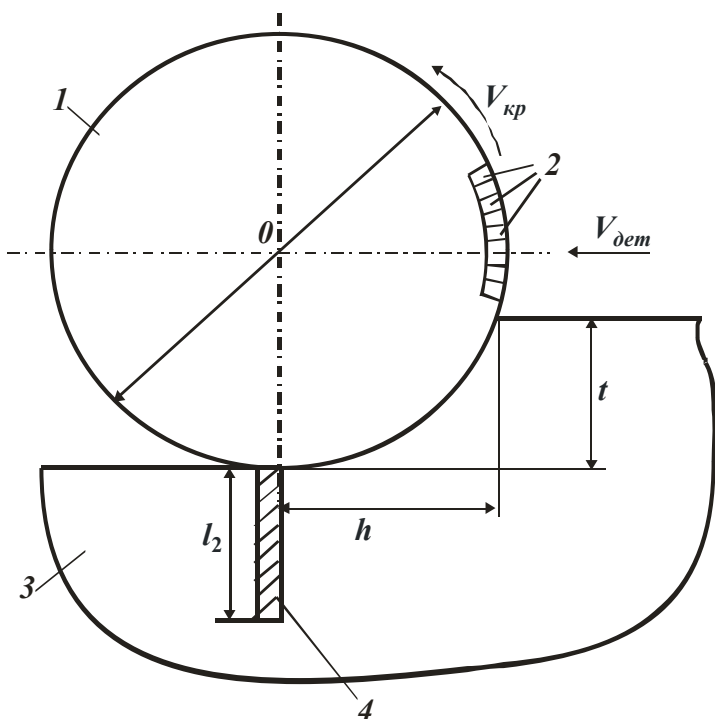


Рис. 3.7. Расчетная схема плоского шлифования: 1 – круг; 2 – адиабатические стержни поверхностного слоя круга; 3 – обрабатываемая деталь; 4 – адиабатический стержень поверхностного слоя детали.

определенного значения, близкого к значению $t=0,5 \cdot l_2$. При значениях t , соизмеримых со значением $0,5 \cdot l_2$ и превышающих его, справедлива зависимость (3.41) и температура θ будет не существенно увеличиваться с увеличением глубины шлифования t , приближаясь к значению $\sigma / (c \cdot \rho_m)$, рис. 3.6.

Приблизительно по такому

же закону будет изменяться температура θ с увеличением скорости детали $V_{дет}$.
 Определить количество тепла, которое уходит на нагревание алмазного круга на металлической связке, можно следующим образом. Представим рабочую поверхность круга в виде множества адиабатических прямолинейных стержней, расположенных по нормали к рабочей поверхности круга. Тогда толщина (или длина) части стержня l_2 , в которой будет концентрироваться тепло, можно определить по зависимости (3.39), рассматривая в ней $\Delta\tau =$

$$h / V_{кр} = \sqrt{D_{кр} \cdot t} / V_{кр},$$

рис. 3.7. Учитывая то, что $V_{кр} \gg V_{дет}$, значение

$\Delta\tau$, рассчитанное по данной зависимости для круга, будет значительно меньше аналогичного значения

$$\Delta\tau = \sqrt{D_{кр} \cdot t} / V_{дет} \text{ для детали.}$$

Следовательно,

толщина прогретого слоя детали l_2 будет значительно больше толщины прогретого слоя алмазного круга. Соответственно количество тепла, затрачиваемого на нагревание поверхностного слоя детали, будет больше количества тепла, затрачиваемого на нагревание поверхностного слоя алмазного круга и которое в первом приближении можно не учитывать при расчете температуры θ . Исходя из этого, в качестве расчетной зависимости для определения температуры θ можно использовать зависимость (3.43).

Таким образом, в параграфе произведен расчет и анализ температуры поверхностного слоя материала при шлифовании на основе решения уравнения теплового баланса, составленного с учетом нагревания массы образующихся стружек (снятого материала) и поверхностного слоя обрабатываемого материала.

3.4. УСЛОВИЯ СНИЖЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛИ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Выше показано, что плотность теплового потока q , возникающего при абразивной и лезвийной обработке, определяется одной и той же простой аналитической зависимостью: $q = \sigma \cdot V_{рез}$.

При точении $V_{рез} = V \cdot \operatorname{tg} \beta$, где V – скорость резания, м/с; β – условный угол сдвига обрабатываемого материала при резании (изменяется в пределах $10 \dots 45^\circ$).

При шлифовании

$$V_{рез} = \frac{t}{\tau} = t \cdot \frac{V_{дет}}{h} = V_{дет} \cdot \sqrt{\frac{t \cdot \rho}{2}},$$

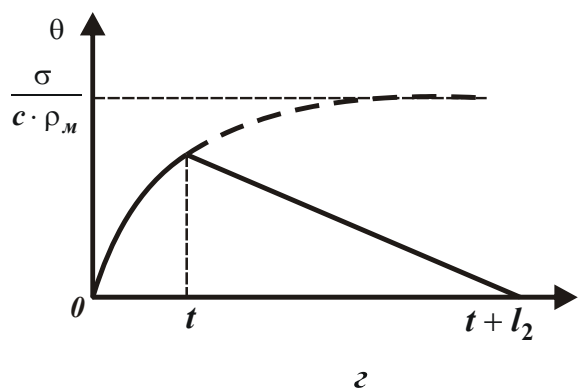
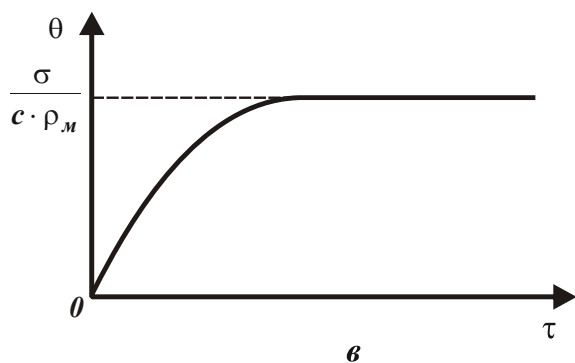
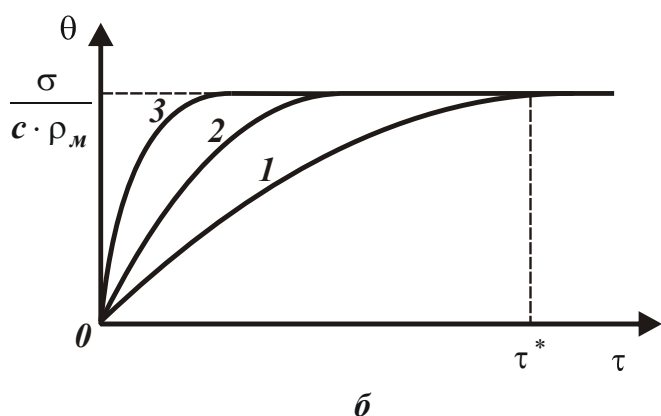
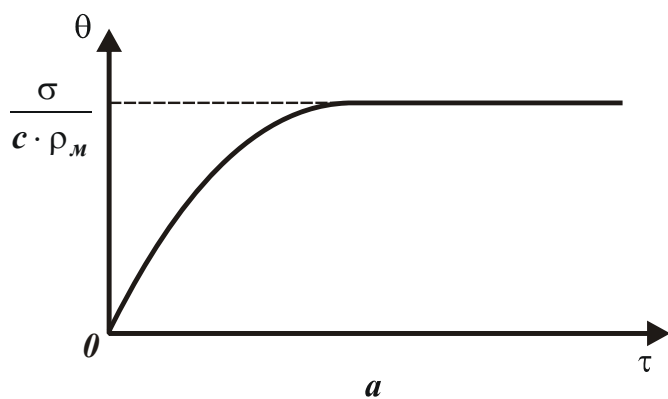
где t – глубина шлифования, м; τ – время контакта рассматриваемого адиабатического стержня с шлифовальным кругом, с; $V_{дет}$ – скорость детали, м/с;

$\rho = \frac{1}{R_{кр}} + \frac{1}{R_{дет}}$; $R_{кр}, R_{дет}$ – соответственно радиусы круга и детали, м.

При плоском шлифовании ($R_{дет} \rightarrow \infty$):

$$V_{рез} = V_{дет} \cdot \sqrt{\frac{t}{D_{кр}}},$$

где $D_{кр}$ – диаметр круга, м.



Очевидно, при точении $V_{рез}$ больше, чем при шлифовании. Учитывая то, что плотность теплового потока q , согласно приведенной зависимости, определяется скоростью $V_{рез}$, целесообразно анализ температуры при механической обработке вести по изменению температуры адиабатического стержня в процессе его перерезания (рис. 3.8,а), т.е. в зависимости от времени обработки τ . Как следует из графика, первоначально температура увеличивается, затем стабилизируется.

Время стабилизации τ , длина пройденного при этом пути теплового источника l_2 вдоль стержня и наибольшая температура θ в стержне (т.е. в момент ее стабилизации) определяются зависимостями (3.12), (3.13) и (3.16).

Расчетами установлено, что при точении все три приведенные параметра τ , l_2 и θ меньше, чем при шлифовании, вследствие меньшего значения σ и большего значения $V_{рез}$. При точении параметр l_2 может быть меньше толщины среза a . В этом случае зависимость температуры θ

Рис. 3.8. Графики изменения температуры резания при точении и шлифовании.

от времени обработки τ будет подчиняться зависимости, графически показанной на рис. 3.8,б (здесь приведены три зависимости для разных значений $V_{рез}$: $V_{рез1} < V_{рез2} < V_{рез3}$). Параметр τ^* определяется зависимостью (3.12).

На основании рис. 3.8,б можно построить зависимость θ от скорости $V_{рез}$ (или скорости резания V). Она будет подчиняться зависимости, графически показанной на рис. 3.8,в. Это хорошо согласуется с многочисленными экспериментальными данными, приведенными в научно-технической литературе [190, 335].

При шлифовании, как правило, выполняется условие $l_2 > t$. Поэтому стабилизация температуры θ с течением времени обработки τ не происходит. Наибольшая температура достигается в момент выхода рассматриваемого адиабатического стержня из контакта с шлифовальным кругом. Зависимость температуры θ от времени обработки τ принимает вид, показанный на рис. 3.8,г. Учитывая то, что при шлифовании условное напряжение резания σ мало изменяется с изменением технологических параметров, основным условием уменьшения максимальной температуры θ является увеличение времени обработки τ и уменьшение длины стержня l_2 . Исходя из зависимостей (3.12) и (3.13), это достигается уменьшением скорости перерезания стержня $V_{рез}$ за счет уменьшения скорости детали $V_{дет}$ для заданной глубины шлифования t .

На рис. 3.9 в обобщенном виде показаны условия уменьшения температуры поверхностного слоя детали в процессе ее механической обработки.

При выполнении условия $l_2 > t$ температура шлифования θ определяется зависимостью (3.5).

Наибольшее значение температуры, исходя из рис. 3.8,г, достигается при условии $\tau = t / V_{рез}$, т.е. в момент выхода рассматриваемого адиабатического стержня из контакта с шлифовальным кругом. Тогда, с учетом плотности теплового потока q , температура θ определится:

$$\theta = \sigma \cdot t \cdot \sqrt{\frac{2}{\lambda \cdot c \cdot \rho_m \cdot \tau}}. \quad (3.44)$$

Как следует из зависимости (3.44), температура θ тем меньше, чем больше время контакта фиксированного адиабатического стерж-

ня с шлифовальным кругом τ , т.е. чем меньше скорость $V_{рез}$. Таким образом уменьшить температуру θ для заданной глубины шлифования t можно увеличением времени τ и соответственно уменьшением скорости $V_{рез}$.



Рис. 3.9. Структурная схема условий уменьшения температуры поверхностного слоя детали при ее механической обработке.

С учетом зависимости для определения скорости $V_{рез}$, температура θ , определяемая зависимостью (3.44), выразится:

$$\theta = \sigma \cdot t^{0,75} \cdot \left(\frac{V_{дет}}{\lambda \cdot c \cdot \rho_m} \right)^{0,5} \cdot (2 \cdot \rho)^{0,25} \quad (3.45)$$

или

$$\theta = \sigma \cdot \left(\frac{Q_{уд}}{\lambda \cdot c \cdot \rho_m} \right)^{0,5} \cdot (2 \cdot t \cdot \rho)^{0,25}, \quad (3.46)$$

где $Q_{уд} = t \cdot V_{дет}$ – удельная производительность обработки (произ-

водительность, приходящаяся на единицу ширины круга), $\text{м}^2/\text{с}$.

Глубина шлифования t в большей мере влияет на температуру, чем скорость детали $V_{дет}$. Поэтому эффективнее уменьшать температуру θ за счет уменьшения глубины шлифования t . Таким образом, обоснованы основные условия снижения температуры поверхностного слоя детали при ее механической обработке.

3.5. ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНОГО ФАКТОРА

При выборе оптимальной структуры и параметров операции необходимо прежде всего учитывать температурный фактор, который как правило, является основным ограничением достижения высоких показателей качества и производительности обработки [213, 355, 383, 409, 410]. В предыдущих параграфах предложен новый подход к расчету температуры поверхностного слоя обрабатываемого материала. Используя его, можно решить ряд важных практических задач по обоснованию и выбору оптимальной структуры и параметров технологического процесса обработки.

Рассмотрим условия уменьшения температуры при шлифовании торцом круга прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга со скоростью $V_{рез}$. В этом случае температура θ будет определяться зависимостью (3.5).

Как следует из зависимости (3.5), уменьшить температуру θ можно двумя путями: уменьшением плотности теплового потока q или времени обработки τ . Уменьшить q можно в первую очередь за счет снижения скорости $V_{рез}$. Однако, это ведет к уменьшению производительности обработки, что не всегда эффективно. Поэтому предпочтительным путем уменьшения температуры следует рассматривать снижение времени обработки τ , которое определяется соотношением $\tau = \Pi / V_{рез}$, где Π – снимаемый припуск, м. Очевидно, уменьшить τ можно разбиением снимаемого припуска на отдельные части. Причем, чем их больше, тем меньше Π , τ и температура θ . Практически реализовать такое разделение припуска на составные части можно, выполняя обработку в несколько операций. Тогда в пределах каждой операции температура θ будет определяться по

преобразованной зависимости (3.5):

$$\theta = \sigma \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot V_{рез} \cdot \Pi}{\lambda \cdot c \cdot \rho_m}}, \quad (3.47)$$

откуда

$$V_{рез} \cdot \Pi = \frac{\lambda \cdot c \cdot \rho_m \cdot \theta^2}{2 \cdot \sigma^2}. \quad (3.48)$$

Из зависимости (3.48) следует, что для заданных значений θ и σ произведение $V_{рез} \cdot \Pi$ является постоянной величиной. Следовательно, уменьшая $\Pi \rightarrow 0$, можно значительно увеличить скорость $V_{рез}$ и соответственно производительность обработки. Реализовать условие $\Pi \rightarrow 0$ можно путем периодического прерывания процесса шлифования. Это достигается, например, за счет применения прерывистого круга: в момент контакта рабочего выступа круга с обрабатываемым образцом снимается слой материала определенной (небольшой) толщины Π , а в момент прохождения впадины круга происходит остывание образца. Температура при этом значительно уменьшается, и новый рабочий выступ круга контактирует практически с охлажденным образцом.

Периодичность контакта круга с обрабатываемым образцом можно обеспечить за счет сообщения кругу или образцу в радиальном направлении вибраций (ультразвуковых колебаний), а также применяя схему шлифования с продольной подачей, которая обеспечивает периодический выход круга из контакта с образцом.

Самое простое техническое решение – это применение схемы плоского шлифования, рассматривая снимаемый припуск детали как набор адиабатических стержней, расположенных перпендикулярно обрабатываемой поверхности. В этом случае время между контактами круга с фиксированным адиабатическим стержнем существенно возрастает, и он фактически успевает остыть до момента следующего контакта с кругом.

К такому же решению приходим, используя схемы круглого наружного и внутреннего шлифования периферией круга, хотя круглое наружное шлифование можно выполнить и торцом круга.

В укрупненном виде реализацией условия (3.48) является, по сути, разбиение процесса обработки на отдельные операции и переходы. В результате общий снимаемый припуск надо разделить на коли-

чество операций, что естественно приведет к уменьшению межоперационных припусков и, согласно зависимости (3.48), к увеличению скорости $V_{рез}$ и производительности обработки при заданных значениях θ и σ . Таким образом за счет применения операционной технологии обеспечивается уменьшение величины Π в зависимости (3.48) и соответственно увеличение производительности обработки. Уменьшение величины Π в результате выполнения обработки за несколько операций позволяет также уменьшить температуру θ для заданной скорости $V_{рез}$ и производительности обработки. Чем больше количество выполняемых операций, тем меньше условная величина межоперационного припуска и тем выше может быть достигнута производительность обработки с учетом ограничения по температурному фактору.

На практике принято финишные операции выполнять с меньшей производительностью и со съемом меньших припусков по сравнению с черновыми операциями. Исходя из зависимости (3.48), это приводит к уменьшению произведения $V_{рез} \cdot \Pi$ и температуры θ . Следовательно, данный подход направлен на снижение температуры и исключение температурных дефектов обработки, т.е. повышение качества обрабатываемых поверхностей.

Учитывая то, что температура θ и произведение $V_{рез} \cdot \Pi$ связаны между собой нелинейной зависимостью (3.48), для обеспечения ощутимого уменьшения температуры θ требуется значительное уменьшение произведения $V_{рез} \cdot \Pi$, т.е. уменьшения параметров $V_{рез}$ и Π . Этим и объясняется существенное отличие режимов резания и величин снимаемых припусков на операциях черновой и чистовой обработки.

Важнейшим условием уменьшения температуры θ и увеличения скорости $V_{рез}$ и производительности обработки, как следует из зависимости (3.48), является уменьшение условного напряжения резания σ за счет повышения режущей способности инструмента, снижения трения в зоне обработки и т.д.

При выборе оптимальных условий обработки необходимо обеспечить концентрацию образующегося тепла как можно в меньшем объеме поверхностного слоя материала, т.е. уменьшить длину адиабатического стержня l_2 , которыми условно представлен снимаемый припуск. Параметр l_2 определяется аналитической зависимостью (3.3).

Как следует из зависимости (3.3), уменьшить l_2 можно лишь за счет уменьшения времени τ . Поэтому все выводы, сделанные выше при анализе условий уменьшения температуры θ , остаются справедливыми и при анализе условий уменьшения параметра l_2 .

Параметры θ и l_2 связаны между собой известной из курса физики зависимостью (3.4) – формулой теплопроводности тела:

$$\theta = \frac{q \cdot l_2}{\lambda}.$$

По сути, из зависимости вытекает зависимость (3.5), т.е. уменьшить температуру θ можно уменьшением двух параметров: q и l_2 . Поскольку плотность теплового потока q посредством скорости $V_{рез}$ связана с производительностью обработки и поэтому ее уменьшать нецелесообразно, основным путем уменьшения температуры θ является снижение параметра l_2 за счет времени обработки τ , согласно зависимости (3.3). Уменьшение $\tau \rightarrow 0$ предполагает уменьшение величины снимаемого припуска $\Pi \rightarrow 0$ на последнем этапе обработки.

Возникает вопрос – а какая закономерность съема припуска на предшествующих этапах (операциях и переходах)? Чтобы ответить на данный вопрос, рассмотрим условия обработки, позволяющие концентрировать образующееся при резании тепло в основном в слое снимаемого припуска, практически исключая его проникновение в поверхностный слой обрабатываемого материала. Математически это выражается условием: $\Delta\Pi + l_2 = \Pi$, где $\Delta\Pi = V_{рез} \cdot \tau$ – текущее значение снимаемого припуска, м. С учетом зависимости (3.3), имеем:

$$V_{рез} \cdot \tau + \sqrt{\frac{2\lambda \cdot \tau}{c \cdot \rho_m}} = \Pi. \quad (3.49)$$

Получено квадратное уравнение относительно неизвестной величины τ . Его решение (принимая $x = \tau^2$):

$$x = -\frac{A}{2 \cdot V_{рез}} + \sqrt{\frac{A^2}{4V_{рез}^2} + \frac{\Pi}{V_{рез}}}, \quad (3.50)$$

где $A = \sqrt{\frac{2\lambda}{c \cdot \rho_m}}$.

Умножим и разделим полученное выражение на сопряженную величину:

$$\frac{A}{2 \cdot V_{рез}} + \sqrt{\frac{A^2}{4V_{рез}^2} + \frac{\Pi}{V_{рез}}},$$

тогда

$$x = \frac{2\Pi}{A} \cdot \frac{1}{\left(1 + \sqrt{1 + \frac{4\Pi \cdot V_{рез}}{A^2}}\right)^2}. \quad (3.51)$$

Откуда

$$\tau = x^2 = \frac{4\Pi^2}{A^2} \cdot \frac{1}{\left(1 + \sqrt{1 + \frac{4\Pi \cdot V_{рез}}{A^2}}\right)^4}. \quad (3.52)$$

Соответственно $\Delta\Pi = V_{рез} \cdot \tau$:

$$\Delta\Pi = \frac{4\Pi^2 \cdot V_{рез}}{A^2} \cdot \frac{1}{\left(1 + \sqrt{1 + \frac{4\Pi \cdot V_{рез}}{A^2}}\right)^4} \quad (3.53)$$

или

$$\frac{\Delta\Pi}{\Pi} = \frac{4\Pi \cdot V_{рез}}{A^2} \cdot \frac{1}{\left(1 + \sqrt{1 + \frac{4\Pi \cdot V_{рез}}{A^2}}\right)^4}. \quad (3.54)$$

Определим количественно величину $\frac{4\Pi \cdot V_{рез}}{A^2}$ при алмазном шлифовании твердого сплава ВК8 для следующих исходных данных: $\lambda = 50$ Вт/(м·К); $c = 175,9$ Дж/(кг·К); $\rho_m = 15 \cdot 10^3$ кг/м³; $\Pi = 10^{-3}$ м; $V_{рез} = 10^{-3}$ м/мин. Данная величина равна $1,7 \cdot 10^{-3}$, т.е. значительно меньше единицы. Из этого вытекает, что подкоренное выражение в знаменателе зависимости (3.54) равно приблизительно единице. Тогда

$$\frac{\Delta\Pi}{\Pi} = \frac{4\Pi \cdot V_{рез}}{A^2} \cdot \frac{1}{16} = \frac{1,27 \cdot 10^{-3}}{16}.$$

Как видим, отношение $\Delta\Pi / \Pi$ принимает весьма малое значение и поэтому первым слагаемым в зависимости (3.49) можно пренебречь. В результате уравнение (3.49) принимает простой вид:

$\Pi = l_2$. Откуда с учетом зависимости (3.3), определяется время обработки τ :

$$\tau = \frac{c \cdot \rho_m \cdot \Pi^2}{2 \cdot \lambda}. \quad (3.55)$$

В общем случае $\tau = \Delta\Pi / V_{рез}$. В результате приходим к двум неизвестным величинам $\Delta\Pi$ и $V_{рез}$. Для определения одной из них наложим ограничение на температуру θ . При условии $\Pi = l_2$, имеем

$$\theta = \frac{\sigma \cdot V_{рез} \cdot \Pi}{\lambda}. \quad (3.56)$$

Из зависимости (3.56) определяется скорость $V_{рез}$:

$$V_{рез} = \frac{\lambda \cdot \theta}{\sigma \cdot \Pi}. \quad (3.57)$$

Как видим, скорость $V_{рез}$ тем больше, чем больше температура θ и меньше величина снимаемого припуска Π . В результате пришли к зависимости, подобной зависимости (3.48). Зная параметры $V_{рез}$ и τ , определим величину $\Delta\Pi = V_{рез} \cdot \tau$ с учетом зависимостей (3.55) и (3.57):

$$\Delta\Pi = \frac{c \cdot \rho_m \cdot \theta \cdot \Pi}{2 \cdot \sigma} \quad (3.58)$$

или

$$\frac{\Delta\Pi}{\Pi} = \frac{c \cdot \rho_m \cdot \theta}{2 \cdot \sigma}. \quad (3.59)$$

Согласно зависимости (3.16), выражение $\theta^* = \frac{\sigma}{c \cdot \rho}$ определяет

максимально возможную температуру, обусловленную тепловым насыщением адиабатического стержня, которыми условно представлен снимаемый припуск. Тогда зависимость (3.59) примет вид

$$\frac{\Delta\Pi}{\Pi} = \frac{\theta}{2 \cdot \theta^*}. \quad (3.60)$$

Поскольку $\theta \ll \theta^*$, отношение $\Delta\Pi / \Pi$ всегда меньше единицы. Из этого вытекает, что условие $\Delta\Pi = \Pi$ может быть выполнено лишь при обеспечении температуры $\theta = 2\theta^*$. Однако с физической точки зрения это не всегда осуществимо. Поэтому снимаемый припуск Π необходимо удалять частями на отдельных операциях, переходах или за счет периодического прерывания процесса резания.

Предположим, на первом этапе обработки (а это может быть первая операция или переход, первое прерывание контакта круга с обрабатываемым материалом) произведен съем слоя материала толщиной $\Delta\Pi_1$. Оставшаяся часть припуска равна $\Pi - \Delta\Pi_1$. Тогда на втором этапе, исходя из зависимости (3.60), произойдет съем слоя материала меньшей толщины $\Delta\Pi_2 < \Delta\Pi_1$, т.к. оставшийся после первого этапа припуск $\Pi - \Delta\Pi_1$ меньше начального припуска Π .

На третьем этапе произойдет съем еще меньшего слоя припуска $\Delta\Pi_3 < \Delta\Pi_2$ и т.д. В результате на последнем этапе $\Delta\Pi_n \rightarrow 0$.

Из этого вытекает, что для выполнения условия $\Pi = l_2$ необходимо обеспечить условно периодическое прерывание процесса обработки путем разбиения его на отдельные операции или за счет периодического выхода круга из контакта с обрабатываемым материалом в пределах одной операции. Причем, снимаемый слой обрабатываемого материала с каждым последующим прерыванием процесса обработки должен уменьшаться.

Рассмотрим данную закономерность, принимая в зависимости новое обозначение $A = \frac{\theta}{2 \cdot \theta^*}$. Тогда $\frac{\Delta\Pi}{\Pi} = A$, откуда

$$\Delta\Pi_1 = A \cdot \Pi. \quad (3.61)$$

На втором этапе обработки: $\frac{\Delta\Pi_2}{\Pi - \Delta\Pi_1} = A$, откуда

$$\Delta\Pi_2 = A \cdot (1 - A) \cdot \Pi. \quad (3.62)$$

На третьем этапе обработки: $\frac{\Delta\Pi_3}{\Pi - \Delta\Pi_1 - \Delta\Pi_2} = A$, откуда

$$\Delta\Pi_3 = A \cdot (1 - A)^2 \cdot \Pi. \quad (3.63)$$

Аналогичным образом определяются значения $\Delta\Pi_4, \Delta\Pi_5$.

В результате приходим к ряду:

$$\begin{aligned} \Delta\Pi_1 + \Delta\Pi_2 + \Delta\Pi_3 + \dots &= A \cdot \Pi + A \cdot (1 - A)^2 \cdot \Pi + \\ &+ A \cdot (1 - A)^3 \cdot \Pi + \dots = A \cdot \Pi \cdot (1 + x + x^2 + x^3 + \dots), \end{aligned} \quad (3.64)$$

где $x = (1 - A)$.

Сумма данного ряда равна

$$\Sigma = A \cdot \Pi \left[1 + \frac{x}{(1 - x)} \right] = \Pi. \quad (3.65)$$

Таким образом, на каждом последующем этапе обработки вели-

чина снимаемого припуска $\Delta\Pi$ в $(1 - A)$ раз меньше, чем на предыдущем этапе обработки.

Приблизительно к такому же закону изменения съема припуска во времени можно прийти, представляя зависимость (3.3) в виде:

$$l_2 = \Pi = \sqrt{\frac{2\lambda}{c \cdot \rho_m} \cdot \frac{\Delta\Pi}{V_{рез}}}. \quad (3.66)$$

В первом приближении можно принять $\Delta\Pi = \frac{V}{F}$, $V_{рез} = \frac{dV}{d\tau} \cdot \frac{1}{F}$, рассматривая скорость $V_{рез}$ переменной величиной (здесь V - объем снятого материала, m^3 ; F - площадь поперечного сечения обрабатываемого образца, m^2). После преобразования зависимости (3.66) приходим к линейному дифференциальному уравнению первого порядка:

$$\frac{dV}{d\tau} - \frac{2\lambda}{c \cdot \rho_m \cdot \Pi^2} \cdot V = 0. \quad (3.67)$$

Его решение общеизвестно:

$$V = \left(\int d\tau \cdot c_1 \cdot e^{\int B \cdot d\tau} + c_2 \right) \cdot e^{-\int B \cdot d\tau}, \quad (3.68)$$

где $c_1 = 0$ (правая часть уравнения); $B = -\frac{2\lambda}{c \cdot \rho_m \cdot \Pi^2}$; c_2 - постоянная интегрирования.

Откуда

$$V = c_2 \cdot e^{-B \cdot \tau}. \quad (3.69)$$

Постоянную c_2 определим из начального условия (при $\tau = 0$):

$V_{рез} = \frac{dV}{d\tau} \cdot \frac{1}{F}$. Тогда зависимость (3.69) принимает вид

$$c_2 = F \cdot V_{рез} \quad (3.70)$$

или

$$V = \frac{2\lambda \cdot F \cdot V_{рез}}{c \cdot \rho_m \cdot \Pi^2} \cdot e^{\frac{2\lambda\tau}{c \cdot \rho_m \cdot \Pi^2}}. \quad (3.71)$$

Как видим, с течением времени обработки τ объем снятого материала V увеличивается по экспоненциальному закону, приближаясь к значению $V = \frac{2\lambda \cdot F \cdot V_{рез}}{c \cdot \rho_m \cdot \Pi^2}$. Таким образом показаны закономерности съема припуска с учетом температурного фактора, обоснованы

структура и параметры технологического процесса механической обработки с учетом температурного фактора.

3.6. УСЛОВИЯ УМЕНЬШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛИ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ПЕРЕМЕННОЙ СКОРОСТИ ПОДАЧИ

Рассмотрим схему шлифования прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности шлифовального круга с постоянной скоростью $V_{рез}$. Температура θ , возникающая в месте контакта круга с образцом, определяется зависимостью (3.5).

Уменьшить температуру θ , согласно зависимости (3.5), можно уменьшением параметров q и τ . Однако, при шлифовании по данной схеме, когда обрабатываемый образец находится в постоянном контакте с кругом, ограничить время τ практически невозможно. Следовательно, необходимо уменьшить q за счет уменьшения $V_{рез}$ по закону $\tau^{-0,5}$. Тогда с течением времени обработки τ температура θ будет оставаться неизменной величиной, т.е. произойдет стабилизация температуры во времени. Пожалуй, этим можно объяснить эффективность применения на конечной стадии обработки процесса выхаживания (шлифования с отключенной радиальной подачей станка). Съем материала в этом случае происходит за счет создания натяга (упругих перемещений) в технологической системе.

Толщина слоя образца l_2 , в котором концентрируется образующееся при резании тепло, определяется зависимостью (3.3).

На величину l_2 , согласно зависимости (3.3), из переменных параметров оказывает влияние лишь время обработки τ . Поскольку его ограничить для данной схемы шлифования практически невозможно, то и величина l_2 с течением времени обработки будет существенно увеличиваться. При этом температура “прогретого” слоя толщиной l_2 , как показано выше, ограничена, что не приведет к температурным дефектам поверхностного слоя обработанного материала.

Описанное решение является приближенным, т.к. зависимость (3.5) получена для постоянной во времени скорости $V_{рез}$. Установим зависимость для определения температуры θ при шлифовании с переменной скоростью $V_{рез}$, используя формулу теплопроводности тела

(3.1) и принимая в ней: $Q = \int_0^{\tau} N \cdot d\tau$ – количество тепла, проходящее через условную “стенку” толщиной l_2 за время τ , Дж; $N = q \cdot S$ – мощность теплового источника, Вт; S – площадь поверхности условной “стенки” (в нашем случае площадь поперечного сечения обрабатываемого образца), м².

Предположим, что скорость $V_{рез}$ изменяется во времени по закону: $V_{рез} = A \cdot \tau^n$, где A и N – некоторые постоянные величины. Тогда имеем:

$$q = \sigma \cdot V_{рез} = \sigma \cdot A \cdot \tau^n, \quad (3.72)$$

$$Q = \int_0^{\tau} S \cdot \sigma \cdot A \cdot \tau^n \cdot d\tau = S \cdot \sigma \cdot A \cdot \frac{\tau^{1+n}}{(1+n)}. \quad (3.73)$$

Подставляя зависимости (3.3) и (3.73) в (3.1), имеем

$$\theta = \frac{A \cdot \sigma}{(1+n)} \cdot \sqrt{\frac{2}{\lambda \cdot c \cdot \rho_m}} \cdot \tau^{0,5+n}. \quad (3.74)$$

При $n=0$ приходим к зависимости (3.5), а при $n=(-0,5)$ – к зависимости

$$\theta = 2 \cdot A \cdot \sigma \cdot \sqrt{\frac{2}{\lambda \cdot c \cdot \rho_m}}, \quad (2.75)$$

в которую время τ не входит.

ГЛАВА 4

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ СВЕТООТРАЖАТЕЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОСОБОТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ

4.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В конструкциях космических летательных аппаратов (КЛА) широко используются многофункциональные ответственные детали из тонкого листа и лент (особотонкостенные детали). Это элементы наружных оболочек, упругие выносные элементы в виде плоскострачиваемых трубок из тонких пружинных лент (штанги систем гравитационной ориентации и стабилизации, антенны и др.), изготовленные из материалов с особыми свойствами упругости и теплового линейного расширения (хромоникелиевых, медно-бериллиевых сплавов и др.). К качеству изготовления таких деталей и надежности их работы предъявляются высокие требования, направленные, прежде всего, на снижение их неравномерного нагрева солнечными лучами и возникающих при этом температурных деформаций.

Известно, что работоспособность поверхностей тонких упругих лент изделий КЛА в условиях воздействия светового потока в значительной степени определяется их геометрическими и физико-химическими характеристиками. Уменьшить температуру деталей, работающих в условиях воздействия светового потока, можно за счет технологического обеспечения заданных геометрических и оптических характеристик поверхностей, применяя для этого эффективные методы механической и физико-технической обработки. Однако, в настоящее время отсутствуют практические рекомендации по технологическому обеспечению высокой светоотражательной и излучательной способностей поверхностей труднообрабатываемых особотонкостенных деталей.

Не исследованы вопросы взаимосвязи шероховатости и оптических характеристик обработанных поверхностей, что не позволяет научно обоснованно подойти к выбору оптимальных методов и условий обработки. Отсутствуют технологические процессы формирования отверстий в особотонкостенных деталях, являющихся одним из важных факторов снижения температуры и температурных деформаций рассматриваемых деталей.

Перспективными являются способы абразивной и электрохими-

ческой обработки, которые могут обеспечить необходимые значения этих характеристик. Вместе с тем, данные процессы многофакторные, дают не стабильные результаты, особенно при обработке тонких упругих лент, и требуют дальнейшего изучения. Практическая реализация этих процессов недостаточно исследована для их серийного применения. Все это указывает на необходимость проведения комплекса теоретических и экспериментальных исследований по технологическому обеспечению геометрических и оптических характеристик поверхностей особотонкостенных деталей с целью повышения их эксплуатационных свойств.

4.2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ

В процессе обработки деталей машин не удастся получить идеальную поверхность, очерчивающую контур обрабатываемой детали. Вследствие особенностей обработки поверхность принимает вид не прямой линии (в сечении) с наложением на нее пилообразного неравномерного профиля, называемого шероховатостью поверхности. В лучшем случае точность формирования поверхности при обработке обусловлена этой шероховатостью. Чем меньше шероховатость, тем выше точность обработки и идеальнее созданная поверхность. Естественно, говорить о точности созданной поверхности и ее эксплуатационных свойствах можно с позиции шероховатости.

В настоящее время сложилось достаточно четкое представление о структуре и параметрах шероховатости поверхности. ГОСТами определены основные характеристики шероховатости, в том числе дано их математическое описание. Выявлены физические связи между параметрами шероховатости поверхности и эксплуатационными характеристиками деталей машин, что позволяет правильно устанавливать требуемую шероховатость обработки в зависимости от условий, в которых будет работать данная обработанная поверхность.

Вместе с тем, уровень анализа шероховатости поверхности ограничивается экспериментальными данными. До настоящего времени мы не научились правильно аналитически определять параметры шероховатости для различных методов обработки. Это значительно сужает возможности анализа, оптимизации и управления шероховатостью поверхности. В связи с этим, чрезвычайно важной и актуальной задачей следует рассматривать дальнейшее изучение законо-

мерностей формирования шероховатости поверхности с целью ее более полного и правильного аналитического описания.

В основу решений положим теоретический подход, предложенный в работах [238, 242]. Рассмотрим схему образования шероховатости поверхности на прямолинейном образце при его обработке алмазно-абразивным инструментом, характеризующимся первоначально одновысотным выступанием режущих зерен над уровнем связки инструмента, рис. 4.1,а.

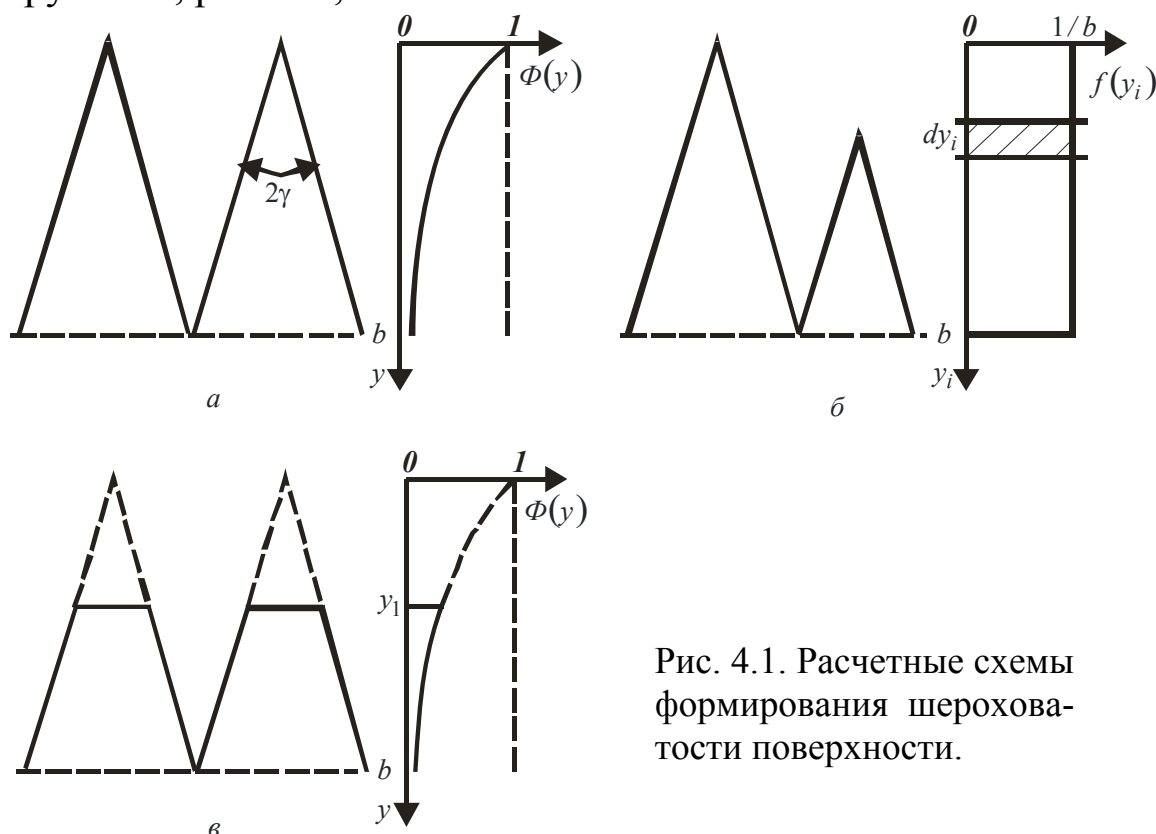


Рис. 4.1. Расчетные схемы формирования шероховатости поверхности.

Относительная полнота профиля отдельного зерна, спроектированного на поверхность обрабатываемого образца, описывается зависимостью

$$\varepsilon_i(y) = \frac{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot y}{B}, \quad (4.1)$$

где 2γ - угол при вершине конусообразного режущего зерна; B - ширина рабочей части алмазно-абразивного инструмента, м; y - координата, отсчитываемая от вершины зерна, м.

Противоположная вероятностная функция $\Phi_i(y)$ имеет вид

$$\Phi_i(y) = 1 - \varepsilon_i(y) = 1 - \frac{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot y}{B}. \quad (4.2)$$

Функция $\Phi(y)$, учитывающая наложение проекций n зерен (расположенных на рабочей поверхности инструмента), согласно

теореме умножения независимых случайных величин, выразится

$$\Phi(y) = \prod_{i=1}^n \Phi_i(y) = \left(1 - \frac{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot y}{B}\right)^n = (1 - x)^n. \quad (4.3)$$

В результате преобразований пришли к Биному Ньютона:

$$(1 - x)^n = 1 - n \cdot x + \frac{n \cdot (n - 1)}{1 \cdot 2} \cdot x^2 - \frac{n \cdot (n - 1) \cdot (n - 2)}{1 \cdot 2 \cdot 3} \cdot x^3 + \dots \quad (4.4)$$

Учитывая то, что $x < 1$, а n - относительно большая величина, в разложении (4.4) преобладают первые слагаемые. Поэтому с достаточной для практики точностью можно принять:

$$(1 - x)^n \approx 1 - n \cdot x + \frac{n^2}{1 \cdot 2} \cdot x^2 - \frac{n^3}{1 \cdot 2 \cdot 3} \cdot x^3 + \dots = e^{-nx}. \quad (4.5)$$

Тогда

$$\Phi(y) = e^{-nx} = e^{-\frac{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n \cdot y}{B}}. \quad (4.6)$$

Соответственно

$$\varepsilon(y) = 1 - e^{-\frac{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n \cdot y}{B}}. \quad (4.7)$$

Характер изменения функции $\Phi(y)$ графически показан на рис. 4.1,а. По физической сути функция $\Phi(y)$ описывает относительную опорную длину микропрофиля обрабатываемой поверхности, рассматривая координату y в противоположном направлении.

Рассмотрим схему образования шероховатости поверхности на прямолинейном образце при его обработке алмазно-абразивным инструментом, характеризующимся разновысотным выступанием режущих зерен над уровнем связки инструмента, рис. 4.1,б.

По аналогии с предыдущим решением, функция $\Phi_i(y)$ от наложения dn_i проекций зерен, имеющих высоту выступления над уровнем связки инструмента, равную $(y - y_i)$, опишется

$$\Phi_i(y) = e^{-\frac{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot (y - y_i) \cdot dn_i}{B}}, \quad (4.8)$$

где $dn_i = n \cdot f(y_i) \cdot dy_i$; n - общее количество зерен, участвующих в формировании шероховатости поверхности; $f(y_i) = \frac{1}{b}$ - плотность распределения высот вершин зерен над уровнем связки инструмента; b - максимальная высота выступления вершин зерен над уровнем связки инструмента.

Суммарная функция $\Phi(y)$ от наложения n проекций зерен определится

$$\begin{aligned} \Phi(y) &= \prod_{i=1}^n \Phi_i(y) = e^{-\frac{2 \cdot \text{tg} \gamma}{B} \cdot \sum_{i=1}^n (y - y_i) \cdot dn_i} = \\ &= e^{-\frac{2 \cdot \text{tg} \gamma}{B} \cdot \int_0^h (y - y_i) \cdot n \cdot f(y_i) \cdot dy_i} = e^{-\frac{2 \cdot \text{tg} \gamma \cdot n}{b \cdot B} \cdot h \cdot \left(y - \frac{h}{2}\right)}, \end{aligned} \quad (4.9)$$

где h - текущее значение координаты y , определяющее количество зерен, которые проконтактировали с обрабатываемым образцом.

При условии $h = y$ зависимость (4.9) упростится

$$\Phi(y) = e^{-\frac{2 \cdot \text{tg} \gamma \cdot n}{B} \cdot \frac{y^2}{2 \cdot b}}. \quad (4.10)$$

Зависимость (4.10) отличается от аналогичной зависимости (4.6) множителем $\frac{y}{2 \cdot b}$, входящим в показатель степени. Данный множитель всегда меньше единицы. Поэтому значение функции $\Phi(y)$, рассчитанное по зависимости (4.10) для заданного значения y , будет всегда больше. Это связано с меньшим количеством зерен, участвующих в формировании шероховатости поверхности, и соответствует большей шероховатости обработки.

Рассмотрим схему формирования шероховатости поверхности при условии, что зерна инструмента движутся в горизонтальном направлении со скоростью $V_{инст}$, а обрабатываемый прямолинейный образец движется в вертикальном направлении (вниз) со скоростью $V'_{дет}$.

Вероятностная функция $\Phi(y)$ в этом случае определится произведением элементарных функций $\Phi_i(y)$, описываемых зависимостью (4.10). При этом вместо параметра n необходимо рассматривать бесконечно малую величину dn_i , а вместо y - величину $(y - y_i)$, учитывающую разновысотное выступание вершин зерен над уровнем связки инструмента, рис. 4.1,б.

Тогда суммарная функция $\Phi(y)$ от наложения n зерен примет вид

$$\Phi(y) = \prod_{i=1}^n \Phi_i(y) = e^{-\frac{\text{tg} \gamma}{b \cdot B} \cdot \sum_{i=1}^n (y - y_i)^2 \cdot dn_i} =$$

$$= e^{-\frac{tg\gamma}{b \cdot B} \int_0^h (y-y_i)^2 \cdot n \cdot f(y_i) \cdot dy_i} = e^{-\frac{tg\gamma \cdot n \cdot h}{b^2 \cdot B} \cdot \frac{1}{3} (3y^2 - 3y \cdot h + h^2)} \quad (4.11)$$

При условии $h = y$, зависимость (4.11) упростится:

$$\Phi(y) = e^{-\frac{2 \cdot tg\gamma \cdot n}{B} \cdot \frac{y^3}{6 \cdot b^2}} \quad (4.12)$$

Сравнивая зависимости (4.10) и (4.12), видим, что зависимость (4.12) содержит дополнительный множитель $\frac{y}{3 \cdot b}$, который меньше единицы. Следовательно, значение $\Phi(y)$, рассчитанное по зависимости (4.12) при данном значении y , будет больше значения $\Phi(y)$, рассчитанного по зависимости (4.10). Это соответствует большей шероховатости поверхности, т.е. для уменьшения шероховатости необходимо обработку производить практически неподвижного образца ($V'_{дет} = 0$).

С учетом того, что $n = k \cdot B \cdot V_{инст} \cdot \frac{b}{V'_{дет}}$ зависимость (4.12)

опишется

$$\Phi(y) = e^{-\frac{tg\gamma \cdot k \cdot V_{инст} \cdot y^3}{b \cdot V'_{дет} \cdot 3}} \quad (4.13)$$

Рассмотрим схему формирования шероховатости поверхности с учетом износа зерен. Предположим, что режущие зерна износились на величину y_1 , рис. 4.1,в. Тогда функция $\Phi(y)$, описываемая зависимостью (4.6) и графически показанная на рис. 4.1,в, будет справедлива в интервале $y \geq y_1$. Значения функции $\Phi(y)$ в данном случае меньше, чем при обработке острыми зернами. Это ведет к уменьшению шероховатости обработки.

При $y = y_1$ функция $\Phi(y)$ примет вид:

$$\Phi(y) = e^{-\frac{2 \cdot tg\gamma \cdot n}{B} \cdot y_1} \quad (4.14)$$

Таким образом, в параграфе приведена новая методика аналитического описания закономерностей формирования шероховатости поверхности при абразивной обработке, позволяющая достаточно просто с позиции теории вероятностей определить основные параметры шероховатости и в дальнейшем увязать их с оптическими характеристиками поверхности. Это позволит улучшить оптические характеристики за счет применения эффективных технологических методов

механической и физико-технической обработки. Предложенная методика является, по сути, дальнейшим развитием известного и широко применяемого на практике теоретико-вероятностного подхода при шлифовании, разработанного профессорами Королевым А.В. и Новоселовым Ю.К.

4.3. СРАВНЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ С ИЗВЕСТНЫМИ РЕШЕНИЯМИ

Получим аналогичные решения, используя методику, приведенную в работе Новикова Ф.В. [242]. В этой работе методически правильно с использованием теоремы умножения независимых случайных величин аналитически описаны условия формирования шероховатости поверхности при шлифовании. Применим данный подход к аналитическому описанию условий формирования шероховатости поверхности при доводке свободным и связанным абразивом.

Рассмотрим расчетные схемы, показанные на рис. 4.1, а, б. Согласно этим схемам, формирование шероховатости поверхности происходит в результате наложения и перекрытия проекций режущих зерен на вертикальную плоскость, имитирующую поверхность обрабатываемого прямолинейного образца. Шероховатость поверхности будет определять слой толщиной R_{max} , ограниченный вершиной максимально выступающего над уровнем связки инструмента зерна и нижней точкой пересечения двух соседних проекций зерен. Параметр R_{max} равен максимальной высоте микронеровностей обработанной поверхности и соответствует ГОСТовскому параметру шероховатости обработки.

Очевидно, что чем больше проекций зерен участвует в формировании шероховатости поверхности, тем меньше параметр R_{max} .

Параметр R_{max} можно определить из условия:

$$\sum_{i=1}^{\infty} l_i = B, \quad (4.15)$$

где B - ширина обрабатываемого образца, м; l_i - ширина проекции зерна на заданном уровне y , м; y - координата, отсчитываемая от вершины максимально выступающего над уровнем связки режущего зерна, м; i - количество проекций зерен на заданном уровне y .

Для упрощения расчетов примем следующие допущения:

- 1) выступание вершин зерен над уровнем связки абразивного инструмента подчиняется равномерному закону с плотностью распределения $f(y_i) = \frac{1}{b}$, где b - максимальная высота выступания вершин зерен над уровнем связки абразивного инструмента;
- 2) рабочие части зерен имеют форму конуса с углом при вершине 2γ .

Для определения параметра R_{max} представим поверхность обрабатываемого образца в виде бесконечного множества горизонтальных элементарных слоев толщиной dy_i . Исходя из принятого равномерного закона распределения высот выступания вершин зерен над уровнем связки, в каждый элементарный слой попадет dn_i вершин зерен. Тогда формирование шероховатости поверхности условно можно представить как результат наложения i -того числа элементарных профилей проекций зерен, имеющих различную высоту (изменяющуюся в пределах от 0 до b).

Будем считать, что в пределах одного элементарного профиля отсутствует взаимное перекрытие проекций зерен. Данное условие можно всегда выполнить за счет увеличения количества рассматриваемых элементарных профилей и соответственно уменьшения числа вершин зерен, попавших в i -й элементарный слой.

Сумма проекций зерен (вершины которых расположены в слое толщиной dy_i) на заданном уровне y определится:

$$\sum_{i=1}^{\infty} l_i = 2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot (y - y_i) \cdot dn_i, \quad (4.16)$$

где $dn_i = n \cdot f(y_i) \cdot dy_i$; $f(y_i) = 1/b$; n - общее число зерен, участвующих в формировании шероховатости поверхности; k - поверхностная концентрация зерен абразивного инструмента, шт/м²; L - длина рабочей поверхности абразивного инструмента, проконтактировавшая с рассматриваемой поверхностью обрабатываемого образца, м; y_i - координата, определяющая положение элементарного слоя толщиной dy_i .

Пользуясь обозначениями параметров, принятыми в работе [242], рассмотрим относительную величину для i -того элементарного слоя:

$$d\varepsilon_i(y) = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} l_i}{B} = 2 \operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot L \cdot \frac{1}{b} \cdot (y - y_i) \cdot dy_i. \quad (4.17)$$

Аналогичным образом определяется данная относительная величина для любого s -того элементарного слоя.

С физической точки зрения относительная величина $d\varepsilon_i(y)$ определяет долю срезанного металла зернами, вершины которых расположены в i -том элементарном слое. По абсолютной величине $d\varepsilon_i(y) < 1$.

Суммарную относительную величину $\varepsilon(y)$, определяющую долю срезанного металла всеми n зернами, можно установить на основе теоремы умножения независимых случайных величин $d\varepsilon_i(y)$, где $i = 1, 2, 3, \dots, s, \dots, \infty$. Однако, очевидно, умножение даже двух относительных величин $d\varepsilon_1(y) < 1$ и $d\varepsilon_2(y) < 1$ приведет к значению, которое меньше $d\varepsilon_1(y) < 1$. Это не соответствует физической сути, т.к. значение произведения $d\varepsilon_1(y) \cdot d\varepsilon_2(y)$ должно быть больше каждого из множителей, т.е. по мере увеличения количества режущих зерен доля срезанного металла должна увеличиваться.

Для того чтобы получить физически правильное решение, необходимо воспользоваться теоремой умножения независимых случайных величин $d\Phi_i(y) = 1 - d\varepsilon_i(y)$, т.е. перейти к противоположной величине $d\Phi_i(y)$. В данном случае относительная величина $d\Phi_i(y)$ будет определять долю не срезанного металла. Произведение $d\Phi_1(y) \cdot d\Phi_2(y)$ даст значение, которое меньше $d\Phi_1(y) < 1$. Следовательно, по мере подключения в работу большего числа зерен суммарная относительная величина $\Phi(y)$, определяющая долю не срезанного металла всеми n зернами, будет уменьшаться, что соответствует действительности.

Тогда, согласно теореме умножения независимых случайных величин, суммарная относительная величина $\Phi(y)$ опишется:

$$\begin{aligned} \Phi(y) = \prod_{i=1}^{\infty} d\Phi_i(y) = \prod_{i=1}^{\infty} [1 - d\varepsilon_i(y)] = 1 - \sum_{i=1}^{\infty} d\varepsilon_i(y) + \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{s=1}^i d\varepsilon_i(y) \cdot d\varepsilon_s(y) - \\ - \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{s=1}^i \sum_{j=1}^s d\varepsilon_i(y) \cdot d\varepsilon_s(y) \cdot d\varepsilon_j(y) + \dots \end{aligned} \quad (4.18)$$

Заменим операцию суммирования интегрированием:

$$\hat{O}(y) = 1 - \int_0^h 2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \frac{k \cdot L}{b} \cdot (y - y_i) \cdot dy_i +$$

$$\begin{aligned}
& + \int_0^h 2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \frac{k \cdot L}{b} \cdot (y - y_i) \cdot dy_i \cdot \int_{y_i}^h 2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \frac{k \cdot L}{b} \cdot (y - y_s) \cdot dy_s - \\
& - \int_0^h 2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \frac{k \cdot L}{b} \cdot (y - y_i) \cdot dy_i \cdot \int_{y_i}^h 2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \frac{k \cdot L}{b} \times \\
& \times (y - y_s) \cdot dy_s \cdot \int_{y_s}^h 2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \frac{k \cdot L}{b} \cdot (y - y_j) \cdot dy_j + \dots
\end{aligned} \quad (4.19)$$

где h - значение координаты y , изменяющееся в пределах от 0 до y .

Определим отдельные слагаемые выражения (4.19).

Второе слагаемое:

$$\begin{aligned}
& \int_0^h 2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \frac{k \cdot L}{b} \cdot (y - y_i) \cdot dy_i = 2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \frac{k \cdot L}{b} \cdot \left(y \cdot y_i - \frac{y_i^2}{2} \right) \Big|_0^h = \\
& = 2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \frac{k \cdot L}{b} \cdot h \cdot \left(y - \frac{h}{2} \right).
\end{aligned} \quad (4.20)$$

Третье слагаемое:

$$\begin{aligned}
& \int_{y_i}^h 2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \frac{k \cdot L}{b} \cdot (y - y_s) \cdot dy_s = 2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \frac{k \cdot L}{b} \cdot \left[h \cdot \left(y - \frac{h}{2} \right) - \left(y \cdot y_i - \frac{y_i^2}{2} \right) \right], \\
& \int_0^h 2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \frac{k \cdot L}{b} \cdot (y - y_i) \cdot dy_i \cdot \int_{y_i}^h 2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \frac{k \cdot L}{b} \cdot (y - y_s) \cdot dy_s = \\
& = \int_0^h \left(2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \frac{k \cdot L}{b} \right)^2 \cdot (y - y_i) \cdot \left[h \cdot \left(y - \frac{h}{2} \right) - \left(y \cdot y_i - \frac{y_i^2}{2} \right) \right] \cdot dy_i = \\
& = \left(2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \frac{k \cdot L}{b} \right)^2 \cdot \left[h \cdot \left(y - \frac{h}{2} \right) \cdot \left(y \cdot y_i - \frac{y_i^2}{2} \right) \Big|_0^h - \int_0^h \left(y^2 \cdot y_i - \frac{3}{2} \cdot y \cdot y_i^2 + \frac{1}{2} \cdot y_i^3 \right) \cdot dy_i \right] = \\
& = \left(2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \frac{k \cdot L}{b} \right)^2 \cdot \left[h \cdot \left(y - \frac{h}{2} \right) \cdot \left(y \cdot h - \frac{h^2}{2} \right) - \left(y^2 \cdot \frac{y_i^2}{2} - y \cdot \frac{y_i^3}{2} + \frac{y_i^4}{8} \right) \Big|_0^h \right] = \\
& = \left(2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \frac{k \cdot L}{b} \right)^2 \cdot \left[h^2 \cdot \left(y - \frac{h}{2} \right) - \frac{h^2}{2} \cdot \left(y^2 - y \cdot h + \frac{h^2}{4} \right) \right] = \left(2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \frac{k \cdot L}{b} \right)^2 \cdot \frac{h^2}{2} \cdot \left(y - \frac{h}{2} \right)^2. \quad (4.21)
\end{aligned}$$

Аналогичным образом определяются четвертое и все последу-

ющие слагаемые. В результате преобразований приходим к следующему выражению:

$$\begin{aligned} \Phi(y) = & 1 - 2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \frac{k \cdot L}{b} \cdot h \cdot \left(y - \frac{h}{2}\right) + \left(2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \frac{k \cdot L}{b}\right)^2 \cdot \frac{h^2}{2} \cdot \left(y - \frac{h}{2}\right)^2 - \\ & - \left(2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \frac{k \cdot L}{b}\right)^3 \cdot \frac{h^3}{2 \cdot 3} \cdot \left(y - \frac{h}{2}\right)^3 + \dots = 1 - \frac{A}{1!} \cdot \left[h \cdot \left(y - \frac{h}{2}\right)\right] + \\ & + \frac{A^2}{2!} \cdot \left[h \cdot \left(y - \frac{h}{2}\right)\right]^2 - \frac{A^3}{3!} \cdot \left[h \cdot \left(y - \frac{h}{2}\right)\right]^3 + \dots, \end{aligned} \quad (4.22)$$

где $A = 2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \frac{k \cdot L}{b}$.

Выражение (4.22) является разложением степенного ряда:

$$\Phi(y) = \exp \left[-2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \frac{k \cdot L}{b} \cdot h \cdot \left(y - \frac{h}{2}\right) \right]. \quad (4.23)$$

Противоположная относительная величина $\varepsilon(y)$ принимает вид:

$$\varepsilon(y) = 1 - \Phi(y) = 1 - \exp \left[-2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \frac{k \cdot L}{b} \cdot h \cdot \left(y - \frac{h}{2}\right) \right]. \quad (4.24)$$

Проведем анализ зависимостей (4.23) и (4.24). При фиксированном значении y , с увеличением параметра h от 0 до значения y произведение $h \cdot \left(y - \frac{h}{2}\right)$ увеличивается, табл. 4.1. Это приводит к уменьшению относительной величины $\Phi(y)$ и увеличению противоположной ей относительной величины $\varepsilon(y)$, описываемой зависимостью (4.24).

Таблица 4.1

Расчетные значения $h \cdot \left(y - \frac{h}{2}\right)$, $\Phi(y)$ и $\varepsilon(y)$ для $y = 1$ мкм

h , мкм	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$h \cdot \left(y - \frac{h}{2}\right)$	0	0,095	0,18	0,255	0,32	0,375	0,42	0,455	0,48	0,495	0,5

Как видим, величины $\Phi(y)$ и $\varepsilon(y)$ наиболее интенсивно изменяются в пределах $0 < h < 0,6$. Следовательно, определяющую роль в съеме металла и формировании шероховатости поверхности играют зерна, вершины которых расположены в интервале $0 < h < 0,6$.

При условии $h = y$ приходим к частным зависимостям:

$$\Phi(y) = \exp\left[-\operatorname{tg}\gamma \cdot \frac{k \cdot L}{b} \cdot y^2\right], \quad (4.25)$$

$$\varepsilon(y) = 1 - \exp\left[-\operatorname{tg}\gamma \cdot \frac{k \cdot L}{b} \cdot y^2\right]. \quad (4.26)$$

В результате пришли к зависимостям, установленным в работе [242]. Таким образом, полученные зависимости (4.25) и (4.26) являются более общими, что позволяет провести более полный анализ формирования шероховатости поверхности при абразивной обработке.

Функции $\Phi(y)$ и $\varepsilon(y)$ являются вероятностными функциями распределения, изменяющимися в пределах от 0 до 1, асимптотически приближаясь к значению 0 (функция $\Phi(y)$) и к значению 1 (функция $\varepsilon(y)$). При таком характере изменения функций $\Phi(y)$ и $\varepsilon(y)$ определить параметр шероховатости поверхности R_{max} можно лишь с заданной степенью точности, например, при $\Phi(y) = \Phi_0 = 0,1; 0,05; 0,01$ и т.д. Тогда из условия

$$\Phi(y = R_{max}) = \Phi_0, \quad (4.27)$$

с учетом зависимости (4.25), имеем

$$R_{max} = \sqrt{\frac{-b \cdot \ln \Phi_0}{\operatorname{tg}\gamma \cdot k \cdot L}}. \quad (4.28)$$

Величина $\ln \Phi_0$ отрицательна. Следовательно, подкоренное выражение зависимости (4.28) всегда положительно.

Из зависимости (4.28) вытекает, что уменьшить параметр шероховатости поверхности R_{max} можно уменьшением параметра b и увеличением γ , k и L , т.е. по сути, увеличением количества зерен n , проконтактировавших с поверхностью обрабатываемого образца.

4.4. РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ОПОРНОЙ ДЛИНЫ ПРОФИЛЯ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

При анализе влияния различных методов обработки на эксплуатационные показатели деталей машин пользуются относительной опорной длиной профиля обработанной поверхности, наиболее информативной характеристикой шероховатости поверхности.

В предыдущем параграфе аналитически описаны закономерности шлифования с позиции теории вероятностей с помощью функции распределения $\varepsilon(y)$ - относительной полноты профиля круга при

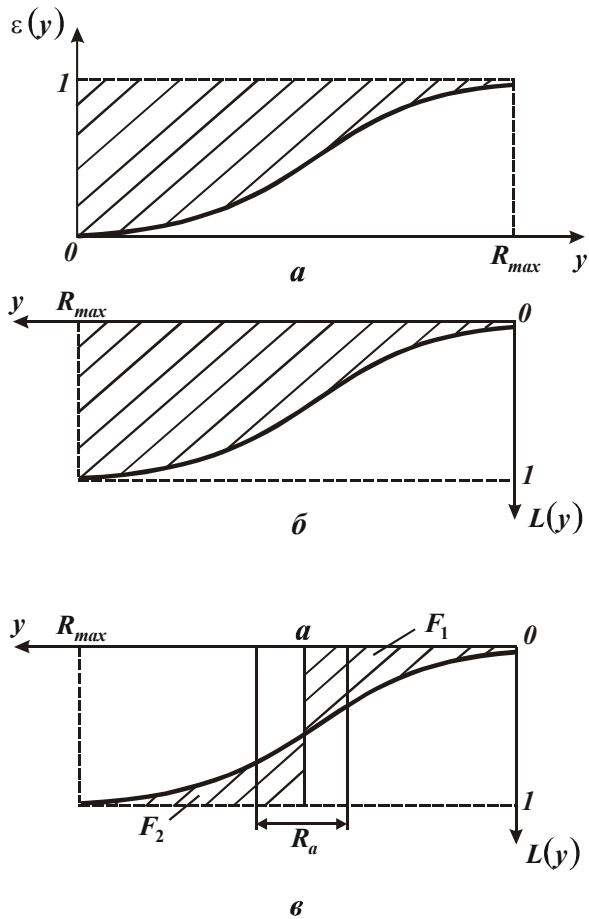


Рис. 4.2. Изменение функций $\varepsilon(y)$ и $L(\bar{y})$.

координат поместить в точке $y = R_{max}$, ввести новую координату $\bar{y} = R_{max} - y$ и рассмотреть противоположную вероятностную функцию:

$$L(\bar{y}) = 1 - \varepsilon(\bar{y}) = e^{-\frac{\operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{кр}}{3 \cdot b \cdot V'_{дет}} \cdot (R_{max} - \bar{y})^3} \quad (4.29)$$

Общий вид функции $L(\bar{y})$ показан на рис. 4.2, б. Как и на рис. 4.2, а, заштрихованным выделен оставшийся на обработанной поверхности материал в виде микронеровностей. Сплошной материал (без микронеровностей) начинается при $\bar{y} \geq R_{max}$. Располагая аналитической зависимостью для описания функции $L(\bar{y})$, можно определить параметр шероховатости обработки R_a . Исходя из рис. 4.2, в, он определяется из выражения

$$R_a = \frac{F_1 + F_2}{1}, \quad (4.30)$$

где F_1 — площадь, ограниченная линиями $\bar{y} = a$, $L(\bar{y}) = 0$ и функцией

шлифовании прямолинейного образца, движущегося с постоянной скоростью $V'_{дет}$ по нормали к рабочей поверхности круга.

Общий вид функции $\varepsilon(y)$, описываемой зависимостью (4.13), показан на рис. 4.2, а. Заштрихованным выделен оставшийся на обработанной поверхности материал в виде микронеровностей. Наибольший выступ микронеровностей соответствует значению $y = R_{max}$ (где R_{max} — параметр шероховатости обработки). Наибольшая впадина соответствует значению $y = 0$.

От функции $\varepsilon(y)$ нетрудно перейти к функции относительной опорной длины профиля обработанной поверхности $L(y)$.

Для этого необходимо начало

координат поместить в точке $y = R_{max}$, ввести новую координату

$\bar{y} = R_{max} - y$ и рассмотреть противоположную вероятностную функцию:

функцию:

$L(\bar{y})$; F_2 - площадь, ограниченная линиями $\bar{y} = a$, $L(\bar{y})=1$ и функцией $L(\bar{y})$.

Значение $\bar{y} = a$ определяет положение средней линии, полученной из равенства площадей, занимаемых выступами и впадинами на участке базовой длины l обработанной поверхности. Численные расчеты для конкретных условий шлифования показали, что соотношение параметров шероховатости R_{max} / R_a изменяется в пределах 4...5. Это указывает на то, что функция $L(\bar{y})$ может быть (приблизительно) описана прямой линией,

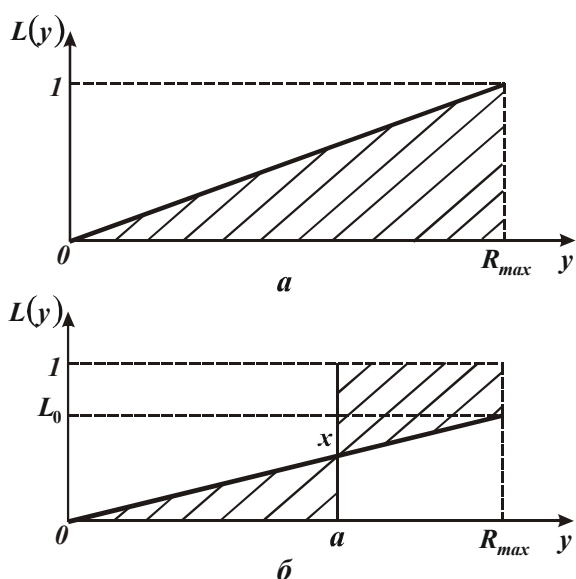


Рис. 4.3. Вид упрощенной функции $L(\bar{y})$.

проведенной через начало координат и точку с координатами $\bar{y} = R_{max}$ и $L(\bar{y})=1$, рис. 4.3,а. В данном случае отношение $R_{max} / R_a = 4$.

Полученный теоретический результат хорошо согласуется с известными экспериментальными данными. В тоже время установлено, что данное соотношение при определенных условиях обработки может изменяться в более широких пределах: от 5 до 8 и более. Поэтому рассмотрим

теоретически условия формирования такого большого соотношения R_{max} / R_a , принимая условно функцию относительной опорной длины профиля обработанной поверхности в виде, показанном на рис. 4.3,б (здесь L_0 - безразмерная величина, изменяющаяся в пределах от 0 до 1).

Используя рис. 4.3,б, произведем расчет параметра шероховатости обработки R_a . Определим величину x из геометрического соотношения:

$$\frac{L_0 - x}{a} = \frac{L_0}{R_{max}},$$

откуда

$$x = L_0 \cdot \left(1 - \frac{a}{R_{max}} \right). \quad (4.31)$$

Определим первоначально положение средней линии $\bar{y} = a$ из условия равенства заштрихованных на рис. 4.3,б площадей:

$$0,5 \cdot a \cdot (L_0 - x) = (R_{max} - a) \cdot (1 - L_0) + 0,5 \cdot x \cdot (R_{max} - a),$$

откуда

$$a = R_{max} \cdot (1 - 0,5 \cdot L_0). \quad (4.32)$$

Параметр шероховатости обработки R_a определим из условия:

$$R_a \cdot 1 = 2 \cdot 0,5 \cdot a \cdot (L_0 - x). \quad (4.33)$$

Откуда с учетом зависимостей (4.31) и (4.32), имеем

$$R_a = R_{max} \cdot L_0 \cdot (1 - 0,5 \cdot L_0)^2. \quad (4.34)$$

Как видим, при $L_0 = 1$ параметр $R_a = \frac{R_{max}}{4}$, что соответствует

приведенному выше решению, т.е. расчеты выполнены правильно. Из зависимости (4.34) следует, что величина L_0 оказывает на параметр R_a неоднозначное влияние. Расчетные данные, характеризующие изменение параметра R_a от L_0 , приведены в табл. 4.2 (для $R_{max} = 1$ мкм).

Таблица 4.2

Расчетные значения R_a и R_{max} / R_a

L_0	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
R_a , мкм	0	0,09	0,162	0,217	0,256	0,281	0,294	0,295	0,29	0,277	0,25
R_{max} / R_a	∞	11,1	6,25	4,54	3,85	3,57	3,4	3,39	3,45	3,7	4,0

С увеличением L_0 от 0 до 0,7 параметр шероховатости обработки R_a увеличивается, при $L_0 > 0,7$ – уменьшается, рис. 4.4.

Отношение R_{max} / R_a , наоборот, с увеличением L_0 до значения 0,7 уменьшается, затем увеличивается, принимая при $L_0 < 0,2$ значения, превышающие 6. Этим показано, что форма относительной опорной длины профиля обработанной поверхности $L(\bar{y})$ определяет

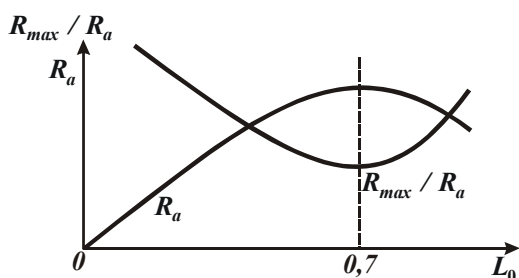


Рис. 4.4. Характер изменения R_a и R_{max} / R_a от L_0 .

значения параметра шероховатости поверхности R_a и соотношения R_{max} / R_a .

Увеличенные значения $R_{max} / R_a > 6$ обусловлены тем, что на участке базовой длины l обработанной поверхности площадь, ограниченная впадинами микронеровно-

стей и средней линией, превышает площадь, ограниченную выступами микронеровностей и средней линией. Это может иметь место при шлифовании кругом с притупленными режущими кромками. Например, установлено [363], что наименьшая относительная опорная длина профиля достигается после шлифования абразивным кругом, а наибольшая – после шлифования алмазным кругом на металлической связке и кругом из кубонита. Следовательно, шлифование кругами из синтетических сверхтвердых материалов позволяет увеличить опорную площадь и соответственно несущую способность и износостойкость деталей машин. Поэтому при выборе оптимального метода обработки необходимо знать его возможности по формированию, как высотных параметров шероховатости R_{max} , R_a , так и относительной опорной длины профиля обработанной поверхности.

4.5. УСТАНОВЛЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ ШЕРОХОВАТОСТИ И ОПТИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Для оценки взаимосвязи параметров шероховатости с оптическими характеристиками поверхности воспользуемся аналитической зависимостью [5, 6] для определения коэффициента излучения поверхности $\varepsilon_{ш}$:

$$\varepsilon_{ш} = \frac{\varepsilon_2}{1 - (1 - A_2) \cdot (1 - F)}, \quad (4.35)$$

где ε_2 , A_2 - соответственно коэффициенты излучения и поглощения гладкой поверхности; $F = \frac{F_2}{F_{ш}}$ - фактор шероховатости.

Параметр F_2 определяет площадь гладкой поверхности, а параметр $F_{ш}$ - площадь поверхности впадины (шероховатость), которую можно описать зависимостью:

$$F_{ш} = h \cdot L,$$

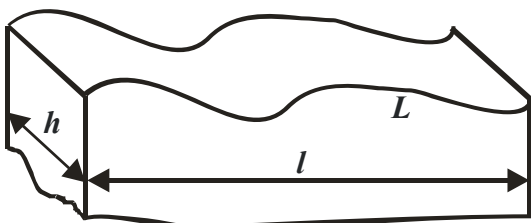


Рис. 4.5. Расчетная схема профиля шероховатости поверхности.

где h - ширина рассматриваемой поверхности (рис. 4.5), м; L - длина профиля, т.е. длина, получающаяся, если все выступы и впадины профиля, находящиеся в пределах базовой длины l , вытянуть в прямую линию

(L - ГОСТовский параметр шероховатости поверхности).

Соответственно параметр F_2 выразится:

$$F_2 = h \cdot l. \quad (4.36)$$

Тогда фактор шероховатости F опишется:

$$F = \frac{F_2}{F_{\text{нн}}} = \frac{l}{L}. \quad (4.37)$$

Нетрудно видеть, что фактор шероховатости F связан обратно пропорциональной зависимостью с ГОСТовским параметром – относительной длиной профиля $l_0 = \frac{L}{l}$.

Рассмотрим профиль шероховатости поверхности, сформированный при абразивной обработке режущими зернами в форме конуса с углом при вершине 2γ , рис. 4.6. Относительная опорная длина

данного профиля $L(\gamma)$ графически показана на рис. 4.3,а.

Исходя из рис. 4.6, параметры l и L связаны между собой тригонометрическим соотношением:

$$\frac{l}{L} = \sin \gamma, \quad (4.38)$$

откуда

$$F = \sin \gamma. \quad (4.39)$$

В табл. 4.3 приведены значения функции $\sin \gamma$.

Таблица 4.3

Значения функции $\sin \gamma$

γ , град	0	30	45	60	75	90
$\sin \gamma$	0	0,5	0,71	0,87	0,96	1,0

Практикой установлено, что угол при вершине режущего абразивного или алмазного зерна 2γ может изменяться в пределах $60 \dots 180^\circ$. Тогда, исходя из табл. 4.3, для угла $2\gamma = 60^\circ$ параметр L в два раза больше l . Для $2\gamma > 90^\circ$ различие параметров l и L не существенно. Из этого вытекает, что фактор шероховатости $F = \frac{l}{L} = \sin \gamma$ изменяется в пределах $0,5 \dots 1,0$.

Рассмотрим профиль шероховатости поверхности, сформиро-

ванный при абразивной обработке режущими зернами, имеющими форму конуса и усеченного конуса (учитывающий износ зерен) с углом при вершине 2γ , рис. 4.7. Относительная опорная длина данного профиля $L(y)$ графически показана на рис. 4.3,б.

Фактор шероховатости F в этом случае определяется:

$$F = L_0 \cdot \sin \gamma + (1 - L_0) = 1 - L_0 \cdot (1 - \sin \gamma). \quad (4.40)$$

Соответственно относительная

длина профиля $l_0 = \frac{1}{F}$ равна

$$l_0 = \frac{1}{1 - L_0 \cdot (1 - \sin \gamma)}.$$

При $L_0=1,0$ зависимость (4.40)

принимает вид зависимости (4.39).

При $L_0=0$ фактор шероховатости

$F=1$, т.е. приходим к гладкой по-

верхности. Как следует из зависимо-

сти (4.40), чем больше параметр L_0 и

меньше угол γ , тем меньше фактор шероховатости F .

Рассчитаем значение фактора шероховатости F для двух случаев: $\sin \gamma=0,5$ и $\sin \gamma=0,9$. В первом случае фактор шероховатости F определяется по зависимости: $F = 1 - 0,5 \cdot L_0$, во втором случае – по зависимости $F = 1 - 0,1 \cdot L_0$.

Таблица 4.4

Расчетные значения фактора шероховатости F и соотношений

R_{max} / R_a и R_a / R_{max}

L_0	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$F (\sin \gamma=0,5)$	1	0,95	0,9	0,85	0,8	0,75	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5
$F (\sin \gamma=0,9)$	1	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,9
R_{max} / R_a	∞	11,1	6,25	4,54	3,85	3,57	3,4	3,39	3,45	3,7	4,0
R_a / R_{max}	0	0,09	0,162	0,217	0,256	0,281	0,294	0,295	0,29	0,277	0,25

Результаты расчетов приведены в табл. 4.4. Здесь же для анализа приведены значения соотношения параметров шероховатости поверхности R_{max} / R_a , взятые из табл. 4.2.

Как видно, с увеличением безразмерной величины L_0 фактор шероховатости F уменьшается от 1 до значения $\sin \gamma$. Соответственно

увеличивается соотношение R_a / R_{max} . Таким образом, аналитическим путем установлена связь между фактором шероховатости F и соотношением R_a / R_{max} .

Получим аналитическую зависимость, увязывающую фактор шероховатости F и соотношение R_a / R_{max} . Для этого представим зависимость (4.40) в виде:

$$L_0 = \frac{(1-F)}{(1-\sin \gamma)}. \quad (4.41)$$

Подставим зависимость (4.41) в уравнение (4.34), откуда получим:

$$\frac{R_a}{R_{max}} = \frac{(1-F)}{(1-\sin \gamma)} \cdot \left[1 - 0,5 \cdot \frac{(1-F)}{(1-\sin \gamma)} \right]^2. \quad (4.42)$$

В результате пришли к трансцендентному уравнению, разрешить которое относительно фактора шероховатости F сложно. Поэтому при расчетах целесообразно задавать значение F и из уравнения (4.42) определять соотношение R_a / R_{max} .

К аналогичной зависимости придем, выражая в (4.42) фактор шероховатости F через относительную длину профиля $l_0 = 1/F$:

$$\frac{R_a}{R_{max}} = \frac{\left(1 - \frac{1}{l_0}\right)}{(1-\sin \gamma)} \cdot \left[1 - 0,5 \cdot \frac{\left(1 - \frac{1}{l_0}\right)}{(1-\sin \gamma)} \right]^2. \quad (4.43)$$

Необходимо отметить, что фактор шероховатости F , исходя из уравнения (4.42), определяется не высотными параметрами шероховатости поверхности R_a и R_{max} , а их соотношением R_a / R_{max} , т.е. фактор шероховатости F является функцией соотношения R_a / R_{max} или $F = f(R_a / R_{max})$. Это указывает на то, что оптические характеристики поверхности, в частности коэффициент излучения поверхности $\varepsilon_{ш}$ (определяемый зависимостью (4.35)), зависят не от высотных параметров шероховатости поверхности R_a и R_{max} , а от формы микронеровностей профиля, обусловленных соотношением R_a / R_{max} .

Используя зависимость (4.35), проведем анализ коэффициента излучения поверхности $\varepsilon_{ш}$.

Как следует из зависимости (4.35), для заданных значений ε_2 ,

A_2 с уменьшением фактора шероховатости F в пределах от 1 до $\sin \gamma$, коэффициент излучения поверхности $\varepsilon_{ш}$ увеличивается. Следовательно, коэффициент излучения поверхности $\varepsilon_{ш}$ увеличивается с увеличением соотношения параметров шероховатости R_a / R_{max} (вследствие увеличения безразмерной величины L_0 в пределах от 0 до 1).

Примерно по такому же закону будет изменяться коэффициент поглощения поверхности $A_{ш}$, имея в виду, что для серого тела $\varepsilon \approx A$. Тогда зависимость (4.35) выразится:

$$A_{ш} = \frac{A_2}{1 - (1 - A_2) \cdot (1 - F)}. \quad (4.44)$$

Коэффициент отражения поверхности $\rho_{ш}$ связан с коэффициентом поглощения поверхности $A_{ш}$ противоположной зависимостью:

$$\rho_{ш} = 1 - A_{ш} = 1 - \frac{A_2}{1 - (1 - A_2) \cdot (1 - F)}. \quad (4.45)$$

Из зависимости (4.45) следует, что с уменьшением фактора шероховатости F (от 1 до $\sin \gamma$) и соответственно увеличением соотношения параметров шероховатости R_a / R_{max} коэффициент отражения поверхности $\rho_{ш}$ будет уменьшаться. Следовательно, наибольшей отражательной способностью будет обладать гладкая поверхность, для которой $F=1$ и $R_a / R_{max}=0$.

В обобщенном виде характер изменения коэффициентов $\varepsilon_{ш}$, $A_{ш}$, $\rho_{ш}$ от фактора шероховатости F показан на рис. 4.8, т.е. с увеличением F коэффициенты излучения $\varepsilon_{ш}$ и поглощения $A_{ш}$ уменьшаются, а коэффициент отражения $\rho_{ш}$ увеличивается.

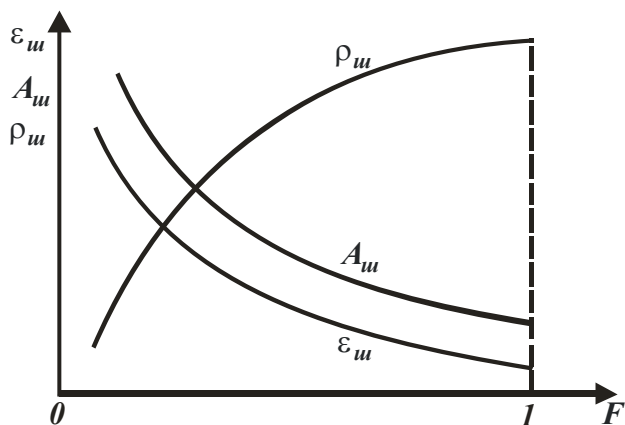


Рис. 4.8. Характер изменения коэффициентов $\varepsilon_{ш}$, $A_{ш}$, $\rho_{ш}$ от фактора шероховатости F .

Противоположное влияние на указанные коэффициенты будет оказывать соотношение параметров шероховатости R_a / R_{max} (табл. 4.4). Так, с уменьшением R_a / R_{max} коэффициенты излучения $\varepsilon_{ш}$ и поглощения $A_{ш}$ шероховатой поверхности уменьшаются, а ко-

эффициент отражения $\rho_{ш}$ увеличивается.

эффицент отражения $\rho_{ш}$ увеличивается. Следовательно, с точки зрения улучшения оптических характеристик обрабатываемых поверхностей необходимо отношение R_a / R_{max} и соответственно относительную длину профиля l_0 уменьшать, а фактор шероховатости F увеличивать.

Таким образом, в данном параграфе предложены три параметра для оценки шероховатости светоотражательных поверхностей: относительная длина профиля l_0 , отношение параметров шероховатости R_a / R_{max} и фактор шероховатости F . Данные параметры связаны между собой, в совокупности дают достаточно полное физическое представление о связи шероховатости с оптическими характеристиками обработанных поверхностей и открывают новые возможности научно-обоснованного выбора оптимальных методов обработки светоотражательных поверхностей.

4.6. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА НОВОГО ПАРАМЕТРА ШЕРОХОВАТОСТИ ОБРАБОТАННЫХ СВЕТООТРАЖАТЕЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Для более глубокого анализа условий формирования шероховатости обработанных светоотражательных поверхностей рассмотрим новый подход к расчету параметров шероховатости.

Используя схему графического решения (рис. 4.9) [66] и учитывая отношение $\frac{F_z}{F_{ш}} \approx \frac{L_0^2}{L^2}$ [253], получим:

$$\frac{L_0^2}{L^2} = \frac{n^2}{\left(\sum_{i=1}^n \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \right)^2} \right)^2}, \quad (4.46)$$

где $L = \sum_{i=1}^n L_i = \sum_{i=1}^n \sqrt{\Delta y^2 + \Delta x^2}$ - длина линии, эквидистантой профилю шероховатости поверхности в пределах базовой длины профилограммы L_0 ; n - число ординат отклонений профиля шероховатости поверхности.

Агабабов С.Г. в работе [5] предлагает определять фактор шеро-

ховатости поверхности по формуле:

$$F = \left(1 + 1,25\pi^2 \cdot n^2 \cdot R_a^2\right)^{-1}, \quad (4.47)$$

где n – число пересечений профиля шероховатости на единице длины средней линии; R_a – среднее арифметическое отклонение профиля.

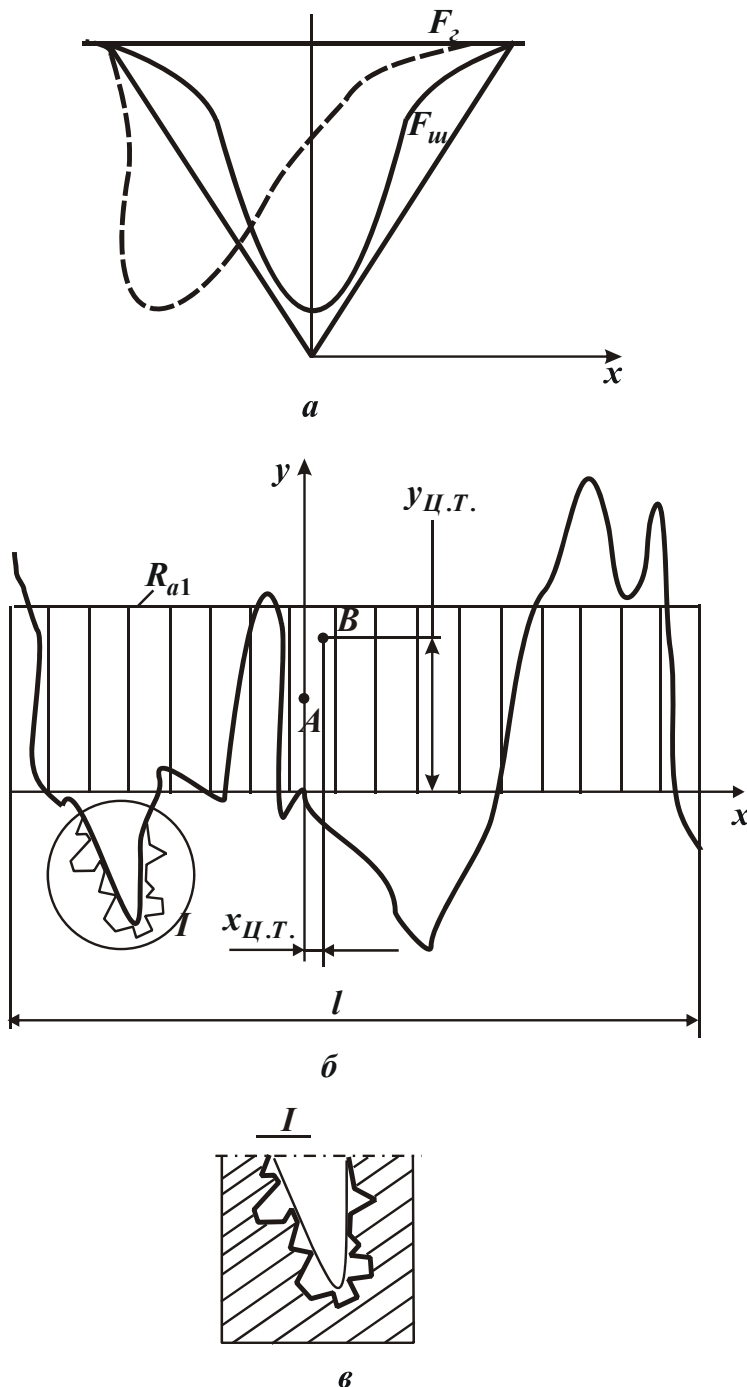


Рис. 4.9. Схемы к оценке критерия шероховатости поверхности: а - впадины различной формы; б - профиль шероховатости; в - элементы вторичной шероховатости.

минимуму поверхности при данном объёме. Эту информацию можно извлекать, используя свойства «условного центра тяжести» площади

Такое определение фактора шероховатости недостаточно чувствительно к форме выступов (впадин) неровностей (рис 4.9). Не исключено, что поверхности после одинаковых методов обработки и при равных значениях фактора шероховатости F будут иметь различный характер светоотражательной способности. В этом случае, на изменение характера их светоотражательной способности может оказать влияние и изменение формы неровностей (на поверхности), соизмеримых и больше длин волн падающего излучения.

При выборе параметров, характеризующих форму неровностей, мы руководствовались положением, что они должны отражать степень её приближения к равновесному состоянию, т.е. к

геометрической фигуры путём определения степени приближения реальной поверхности к её минимуму. Равновесное состояние для реальной поверхности будет соответствовать срединной поверхности. Её характеризует среднее арифметическое отклонений ординат профиля шероховатости. В действительности, такого равновесного состояния существовать не должно, так как для микрочастиц поверхностная энергия будет преобладать над энергией объёма, поэтому зёрна, кристаллы и их образования должны принимать определённую форму и ориентировку.

Рассмотрим распределение материала в поверхностном слое, характеризующее профилограммой поверхности (рис. 4.9). Степень приближения его к равновесному состоянию можно охарактеризовать относительным смещением «условных центров тяжести» A и B площадей, заключённых средней линией профиля шероховатости:

$$F' = \sqrt{\frac{x_{Ц.Т.А.} + y_{Ц.Т.А.}^2}{x_{Ц.Т.В.}^2 + y_{Ц.Т.В.}^2}}, \quad (4.48)$$

где F' - характеристика формы профиля шероховатости; $x_{Ц.Т.}$, $y_{Ц.Т.}$ - координаты «центров тяжести» площадей.

По физической сути F' – новый параметр шероховатости, который позволит провести более глубокий анализ формирования шероховатости обрабатываемых светотражательных поверхностей. Назовем данный параметр критерием шероховатости.

В зависимости от характера интересующей информации выражение (4.48) будет принимать вид:

- при анализе профиля шероховатости относительно средней линии

$$F' = \frac{R_a}{2\sqrt{x_{Ц.Т.В.}^2 + y_{Ц.Т.В.}^2}}, \quad (4.49)$$

где $x_{Ц.Т.А.} = 0$, $y_{Ц.Т.А.} = \frac{R_a}{2}$;

- при анализе профиля шероховатости поверхности относительно линии впадин

$$F' = \frac{H_{i.min}}{2\sqrt{x_{Ц.Т.В.}^2 + y_{Ц.Т.В.}^2}}, \quad (4.50)$$

где $x_{Ц.Т.} = 0$, $y_{Ц.Т.А.} = \frac{H_{i.min}}{2}$, $H_{i.min}$ - отклонение наибольшего минимума ординат профиля шероховатости;

– при анализе профиля шероховатости поверхности относительно линии впадин и средней линии:

$$F' = \frac{2H_{i.min} - R_a}{2\sqrt{x_{Ц.Т.В.}^2 + y_{Ц.Т.В.}^2}}, \quad (4.51)$$

где $x_{Ц.Т.А.} = 0$;

$$y_{Ц.Т.А.} = H_{i.min} - \frac{R_a}{2}.$$

Для поверхностей с синусоидальным профилем шероховатости поверхности выражение (4.48) упрощается:

$$F' = 1 - \frac{R_a}{2H_{i.min}}, \quad (4.52)$$

где $x_{Ц.Т.В.} = 0$.

Если учесть, что $2H_{i.min} \approx R_{max}$ (где R_{max} – максимальная высота микронеровностей обработанной поверхности), то выражение (4.52) примет простой вид:

$$F' = 1 - \frac{R_a}{R_{max}}.$$

Как видно, критерий шероховатости F' является противоположной функцией отношения параметров шероховатости R_a / R_{max} и изменяется также как и отношение R_a / R_{max} в пределах 0...1. Чем больше отно-

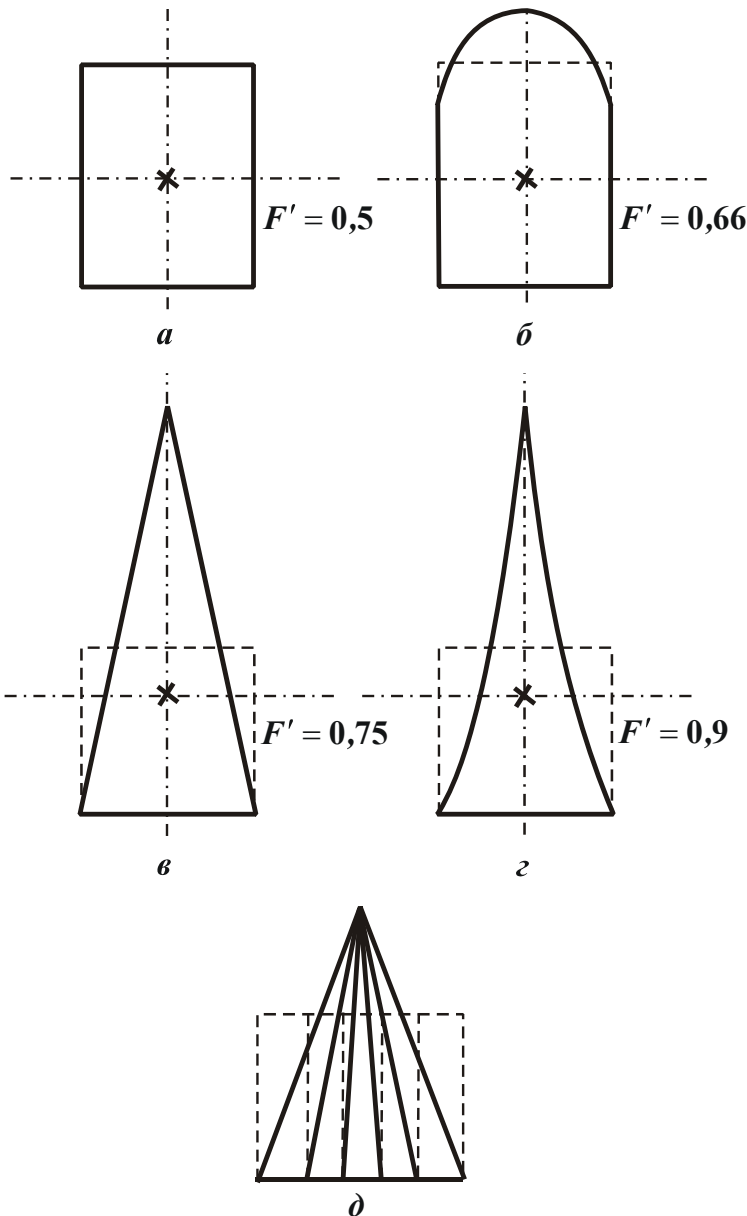


Рис 4.10. Значения критерия шероховатости F' и фактора шероховатости $F = F_2 / F_{ин}$ для различных элементов неровностей: а, б, в и г - при равных значениях фактора шероховатости $F = F_2 / F_{ин}$; д – изменение полноты при постоянном значении критерия шероховатости.

шение R_a / R_{max} , тем меньше критерий шероховатости F' и наоборот. Критерий шероховатости F' дополняет установленные в предыдущем параграфе параметры шероховатости светоотражательных поверхностей: l_0 , R_a / R_{max} , F .

На рис. 4.10 представлены значения критерия шероховатости поверхности F' для различных элементов неровностей при равном значении фактора шероховатости F [5]. Здесь же показано изменение фактора шероховатости F при постоянном значении критерия F' .

При анализе нерегулярной шероховатости поверхности возникает задача нахождения «условных центров тяжести» А и В площадей, заключённых средней линией и линией профиля шероховатости поверхности.

Координаты центра тяжести площади, ограниченной средней линией и линией профиля шероховатости поверхности (рис. 4.9) определим путём графического решения последовательного нахождения объединения двух материальных точек, носителями которых являются условные центры тяжести прямоугольников [392].

В работах Агабабова С.Г. [5] показано, что фактор шероховатости поверхности F может быть рассчитан по характеристикам профилограммы поверхности [399].

Результаты расчётов удовлетворительно согласуются со значениями коэффициента излучения, полученными по формуле [5]:

$$\xi_i = \left[1 + \left(\frac{1}{\xi_{ЭК}} - 1 \right) \frac{F_i}{F_{ЭК}} \right]^{-1}. \quad (4.53)$$

Предлагаемый в работе способ расчёта фактора шероховатости поверхности рекомендуется к применению в пределах указанной степени точности (расхождение между опытными и расчётными величинами не превышает 10%).

Для проверки возможности использования предлагаемой нами методики оценки критерия шероховатости поверхности с учётом формы неровностей (зависимость (4.54)) мы использовали результаты этого эксперимента.

Значение критерия шероховатости поверхности с учётом формы неровностей будем определять по упрощённой формуле:

$$F = \left[1 + 1,25\pi^2 \cdot n^2 \cdot R_a \right]^{-1} \cdot \left(1 - \frac{R_a}{2H_{i.min}} \right), \quad (4.54)$$

где R_a - среднее арифметическое отклонений профиля шероховато-

сти поверхности, мкм; n - число шагов неровностей по отношению к отсечке шага, 1/мкм; $H_{i.min}$ - отклонение ординаты по наибольшей впадине профиля шероховатости поверхности, мкм.

Таблица 4.5

Значение параметров поверхности образцов из латуни Л63

№ обр.	R_a , мкм	n , мкм ⁻¹	F_γ	F	$H_{i.min}$, мкм	F'_γ	F'
1	0,45	0,015	0,999	0,999	1,1	0,799	0,795
2	15,3	0,0045	0,932		82,4	0,845	0,907
3	2,4	0,02	0,965		17,1	0,890	0,93
4	0,94	0,05	0,963	0,913	7,3	0,889	0,936

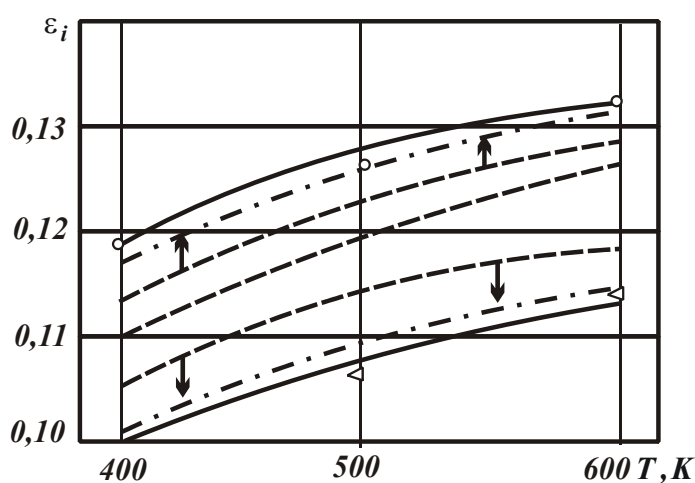


Рис. 4.11. Коэффициенты излучения поверхности образцов с различными значениями фактора шероховатости поверхности (штрих-пунктирная линия получена расчетным путем с учетом зависимости (4.54)).

Значения параметров поверхности, рассчитанные по зависимости (4.54), представлены в табл. 4.5.

На графике (рис. 4.11) показаны результаты эксперимента [6] и стрелкой указано направление перемещения кривых, полученных нами.

Как видим, в любом случае учёт формы неровностей по зависимости (4.54) будет уменьшать расхождение между опытными и расчётными величинами коэффициента излучения

(расхождение между опытными и расчётными величинами не превышает 2%).

4.7. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ И ЕЕ СВЯЗИ С ОПТИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Для проверки теоретических решений, приведенных в параграфе 4.5, были выполнены экспериментальные исследования параметров шероховатости и оптических характеристик поверхностей эталонных

образцов из стали 40Х, обработанных различными методами резания, табл. 4.6. Установлено, что при фрезеровании, в зависимости от условий обработки, параметры шероховатости R_a и R_z изменяются в довольно больших пределах (в 15–20 раз). Вместе с тем, коэффициент отражения ρ_s остается почти неизменным. Это указывает на то, что коэффициент отражения ρ_s практически не зависит от высотных параметров шероховатости поверхности R_a и R_z . Полученный результат хорошо согласуется с теоретическими выводами.

Как следует из табл. 4.6, переход от фрезерования к шлифованию и полированию позволяет уменьшить параметры шероховатости поверхности R_a и R_z . При этом увеличивается коэффициент отражения ρ_s . Следовательно, применение абразивной обработки позволяет уменьшить шероховатость и повысить светоотражательную способность обработанных поверхностей.

На первый взгляд может показаться, что увеличение коэффициента отражения ρ_s при переходе от лезвийной к абразивной обработке связано с уменьшением высотных параметров шероховатости R_a и R_z . В действительности это не так. В этом несложно убедиться, анализируя результаты экспериментальных исследований, приведенных в табл. 4.7.

В параграфе 4.5 теоретически показано, что с увеличением критерия шероховатости поверхности $F' \rightarrow 1$ коэффициент излучения ε уменьшается, а коэффициент отражения ρ_s увеличивается. Данная закономерность также вытекает из табл. 4.7. Так, наименьшему значению коэффициента излучения $\varepsilon=0,05$ и наибольшему значению коэффициента отражения $\rho_s=0,98$ соответствуют наибольшие значения критерия шероховатости $F'=0,95$ (после выглаживания). Наибольшее значение $\varepsilon=0,3-0,32$ и наименьшее значение $\rho_s=0,35-0,4$ соответствуют наименьшему значению критерия шероховатости $F'=0,84-0,89$ (после гидроабразивной обработки или обработки металлической дробью).

Таким образом, из табл. 4.7 четко следует, что чем больше критерий шероховатости F' , тем меньше коэффициент излучения ε и больше коэффициент отражения ρ_s . В табл. 4.7 приведены значения отношения параметров шероховатости поверхности R_a / R_{max} . Как видно, наибольшему значению критерия шероховатости $F'=0,95$ со-

ответствует фактически наименьшее значение отношения $R_a / R_{max} = 0,05$, а наименьшему значению $F' = 0,84-0,89$ соответствует наибольшее значение отношения $R_a / R_{max} = 0,16$ (после гидроабразивной обработки или обработки металлической дробью).

Таблица 4.6

Значения параметров шероховатости и коэффициента отражения поверхности образцов из стали 40X после обработки резанием

Метод обработки	Параметры шероховатости поверхности		Коэффициент отражения ρ_s
	R_a , мкм	R_z , мкм	
Фрезерование	11,05...0,52	40...1,4	0,20...0,25
Шлифование предварительное	0,4...0,35	-	0,25...0,31
Шлифование окончательное	0,2...0,16	-	0,48...0,51
Полирование	-	0,4-0,16	0,72...0,74

Таблица 4.7

Значения параметров шероховатости и коэффициентов отражения ρ_s , поглощения A_s и излучения ϵ поверхности образцов листового проката из сплава АМгб после обработки резанием

Метод обработки	F'	R_a / R_{max}	ρ_s	A_s	ϵ
Тонкое точение алмазным инструментом	0,926-0,953	0,047-0,074	0,75-0,87	0,13-0,25	0,07
Выглаживание шаром (диаметром 6мм из ШХ15)	0,95	0,05	0,98	0,02	0,05
Механическое полирование (окись хрома МЗ)	0,9-0,95	0,05-0,1	0,6-0,75	0,25-0,4	0,06-0,07
Точение	0,9	0,1	0,48-0,54	0,46-0,52	0,09-0,12
Фрезерование	0,88-0,89	0,11-0,12	0,47-0,61	0,39-0,53	0,15-0,18
Без обработки (прокат)	0,896	0,104	0,4-0,6	0,4-0,6	0,14-0,16
Гидроабразивная или обработка металлической дробью	0,84-0,89	0,11-0,16	0,35-0,4	0,6-0,65	0,3-0,32

Из этого можно сделать вывод, что коэффициенты излучения и отражения обусловлены изменением фактора шероховатости и соответственно отношения R_a / R_{max} , а не высотных параметров шероховатости R_a и R_z . Следовательно, формирование оптических характеристик поверхности связано с формой микронеровностей поверхности, а не с высотой ее профиля. Это хорошо согласуется с теоретическими результатами.

Аналогичные результаты получены при обработке алюминиевого сплава АМг4 (табл. 4.8).

Как следует из табл. 4.8, уменьшение отношения параметров шероховатости R_a / R_{max} (обусловленное различными методами обработки) соответствует увеличению критерия шероховатости F' , коэффициента отражения ρ_s и уменьшению коэффициентов поглощения A_s и излучения ε . При этом отношение R_a / R_{max} принимает весьма малые значения (0,033 для абразивного полирования), соответственно R_{max} / R_a принимает относительно большие значения – 30,3. Это хорошо согласуется с полученными теоретическими результатами, в частности, приведенными в табл. 4.4, согласно которым отношение R_a / R_{max} может изменяться в пределах 0...0,29.

Таблица 4.8

Значения параметров шероховатости и оптических характеристик поверхностей образцов из проката алюминиевого сплава АМг4, обработанных различными методами

Метод обработки	R_a , мкм	$\frac{R_a}{R_{max}}$	Критерий шерохо- ватости F'	Кoeffи- циент от- ражения ρ_s	Кoeffи- циент по- глощения A_s	Кoeffи- циент из- лучения ε
Исходная поверх- ность (прокат)	0,35	0,104	0,896	0,4	0,6	0,16
Фрезерование	1,6	0,11	0,89	0,47	0,53	0,15
Струйно- абразивная	0,9	0,16	0,84	0,4	0,6	0,3
Точение	0,56	0,09	0,91	0,48	0,52	0,07
Выглаживание шаром	0,1	0,07	0,93	0,8	0,2	0,05
Абразивное поли- рование	0,1	0,033	0,967	0,75	0,25	0,06
Тонкое точение алмазным инструментом	0,1	0,047	0,953	0,87	0,13	0,07

Экспериментально установлено (табл. 4.8), что наибольшие значения коэффициента отражения поверхности ρ_s достигаются после тонкого точения алмазным инструментом, выглаживания шаром и абразивного полирования. Эти методы обработки также обеспечивают наименьшие значения параметров шероховатости R_a , R_a/R_{max} и наибольшие значения критерия шероховатости F' . Из этого следует, что для создания высокосветоотражательных поверхностей (при обеспечении зеркального характера отражения) жестких деталей из алюминиевых и медных сплавов более эффективно применять методы алмазного точения и выглаживания, а для деталей из тонкого листа и лент – абразивное полирование, позволяющее уменьшить силовую напряженность процесса обработки особотонкостенных деталей. Для создания высокосветоотражательных матовых поверхностей (при обеспечении диффузного характера отражения, для которого отношение A_s/ε принимает относительно небольшие значения) эффективно применять точение и струйно-абразивную обработку, табл. 4.8.

4.8. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ОСОБОТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ

Характерной особенностью обработки плоскостворачиваемых трубчатых заготовок штанг является обеспечение жесткости в рабочей зоне, стабильности упругих и механических характеристик их материала после механических и химических воздействий в процессе обработки. В этом случае абразивное полирование является незаменимой операцией удаления окисной пленки. Учитывая это, нами, для процесса полирования, проведены эксперименты по выбору приемлемой технологической среды с точки зрения создания желаемого рельефа обработанной поверхности. Исследования выполнены на образцах из холоднокатаной ленты сплава марки 36НХТЮ. В табл. 4.9 приведены экспериментальные и расчетные значения коэффициента поглощения A_s , которые получены с учетом критерия шероховатости F' .

Изучение и анализ снимков и профилограмм поверхностей, обработанных пастами различных составов, позволили установить различие распределений количества размеров неровностей различных порядков малости.

Таблица 4.9.

Значения критерия шероховатости F' и коэффициента поглощения A_s поверхностей лент сплава 36НХТЮ после полирования

Абразивная паста	A_s (эксперимент)	F'	A_s (расчетное)
АСМ 2/1	0,38	0,93	0,380
АСМ 1/0	0,39	0,91	0,382
Окись алюминия МЗ	0,42	0,89	0,394
Окись хрома МЗ	0,43	0,89	0,394
Электрокорунд М7	0,46	0,88	0,399

Для поверхностей, обработанных с применением алмазных паст АСМ 2/1, преобладают неровности более высокого порядка малости (0,01...0,1 мкм), а после полирования электрокорундом М7 преобладающие высоты неровностей находятся в пределах 0,1...1,0 мкм. Различие формирования поверхностного слоя, по-видимому, определяется разной геометрией зерен алмазных и абразивных микропорошков на уровне субмикрорельефа поверхностей граней, что должно оказывать влияние на эффект процесса резания-царапания, развитие локальных температур. Для микрограней алмазных зерен более характерно микрорезание, а для электрокорунда - микросмятие с локализацией и увеличением затрачиваемой энергии (возникновение на полированных поверхностях кометообразных углублений). Локальное активное контактирование абразивного зерна с обрабатываемой поверхностью эффективно, по-видимому, до тех пор, пока геометрические размеры зерен не становятся соизмеримыми с отделившимися частицами обрабатываемого материала, что в последующем приводит к потере эффекта полирования. При больших подачах полировальника на образцах наблюдались следы направленного царапания. По-видимому, зернистость абразива и подача полировальника оказывают существенное влияние на направленность следов обработки, формируя систематическую составляющую шероховатости с более низкой частотой. Высокочастотные составляющие шероховатости поверхности можно отнести к разряду случайных, что подтверждает анализ профилограмм и снимков (разных увеличений) отдельных участков поверхности. Значительное влияние на их формирование оказывает химическая активность пасты.

В процессе обработки возникновение локальных очагов повышенных температур, наличие на поверхности веществ, растворяющихся и активно реагирующих с металлом, приводит к образованию неоднородностей кристаллоструктурных образований, что способ-

ствуется повышенной склонности поверхности к адсорбции и увеличению ее поглощательной способности (снижению светоотражательной).

После полирования относительная ошибка расчетных значений коэффициентов поглощения светового потока составила: с учетом критерия шероховатости поверхности - 13%, без учета - 18%. Различия расчетных и экспериментальных значений мы объясняем наличием загрязнений от остатков рабочей среды и окисной пленки, образованной в процессе обработки. Следует заметить, что в результате образования окисной пленки изменяется распределение плотности материала поверхностного слоя, что должно оказывать влияние на изменение формы и полноты неровностей большего порядка малости. Видимо, полнота и форма неоднородностей на поверхности, соизмеримых с длинами волн падающего излучения, определяется, в основном, адгезионными свойствами и окислением поверхности образцов в процессе полирования, что и способствует значительным расхождениям экспериментальных и расчетных значений коэффициентов поглощения A_s . Это обстоятельство необходимо учитывать при назначении режимов обработки таких деталей.

Проведенные исследования показали, что полирование сплава марки З6НХТЮ алмазными пастами на основе АСМ 2/1 способствует образованию поверхностного слоя с наименьшими значениями коэффициентов поглощения A_s (с наибольшей отражательной способностью ρ_s).

Основные результаты исследований можно распространить и на другие материалы, имеющие характерные особенности обработки, в частности, сплавы на основе меди. Их отличает легкая окисляемость поверхностных слоев. С применением выбранной по результатам экспериментов пасты, нами обработаны различные материалы с целью выявления достигаемых значений оптических характеристик.

Нами проведены исследования по выбору режимов абразивной обработки поверхностей лент из медно-бериллиевых сплавов.

Выбор режимов абразивного полирования поверхностей, обеспечивающих заданные значения критерия шероховатости поверхности F' , осуществляли на специальном оборудовании с применением войлочных полировальников и абразивного состава на основе алмазного микро порошка АСМ 2/1. По результатам предварительных исследований в качестве основных факторов процесса абразивного полирования, оказывающих наиболее существенное влияние на сглаживание поверхностного слоя, выбраны окружная скорость полироваль-

ника V , давление p и время обработки τ . Значения интервалов варьирования факторов, были выбраны из следующих пределов: окружная скорость (10...30) м/с; давление (0,5.. .3,0) МПа; время обработки (2...60)с.

Статистическая обработка результатов эксперимента позволила получить эмпирическую зависимость:

$$F' = 0,0764 \cdot V^{0,037} \cdot p^{0,015} \cdot \tau^{0,0245} \quad (4.55)$$

Наибольшее влияние на сглаживание поверхностного слоя в выбранном интервале изменения факторов оказывает скорость полировальника и в меньшей степени влияние давления на обрабатываемую поверхность.

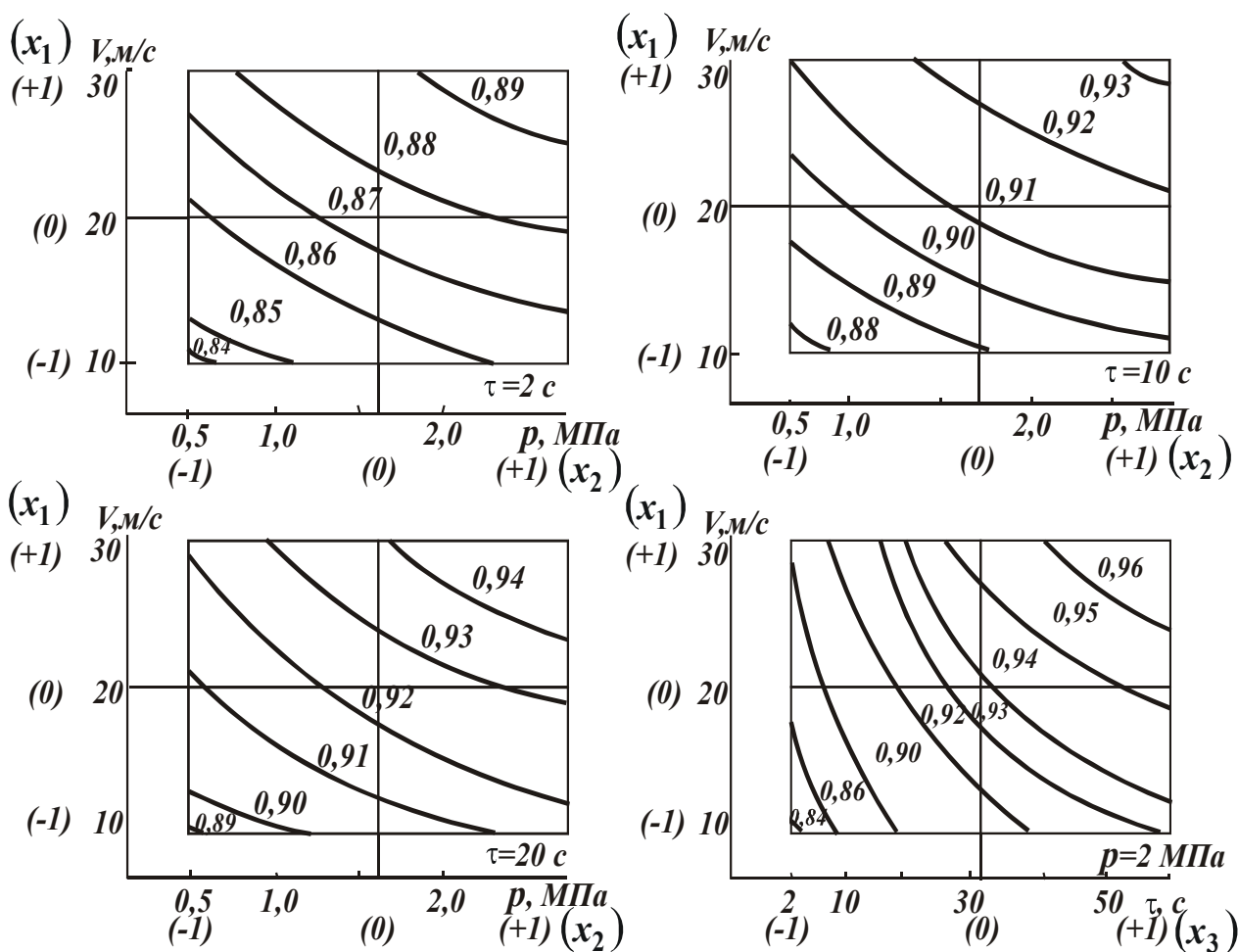


Рис. 4.12. Зависимость критерия шероховатости поверхности от значений факторов абразивного полирования: V – скорость резания, м/с; p – давление полировальника на обрабатываемую поверхность, МПа; τ - время обработки, с.

Полученная модель абразивного полирования позволяет назначать необходимые режимы обработки. Для этого были построены двухмерные сечения поверхности отклика, соответствующие пересечению пространственной фигуры с плоскостями $\tau = const$ и $p = const$. Изолинии равных значений отклика представлены на рис. 4.12.

4.9. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ПОЛИРОВАНИЯ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ

Электрохимическая обработка может с успехом применяться для обеспечения светорассеивающих свойств поверхностей. Так после электрохимического травления поверхностей деталей из стали Ст.3 их светоотражательная способность соответствовала 30%, а после покрытия "блестящим" хромом - 50%. Установлено, что светорассеивающие свойства поверхностей достигаются при относительно меньшей высоте неровностей, что улучшает эстетические свойства обработанных поверхностей.

Для исследования особенностей электроконтактного способа полирования было изготовлено устройство с тампонодержателем для обработки образцов из лент.

Для бериллиевых бронз после нагрева на воздухе характерны особенности электрохимической обработки. Они обусловлены тем, что при формовании деталей, в процессе дисперсионного твердения происходит образование стойкой окисной пленки, а сам материал приобретает гетерогенное строение с мелкодисперсными включениями частиц из интерметаллидов.

Для обеспечения высокой отражательной способности необходимо перед электрополированием удалить с поверхности деталей окисную пленку абразивными пастами. Механическое полирование бериллиевой бронзы не обеспечивает стабильности отражательной способности ее поверхности в процессе длительного хранения. Это говорит о том, что шероховатая поверхность задерживает на поверхности остатки рабочей среды, создавая условия для протекания физико-химических процессов при длительном хранении и эксплуатации, а это ухудшает оптические свойства поверхности.

Результаты эксперимента по изучению зависимости отражательной способности поверхности образцов из ленты БрБНТ 1,7 от

продолжительности хранения в атмосферных условиях могут быть представлены в виде эмпирических зависимостей (табл. 4.10); которые получены по методу наименьших квадратов.

Важным моментом процесса электрохимической обработки является удаление окисной пленки с поверхности деталей. Из-за высокой химической стойкости пленки и ее неравномерности по толщине, гетерогенности материала после термической обработки возможны дефекты поверхности. В частности при форсированном режиме обычно происходит местное растравливание поверхности.

Таблица 4.10

Зависимость коэффициента отражения ρ_s поверхностей лент сплава БрБНТ 1,7 после различных методов обработки от продолжительности их хранения τ в атмосферных условиях

Метод обработки	Эмпирическая зависимость
Абразивное полирование	$\rho_s = -0,04 \ln \tau + 0,62$
Химическое + абразивное полирование	$\rho_s = -0,0144 \ln \tau + 0,721$
Без обработки (прокат)	$\rho_s = -0,0018 \tau + 0,424$
Абразивное + электрохимическое полирование	$\rho_s = -0,000032 \tau + 0,779$

Для обеспечения заданных эксплуатационных свойств деталей из тонколистового материала предлагается осуществлять обработку поверхности в две операции. Вначале, при механическом полировании, достигается удаление окисной пленки и сглаживание поверхностного слоя. Последующая электрохимическая обработка придает поверхности свойства высокой отражательной способности и ее устойчивости при последующей эксплуатации за счет пассивирующей анодной обработки.

Повышенная активность поверхности после абразивного полирования практически исключает возможность очистки поверхностного слоя (без его замены) от остатков обрабатываемых материалов, что заметно снижает (на 4...15%) ее отражательную способность. Это подтверждается и оценкой работы выхода электронов обработанных поверхностей (контактной разностью потенциалов КРП) - после электрохимического полирования она значительно ниже. Значения коэффициента отражения, КРП, поверхностей образцов лент из сплава БрБНТ 1,7 после обработки различными методами приведены в табл. 4.11.

Кратковременная анодная обработка позволяет удалить загрязнения на поверхности и уменьшить площадь реальной поверхности,

что должно увеличить значения критерия шероховатости поверхности F' .

Таблица 4.11

Значения коэффициентов отражения и излучения, КРП поверхностей деталей из сплава БрБНТ 1,7 после обработки различными методами

Метод обработки	ρ_s	ε	КРП, мВ
Полирование (АСМ 2/1)	0,62	0,07	-100
Электрополирование	0,76	0,05	+300
Термическая обработка на воздухе (при температуре 400 ⁰ С) в течение 50 мин	0,25	0,18	-300

На рис. 4.13 приведены зависимости критерия шероховатости поверхности F' , фактора шероховатости поверхности F и высоты неровностей R_z от продолжительности полирования ленты сплава БрБНТ 1,7. Обработку образцов производили после нагрева на воздухе (отпуск).

Анализируя зависимости критериев шероховатости поверхности от продолжительности полирования и профилограммы поверхностей после обработки на различных режимах (рис. 4.13), можно предположить, что на первой стадии обработки происходит структурное травление поверхностного слоя, обладающего большой геометрической неоднородностью. Интенсивность растворения более активных в электрохимическом отношении включений окисной пленки значительно выше, поэтому в начальный момент происходит резкое увеличение площади реальной поверхности за счет увеличения пористости окисной пленки. Значения критерия шероховатости поверхности F' снижаются.

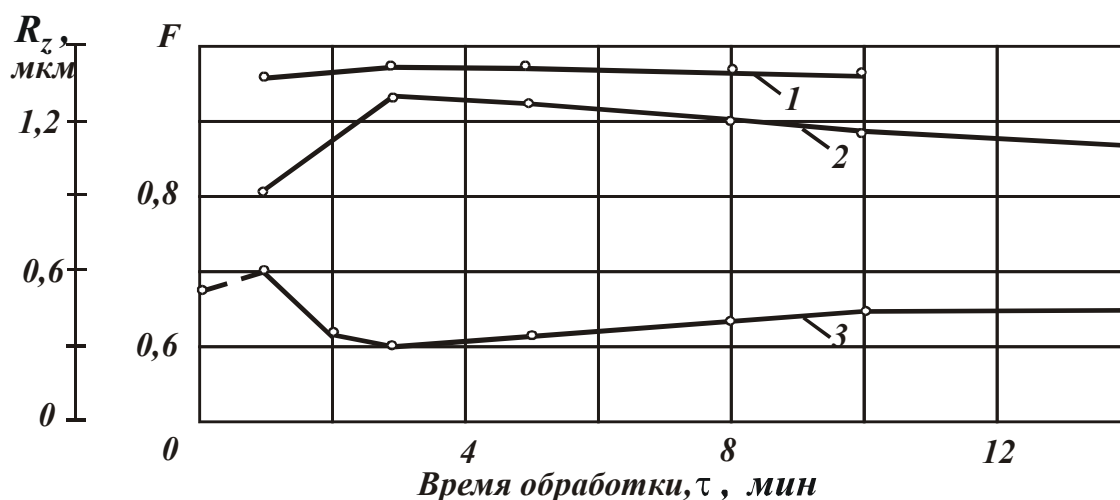


Рис. 4.13. Зависимости фактора шероховатости F (1), критерия шероховатости F' (2) и высоты неровностей R_z (3) от продолжительности электрохимического полирования (плотность тока 80 А/дм²).

В дальнейшем начинает растворяться основной металл и пористая часть окисной пленки отслаивается. Происходит увеличение значения критерия шероховатости F' . При увеличении времени обработки свыше 6 мин происходит снижение его значений, что можно объяснить изменением формы выступов и впадин в результате более интенсивного растворения мелкодисперсной фазы.

При повышенных плотностях тока и большой продолжительности при течении процесса в анодном слое может произойти нарушение соотношения скоростей диффундирования ионов с матрицы и мелкодисперсной фазы, что, по-видимому, и наблюдается в нашем случае, и снижает значения критерия шероховатости поверхности F' .

Сравнение профилограмм поверхностей показывает, что частотный состав неровностей при сглаживании уменьшается и амплитуда снижается, а при нарушении стабильности режима - частотный состав увеличивается и периодическая составляющая незначительна.

Стабилизация параметров процесса полирования (выравнивание скоростей растворения матрицы и мелкодисперсной фазы) достигается интенсификацией отвода продуктов анодного растворения (принудительное обновление прианодного слоя). Это увеличивает значения критерия шероховатости поверхности F' . Принудительное обновление прианодного слоя может быть достигнуто увеличением кратности обмена электролита в зоне обработки (ваннный способ) или путем механического снятия (замены) прианодного слоя (электроконтактный способ).

Применение электрохимического полирования электроконтактным способом предпочтительно перед ваннным. В отличие от ваннного способа при электроконтактном более интенсивно обновляется прианодная пленка в области контакта микронеровностей тампона с микровыступами обрабатываемой поверхности. Возникающая прианодная пленка менее насыщена ионами металла и обладает меньшим сопротивлением направленному движению ионов, чем при ваннном способе. Характерная особенность процесса - незначительная продолжительность жизни прианодного слоя, что позволяет интенсифицировать процесс обработки. Следует отметить наличие существенных расхождений расчетных и экспериментальных данных коэффициентов поглощения и излучения особенно при низких плотностях тока и малом времени обработки. При $I=30 \text{ А/дм}^2$ и $\tau=1$ мин эти расхождения составили 30%, а с учетом критерия шероховатости поверхности - 4%. Экспериментальные значения коэффициентов поглощения вы-

ше расчетных из-за наличия окисной пленки, образованной в процессе полирования в результате нарушения равновесия между скоростью ее образования и химического растворения. При низких плотностях тока и малом времени обработки одной из причин увеличения экспериментальных значений коэффициентов поглощения является возникновение большого числа характерных неровностей, резко увеличивающих площадь реальной поверхности и снижающих значения критерия шероховатости поверхности F' .

Результаты экспериментальных исследований электрохимического полирования поверхностей лент пружинных сплавов с целью оценки достигаемых значений коэффициентов поглощения A_s и излучения ϵ представлены в табл. 4.12.

Таблица 4.12

Значения коэффициентов поглощения и излучения поверхностей лент пружинных сплавов после электрохимического полирования (при равных значениях параметра шероховатости R_a)

Марка сплава	A_s	ϵ
36НХТЮ	0,40-0,42	0,11-0,14
БрБ2	0,20-0,21	0,03-0,04
БрБ2,5	0,20-0,22	0,03-0,04
БрБНТ1,7	0,22-0,24	0,03-0,05
БрБНТ1,9	0,22-0,24	0,03-0,05
БрБНТ1,9Мг	0,22-0,24	0,03-0,05
БрБНТ1,7Мг	0,20-0,21	0,04-0,05

После полирования (съем 1...10 мкм) значения предела упругости $\sigma_{0,02}$ увеличиваются до 9% для сплава БрБНТ 1,7, что можно объяснить устранением концентраторов напряжений, снятием слоя с повышенными остаточными напряжениями и микродефектами, а также тем, что на поверхности оказывается слой с благоприятной тонкой структурой.

Для изготовления деталей с высокой отражательной способностью поверхностей существенным является съем металла в процессе полирования. Мы изучили влияние факторов процесса полирования: плотности тока I , температуры электролита T и продолжительности обработки τ на толщину удаленного слоя h . Результаты эксперимента по обработке деталей из медно-бериллиевых сплавов (марки БрБНТ1,7Мг) представлены в следующем виде:

$$\rho_s = 1,44 \cdot I^{0,068} \cdot \tau^{0,037} T^{-0,272} \quad (4.56)$$

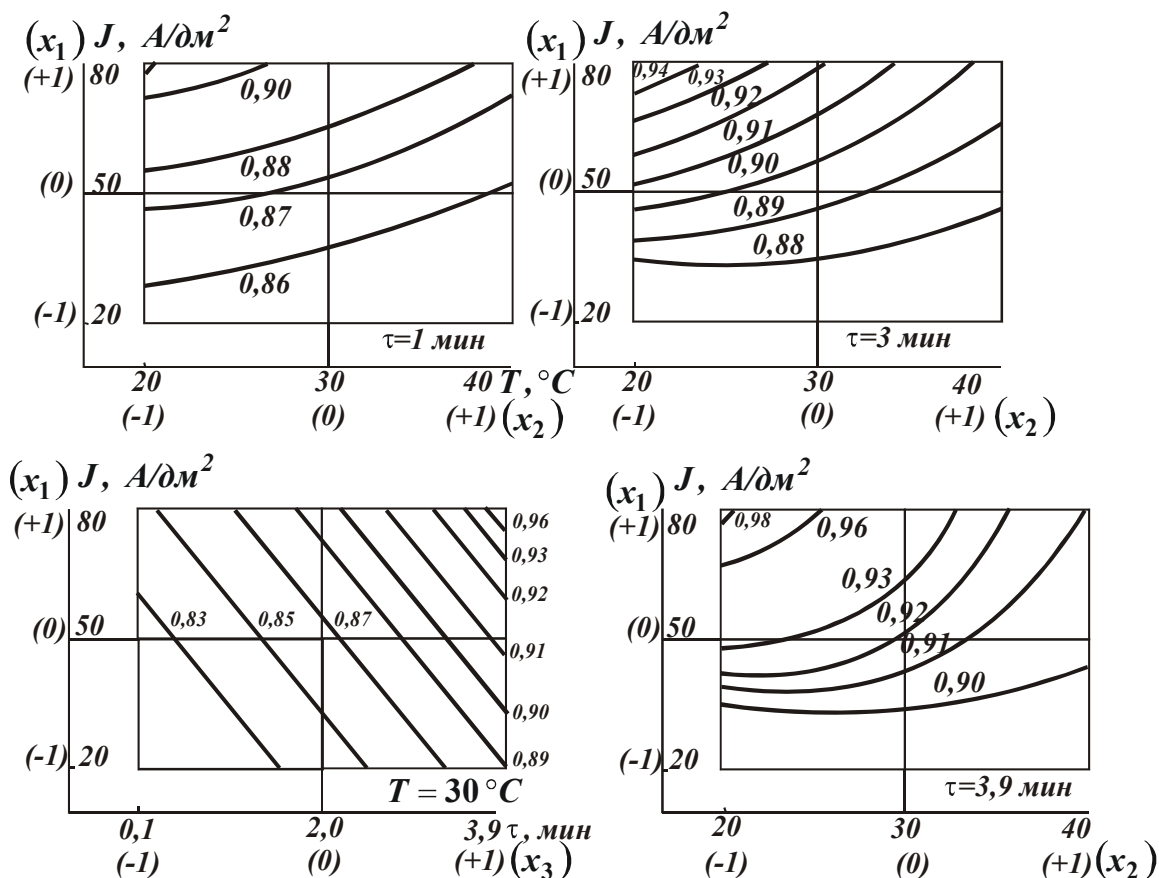


Рис. 4.14. Зависимость критерия шероховатости поверхности F' от значений параметров режима электрохимического полирования.

Анализ уравнения показывает, что наибольшее влияние на изменение отражательной способности обрабатываемой поверхности оказывает температура электролита. Плотность тока и продолжительность обработки оказывают значительно меньшее влияние.

В результате анализа и оценки факторов технологического процесса, влияющих на критерий шероховатости поверхности F' (для сплава марки БрБНТ 1,7), в качестве основных были приняты: плотность технологического тока, A/dm^2 ; температура электролита, $^\circ\text{C}$; продолжительность обработки, мин (рис. 4.14).

Анализ модели указывает на различное влияние учтенных факторов (для выбранных интервалов их изменения) на шероховатость поверхности. Более слабое влияние на значение параметров шероховатости поверхности по сравнению с остальными параметрами оказывает температура электролита сама по себе. Наибольшее влияние оказывает продолжительность полирования и в меньшей степени - плотность технологического тока. Совместное воздействие технологического тока и температуры электролита в зависимости от продолжительности обработки увеличивают значения параметров шероховатости поверхности.

4.10. АБРАЗИВНОЕ ПОЛИРОВАНИЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОЛИМЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Полимеры, входящие в состав абразивных паст и суспензий как вещества с высоким молекулярным весом и большими размерами макромолекул оказывают сложное действие на процесс обработки. По характеру это действие может быть физическим, химическим и механическим. На рис. 4.15 приведена зависимость съема металла от времени обработки алмазной суспензией различной зернистости. С увеличением длительности обработки съем металла существенно уменьшается, что можно объяснить сложностью процессов, протекающих в рабочей зоне.

Физические действия полимеров состоят в том, что они, изменяя вязкость абразивного состава, воздействуют на демпфирующее состояние рабочего слоя в зоне обработки и тем самым на царапающий эффект абразивных зерен и, следовательно, производительность процесса обработки. При этом изменением вязкости состава регулируется степень удержания абразивного состава в зоне обработки. Химическое действие заключается в том, что интенсификация съема металла происходит за счет взаимодействия активных продуктов деструкции полимеров в процессе обработки. Полимерные вещества в процессе

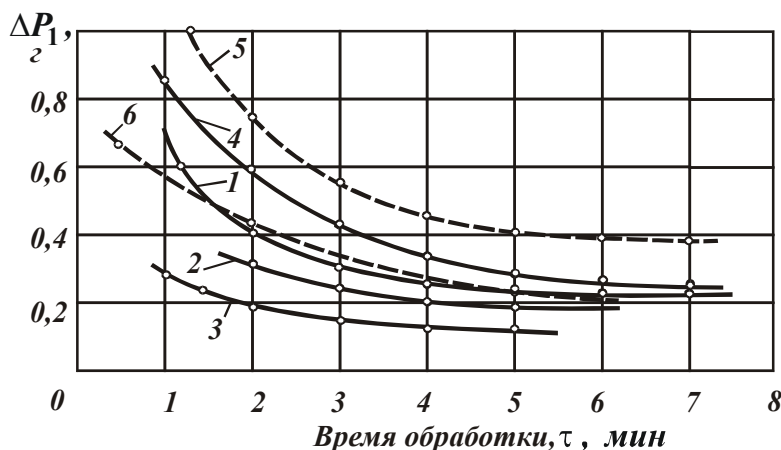


Рис. 4.15. Зависимость съема металла от времени обработки алмазной суспензией различной зернистости: 1 - АСМ 7/5 после шлифования; 2 - АСМ 5/3 после обработки АСМ 7/5; 3 - АСМ 3/2 после обработки АСМ 5/3; 4 - АСМ 7/5 после обработки АСМ 3/2; 5 - АСМ 7/5 после шлифования (суспензия с полимером); 6 - АСМ 5/3 после обработки АСМ 7/5 (суспензия с полимером).

обработки подвергаются механической, термической, окислительной и другим видам деструкции.

При взаимодействии абразивных зерен, поверхностей притира (полировальника) и обрабатываемой детали происходит механическая деструкция полимера, которая выражается в разрыве цепочек макромолекул полимеров. При этом может происходить уменьшение молеку-

лярного веса полимера. Обрыв цепочек сопровождается образованием свободных валентностей в месте обрыва свободных макрорадикалов, снижение молекулярного веса возможно только при стабилизации этих макрорадикалов, т.е. при образовании стабильных обрывков исходных молекулярных цепочек.

Стабилизация макрорадикалов – компенсация свободных валентностей на их концах — может происходить при взаимодействии с металлом ювенильных поверхностей, образующихся в результате царапания абразивными частицами обрабатываемой детали.

Стабилизация макрорадикалов возможна при компенсации свободных валентностей на их концах при взаимодействии с веществами (акцепторами) из неабразивных составляющих. Имеются в виду вещества, способные легко отщеплять атомы или группы атомов для присоединения к свободным валентностям макрорадикалов, и, тем самым, их стабилизировать. Некоторые из них, взаимодействуя с веществами, образуют соединения, способные в дальнейшем перегруппироваться с образованием более стабильных концевых групп.

В процессе абразивной обработки механическое воздействие является не единственной причиной обрыва цепочек макромолекул полимеров, а активизируется целым рядом сопутствующих факторов.

Обрабатываемая поверхность при резании - царапании абразивными зернами - может нагреваться в локальных участках до значительных температур, а соприкосновение макромолекул вызывает термическую деструкцию - разрыв макромолекулярных цепочек. Под действием тепловой энергии ослабевают не только главные валентные связи между атомами основной цепочки макромолекулы, но и связи в боковых ответвлениях или группах, вследствие чего может произойти не только обрыв цепи макромолекулы, но и перегруппировка, взаимодействие активированных атомов и групп атомов с веществами окружающей среды или соседних цепочек.

Устойчивость к тепловому воздействию, характер изменения макромолекулы зависят от химической природы полимера и воздействия окружающих веществ. Как правило, чистые полимеры наиболее термостойки. Наличие примесей и активных (ювенильных) металлических поверхностей притира и обрабатываемой детали способствуют химическому взаимодействию полимера и образованию новых продуктов с меньшим молекулярным весом. При этом ювенильные металлические поверхности могут оказать также каталитическое действие на химическое взаимодействие полимера с различными веще-

ствами абразивного состава и, кроме того, сами могут химически взаимодействовать с полимером.

Под действием окружающего воздуха протекает окислительная деструкция полимеров. Наиболее неустойчивы к действию окислительной деструкции - непредельные полимеры, обладающие двойными связями. Продукты окислительной деструкции претерпевают ряд изменений и, обладая на различных стадиях своего изменения разной химической активностью, взаимодействуют с металлом обрабатываемой детали. Кроме того, возникновение концевых окислительных групп повышает адгезию полимера с соприкасавшимися поверхностями, что имеет значение для протекающих химических реакций и удержания абразивного состава в зоне обработки.

Таким образом, полимерные вещества, входящие в абразивный состав, изменяясь в процессе обработки и за счет образующихся активных продуктов деструкции, оказывают химическое действие на обрабатываемую поверхность, способствуя повышению съема металла.

Механическое действие состоит в том, что макромолекулы полимеров, обволакивая абразивные зерна, могут способствовать уменьшению эффекта взаимного царапания зерен, вызывая этим повышение времени активного режущего-царапающего воздействия абразивного состава на обрабатываемый материал.

Кроме того, полимеры с другими неабразивными компонентами создают матрицу, в которой распределяются и удерживаются на притире (полировальнике) этой матрицей абразивные зерна.

Введение полимера в абразивный состав способствует повышению производительности процесса доводки. Однако этот эффект не одинаков для составов с различной зернистостью абразивов. Большая производительность достигается при обработке составами с меньшим размером абразивных зерен. При этом значительное влияние на производительность процесса оказывает также удельное давление притира.

4.11. ОБРАБОТКА ПРЕЦИЗИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ С ЗЕРКАЛЬНЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

Для обработки прецизионных деталей с зеркальными поверхностями используют пекоканифольные полировальники. Положительный результат получен при использовании доводочного алмазно-абразивного состава с поливинилацетатной дисперсией, что позволи-

ло устранить токсичность ранее применяемых составов и уменьшить неровности на поверхности. Рекомендовано следующее соотношение компонентов, в вес %: алмазный микропорошок (5-8); поливинилацетатная дисперсия (5-7); вода (остальное). Состав готовят смешением компонентов.

Варианты состава и их рабочие характеристики приведены в табл. 4.13.

Таблица 4.13

Шероховатость поверхности для различных составов

№ п/п	АСМ 3/2, %	ПВА, %	ПАВ, %	Аммиак, %	Вода, %	Съем металла, г	Шероховатость R_z , мкм	Коэффициент от- ражения ρ_s , %
1	1,5	-	2,5	0,15	95,85	0,26331	0,08	98,4
2	6,0	-	2,5	0,15	91,35	0,28231	0,09	98,2
3	2,0	6,0	-	-	92,0	0,27312	0,09	99,0
4	3,0	6,0	-	-	91,0	0,41349	0,09	99,0
5	4,0	6,0	-	-	90,0	0,56331	0,10	98,1
6	5,0	6,0	-	-	89,0	0,64632	0,05	99,1
7	6,0	6,0	-	-	88,0	0,68922	0,04	99,2
8	7,0	6,0	-	-	87,0	0,65734	0,05	99,2
9	8,0	6,0	-	-	86,0	0,64931	0,06	99,1
10	9,0	6,0	-	-	85,0	0,63110	0,07	99,0
11	6,0	3,0	-	-	91,0	0,51006	0,09	98,2
12	6,0	4,0	-	-	90,0	0,63789	0,08	98,3
13	6,0	5,0	-	-	89,0	0,65123	0,05	99,0
14	6,0	6,0	-	-	88,0	0,67123	0,05	99,2
15	6,0	7,0	-	-	87,0	0,64341	0,04	99,2
16	6,0	8,0	-	-	86,0	0,62789	0,05	99,0

АСМ 3/2 – алмазный микропорошок; ПАВ – поливинилацетатная дисперсия; ПАВ – оксиэтилированные аминоспирты.

Поливинилацетатная дисперсия при оптимальном ее содержании в доводочном алмазно-абразивном составе обеспечивает фиксацию абразивных зерен на полировальнике. Продукты механической деструкции поливинилацетата способны химически взаимодействовать с металлом обрабатываемой поверхности, особенно с образующимися в процессе царапания режущими элементами зерен, гребешками, что обеспечивает повышение съема металла и сглаживание поверхности,

и приводит к увеличению ее светоотражающей способности.

При увеличении содержания поливинилацетатной дисперсии вязкость доводочного алмазно-абразивного состава повышается и он оказывает демпфирующее действие на полировальник, абразивные зерна при этом свободно перемещаются в зоне обработки, не оказывая значительного режуще-царапающего действия и производительность процесса доводки уменьшается. Уменьшение же содержания поливинилацетатной дисперсии в составе ниже 5% приводит к потере эффекта оказываемого ею на процесс доводки.

Содержание алмазного микропорошка в доводочном алмазно-абразивном составе свыше оптимального содержания при капельном методе подачи суспензии в зону обработки не приводит к повышению производительности процесса доводки, так как насыщение полировальника абразивными зернами может происходить до определенной степени, а затем алмазный микропорошок непроизводительно минует зону обработки.

Поливинилацетат и продукты его механической деструкции, происходящей при царапании абразивными (алмазными) зернами металлических поверхностей, способны образовывать прозрачную тончайшую пленку на обработанной поверхности, которая оказывает консервирующее действие на ювенильные металлические поверхности и, следовательно, уменьшает коррозионный процесс.

Сглаживание поверхности в процессе доводки обеспечивает высокую светоотражающую способность поверхностей, обрабатываемых с помощью разработанного доводочного алмазно-абразивного состава. Этот же состав может быть использован для обработки прецизионных деталей с заменой алмазного микропорошка обычными абразивами (макропорошками электрокорунда или карборунда).

Предлагаемый доводочный алмазно-абразивный состав может успешно применяться при доводочных процессах высокоточных деталей с зеркальными поверхностями, так как он обладает указанными ранее достоинствами, а поливинилацетатная дисперсия является весьма доступным веществом.

4.12. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СВОЙСТВ ДЕКОРАТИВНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ

Спрос на изделия определяется их товарным видом. Товарный вид изделий оказывает влияние и на другие эксплуатационные свой-

ства, например, долговечность, склонность к адгезии различного рода загрязнений. Высокие эстетические свойства деталей вызывают бережное отношение к изделию в целом и удлиняют срок его службы.

Приятное на ощупь восприятие предмета непосредственно связано с величиной и формой неровностей на поверхности. Зрительное восприятие зависит от спектра излучения, отражения света поверхностями, характера пространственного распределения светового потока и др. Все тела видимы только благодаря рассеянному свету и собственному излучению. Рассеянный свет формируется в поверхностном слое с участием мельчайших пылинок и других загрязнений. При рассеивании в преимущественном направлении наблюдают характерный блеск поверхности. Эстетические свойства в значительной степени будут определяться макро-, микро- и субмикрорельефом.

В настоящее время отсутствуют единые подходы к нормированию и контролю неровностей декоративных поверхностей. Анализ возможностей использования ГОСТ 2789-73 к решению данной проблемы рассмотрен в работе, где отражены и недостатки существующих приборов контроля и оценки параметров шероховатости обработанных поверхностей. Предусмотренные стандартом на шероховатость поверхности типы направлений неровностей не в состоянии передать эстетические особенности возможных узоров, рисунков, образующихся на поверхности после обработки с диффузным, зеркальным или смешанным отражением.

Известно, что применение различных методов финишной обработки деталей приводит к формированию характерного поверхностного слоя, который оказывает существенное влияние на перераспределение падающего светового потока (отражение, поглощение и излучение). В поверхностном слое при обработке происходят физические и химические изменения, а поверхностный слой приобретает характерный микрорельеф и химическое состояние.

Состояние поверхностного слоя алюминиевых сплавов марок АМг3, АМг4 и АМг6 изучали после различных методов обработки, при этом учитывали приобретенную предварительно технологическую наследственность. Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 4.16.

Установлено, что изменение режимов обработки точением, фрезерованием и выглаживанием мало влияет на изменение излучательной способности поверхности, но оказывает влияние на ее светоотражение. Эстетические свойства поверхностей улучшаются при точении

алмазным инструментом, при этом светоотражательная способность увеличивается и имеет зеркальный характер. Однако, при обработке тонкостенных деталей осуществление этих процессов затруднено.

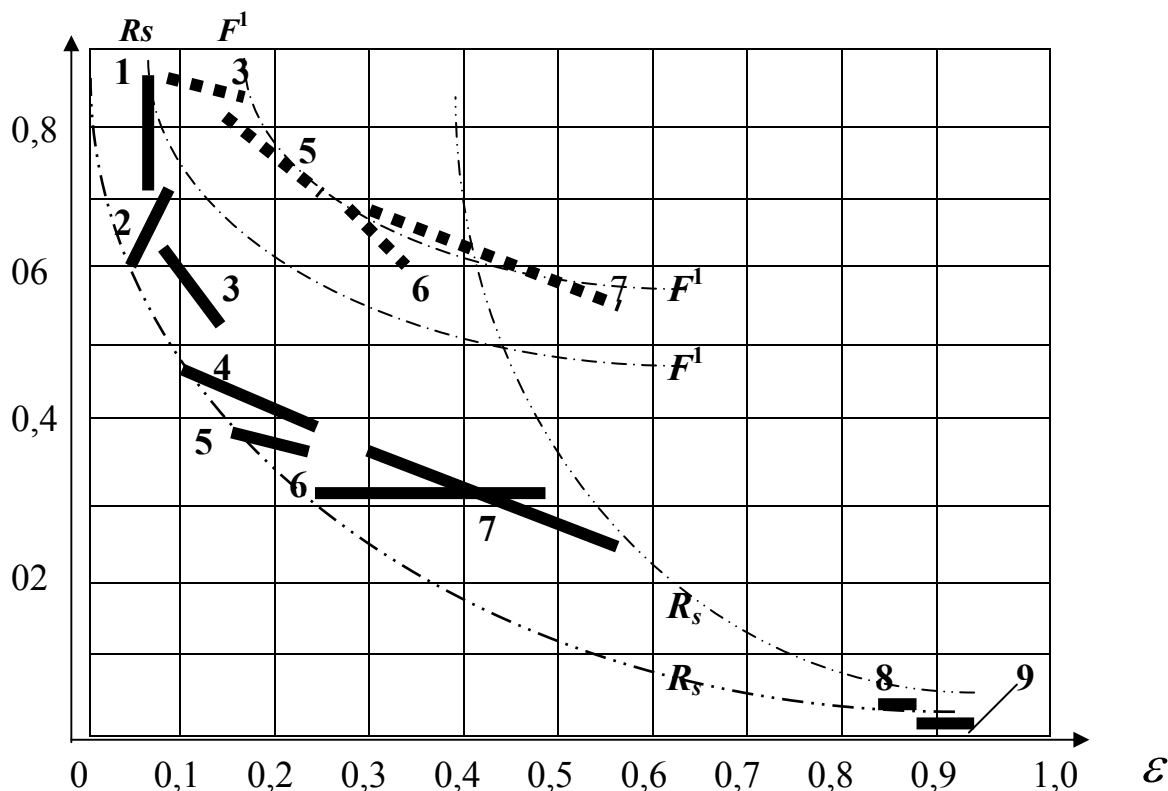


Рис. 4.16. Область значений критерия шероховатости, коэффициентов отражения и излучения после обработки: 1- металлизированная полимерная пленка; 2- диэлектрическая пленка на полированном металле; 3- полированные металлы; 4- краски на основе металлов; 5- неполированные металлы; 6- обдувка песком; 7- серые краски; 8- черное покрытие; 9- черные краски.

Отсутствие бликов на поверхности (светорассеивание) можно получить обдувкой свободным абразивом, струйно-абразивной обработкой, травлением в электролитах, нанесением гальванических покрытий. Эти методы обработки увеличивают излучательную способность поверхностей при одновременном уменьшении светоотражения. Характер светоотражения от таких поверхностей диффузный. Эти методы обработки могут быть эффективны при технологическом обеспечении свойств декоративных поверхностей. При применении струйных методов обработки свободным абразивом образуются неровности с относительно большим диапазоном рассеивания размеров. Для поверхностей деталей с окисленным слоем критерий шероховатости лишь частично отражает форму неровностей на поверхности ввиду увеличенной погрешности контактного метода оценки параметров шероховатости.

4.13. ШЕРОХОВАТОСТЬ И ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРООСАЖДЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Электроосажденные покрытия на поверхностях деталей из алюминевых и титановых сплавов нашли применение в системах терморегулирования летательных аппаратов.

Известен ряд работ по изучению шероховатости электроосажденных поверхностей, однако в них содержится недостаточно информации о взаимосвязи параметров шероховатости поверхностей с ее оптическими свойствами. Оценка параметров шероховатости поверхности затруднена, ввиду неприемлемости стандартных методик для их оценки, которые не позволяют оценить развитый рельеф наслоений, пор и других, характерных для электроосаждения форм и размеров неровностей.

Для ряда деталей, работающих в условиях воздействия светового потока отношение A_s / ε для поверхностей должно быть меньше единицы и стремиться к нулю.

Нами для исследований выбраны материалы, нашедшие наибольшее применение в производстве летательных аппаратов: АМг3, АМг6, Д16, ВТ6, ВТ14 и ВТ20. Перед нанесением покрытий подготовку поверхности проводили механическим и химическим способом. На поверхности образцов размером 5x50x50 мм (из листового проката) получали покрытия хромом, никелем, оксидированием и анодированием. Толщина никелевых и хромовых покрытий до 3 мкм, анодированных до 30 мкм.

Анодирование проводили в сернокислотном растворе при комнатной температуре и плотности тока $1 \div 1,5$ А/дм² для получения пленок толщиной $3 \div 12$ мкм. При таких толщинах формируются бесцветные пленки.

Процесс глубокого анодирования вели по методу подающей мощности при температуре 8–12⁰С и начальной анодной плотности тока 10 А/дм². Напряжение при этом изменялось от 20 до 22 В.

Пленки на поверхности образцов формировались со скоростью 2 мкм/мин. Образцы с пленкой толщиной 30 мкм имели гладкую поверхность черного цвета.

Так как область получения белых, плотных анодных оксидов находится в довольно узких пределах изменения технологических параметров, анодирование осуществляли в двухкомпонентном растворе на основе серной кислоты и трехкомпонентном растворе на основе

сульфосалициловой кислоты. Температура раствора варьировалась в интервале $20 \div 50^{\circ}\text{C}$, напряжение – $30 \div 55$ В (при вольта статическом режиме), плотность тока – $2 \div 4$ А/дм² (при гальвано статическом режиме).

Контроль толщины осуществляли на вертикальном оптиметре. Шероховатость поверхностей оценивали на приборе мод. 252 и электронном микроскопе. Коэффициенты поглощения A_s и излучения ε оценивали на фотометре ФМ 59 и терморadiометре ТИС.

В результате проведенных исследований установлена зависимость оптических свойств поверхностей от их предварительной обработки.

Покрытие поверхностей образцов никелем и хромом при равных значениях параметров шероховатости поверхности имело следующие значения поглотительной и излучательной способности:

- для черного хрома A_s ($0,97 \div 0,98$) и ε ($0,93$);
- для черного никеля A_s ($0,95 \div 0,96$) и ε ($0,08 - 0,2$).

Изучение поверхностей по снимкам электронного микроскопа показало различие субмикро шероховатости поверхности покрытий.

Поверхности характеризуются развитым рельефом с большим набором микронеровностей различных порядков малости от 1000 до 100000 Å и значительной протяженностью глубины впадин (неровности со ступенчатыми наслоениями). Поверхности покрытия черным никелем выделяются низкими значениями излучательной способности (при этом значения отношения $A_s / \varepsilon = 11,8 \div 4,8$), что можно объяснить высокой электропроводностью никеля, солей никеля и цинка, а очень развитая поверхность обеспечивает повышенную поглотительную способность.

Оксидирование образцов из алюминиевых сплавов осуществляли в следующей последовательности: обработка перед травлением (органический растворитель или органический растворитель + HNO_3 или $\text{NaOH} + \text{HNO}_3$), затем травление от 5 до 40 мин. и последующее оксидирование от 15 до 30 мин. Результаты эксперимента представлены на рис. 4.17. Установлено, что химическое фрезерование перед травлением поверхностей уменьшает значение отношения A_s / ε : для сплава АМг3 с 3 до 2,5; для сплава АМг6 с 2,5 до 2,0.

В большинстве случаев увеличение времени травления и оксидации способствует увеличению поглотительной и излучательной способности поверхности. Для образцов после химического фрезеро-

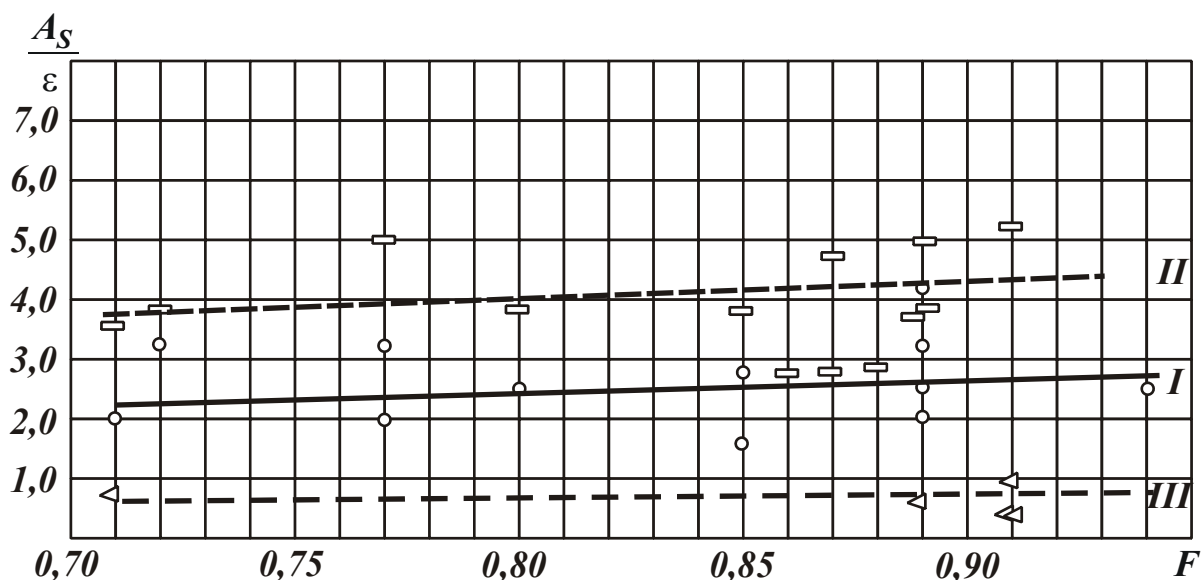


Рис. 4.17. Зависимость отношения A_s / ϵ от критерия шероховатости поверхности F' : I - исходное состояние перед нанесением покрытий; II - после оксидирования; III - после анодирования.

вания подобного увеличения не наблюдается, а это, по видимому, и приводит к снижению значений отношения A_s / ϵ .

При анодировании образцов из алюминиевых сплавов в состоянии поставки после предварительного химического полирования наблюдается большой разброс по значениям коэффициентов A_s и ϵ , что можно объяснить неравномерностью снятия лакируемого слоя.

Предварительная обработка песком или металлической дробью увеличивает поглотительную способность A_s .

Предварительное химическое фрезерование увеличивает значение A_s до $0,8 \div 0,9$ у сплава АМг6 и $0,4 \div 0,5$ для сплава Д16.

Окрашивание в черный цвет дает наибольшее значение коэффициентов A_s : для АМг6 до $0,88 \div 0,92$ и $0,65 \div 0,8$ для Д16.

Значение коэффициента излучения ϵ почти не зависит от предварительных способов подготовки поверхностей перед анодированием и находится в пределах $0,8 \div 0,9$.

Наименьшие значения отношения A_s / ϵ для анодированных поверхностей достигаются при наполнении в воде и хромпике образцов в состоянии поставки:

- для сплава АМг6: $A_s / \epsilon = 0,27$ (в воде); $0,24$ (в хромпике);
- для сплава Д16: $A_s / \epsilon = 0,2$ (в воде); $0,22$ (в хромпике).

Химическое полирование перед анодированием повышает значение отношения A_s / ϵ до $0,5 \div 0,8$.

Для образцов после глубокого анодирования обработка их поверхности перед анодированием практически не оказывает влияния на коэффициент поглощения поверхности, что, по видимому, можно объяснить сравнительно большой толщиной анодного покрытия (оксида) до 30 мкм.

Однако, предварительная обработка исходной поверхности оказывает существенное влияние на другие свойства оксидных покрытий (плотность и равномерность пленки, ее адгезионные свойства), поэтому для получения качественных покрытий можно рекомендовать подготовку поверхностей деталей с применением переменного тока промышленной частоты в растворах, содержащих серную кислоту (H_2SO_4 – 400 г/л). Плотность технологического тока 70 А/дм².

При анодировании образцов из сплавов ВТ14 и ВТ20 варьирование концентрации соляной кислоты в электролите от 30 до 60 г/л, при температуре от 30 до 50⁰С оказывает незначительное влияние на оптические свойства (A_s находится в пределах 0,47÷0,61, а ε - в пределах 0,76–0,86). Такое значение характеристик поглощательной и излучательной способности, по-видимому, связано с тем, что изменение технологических параметров в указанных пределах, оказывая влияние на адгезию покрытий, не приводит к изменению структуры и состава анодных оксидов.

Пленки, сформированные на этих сплавах матовые, белого цвета с незначительным изменением оттенка от желтоватого до розового.

Так как на сплаве ВТ 6 при анодировании в двухкомпонентном растворе формируются окрашенные пленки, вследствие довольно большого количества ванадия в составе сплава, варьирование параметров процесса анодирования приводит к некоторому изменению состава и окраски пленок, что приводит к изменению излучательных свойств анодированной поверхности.

Для исследуемых титановых сплавов изменение состава (ВТ6...ВТ20) незначительно влияет на изменение излучательной и поглощательной способности после анодирования (для случая формирования белых анодных оксидов).

4.14. ФОРМИРОВАНИЕ НЕРОВНОСТЕЙ СВЕТОРАССЕИВАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ

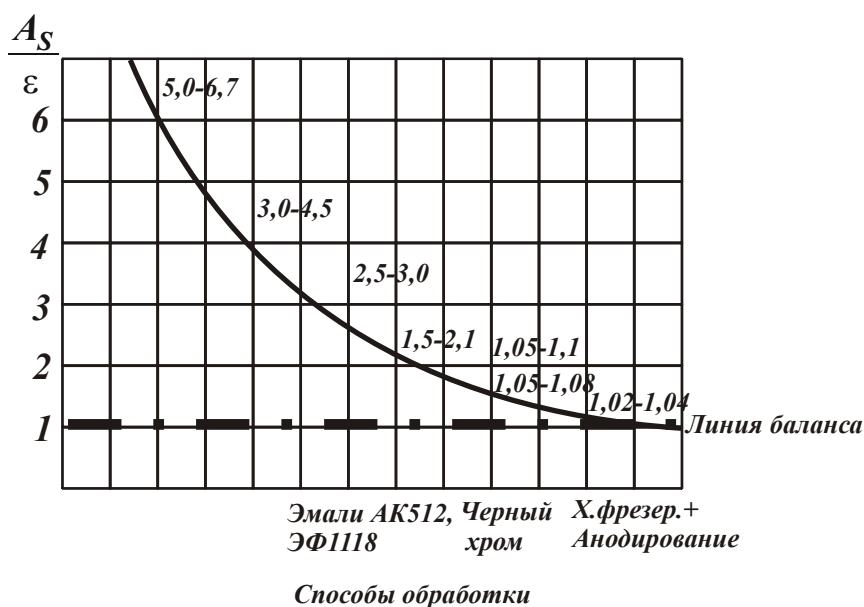
В настоящее время нашли широкое применение тонкостенные детали с высокими показателями качества поверхностного слоя. Осо-

бое место среди процессов обработки этих деталей занимают финишные операции.

Известно, что применение различных методов финишной обработки деталей приводит к формированию характерного поверхностного слоя, который оказывает существенное влияние на перераспределение падающего светового потока (отражение, поглощение и излучение). В поверхностном слое при обработке происходят физические и химические изменения, а поверхностный слой приобретает характерный микрорельеф и химическое состояние. Обычное шлифование жесткими кругами для таких деталей применять нецелесообразно, так как при обработке тонкостенных оболочек очень сложно управлять силовыми воздействиями на поверхностные слои. Поэтому мы рассмотрели ряд альтернативных способов обработки (рис. 4.18). Состояние поверхностного слоя алюминиевых сплавов марок АМг3, АМг4 и АМг6 изучали после различных методов обработки, при этом учитывали ранее приобретенную технологическую наследственность. Установлено, что изменение режимов обработки при точении, фрезеровании и выглаживании мало влияет на изменение излучательной способности поверхности, но оказывает влияние на ее светоотражение.

Эстетические свойства поверхностей улучшаются при точении алмазным инструментом, при этом светоотражательная способность увеличивается и имеет зеркальный характер.

Отсутствие бликов на поверхности (светорассеивание) можно получить обдувкой свободным абразивом, струйно-абразивной обра-



боткой, травлением в электролитах, нанесением гальванических покрытий.

Эти методы обработки увеличивают излучательную способность поверхностей при одновременном уменьшении светоотражения. Характер све-

Рис. 4.18. Влияние способа обработки поверхности на ее оптические свойства.

тоотражения от таких поверхностей диффузный. Эти методы обработки могут быть эффективны при технологическом обеспечении свойств декоративных поверхностей. При применении струйных методов обработки свободным абразивом образуются неровности с относительно большим диапазоном рассеивания размеров. Для поверхностей деталей с окисленным слоем критерий шероховатости лишь частично отражает форму неровностей на поверхности ввиду увеличенной погрешности контактного метода оценки параметров шероховатости.

Однако, при обработке тонкостенных деталей осуществление ряда процессов затруднено. Поэтому для разработки технологии изготовления деталей термоса мы выбрали способы обработки абразивными составами, лепестковыми и игольчатыми кругами.

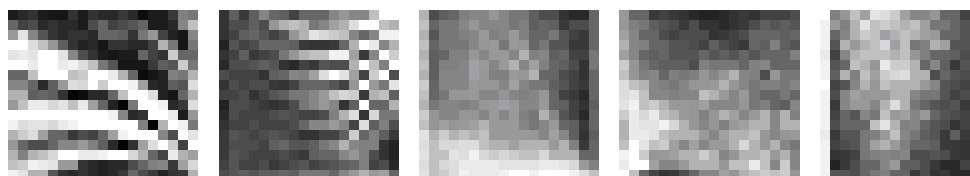


Рис. 4.19. Фотографии макрорельефа поверхности образцов из алюминиевых сплавов марки АМг3 после различных режимов обработки: 1 - 250 об/мин; 2 - 325 об/мин; 3 - 410 об/мин; 4 - 630 об/мин; 5 - 840 об/мин.

Разработан технологический процесс обработки поверхностей тонкостенных осесимметричных деталей лепестковыми кругами и иглофрезами, включающий следующие операции: контроль качества поверхности до и после обработки; установка и снятие детали с приспособления для обработки; процесс обкатывания поверхности лепестковыми кругами или иглофрезами. При этом обеспечивается получение равномерной по оттенку светорассеивающей поверхности (рис. 4.19).

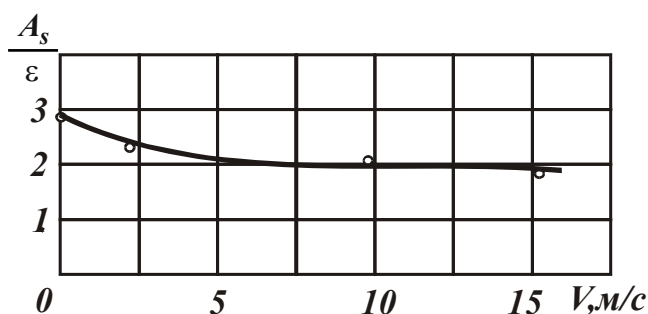


Рис. 4.20. Изменение отношения коэффициентов A_s / ϵ при обкатке иглощетками поверхностей деталей термоса из сплава марки АМг2 (диаметр игл 0,15 мм из стали 65 Г, коэффициент заполнения 0,7).

Обработка позволила снизить значение отношения коэффициентов поглощения и излучения (A_s / ϵ) до 1,8, что должно улучшить функциональные и эстетические свойства деталей.

Результаты эксперимента представлены на рис. 4.20. Результаты эксперимента показывают, что изме-

нение скорости обкатки поверхности свыше 3 м/с незначительно влияет на отношение коэффициентов A_s / ε .

4.15. ВЫВОДЫ

1. Разработана новая математическая модель формирования шероховатости поверхности при абразивной обработке, позволившая выразить связь между шероховатостью и оптическими характеристиками обрабатываемой поверхности посредством относительной длины профиля. Доказано, что относительная длина профиля вполне однозначно определяется отношением среднеарифметического отклонения профиля к максимальному значению высотного параметра шероховатости поверхности (R_a / R_{max}), которое изменяется в довольно широких пределах: $0 \dots 0,29$. Это указывает на возможность значительного повышения светоотражательной способности обрабатываемых поверхностей и соответственно эксплуатационных свойств осеботонкостенных деталей, рассматривая в качестве параметров шероховатости относительную длину профиля и отношение среднеарифметического отклонения профиля к максимальному значению высотного параметра шероховатости поверхности (R_a / R_{max}).
2. Разработана методика расчета нового параметра шероховатости светоотражательных поверхностей – критерия шероховатости, основанная на использовании условия энергетического равновесия, образующегося при обработке регулярного или нерегулярного профиля поверхности. Доказано, что три вышеуказанные параметра аналитически связаны между собой и в совокупности дают достаточно полное физическое представление о связи шероховатости с оптическими характеристиками обрабатываемой поверхности, а также позволяют научно-обоснованно подойти к выбору оптимального метода обработки светоотражательных поверхностей. Теоретически определены условия повышения светоотражательной способности поверхностей, состоящие в уменьшении отношения R_a / R_{max} , относительной длины профиля и увеличении критерия шероховатости.
3. Проведен комплекс экспериментальных исследований по установлению связи параметров шероховатости обработки R_a , R_z ,

R_a / R_{max} и критерия шероховатости с оптическими характеристиками поверхностей, обработанных различными механическими и физико-техническими методами (точением и тонким точением алмазным инструментом, фрезерованием, шлифованием, выглаживанием шаром, гидроабразивной обработкой и обработкой металлической дробью, абразивным полированием, электрохимическим полированием и т.д.). Установлена четкая взаимосвязь между отношением параметров шероховатости R_a / R_{max} , критерием шероховатости и коэффициентами отражения, поглощения и излучения. Доказано, что меньшим значениям R_a / R_{max} соответствуют большие значения критерия шероховатости, коэффициента отражения и меньшие значения коэффициентов поглощения и излучения. При этом отношение R_a / R_{max} изменяется в больших пределах (0,033...0,16 – для образцов из проката алюминиевого сплава АМг4), чем критерий шероховатости (0,84...0,967), что указывает на важность использования данного отношения для оценки шероховатости светоотражательных обработанных поверхностей. Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с теоретическими, что свидетельствует о достоверности разработанной математической модели, позволяющей установить функциональные связи между шероховатостью и оптическими характеристиками обработанных поверхностей.

4. Экспериментально установлено, что из всех исследуемых методов механической обработки наиболее эффективными с точки зрения создания высокосветоотражательных поверхностей (при обеспечении зеркального характера отражения) жестких деталей из алюминиевых и медных сплавов являются тонкое точение алмазным инструментом и алмазное выглаживание, а для деталей из тонкого листа и лент – методы абразивного и электрохимического полирования. Данные методы обеспечивают наименьшие значения R_a / R_{max} и наибольшие значения критерия шероховатости и коэффициента отражения поверхности.
5. Показана возможность повышения коэффициента отражения поверхности за счет применения при абразивном полировании алмазных паст с зернами АСМ 2/1. Установлено также, что введение в абразивный состав полимера обеспечивает увеличение интенсивности съема материала и уменьшение шероховатости за счет химического действия на обрабатываемую поверхность. На

этой основе разработан и защищен авторским свидетельством на изобретение эффективный абразивный состав, включающий 5–8% алмазного микропорошка, 5–7% поливинилацетатной дисперсии, а остальное – дистиллированная вода.

6. Экспериментально установлена возможность значительного повышения отражательной способности поверхности при электрохимическом полировании за счет увеличения силы тока (до 70 А/дм^2), температуры электролита (до 70°С) и увеличения времени обработки (до 1 мин). Показано, что электрохимическое полирование обеспечивает улучшение механических характеристик обрабатываемого материала, а электроконтактный способ его осуществления более эффективен ванного способа за счет активации обновления и снятия прианодного слоя.
7. Установлено, что для создания светорассеивающих поверхностей (при обеспечении диффузного характера отражения, для которого отношения коэффициентов поглощения и излучения принимают небольшие значения), применяемых для терморегулирования отсеков космических летательных аппаратов, наиболее эффективными являются струйно-абразивная обработка, химическое и электрохимическое травление, обкатывание поверхностей эластичным инструментом, а также нанесение покрытий электроосаждением. Доказано, что наименьшие значения отношения коэффициентов поглощения и излучения (0,2...0,27) для анодированных поверхностей достигаются при наполнении в воде и хромпике образцов в состоянии поставки.
8. Разработана математическая модель устойчивости осебортонко-стенной детали в процессе ее абразивной обработки, позволившая определить предельные значения параметров режима резания, при которых сила резания достигает критического значения, обусловленного потерей устойчивости детали.
9. На основе результатов исследований разработан эффективный технологический процесс и специальное оборудование для изготовления пружинных штанг из лент хромоникелевых и медно-бериллиевых сплавов с отверстиями и без отверстий. Технологический процесс включает операции формообразования, термической обработки, абразивного и электрохимического полирования. Определены оптимальные режимы обработки: при формообразовании трубчатой заготовки – нагрев в среде аргона и выдержка при температуре 640 К в течение 40 мин; последующее абразив-

ное полирование алмазной пастой АСМ 2/1 при окружной скорости полировальника 25 м/с, давлении 200 кПа и времени обработки 10 с; анодное пассивирование в течение 15 с при плотности тока $0,5 \cdot 10^4$ А/м² (фосфорно-хромовый электролит). По разработанной технологии изготовлены на специальном оборудовании пружинные штанги диаметром 0,024 м с улучшенными эксплуатационными характеристиками и высокой светоотражательной способностью обработанных поверхностей (коэффициент отражения на уровне 0,7...0,75 и более). Разработанная технология изготовления штанг из новых материалов (сплавы марки БрБНТ 1,7 и БрБНТ 1,9, а также с добавками магния) по сравнению с существовавшей технологией изготовления штанг из сплава марки 36НХТЮ обеспечивает снижение себестоимости их изготовления.

ЧАСТЬ 2

КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СОВРЕМЕННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

ГЛАВА 1

ИСХОДНАЯ ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ

Настоящая глава подготовлена с использованием материалов работы [45], которая, по мнению авторов, относится к наиболее удачным работам по станочным приспособлениям (по лаконичности и информативности представленного материала). Это особенно важно с точки зрения компьютеризации практических и лабораторных работ, и для овладения предметом при самостоятельной работе студентов. Произведена корректировка устаревших терминов и ГОСТов, исключены менее важные разделы, добавлены задачи для самостоятельной работы студентов.

1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СТАНОЧНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЯХ

1.1.1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ БАЗИРОВАНИЯ

Базирование - придание заготовке или изделию требуемого положения относительно выбранной системы координат.

Закрепление - приложение сил и пар сил к заготовке или изделию для обеспечения постоянства их положения, достигнутого при базировании.

Установка - процесс базирования и закрепления заготовки или изделия. Погрешность базирования - отклонение фактически достигнутого положения заготовки или изделия.

Погрешность установки - отклонение фактически достигнутого положения заготовки или изделия при установке от требуемого.

База - поверхность или выполняющее ту же функцию сочетание поверхностей, ось, точка заготовки или изделия, используемые для базирования.

Действительная база - база, фактически используемая в конструкции, при изготовлении, эксплуатации или ремонте изделия.

Опорная точка - точка, символизирующая одну из связей заготовки или изделия с избранной системой координат.

Для обеспечения неподвижности заготовки или изделия в избранной системе координат на них необходимо наложить шесть двусторонних геометрических связей. Если на заготовку наложено менее шести двусторонних связей, то она имеет степени свободы, число которых соответствует отсутствующим связям.

Схема базирования - схема расположения опорных точек на базах заготовки или изделия.

Технологическая база - база, используемая для определения положения заготовки или изделия в процессе изготовления или ремонта.

Явная база - база заготовки или изделия в виде реальной поверхности, разметочной риски или точки пересечения рисок.

Установочная база - база, лишаящая заготовку или изделие трех степеней свободы перемещения вдоль одной координатной оси и поворотов вокруг двух других осей.

Направляющая база – это база, лишаящая заготовку или изделие двух степеней свободы - перемещения вдоль одной координатной оси и поворота вокруг другой оси.

Опорная база - база, лишаящая заготовку или изделие одной степени свободы - перемещения вдоль одной координатной оси или поворота вокруг оси.

Двойная направляющая база - база, лишаящая заготовку или изделие четырех степеней свободы - перемещений вдоль двух координатных осей и поворотов вокруг этих осей.

Двойная опорная база - база, лишаящая заготовку или изделие двух степеней свободы - перемещения вдоль двух координатных осей.

Конструкторская база - это база для определения положения детали или сборочной единицы в изделии, а также база, относительно которой на чертеже детали (сборочной единицы) координируется положение другой поверхности, линии или точки той же детали (сборочной единицы).

Конструкторский размер - размер, связывающий рассматриваемый элемент детали (поверхность, линию или точку) с его конструкторской базой.

Исходная база - поверхность, линия или точка, относительно ко-

торой на операционном эскизе координируется положение обрабатываемой поверхности.

Исходный размер - размер, связывающий обрабатываемую поверхность с исходной базой.

Для базирования заготовок в приспособлениях используются только явные базы, и для этого выбираются лишь поверхности, а не разметочные риски или точки их пересечения. Причем, как правило, используются плоские и цилиндрические поверхности (внутренние и наружные) и лишь иногда - конические, сферические и резьбовые.

В зависимости от конфигурации детали, формы баз и выполняемой операции базирование заготовки может осуществляться с помощью трех, двух или только одной базы.

Группа баз - это совокупность из трех или двух баз, используемых для базирования заготовки в приспособлениях. Значимость баз, входящих в группу баз, неодинакова.

Во всех случаях имеется главная база, с которой начинается базирование заготовки. Этой базой заготовка ставится на приспособление, либо одевается на его элемент и получает достаточно устойчивое положение и почти полную ориентировку.

Главная база - это база, при использовании которой заготовка лишается трех или четырех степеней свободы. Следовательно, главной базой может служить установочная или двойная направляющая база.

Если базирование заготовки в приспособлении осуществляется только одной базой, то она и будет главной.

Дополнительная база - каждая из группы баз, кроме главной. В зависимости от конкретных условий дополнительной базой может служить направляющая, опорная либо двойная опорная база.

1.1.2. ОСНОВНЫЕ УЗЛЫ И ДЕТАЛИ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ

Приспособления необходимы для закрепления заготовки на станке и обеспечения при этом требуемого на данной операции взаимного расположения станка, заготовки и режущего инструмента. Например, в заготовке, показанной на рис. 1.1, а, требуется просверлить с одной установки на вертикально-сверлильном станке шесть отверстий *Б*, равномерно расположенных по окружности. Для обеспечения заданных требований необходимо:

- придать заготовке относительно горизонтальной плоскости стола положение (рис. 1.1,б), при котором в процессе обработки отверстия *Б* будет получен требуемый угол (30°) между осью отверстия *Б* и торцом *А*;

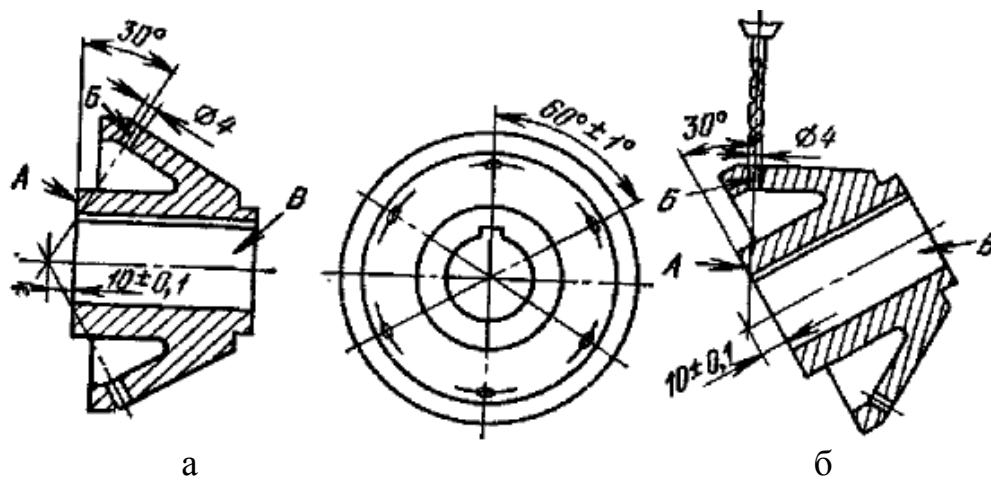


Рис. 1.1. Заготовка для обработки шести отверстий, требующая приспособления.

- расположить заготовку на станке относительно оси шпинделя (сверла) таким образом, чтобы при сверлении отверстия *Б* его ось пересекала ось отверстия *В* на заданном расстоянии ($10 \pm 0,1$) от торца *А*;
- закрепить заготовку;
- поворачивать заготовку относительно оси отверстия *В*, чтобы иметь возможность сверлить поочередно при одном установе все шесть отверстий *Б*, расположенных на заданном угловом шаге относительно друг друга.

Все эти требования могут быть обеспечены с помощью приспособления, предназначенного для данной операции (рис. 1.2). Заготовка 8 базируется главной базой - отверстием - на центрирующий палец 10 и фиксируется от поворота на нем шпонкой 11. Необходимый угол 30° между осью отверстия и торцом заготовки обеспечивается наклоном оси пальца относительно основания корпуса 5. Закрепляется заготовка поворотом рукоятки-звездочки 1, при этом тяга 3 перемещается в осевом направлении и своим буртом через быстросменную шайбу 12 закрепляет заготовку. При вращении звездочки 1 в обратном направлении пружина 4 освобождает шайбу и заготовку. На пальце 10 жестко закреплен делительный диск 7 с шестью пазами, в которые заходит храповик-фиксатор 13, смонтированный в корпусе 5. Делительный механизм храпового типа обеспечивает при повороте

заготовки вместе с валом и делительным диском требуемый угловой шаг между отверстиями *Б*, позволяя просверлить все шесть отверстий *Б* при одном установе заготовки. Поворот для деления осуществляется с помощью штурвала 2. В верхней части корпуса в планке 6 запрессована кондукторная втулка 9, которая координирует и направляет сверло при сверлении. Она расположена так, чтобы получить заданный размер заготовки $10 \pm 0,1$ мм.

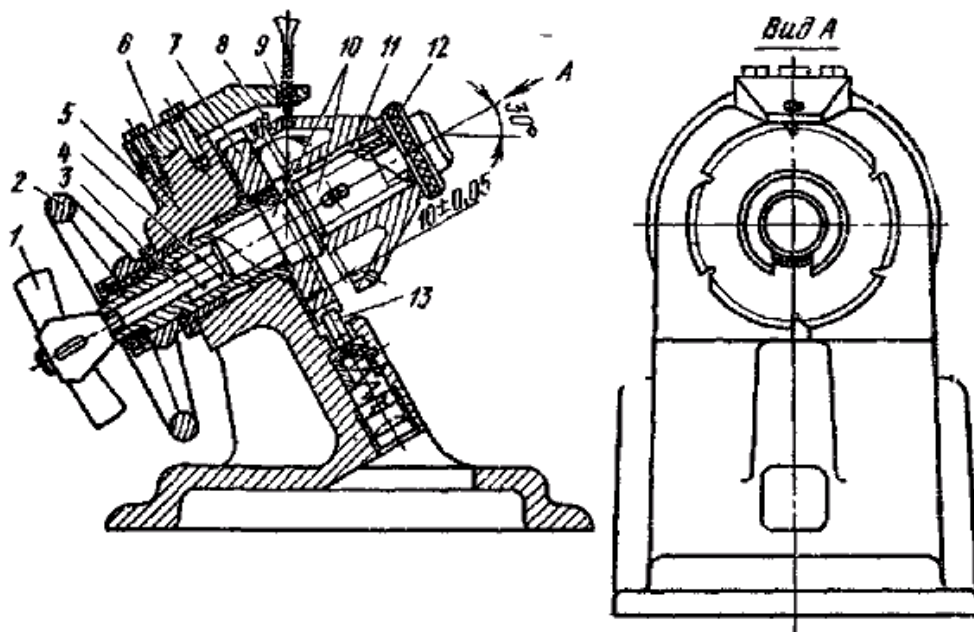


Рис. 1.2. Приспособление с делительным устройством для сверления шести отверстий.

Итак, данное приспособление обеспечивает: базирование заготовки, её закрепление, координацию и направление режущего инструмента, поворот (деление) заготовки на заданный угловой шаг. Не всегда, однако, приспособление должно одновременно выполнять все перечисленные функции. Так, поворот заготовки (деление) приходится производить сравнительно редко, так как редко встречаются операции, когда у заготовки поочередно обрабатываются одинаковые поверхности, расположенные на определенном шаге друг от друга. В ряде случаев от приспособления не требуется, чтобы оно обеспечивало координацию и направление инструмента. Например, при обточке наружной поверхности заготовки, установленной на оправке резца на требуемый диаметр, обработки осуществляется отнюдь не с помощью приспособления.

Таким образом, в зависимости от конкретных условий, определяемых требованиями чертежа и технологического процесса, с помощью приспособления можно одновременно решать несколько раз-

личных задач. Для этого в нем предусмотрены детали и узлы с соответствующим целевым назначением. В самом общем случае приспособление может иметь следующие детали и узлы: корпус, опорные элементы, зажимные устройства, элементы для координации и направления инструмента, элементы, обеспечивающие точное расположение приспособления на станке, делительное устройство. Рассмотрим эти детали и узлы более подробно.

Корпус. Каждое приспособление имеет корпус, на котором монтируются все остальные элементы. Конструктивное оформление корпусов весьма разнообразно. Корпус имеет поверхности, с помощью которых приспособление устанавливается на станок.

Опорные элементы. Своими базами заготовка соприкасается с поверхностями приспособления, которые называют опорными. Чаще всего они выполняются не на корпусе, а на отдельных элементах, закрепляемых на корпусе. Такие элементы также называются опорными. Их делают сменными (для удобства замены при износе) и размещают на корпусе приспособления в фиксированном положении. От точности расположения их на корпусе зависит точность обработки.

Опорные поверхности элементов должны обладать большой износостойкостью, поэтому их обычно изготавливают из стали марок 15, 20 и 20Х с цементацией на глубину 0,8...1,2 мм и последующей закалкой до твердости HRC 50...55. Большинство опорных элементов стандартизовано.

Зажимные устройства. Закрепление заготовки в приспособлении осуществляют с помощью зажимных устройств, которые приводятся в действие либо вручную, либо от привода - пневматического, гидравлического и др. Многолетняя практика проектирования и эксплуатации приспособлений обусловила создание хорошо зарекомендовавших себя разнообразных конструкций зажимных устройств, многие из которых нормализованы.

Элементы для координации и направления инструмента. Необходимое взаимное расположение режущего инструмента и заготовки достигается с помощью элементов, предназначенных для координации и направления инструмента. В качестве таких элементов используются кондукторные и направляющие втулки, установочные для фрез и копиры.

Элементы, обеспечивающие точное расположение приспособления на станке. Такими элементами могут быть либо специально предусмотренные детали, либо соответствующей формы поверхности

на корпусе приспособления. Так, для точного расположения приспособлений на столе фрезерного станка обычно применяют две шпонки, закрепляемые в пазу на корпусе снизу. При установке приспособления на стол станка эти шпонки входят в Т-образный паз стола. На токарном станке точное расположение оправок по оси шпинделя достигается путем образования на корпусе оправок соответствующих поверхностей — центровых отверстий или конических хвостовиков с конусом Морзе, размер которого соответствует отверстию в шпинделе.

Делительное устройство. Это устройство применяют в тех случаях, когда при одном установе заготовки требуется поочередно обработать несколько одинаковых поверхностей, расположенных на определенном расстоянии друг от друга. После каждого деления оно обеспечивает необходимое взаимное расположение заготовки и инструмента. Устройство состоит из делительного диска 7 (рис. 1.2), фиксатора 13 и механизма для скрепления подвижной части с неподвижной.

1.1.3. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ

Наиболее часто приспособления классифицируют по двум признакам: по группам станков и степени специализации.

Классификация по группам станков. Имеется некоторая общность в конструктивных элементах приспособлений, применяемых на станках одной и той же группы или родственных групп. На этой основе и проводится их классификация. Наиболее характерными и распространенными являются приспособления для следующих групп станков: токарных, револьверных и круглошлифовальных, сверлильных, расточных, фрезерных, протяжных, зубообрабатывающих.

Классификация по степени специализации. По этому принципу приспособления можно разделить на следующие пять групп: универсально-безналадочные (УБП); универсально-наладочные (УНП); универсально-сборные (УСП) и сборно-разборные (СРП); специализированные наладочные (СНП) и неразборные специальные (НСП). Эти наименования соответствуют наименованиям систем технологической оснастки по ГОСТ 14.305-73. Приспособления последней пятой, группы (НСП) часто называют специальными приспособлениями.

В методическом отношении вначале удобнее рассмотреть приспособления первой и пятой групп, как наиболее отличающиеся по

специализации.

Универсально-безналадочные приспособления (УПБ) (рис. 1.3).

К этой группе относятся универсальные приспособления общего назначения (тиски, трёхкулачковые самоцентрирующие патроны и т.п.). Они изготавливаются как принадлежность к станку заводом-изготовителем станков или специализированными предприятиями.

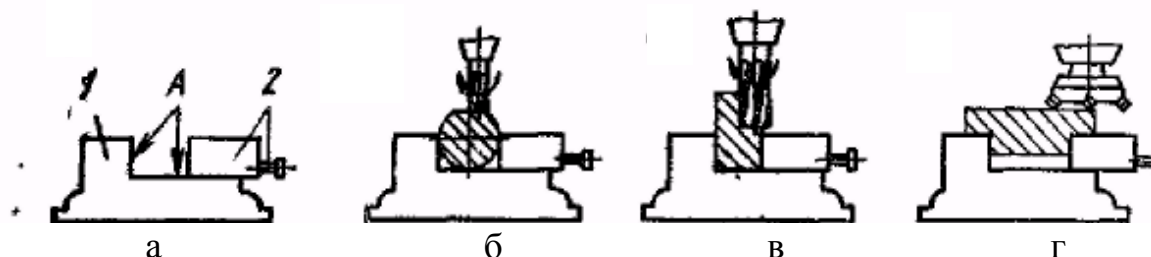


Рис. 1.3. Схема универсально-безналадочного приспособления (а) и его использование при фрезеровании: лыски на валике (б); уступа (в); плоскости (г).

Схема УБП показана на рис. 1.3, а. Приспособление состоит, как правило, из корпуса 1 и зажимного устройства 2 с приводом. Опорные поверхности А остаются неизменными при базировании различных заготовок. Это, естественно, вызывает определенные трудности при базировании и часто требует предварительной разметки и выверки заготовки. Преимуществом таких приспособлений является возможность их использования для установки различных деталей на различных операциях (рис. 1.3, а и г). К сожалению, эти возможности невелики, и в ряде случаев либо вообще не удастся установить заготовку и произвести обработку, либо невозможно достигнуть требуемой точности. УВП применяют, как правило, в единичном и мелкосерийном производстве.

Неразборные специальные приспособления. Каждое приспособление этой группы служит для обработки только определенной детали на одной конкретной операции (например, рис. 1.2). Специальные приспособления обладают большими преимуществами - позволяют без выверки придать заготовке требуемое положение относительно станка и режущего инструмента и благодаря этому при одной настройке обработать всю партию заготовок. Это дает возможность повысить производительность труда и снизить разряд работы. К недостаткам приспособлений относится то, что их надо проектировать и изготавливать для каждой новой детали, что удлиняет сроки подготовки производства и повышает себестоимость изготавливаемой детали. Кроме того, при изменении чертежа детали или снятии изделия с производства приспособление подлежит ликвидации, что также уве-

личивает расходы. При крупносерийном и массовом производстве указанные недостатки мало отражаются на себестоимости продукции. В условиях же единичного и мелкосерийного производства расходы на проектирование и изготовление приспособлений часто не окупаются получаемой в результате повышения производительности экономией, поэтому здесь они применяются сравнительно редко.

Проводились работы, направленные на повышение оснащенности единичного и мелкосерийного производства путем создания новых типов приспособлений, обладающих преимуществами специальных, но не имеющих их недостатков. Эти исследования велись в двух направлениях: создавались агрегатные приспособления с унификацией и стандартизацией отдельных элементов и максимальной их обратимостью; повышалась универсальность специальных приспособлений. В результате появились системы наладживаемых приспособлений.

Универсально наладочные приспособления (УНП) (рис. 1.4).

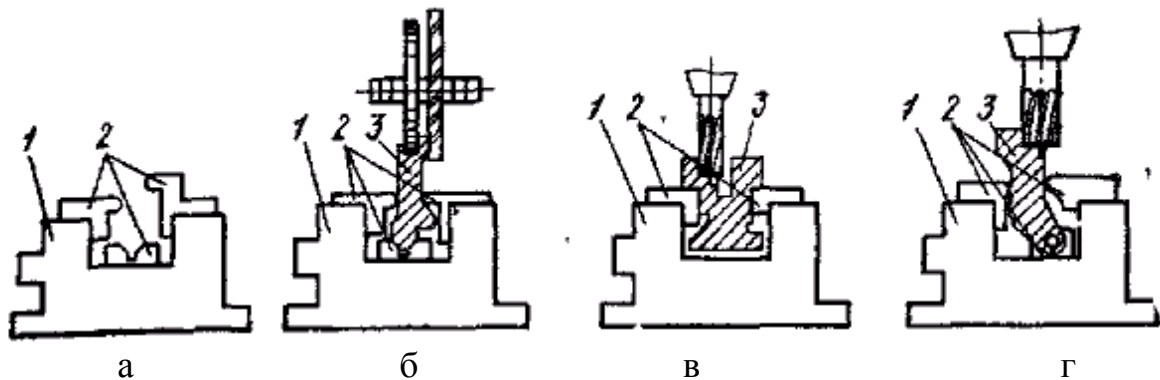


Рис. 1.4. Схема универсально-наладочного приспособления (а) и его наладка для фрезерования: паза и плоскости у рычага (б); уступа в корпусе (в); уступа в рычаге (г).

К этой группе относятся приспособления, состоящие из постоянной части 1 и сменных наладок 2 (рис. 1.4, а). Примеры использования УНП схематично показаны на рис. 1.4, б, в и г. Постоянная часть 1 во всех случаях остается неизменной, а сменная наладка 2 заменяется в зависимости от конкретной обрабатываемой детали 3. Постоянная часть может изготавливаться заранее и применяться многократно. Перед очередным использованием УНП требуется произвести лишь смену наладки и иногда некоторую дополнительную обработку.

Наладка представляет собой сменные опорные и направляющие элементы. Каждый комплект наладки предназначен только для данной детали и для конкретной операции её обработки и в этом смысле является специальным. С помощью УНП заготовка устанавливается с такой же точностью и быстротой, как и при использовании дорого-

стоящего специального приспособления. Следовательно, УНП выполняет функции специального приспособления при меньших удельных затратах. Универсальность УНП несколько ограничена определенными размерами постоянной части. Последняя обычно нормализуется в пределах предприятия или отрасли. К УНП относятся скальчатые кондукторы, переналаживаемые пневматические тиски и т. д.

Универсально - сборные и сборно-разборные приспособления. К этой группе относятся приспособления, komponуемые из нормализованных обратимых деталей и узлов. Здесь рассмотрим лишь одну разновидность приспособлений - УСП (рис. 1.5).

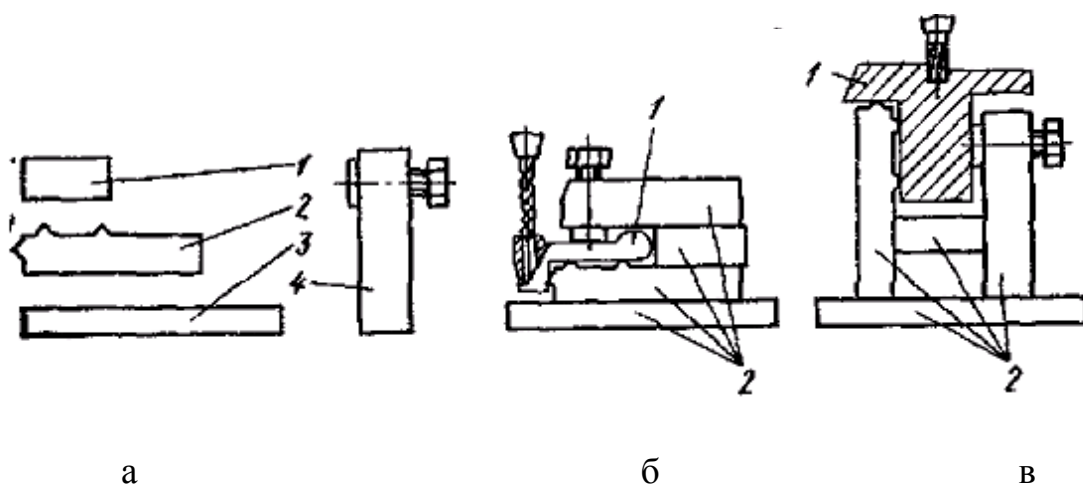


Рис. 1.5. Группа нормализованных деталей и узлов (а), используемых для компоновки приспособлений: для сверления отверстий в рычаге (б); для фрезерования паза в корпусе (в).

Каждая компоновка УСП обладает всеми основными свойствами специального приспособления: она предназначена для обработки конкретной детали на определенной операции, обеспечивает базирование заготовки без выверки и требуемую точность. По истечении надобности в таком приспособлении оно разбирается на составные детали и узлы, которые могут быть многократно использованы для компоновки других приспособлений.

На рис. 1.5, а схематично показана группа нормализованных деталей 1, 2, 3 и узел 4, из которых скомпонованы два различных приспособления (рис. 1.5, б и в). При наличии соответствующего комплекта нормализованных обратимых деталей и узлов можно довольно быстро и без больших затрат времени скомпоновать большое число разнообразных приспособлений, что способствует сокращению сроков подготовки производства и повышению коэффициента оснащенности единичного и мелкосерийного производства.

Недостатком УСП является высокая стоимость и сложность изготовления комплекта. Наибольшее распространение получила система УСП, разработанная инженерами В.С. Кузнецовым и В.А. Пономаревым. Соединение любых деталей комплекта друг с другом с необходимой точностью взаимного расположения здесь достигается с помощью соответствующих пазов высокой точности, обеспечивающих полную взаимозаменяемость деталей.

Специализированные наладочные приспособления (рис.1.6). К этой группе относятся специальные приспособления, обладающие определенной универсальностью вследствие введения в их конструкцию элементов, допускающих наладку приспособления путем регулировки. Благодаря этому одно и то же приспособление можно применять для обработки ряда деталей одной технологическо-конструкторской группы. На рис. 1.6, а и б схематично показано, как с помощью одного и того же специализированного приспособления 1 обрабатываются разные по размерам однотипные детали 2. Достигается это путем регулировки положения кондукторной планки 3 с втулкой, а также плунжеров 5 с помощью винтов 4.

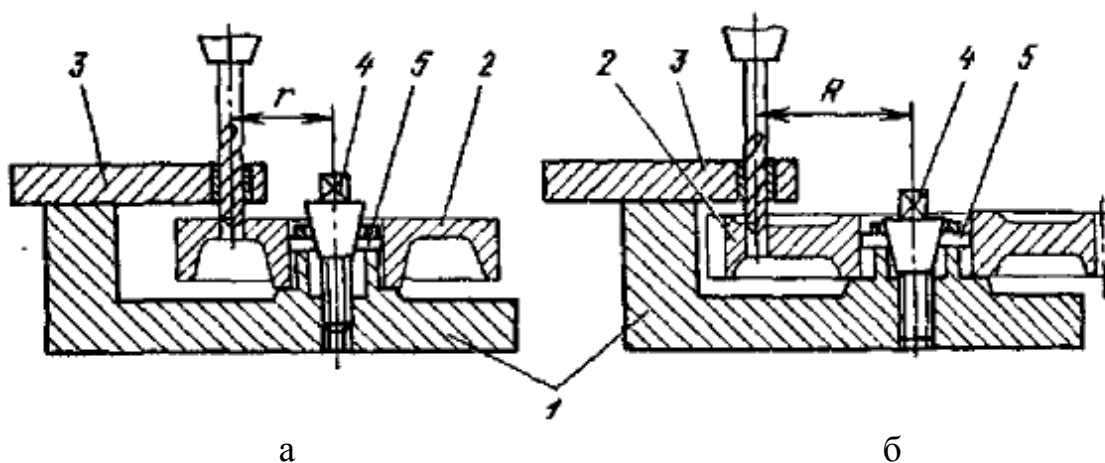


Рис. 1.6. Схема специализированного наладочного приспособления для обработки однотипных деталей: а - при радиусе r ; б - при радиусе R .

В заключение еще раз отметим, что приспособления всех групп, кроме универсально-безналадочных, используются как специальные, потому что каждое из них создано заново, налажено или скомпоновано для выполнения одной операции обработки какой-то конкретной детали. Каждое из этих приспособлений имеет детали и узлы, проектирование которых основано на общих закономерностях, свойственных специальным приспособлениям, поэтому в дальнейшем все основные вопросы будут рассматриваться применительно к специальным приспособлениям.

1.1.4. НАЗНАЧЕНИЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ

Основным назначением большинства приспособлений является повышение производительности и точности обработки. Лишь в отдельных случаях приспособление предназначается для расширения технологических возможностей станка.

Повышение производительности обработки. Особое значение проблема повышения производительности труда приобретает в крупносерийном и массовом производстве. Решается она в результате сокращения времени выполнения операции, определяемого по формуле:

$$T_{ш} = T_o + T_B + T_{обс} + T_{отд},$$

где $T_{ш}$ - штучное время, мин; T_o - основное технологическое (машинное) время, мин; T_B - вспомогательное время, мин; $T_{обс}$ - время обслуживания рабочего места, мин; $T_{отд}$ - время перерывов на отдых и естественные надобности, мин.

Так как $T_{обс}$ и $T_{отд}$ определяются в процентах от оперативного времени, равного $(T_o + T_B)$, то можно записать:

$$T_{ш} = (T_o + T_B) \left(1 + \frac{a_{обс} + a_{отд}}{100} \right),$$

где $a_{обс}$ и $a_{отд}$ - соответственно время на обслуживание рабочего места и отдых, в процентах от оперативного времени $(T_o + T_B)$.

Из этой формулы видно, что сокращение $T_{ш}$ возможно путем уменьшения как T_o или T_B , так и одновременно T_o и T_B . Сокращение T_o достигается главным образом в результате применения многоместных приспособлений и многоинструментных наладок, совершенствования инструментов, интенсификации режимов резания.

Многоместными называют приспособления, в которых одновременно устанавливаются несколько заготовок. Расположение заготовок 1, 2 в многоместном приспособлении (рис. 1.7) может быть различное: параллельное (рис. 1.7, а), последовательное (рис. 1.7, б) и смешанное. При параллельном размещении заготовки обрабатываются одновременно, благодаря чему T_o сокращается по сравнению со временем обработки в одноместном приспособлении в n раз, где n -

число устанавливаемых заготовок. При последовательном размещении заготовок T_o сокращается меньше, так как экономия здесь достигается лишь на времени, затрачиваемом на врезание и выход инструмента Z . Причем эта экономия будет получена лишь в том случае, если заготовки установлены вплотную ($B = 0$).

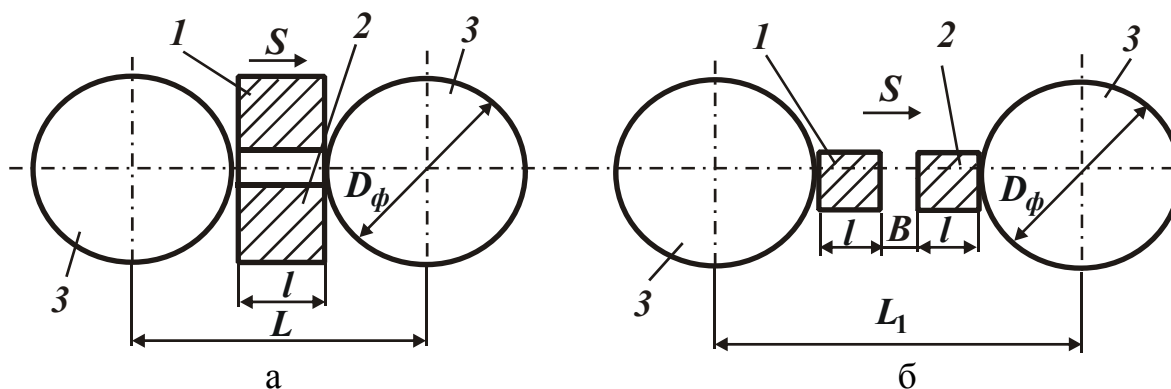


Рис. 1.7. Расположение заготовок в многоместном приспособлении: а - заготовки обрабатываются параллельно; б - заготовки обрабатываются последовательно; D_ϕ - диаметр инструмента (фрезы); l - длина заготовки; B - расстояние между заготовками; L и L_1 - длина перемещения стола соответственно при параллельном и последовательном расположении заготовок.

При использовании многоместных приспособлений сокращается не только T_o , но и T_B , так как время, затрачиваемое на управление станком, подвод заготовки к инструменту и её отвод, относится к n заготовкам, а не к одной. Однако сокращение главным образом вспомогательного времени при использовании приспособлений достигается благодаря возможности базирования заготовки *без разметки и выверки*, а также в результате применения быстродействующих зажимных устройств и создания эксплуатационных удобств (установки и снятия заготовки и др.).

Таким образом, степень сокращения T_B и T_o при применении приспособления во многом определяется квалификацией конструктора.

Расширение технологических возможностей станка. В условиях единичного и мелкосерийного производства иногда возникают ситуации, при которых появляется необходимость спроектировать и изготовить специальное приспособление. Например, для обработки в кронштейне ступенчатого отверстия с осью, параллельной основанию кронштейна, при высокой точности расстояния между основанием и осью отверстия требуется расточный станок, которого в цехе нет. Эту

операцию можно выполнить и на токарном станке, применив специальное приспособление.

В подобных случаях решение о целесообразности изготовления специального приспособления принимают путем сравнения затрат на тот или иной вариант выполнения операции; при передаче работы в другой цех или даже на другое предприятие с соответствующей оплатой и при изготовлении специального приспособления, расширяющего технологические возможности имеющегося станка. Обычно принимают второй вариант, при условии, что специальное приспособление будет простым и дешевым.

1.1.5. ТРЕБОВАНИЯ К ПРИСПОСОБЛЕНИЯМ

К приспособлению предъявляют три основных требования: отвечать своему назначению, обеспечивать заданную точность обработки, быть удобным и безопасным в эксплуатации.

Соответствие назначению. Если основным назначением приспособления является расширение технологических возможностей станка, то оно должно быть максимально дешевым. Этим в основном и определяется выбор варианта его конструкции, которая должна быть наипростейшей. Если же приспособление предназначается главным образом для повышения производительности обработки, то при его проектировании должны быть использованы все возможности её повышения. Во всех случаях основным критерием правильности выбора варианта конструкции приспособления является его экономическая эффективность.

Обеспечение точности обработки. В процессе обработки деталей неизбежно возникают погрешности. Если они находятся в пределах допускаемых отклонений, заданных чертежом или техническими условиями, то точность обработки будет обеспечена.

Погрешности можно разделить на две группы: погрешности размера и формы самой обрабатываемой поверхности и погрешности расположения обрабатываемой поверхности относительно других поверхностей детали.

Допустимые погрешности первой группы оговариваются: допуском на размер (при обработке замкнутых цилиндрических, конических и других поверхностей) и особыми условиями в виде обозначений и надписей, определяющих величину отклонения формы

(овальность, конусообразность, неплоскостность и т. д.).

Погрешности второй группы оговариваются допуском на исходный размер, связывающий обрабатываемую поверхность с ее исходной базой, и особыми условиями в виде обозначений или надписей, определяющих и величину отклонения обрабатываемой поверхности (неперпендикулярность, несоосность и т.п.). Предельные отклонения формы и расположения поверхностей обозначаются в соответствии с ГОСТ 2.308-79.

Погрешность обработки является результатом совокупного влияния ряда ее независимых составляющих, среди которых имеются и такие, которые связаны с приспособлением. Однако последние часто не влияют на общую погрешность обработки. Так, указанные выше погрешности первой группы практически почти не зависят от приспособления. Погрешности же второй группы в значительной степени зависят от него.

Поясним сказанное на примере обработки заготовки, показанной на рис.1.1. Здесь к первой группе погрешностей относятся только погрешности самого отверстия Б: овальность, огранка, конусообразность, а также погрешность его диаметра (4 мм). Все они зависят в основном от принятого метода обработки. Ко второй группе погрешностей, зависящих от приспособления, относятся: погрешность угла между плоскостью А и осью обрабатываемого отверстия Б (угол 30°) и погрешность размера между плоскостью А и точкой пересечения осей отверстий Б и В (размер $10 \pm 0,1$ мм). Таким образом, предъявляемое к приспособлениям требование обеспечить заданную точность обработки распространяется лишь на размеры, связывающие обрабатываемую поверхность с ее исходной базой, и на отклонение ее расположения.

Эксплуатационные удобства и безопасность в работе. Конструктор должен предусмотреть эксплуатационные удобства приспособления, оказывающие большое влияние на производительность труда: удобные установку и снятие заготовки, а также расположение рукояток зажимных устройств, легкость очистки приспособления от стружки, простоту установки его на станке. Необходимо также обеспечить безопасность приспособлений при работе, особенно используемых на токарных, револьверных, карусельных и круглошлифовальных станках, где приспособление вращается вместе со шпинделем. Такие приспособления не должны иметь выступающих частей, как правило, они требуют специального ограждения.

1.2. СПОСОБЫ БАЗИРОВАНИЯ ЗАГОТОВОК И ОПОРНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

1.2.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О БАЗИРОВАНИИ ЗАГОТОВОК В ПРИСПОСОБЛЕНИИ. ПРАВИЛО ШЕСТИ ТОЧЕК

Каждое приспособление должно обеспечивать выполнение всех функций, обусловленных операцией. Среди них главной является базирование заготовки, т.е. придание ей требуемого положения в приспособлении. Для удобства описания ориентации заготовки относительно приспособления будем пользоваться системой трех взаимно перпендикулярных осей координат X , Y и Z (рис 1.8).

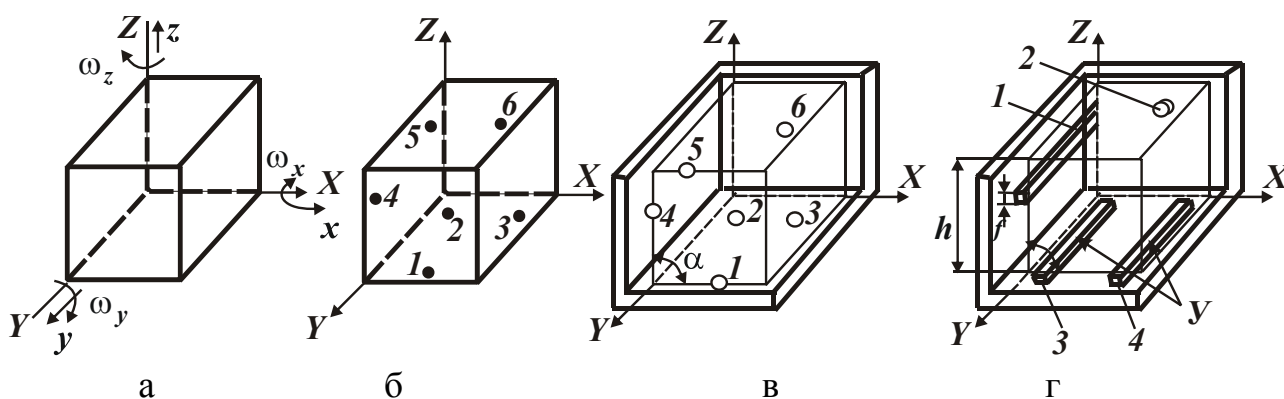


Рис.1.8. Эскизы, иллюстрирующие правило шести точек.

Любое твердое тело (в том числе и заготовка) имеет шесть степеней свободы (рис.1.8, а): перемещение x , y и z в направлении координатных осей X , Y и Z и поворот ω_x , ω_y и ω_z относительно тех же осей. Согласно теоретической механике, требуемое положение твердого тела (заготовки) относительно выбранной системы координат достигается наложением геометрических связей. Для лишения заготовки всех шести степеней свободы необходимо наложить на нее шесть связей в виде точек (1...6) контакта баз с опорными элементами (рис.1.8, б). Отметим, что здесь и далее в этом разделе рассматривается только базирование заготовок, т.е. придание им определенного положения в пространстве. После базирования заготовку необходимо закрепить, чтобы она сохранила при обработке неподвижность относительно приспособления. Базирование и закрепление - это два разных элемента установки заготовки.

Они выполняются, как правило, последовательно, причем базирование достигается наложением на заготовку односторонних связей, а базирование совместно с закреплением - двухсторонних, лишаящих

заготовку подвижности в обе стороны по рассматриваемой оси (по рассматриваемому повороту).

Базирование нельзя заменить закреплением. Если из шести опорных точек отсутствует одна или несколько точек, то у заготовки остается соответственно одна или несколько степеней свободы. Это значит, что в направлении отсутствующих опорных точек положение заготовки не определено, и заменить отсутствующие опорные точки закреплением с целью базирования нельзя.

Поясним сказанное примером установки заготовки плоскостью на магнитную плиту (рис.1.12, а). В рассматриваемом случае заготовка при базировании плоскостью на плоскость плиты (три опорные точки) лишается трех степеней свободы. У нее остаются три степени свободы: она может быть поставлена на плите в неопределенном положении в направлении осей X и Y и повернута относительно оси Z . Закрепление не изменит неопределенности положения заготовки в плоскости плиты, а только придаст ей неподвижность. На основе сказанного формулируется так называемое правило шести точек: чтобы придать заготовке вполне определенное положение в приспособлении, необходимо и достаточно иметь шесть опорных точек, лишаящих ее всех шести степеней свободы (рис.1.8, б).

Опорные точки реализуются различными конструкциями опорных элементов. В простейшем случае - это опора со сферической головкой, контактирующая с базой заготовки в одной точке (рис.1.8, в). Группа опор 1, 2 и 3, расположенных в плоскости XOY , выполняет три функции: ограничивает перемещение заготовки по оси Z и вращение относительно осей X и Y . Группа из двух опор 4 и 5 осуществляет две функции: ограничивает перемещение по оси X и поворот относительно оси Z . Опора 6 ограничивает перемещение по оси Y .

В большинстве случаев опорный элемент не так прост по конструкции, как опора со сферической головкой, и порой бывает трудно определить, сколько опорных точек реализует (заменяет) тот или иной опорный элемент. Например, если базирование заготовки, показанной на рис.1.8, в тонкой линией, осуществить с помощью опорных пластин 1, 3 и 4 (рис.1.8, г), то для обнаружения указанных в правиле 6 опорных точек потребуются некоторые дополнительные рассуждения.

При изготовлении приспособления добиваются, чтобы опорные поверхности Y пластин 3 и 4 лежали в одной плоскости (рис.1.8, г). Ставя на них заготовку, полагают, что ее обработанная плоскость будет соприкасаться с опорными поверхностями Y обеих пластин. А так

как положение любой плоскости определяется положением трех точек, то считают, что опорные пластины 3 и 4 заменяют собой три опорные точки. Таким образом, две опорные пластины 3 и 4 определяют те же функции, что и группа опор 1, 2 и 3 на рис.1.8, в.

Опорная пластина 1 (рис. 1.8, г) ориентирует лишь одну линию заготовки, расположенную в плоскости базы (боковой плоскости, выполняющей роль направляющей базы). Это объясняется следующим. Во-первых, вследствие погрешности угла α у заготовки она будет соприкасаться с пластиной только по линии. Во-вторых, часто заготовка имеет большую ширину h , по сравнению с которой ширина f пластины представляется узкой полоской, условно принимаемой за линию. А так как положение любой линии определяется двумя точками, то считают, что опорная пластина 1 заменяет две опорные точки. Следовательно, она выполняет те же функции, что и группа опор 4 и 5 (рис.1.8, в). Опора 2 играет роль шестой опорной точки.

Рассмотрим еще один пример. На рис.1.9, а показано базирование заготовки типа рычага на шесть опор со сферической головкой, из которых четыре (1, 2, 3, 4) используются для базирования цилиндрической поверхности заготовки.

При этом группа опор 1 и 2 лишает заготовку двух степеней свободы - перемещения по оси Z и вращения относительно оси X .

Вторая группа опор (3 и 4) также лишает заготовку двух степеней свободы - перемещения по оси X и вращения относительно оси Z . Опора 5 препятствует вращению относительно оси Y , а опора 6 - перемещению по оси Y .

Базирование данной заготовки можно выполнить и другим способом (рис.1.9, б). Цилиндрическую базу заготовки расположить не на четыре

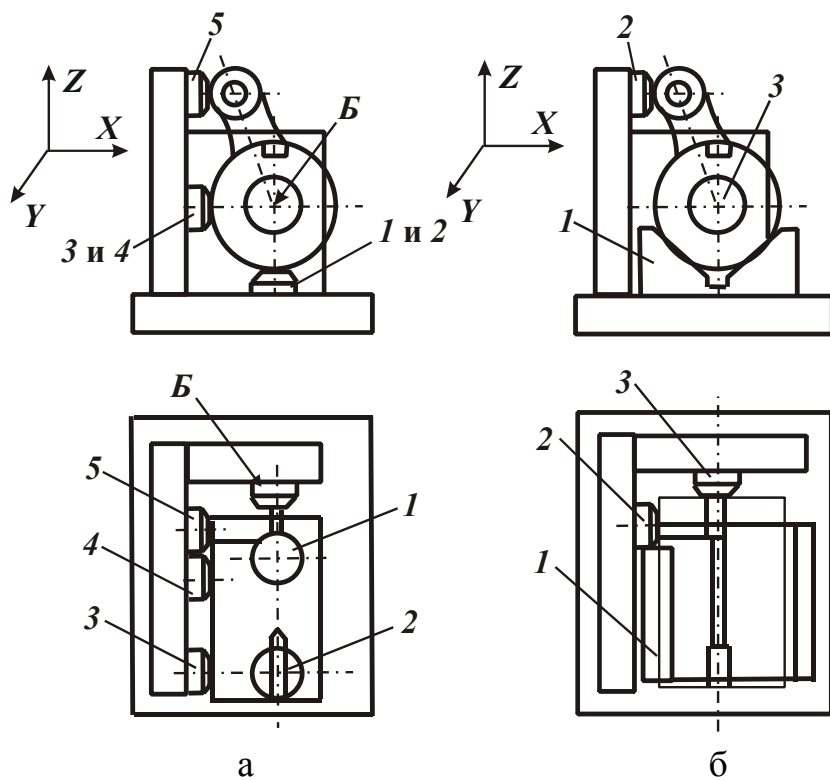


Рис.1.9. Базирование рычага по правилу шести точек

штыря, а на призму 1. Легко увидеть, что эта призма контактирует с цилиндрической поверхностью заготовки по двум линиям и лишает ее тех же четырех степеней свободы, которых в предыдущем случае (рис.1.9, а) лишали опоры 1, 2, 3, 4. Назначение опор 2 и 3 такое же, как и опор 5 и 6 на рис. 1.9, а.

Можно ли на практике применять для базирования заготовки больше или меньше шести опорных точек? Больше шести опорных точек использовать недопустимо. Из-за лишних опорных точек заготовку вообще не удастся поставить в приспособление, а если и удастся, то при закреплении нарушится положение, приданное ей при базировании. Поясним это на примере. Допустим, у заготовки требуется обработать верхнюю плоскость В (рис. 1.10) в размер Н, заданный от плоскости Б, и обеспечить параллельность плоскостей В и Б в требуемых пределах.

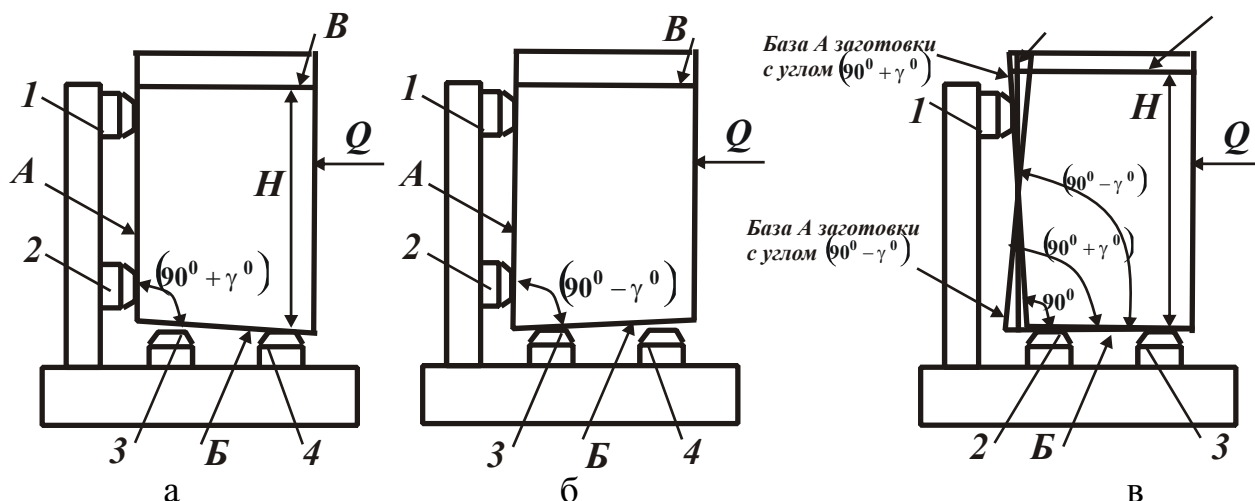


Рис. 1.10. Базирование заготовки в приспособлении после её закрепления: а - на семь точек при угле между базами $(90^\circ + \gamma^\circ)$; б - на семь точек при угле между базами $(90^\circ - \gamma^\circ)$; в - на шесть точек при углах 90° , $(90^\circ - \gamma^\circ)$ и $(90^\circ + \gamma^\circ)$.

По недосмотру базирование проведено с использованием семи точек (рис. 1.10, а и б): три обеспечиваются пластинами 3 и 4, еще три - пластинами 1 и 2 и седьмая – опорой (на рисунке не показана), ограничивающей перемещение заготовки вдоль пластин. Если угол между базами А и Б у заготовки (90°) будет в точности равен углу между опорными поверхностями пластин 1 и 2 и пластин 3 и 4, то заготовка, поставленная базой Б на пластины 3 и 4, будет базой А соприкасаться с опорной поверхностью пластин 1 и 2 (этот случай на рис. 1.10, а и б не показан). Однако это маловероятно. Вследствие погрешности обработки, угол 90° будет иметь отклонения в пределах

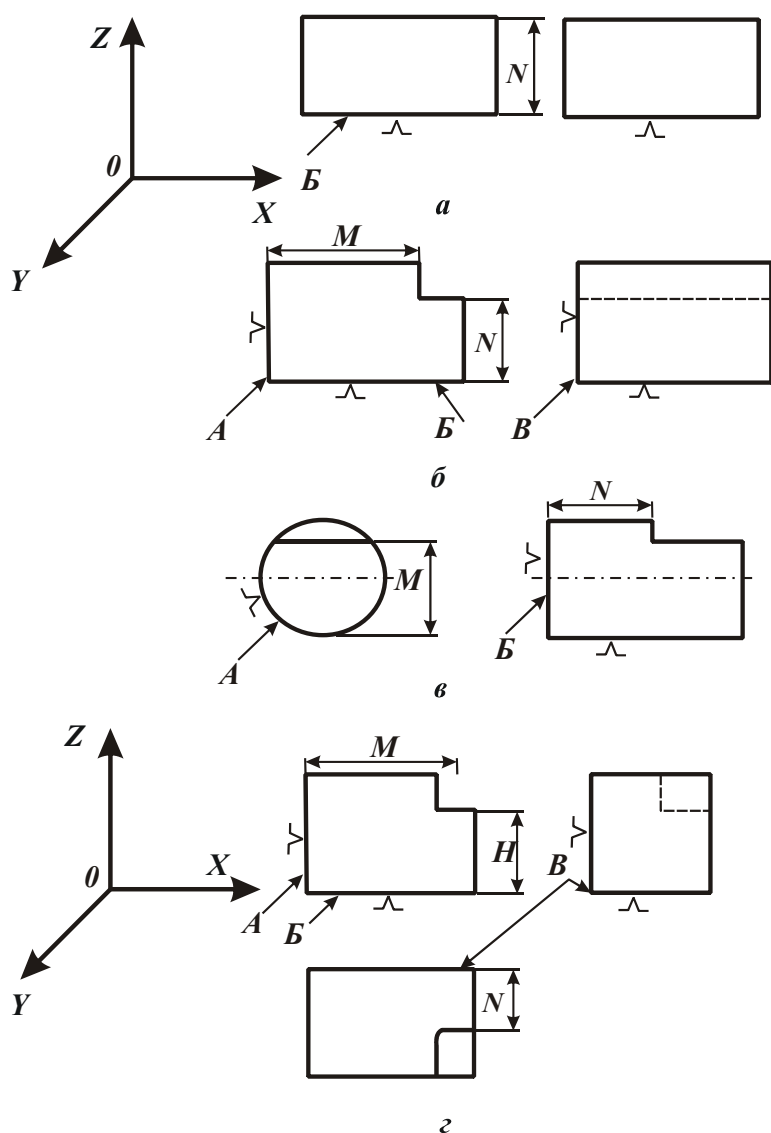


Рис. 1.11. Операционные эскизы, иллюстрирующие выбор минимально необходимого количества баз.

Так как настройка фрезы на размер H (рис.1.10, а) производится относительно опорной поверхности пластин 3 и 4, всякое изменение положения базы B заготовки приведет к погрешности в размере H и к неправильности обработанной плоскости B и плоскости \bar{B} .

Чтобы базирование заготовки удовлетворяло правилу шести точек, вместо двух пластин 1 и 2 в вертикальной плоскости следует расположить только одну пластину 1 (рис.1.10, в). Тогда при закреплении заготовки ее положение, достигнутое при базировании, нарушаться не будет. Это хорошо видно из рис.1.10, в, где показаны три заготовки с разными углами между базами A и B : 90° , $(90^\circ + \gamma^\circ)$ и $(90^\circ - \gamma^\circ)$. При данном базировании (на шесть точек) и после закрепления положение всех трех заготовок остается неизменным, а база B —

$\pm \gamma^\circ$, и поэтому он хотя бы на незначительную величину будет отличаться от угла в приспособлении между опорными поверхностями пластин. В связи с этим у заготовки, поставленной базой B на пластины 3 и 4, база A не будет соприкасаться с обеими пластинами 1 и 2 (такое положение заготовки на рис.1.10, а и б не показано). При закреплении заготовки с усилием Q произойдет ее поворот, при этом она всегда будет контактировать базой A с опорной поверхностью пластин 1 и 2, а база B изменит положение, достигнутое при базировании, и станет с перекосом по отношению к опорной поверхности пластин 3 и 4.

совмещенной с поверхностью пластин 2 и 3.

Теперь рассмотрим, можно ли осуществлять базирование заготовки с использованием только пяти, четырех или даже трех опорных точек. На практике довольно часто встречаются такие случаи, и они вполне правомерны с точки зрения обеспечения точности.

Количество опорных точек определяется операцией и в первую очередь - числом выдерживаемых на ней исходных размеров и схемой их расположения по отношению к осям координат. От этого зависит количество баз, необходимых для базирования заготовки, а, следовательно, и число опорных точек. Кроме того, на число последних оказывает влияние и форма выбранных баз.

Во всех случаях, когда для базирования заготовки используется меньше шести точек, то есть не три базы, а меньше, положение заготовки в приспособлении полностью не определено. При базировании заготовки двумя базами (на пять опорных точек) у нее остается одна степень свободы, а одной базой - две степени свободы, если базирование выполняется по цилиндрической поверхности (на четыре опорных точки), и три степени свободы, если базирование осуществляется плоскостью (на три опорные точки).

Рассмотрим примеры. На рис. 1.11 приведено несколько операционных эскизов обработки призматической и цилиндрической заготовок. Эскизы отличаются формой обрабатываемой поверхности и числом исходных размеров. Исходя из обеспечения требуемой точности на каждой операции выбрано минимальное количество баз для базирования заготовки: по рис. 1.11, а, где выдерживается один исходный размер N , одна база B , по рис. 1.11, б и 1.11, в, где выдерживаются два исходных размера N и M , две базы A и B , по рис. 1.11, г, где выдерживаются три исходных размера M , N , H - три базы A , B и B .

Возможные способы базирования заготовок на этих операциях показаны на рис. 1.12 и 1.13.

1. На рис. 1.12, а - одной базой на плоскость магнитной плиты 1. Здесь заготовка лишается трех степеней свободы - перемещения по Z и поворота относительно X и Y и во время обработки удерживается силами q . Такой способ базирования может быть использован на операции по рис. 1.11, а.
2. На рис. 1.12, б - двумя базами A и B на опорные пластины 1, 2 и 3. Заготовка при этом лишается пяти степеней свободы. Этот способ может быть применен на операциях по рис. 1.11, а и б.
3. На рис. 1.12, в - тремя базами A , B и B на опорные пластины 1, 2 и

3 и опорный штырь 4, при этом заготовка лишается всех шести степеней свободы. Такой вид базирования может использоваться на операциях по рис 1.11, а, б и г.

4. На рис 1.13 - цилиндрической базой на призму 2, а торцом - на опорный штырь 1. Заготовка (валик) при этом лишается пяти степеней свободы. У нее остается лишь возможность поворота относительно оси X (оси валика). Этот способ может быть применен на операции по рис 1.11, в.

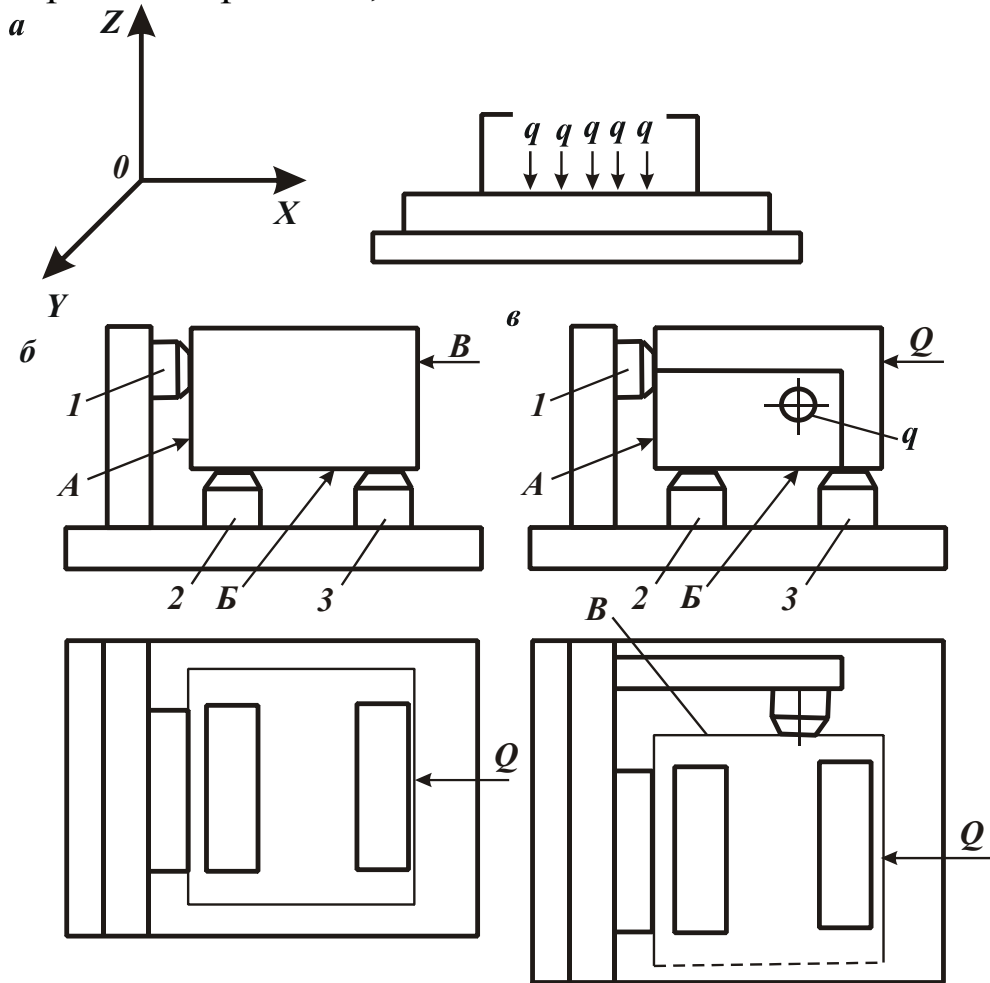


Рис. 1.12. Схема базирования призматической заготовки.

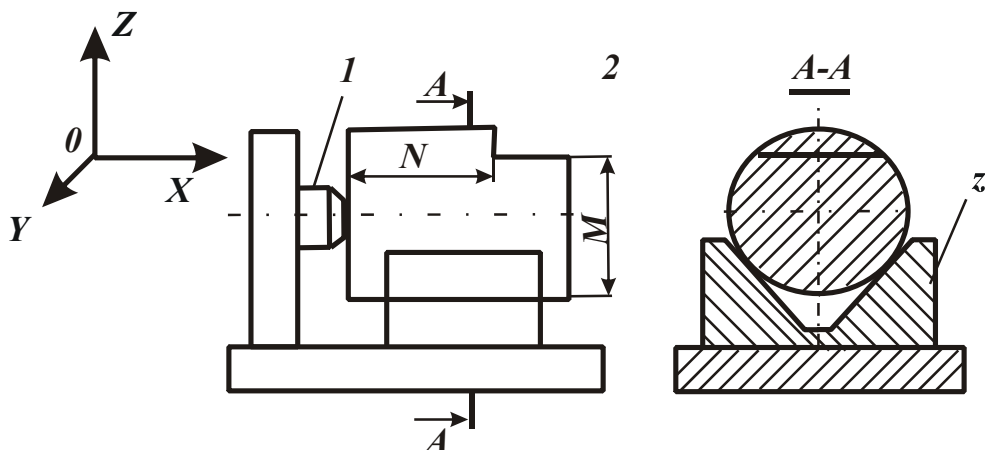


Рис. 1.13. Схема базирования валика двумя базами.

Рассмотренные примеры показывают, что базирование заготовки можно производить несколькими способами - с использованием как минимально необходимого, так и большего числа баз, не ухудшая условий обеспечения точности заданных исходных размеров. При базировании с числом баз менее трех приспособление получается проще, однако у заготовки остаются степени свободы, и ограничить ее возможные перемещения под действием сил резания можно только закреплением с повышенным усилием, а это приводит к увеличению габаритов зажимных устройств. На практике такие заготовки чаще всего базируются тремя базами, так как в этом случае они получают полную ориентировку, что очень важно при обработке на настроенных станках, где все заготовки партии должны занимать одно и то же положение. Вместе с тем следует иметь в виду, что не всегда удастся выбрать три базы. В ряде случаев у заготовки не находится поверхности, которую можно было бы принять за третью базу. Такой случай приведен на рис 1.13. Заготовка базируется здесь двумя базами, и у нее остается одна степень свободы (поворот вокруг оси валика). С точки зрения возможности обеспечения точности исходных размеров М и N это допустимо, но чтобы валик не повернулся под действием сил резания, его необходимо закреплять с повышенным усилием, так как он будет удерживаться от поворота только силами трения.

1.2.2. ОПОРНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ИХ УСЛОВНОЕ ГРАФИЧЕСКОЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ

Опорные элементы имеют разнообразную конструкцию, которая зависит от формы базы и числа лишаемых степеней свободы. Их можно разделить на основные и дополнительные.

Основные опорные элементы характеризуются тем, что каждый из них реализует одну или несколько опорных точек для базирования заготовки. Будучи соответствующим образом размещенными в приспособлении, они образуют необходимую при выбранном способе базирования совокупность опорных точек (до шести включительно). К этим элементам относятся: опорные штыри и пластины, центры, плавающие и заблокированные опоры и др.

Дополнительные опорные элементы отличаются тем, что они подводятся к заготовке после того, как она получила необходимое базирование с помощью основных элементов. При подведении допол-

нительных опор необходимо следить, чтобы не нарушилось уже достигнутое базирование заготовки. Такие опоры используются для увеличения числа точек контакта заготовки с приспособлением с целью повышения жесткости системы. Это позволяет уменьшить или совершенно предотвратить возможные деформации заготовки под влиянием усилий резания и закрепления. К дополнительным элементам относятся подводимые и самоустанавливающиеся одиночные опоры, люнеты и т.п.

Условное графическое обозначение опорных элементов установлено ГОСТ 3.1107-81.

1.2.3. ВЫБОР БАЗ. ПОГРЕШНОСТИ, СВЯЗАННЫЕ С ВЫБОРОМ БАЗ

Конструкторские базы назначаются конструктором изделия при простановке размеров на рабочем чертеже. На выбор той или иной схемы их простановки влияют как конструкторские, так и технологические требования. Выбранная схема в значительной степени предопределяет последовательность обработки, выбор баз, конструкцию приспособления и т.д.

Выбирая схему простановки размеров, конструктор должен исходить из обеспечения принципа технологичности конструкции. Более технологичной является та конструкция, на изготовление которой затрачивается меньше времени, требуется более простое приспособление, а заданная точность достигается просто и надежно.

При разработке технологического процесса для каждой операции выбираются исходные базы и проставляются исходные размеры, а так же базы для ориентирования заготовки. Это наиболее ответственный этап разработки технологического процесса и проектирования приспособлений. При неправильном выборе баз заметно увеличивается вспомогательное время на установку и снятие заготовки, усложняется конструкция приспособления, возможен брак.

При выборе баз необходимо руководствоваться следующими правилами.

Во-первых, в качестве исходных следует принимать только конструкторские размеры, т.е. задавать положение обрабатываемой поверхности по возможности теми же размерами, которые проставлены на чертеже детали, и относительно тех же ее элементов. В этом случае исходная база будет совпадать с конструкторской.

Во-вторых, в качестве базы для ориентирования заготовки следует выбирать исходную базу, если она является поверхностью. Если же исходная база представляет собой линию или точку, то базой для ориентирования заготовки надо выбирать поверхность, на которой расположена исходная база.

Отступление от первого правила приводит к ужесточению допусков на исходные размеры, так как вместо конструкторских приходится вводить так называемые технологические размеры, на которые назначаются меньшие допуски. Это приводит к удорожанию обработки детали. Методика расчетов допусков и отклонений на вводимые технологические размеры приводится в учебниках по технологии машиностроения и в некоторых книгах по приспособлениям.

При отступлении от второго правила увеличивается погрешность исходного размера из-за несовмещения баз. Это связано с тем, что увеличивается погрешность базирования исходной базы.

1.2.4. ПОГРЕШНОСТЬ БАЗИРОВАНИЯ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ БАЗИРОВАНИЯ ИСХОДНОЙ БАЗЫ

Любая схема базирования может обеспечить одинаковое положение всех заготовок партии только в том случае, если у них не будет погрешностей в размерах и во взаимном расположении баз. В действительности же погрешности всегда имеют место и влияют на положение заготовки в приспособлении.

Практически каждая заготовка из партии занимает свое положение в приспособлении, несколько отличающееся от положения других. Например, при базировании цилиндрического валика на призме 1 (рис 1.14, а) ось валика с наибольшим диаметром D будет находиться в точке O , а с наименьшим $(D-a)$ - в точке O_1 .

Величина смещения оси валика (вследствие погрешности его диаметра) в направлении плоскости симметрии призмы равна отрезку OO_1 . Легко увидеть, что в направлении, перпендикулярном плоскости симметрии призмы ось валика никогда не смещается. Кроме того, различные поверхности и точки заготовки при ее базировании в приспособлении смещаются на разные величины. Так, у того же валика ось смещается на величину m (рис. 1.14, а), точка A - на n , а точка B - на l .

Отклонение положения заготовки (при базировании) от требуе-

мого, и в первую очередь отклонение ее исходной базы, влияет на точность выдерживаемых на операции исходных размеров. Поэтому в каждом случае базирования необходимо определять *смещение исходной базы в направлении исходного размера*. Это смещение будем называть погрешностью базирования исходной базы и обозначим $\delta_{б.и.б}$.

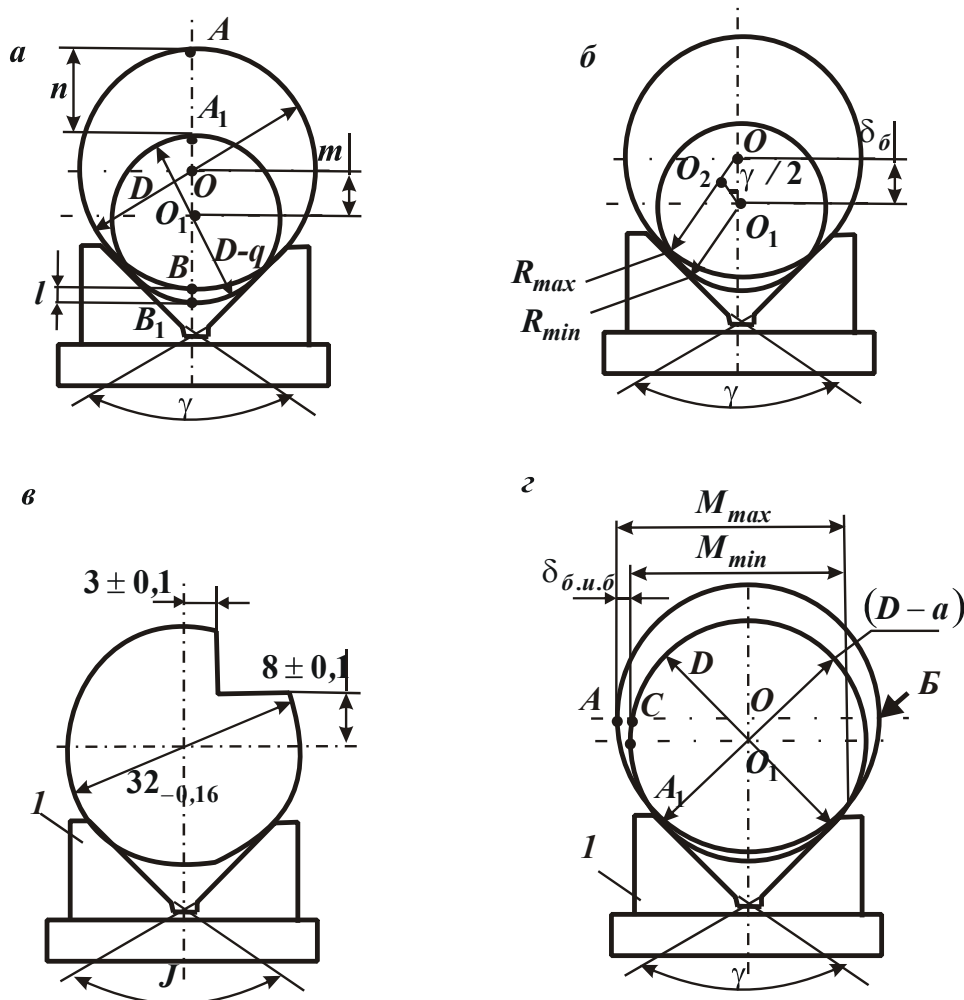


Рис. 1.14. Погрешности базирования валика на призме.

Отклонение положения заготовки (при базировании) от требуемого, и в первую очередь отклонение ее исходной базы, влияет на точность выдерживаемых на операции исходных размеров. Поэтому в каждом случае базирования необходимо определять *смещение исходной базы в направлении исходного размера*. Это смещение называют погрешностью базирования исходной базы и обозначим $\delta_{б.и.б}$.

Погрешность базирования исходной базы - это расстояние между крайними положениями, которые может занимать исходная база у разных заготовок партии при их базировании в приспособлении, измеренное в направлении исходного размера.

Смещение исходной базы при базировании заготовки порождается погрешностями изготовления не только базы, но и опорного элемента, а также его износом. В дальнейшем при определении $\delta_{\delta.u.\delta}$ влиянием износа элементов будем пренебрегать, полагая, что он не выходит за пределы допуска на изготовление.

Определение погрешности $\delta_{\delta.u.\delta}$ сводится к решению чисто геометрических задач. Рассмотрим несколько примеров.

Пример 1. Рассчитаем величину погрешности базирования оси валика в направлении оси симметрии призмы (рис 1.14, б). В прямоугольном треугольнике OO_2O_1 :

$$OO_2 = R_{max} - R_{min}; \quad OO_1 = \delta_{\delta},$$

где δ_{δ} - погрешность базирования оси валика в направлении плоскости симметрии призмы в мм;

Тогда

$$\delta_{\delta} = \frac{R_{max} - R_{min}}{\sin \frac{\gamma}{2}}. \quad (1.1)$$

Если на призму устанавливаются валики диаметром D_{-a} , то

$$R_{max} = \frac{D_{max}}{2} = \frac{D}{2}; \quad R_{min} = \frac{D_{min}}{2} = \frac{D - a}{2}. \quad (1.2)$$

Подставим значения R_{max} и R_{min} в выражение (1.1), после преобразования получим

$$\delta_{\delta} = \frac{a}{2 \sin \frac{\gamma}{2}}, \quad (1.3)$$

где a - допуск на диаметр валика, мм; γ - угол между опорными плоскостями призмы, град.

На практике обычно применяют призмы с углом $\gamma = 90^\circ$. Подставив значение γ в формулу (1.2), будем иметь:

$$\delta_{\delta} \approx 0,71a.$$

Пример 2. На рис. 1.14, в показана схема базирования валика на призме на операции фрезерования уступа. Определим величину погрешности базирования исходных баз в направлении исходных размеров ($3 \pm 0,1$ мм и $8 \pm 0,1$ мм). Исходной базой для обоих размеров является ось валика. Так как она никогда не смещается с оси симметрии призмы, для размера $3 \pm 0,1$ мм, погрешность $\delta_{\delta.u.\delta} = 0$. В направлении

размера $8 \pm 0,1$ мм $\delta_{\text{б.и.б}}$ можно определить по формуле (1.3). Имея в виду, что в данном случае $a = 0,16$ мм и $\delta_{\text{б.и.б}} = \delta_{\text{б}}$, получим:

$$\delta_{\text{б.и.б}} = 0,71a \approx 0,71 \cdot 0,16 \approx 0,11 \text{ мм.}$$

Пример 3. Рассмотрим случай, когда исходный размер задан не от оси валика, а от образующей (рис. 1.14, г). У валиков обрабатывается лыска в размер, заданный от образующей А. На призму 1 установлены два валика: один диаметром $D_{\text{max}} = D$, а второй диаметром $D_{\text{min}} = D - a$. Точки А и А₁ соответствуют крайним положениям исходной базы (образующей А) при базировании партии валиков. Ось валика не смещается относительно оси симметрии призмы, поэтому смещение образующей А в направлении размера М вызывается только изменением диаметра валика. Величина смещения исходной базы (образующей А) в направлении размера М равна отрезку $AC = OA - O_1A_1$. Так как $OA = \frac{D}{2}$, а $O_1A_1 = \frac{D}{2} - \frac{a}{2}$, то $AC = \frac{D}{2} - \left(\frac{D}{2} - \frac{a}{2}\right) = \frac{a}{2}$. Следовательно, погрешность базирования исходной базы в направлении размера М равна

$$\delta_{\text{б.и.б}} = AC = \frac{a}{2}.$$

Пример 4. На рис. 1.15, а и б показана схема базирования заготовки при обработке уступа В с размерами N и М, заданными соответственно от исходных баз А и Б.

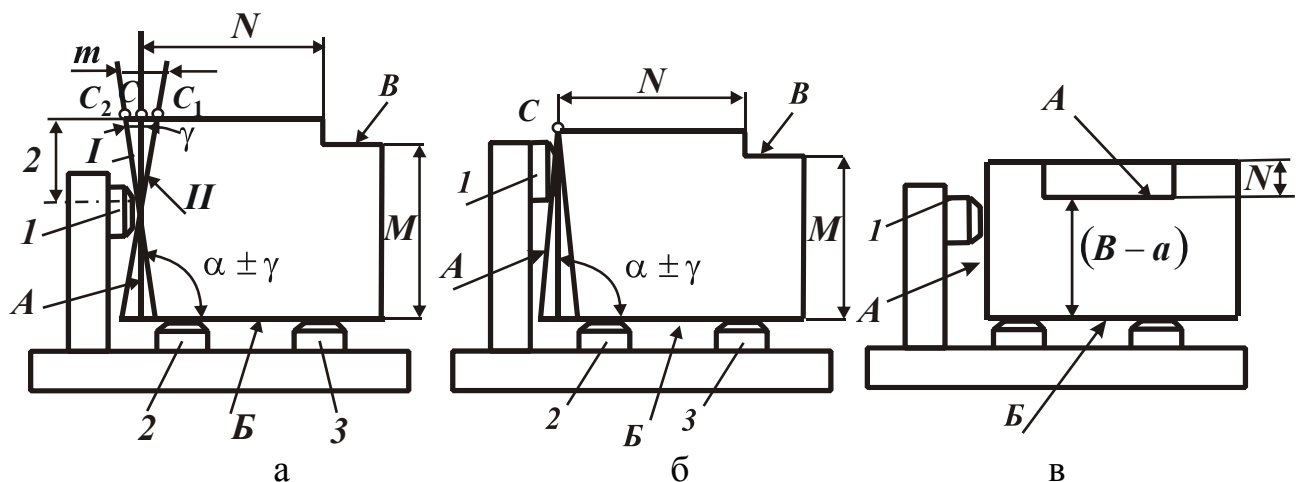


Рис. 1.15. Эскизы к определению погрешности базирования.

В данном случае обе исходные базы совпадают с базами, используемыми для базирования заготовки. Погрешность базирования исходной базы Б в направлении размера М равна нулю, т.е. $\delta_{\text{б.и.б}} = 0$, так как

у всех заготовок партии база Б всегда совмещается с опорной плоскостью пластин 2 и 3 и, следовательно, занимает неизменное положение.

Иначе обстоит дело с базой А. Вследствие погрешности угла α между базами А и Б, равной $\pm\gamma$, база А при базировании заготовок партии может занимать различные положения. Возможные крайние положения базы А на рис. 1.15, а обозначены I и II. Различные точки базы смещаются в направлении размера N на разную величину. Лишь точка контактирующая с пластиной 1, не имеет смещения. На точность выполнения размера N влияет смещение точки С, равное m . Таким образом, погрешность базирования для размера N

$$\delta_{б.и.б} = m = 2ltg\gamma .$$

Для уменьшения $\delta_{б.и.б}$ пластину 1 необходимо располагать по высоте как можно ближе к точке С. Если её поставить непосредственно у точки С (рис. 1.15, б), то погрешность базирования этой точки практически будет равна нулю.

Пример 5. Рассмотрим пример, когда исходная база не совмещена с базой, принятой для ориентирования заготовки (рис. 1.15, в). Это имеет место при обработке верхней плоскости заготовки в размер N, заданной от исходной базы А. В рассматриваемом случае погрешность базирования исходной базы А в направлении размера N будет равна

$$\delta_{б.и.б} = a ,$$

где a - допуск на размер В между исходной базой и базой, используемой для базирования заготовки. Действительно, смещение базы А в направлении N вызывается только погрешностью выполнения размера В у заготовки на предыдущих операциях.

1.2.5. ВЫБОР ГЛАВНОЙ БАЗЫ

Выше было показано, что базирование заготовки в приспособлении производится, как правило, двумя или тремя базами, причем оно сводится, по существу, к базированию её отдельных баз. Обнаружено, что в группе баз значимость каждой из них для данной операции неодинакова. Среди них выделяется главная база. Заготовка, поставленная этой базой в приспособление, получает почти полную ориентировку, лишаясь трех или четырех степеней свободы. Для лишения заготовки других степеней свободы используются другие, дополнительные базы. Главную базу необходимо выделять из группы

баз еще и потому, что способ ее базирование принципиально отличается от способа базирования остальных, дополнительных баз. Например, если в качестве баз на операции используются два отверстия, причем одно из них принято за главную базу, то метод его базирования принципиально отличается от метода базирования второго отверстия, играющего роль дополнительной базы.

Вместе с тем установлено, что для разных заготовок может быть использован один и тот же способ базирования главной базы, если в качестве неё приняты одинаковые по форме поверхности. Таким образом, способ базирования главной базы определяется в основном ее формой. Например, если у совершенно разных заготовок в качестве главной базы принята нижняя обработанная плоскость, то при проектировании приспособлений для всех заготовок может быть предусмотрен один и тот же способ ее базирования - на две опорные пластины (рис. 1.12, б и в).

В связи с этим представляется возможным рассматривать типовые способы базирования главной базы определенной формы безотносительно к форме и размерам заготовки, тем более, что круг поверхностей, используемых в качестве главной базы, ограничен, по существу, тремя видами - плоскостью, цилиндрическим отверстием и цилиндрической наружной поверхностью.

Главную базу из группы баз выбирает конструктор приспособления. Иногда это делает технолог при разработке технологического процесса, проставляя на операционном эскизе значками тип опорного элемента и число опорных точек. За главную базу предпочтительно брать поверхность, которая обеспечивает заготовке устойчивое положение в приспособлении даже при базировании только одной этой базой. Наиболее полно такому требованию отвечает плоская поверхность заготовки, располагающаяся снизу и обладающая достаточной протяженностью. Если у заготовки такой поверхности нет, выбирают другую достаточной протяженности - боковую плоскость, цилиндрическое отверстие либо цилиндрическую наружную поверхность.

На выбор главной базы влияет так же точность исходных размеров и допускаемых отклонений расположения обрабатываемой поверхности. За главную следует принимать базу, от которой заданы наиболее точные размеры (или наименьшие отклонения расположения). На первой операции, когда у заготовки еще нет ни одной обработанной поверхности, за главную базу приходится принимать необработанную поверхность. На последующих операциях за главную ба-

зу стремятся принять поверхности, обработанные точно и с наименьшей шероховатостью.

Примеры, иллюстрирующие выбор главной базы, приведены на рис. 1.16, где главная база обозначается ГБ, дополнительные базы - А и В, а обработанная поверхность изображена утолщенной линией.

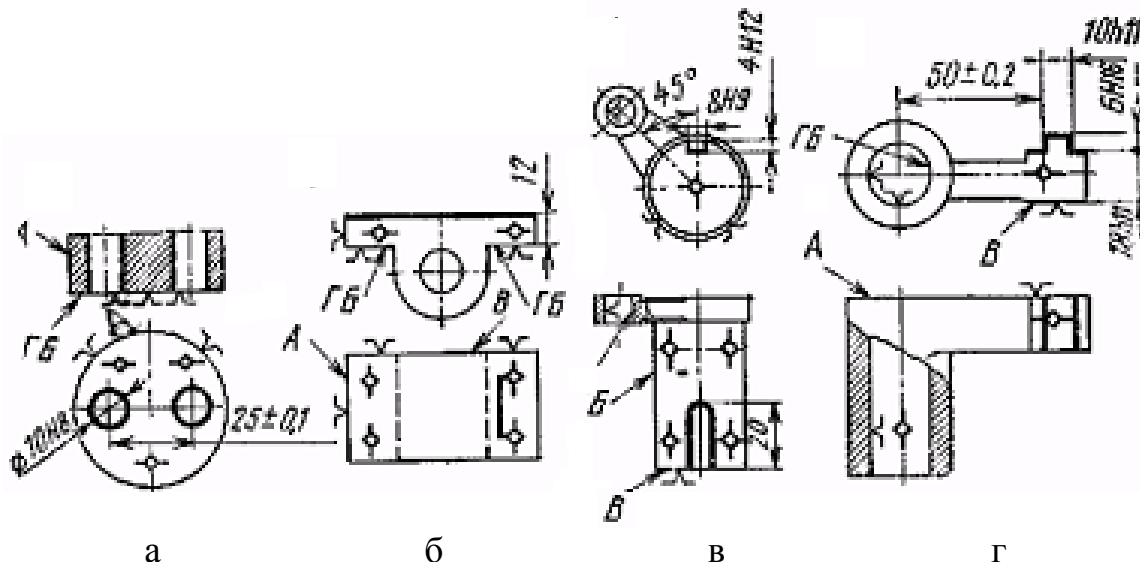


Рис. 1.16. Выбор главной базы.

На рис. 1.16, а из двух баз – за главную принята нижняя плоскость. На рис. 1.16, б из трёх баз за главную принята нижняя плоскость, имеющая два участка, один из которых устанавливается на два опорных штыря, а другой - на заблокированную опору. На рис. 1.16, в главной базой является обработанная наружная цилиндрическая поверхность, которой заготовка устанавливается на призму (рис. 1.9, б), а на рис. 1,16, г - точно обработанное цилиндрическое отверстие, которым заготовка надевается на цилиндрическую оправку, закрепленную на корпусе приспособления.

Несмотря на то, что для каждой формы главной базы разработано несколько типовых способов ее базирования, в конкретных условиях используется какой-то один способ, обусловленный расположением заготовки на операции, точностью исходных размеров и т. д.

1.2.6. СПОСОБЫ БАЗИРОВАНИЯ ЗАГОТОВКИ С ГЛАВНОЙ БАЗОЙ, ИМЕЮЩЕЙ ФОРМУ ПЛОСКОСТИ

Осуществить базирование плоской главной базы – значит совместить ее с какой-то заданной плоскостью приспособления. Так как положение любой плоскости определяется тремя точками, для выполнения

базирования необходимо иметь в приспособлении три опорные точки, расположенные в одной заданной плоскости, но не на одной прямой.

Это достигается с помощью различных сочетаний основных опорных элементов, которые и определяют способы базирования плоской главной базы: на три опорных штыря; на опорные штыри в сочетании с плавающими и заблокированными опорами; на две опорные пластины; на плоскость опорного элемента.

Базирование с помощью трех опорных штырей (рис. 1.17, в). Применяется в основном в случаях, когда плоская главная база заготовки не обработана. При использовании данного базирования для ориентирования обработанных баз опорные штыри (рис. 1.17) должны иметь плоскую головку (рис. 1.17, а), причем их диаметр должен выбираться сообразно с площадью базы (чтобы в сравнении с размером базы поверхность опоры можно было принять за точку). Размещать опорные штыри следует как можно дальше один от другого - это повышает точность базирования.

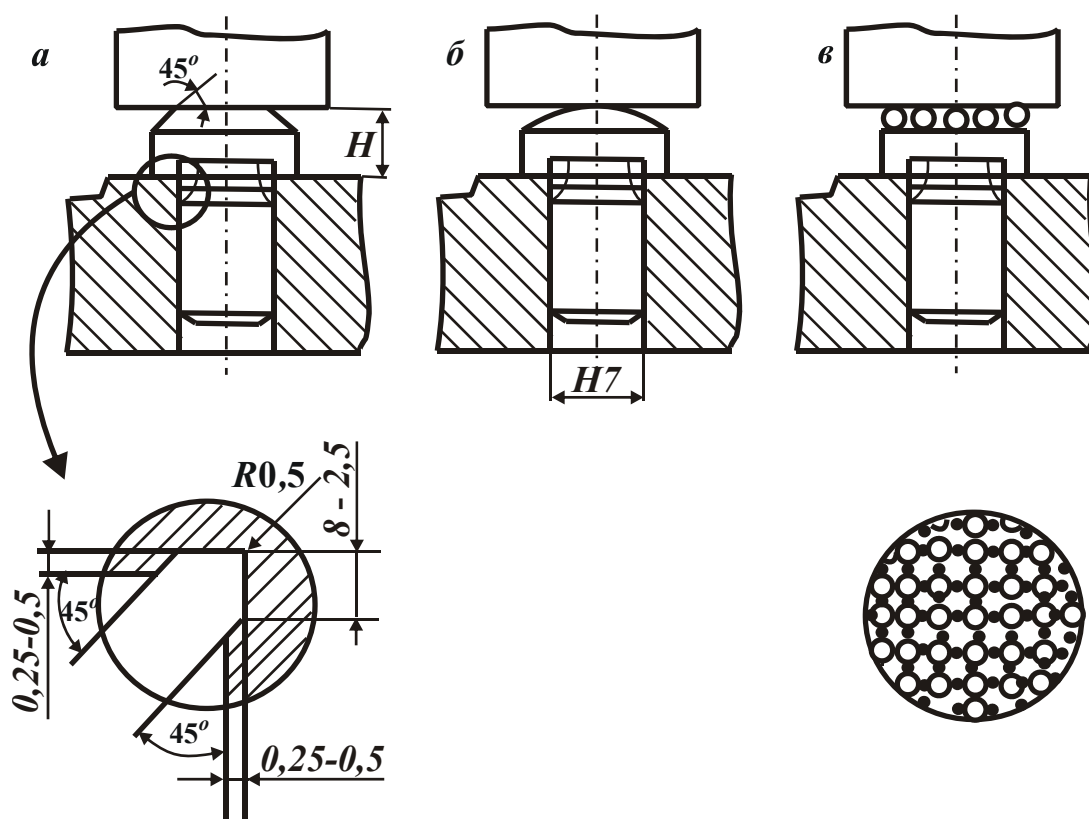


Рис. 1.17. Опорные штыри.

Конструкция опорных штырей стандартизована. По ГОСТу они называются опоры постоянные. Выполняются штыри с плоской (ГОСТ 13440-68), сферической (ГОСТ 13441-68) и насечённой (ГОСТ 13442-68) головками. На корпусе приспособления в местах установки

штырей предусматриваются площадки (обычно на возвышениях), которые обрабатываются одновременно. Точность выполнения размера H головки штырей с отклонением по $h5$ или $h6$ обеспечивает размещение опорных поверхностей штырей в одной заданной плоскости. Иногда по размеру H у штырей оставляют припуск для обработки их опорных поверхностей после запрессовки штырей в корпус.

Штыри, показанные по рис. 1.17, б и в, служат только для ориентирования необработанных баз.

Иногда для базирования заготовок с плоской необработанной главной базой вместо указанных опорных штырей используют регулируемые опоры (рис. 1.18), чтобы можно было изменять высоту опор в соответствии с величиной припуска у заготовок разных партий.

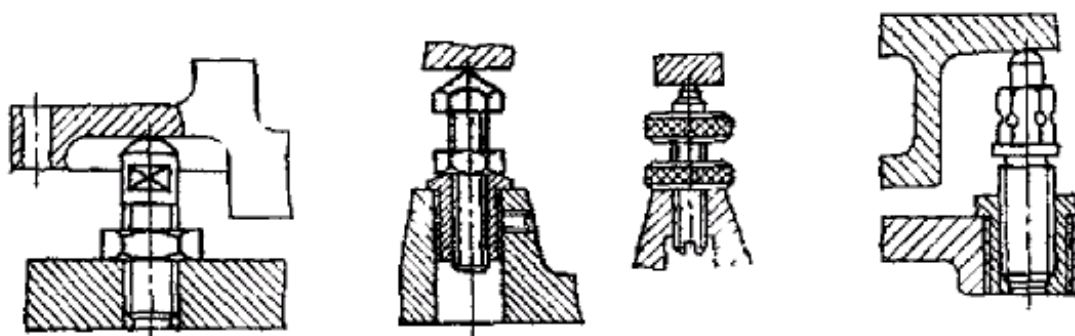


Рис. 1.18. Примеры установки заготовок на регулируемые винтовые опоры.

Регулировку производят перед обработкой каждой партии заготовок с новым припуском. После регулировки положение опор фиксируется и сохраняется неизменным на протяжении обработки всех заготовок партии.

Конструкция регулируемых опор регламентирована ГОСТ 4084-68, 4085-68 и 4086-68. Пример их применения приведен на рис. 1.18. Естественно, что для одной плоской базы требуются три регулируемые опоры.

Базирование с помощью опорных штырей в сочетании с плавающими или заблокированными опорами. При установке в приспособлении нежестких заготовок возможна их деформация под влиянием усилий закрепления, а при обработке - под влиянием сил резания. Для повышения жесткости стремятся создать большее число точек контакта заготовки с приспособлением, не нарушая при этом требования теоретической механики - для определения положения плоскости необходимо и достаточно трех точек. Достигается это путем применения плавающих или заблокированных опор (рис. 1.19), каждая из которых заменяет собой один опорный штырь, хотя и кон-

тактирует с базой в двух или трех точках. Конструкция таких опор обеспечивает согласованное перемещение опорных поверхностей, при котором сохраняется практически неизменным положение опорной точки (она остается в заданной плоскости приспособления). Естественно, что общее количество опорных штырей совместно с плавающими или заблокированными опорами должно быть равно трем при любом их сочетании.

Данный способ базирования применяется и тогда, когда конфигурация заготовки не позволяет разместить соответствующим образом три опорных штыря (рис. 1.19, г).

Основные плавающие и заблокированные опоры имеют разнообразные конструкции. Некоторые из них схематично показаны на рис. 1.17, а, б, в. Работа опор ясна из рисунков.

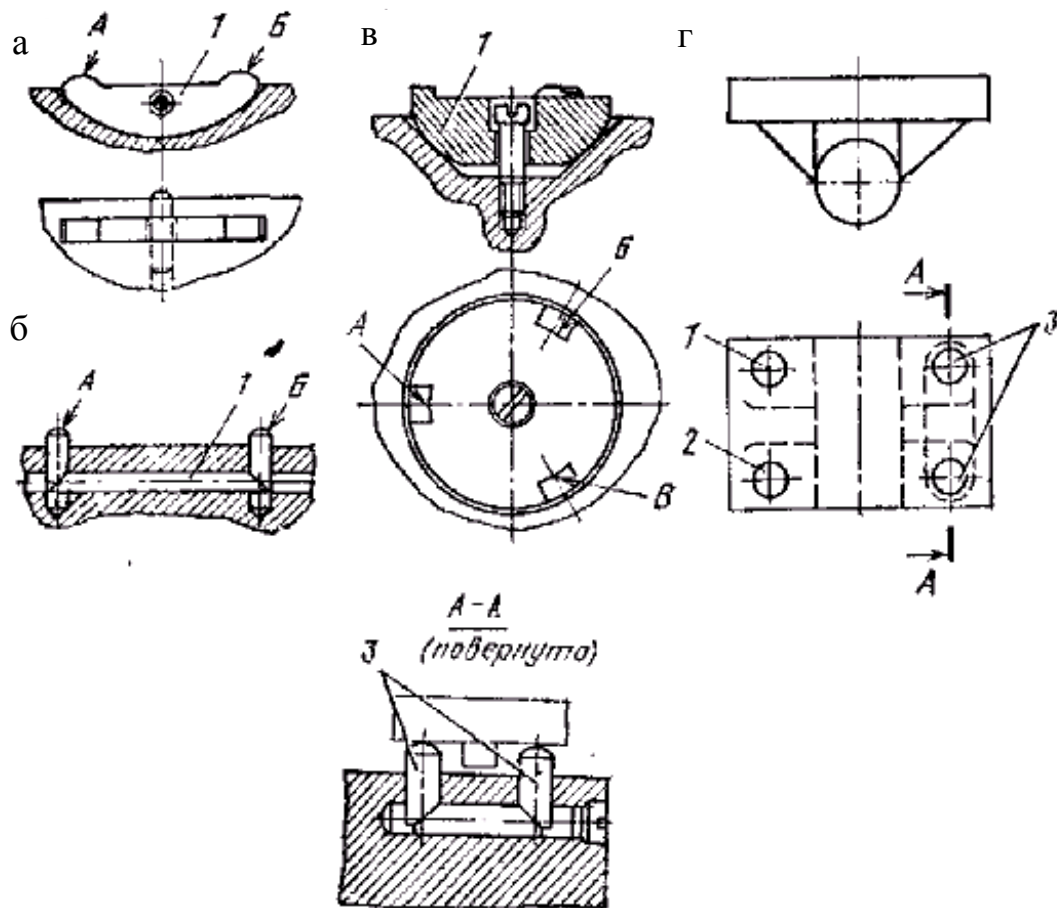


Рис. 1.19. Сблокированные и плавающие опоры.

На рис. 1.19, а и б приведены двухточечные заблокированные опоры (с точками А и Б и плавающим элементом 1). Пример применения двухточечной заблокированной опоры показан на рис. 1.19, г. Здесь заготовка базируется на два опорных штыря 1 и 2 и заблокированную опору 3. Использование ее в данном случае объясняется тем,

что базирование на три штыря невозможно из-за наличия у заготовки ребра, которое не позволяет установить один из штырей в требуемом месте. Путем замены одного из штырей двухточечной опорой задача базирования успешно разрешается, при этом увеличивается число точек контакта заготовки с приспособлением.

Рассмотренный способ базирования рекомендуется применять при ориентировании необработанных баз, так как сблокированные и плавающие опоры дают возможность в значительной степени устранить отрицательное влияние неровностей поверхности на точность ее базирования.

Базирование с помощью двух опорных пластин - наиболее распространенный способ ориентирования обработанных баз (рис.1.12, б и в). Опорные пластины (рис. 1.20) изготавливаются в соответствии с ГОСТ 4743-68 двух типов: плоские (рис. 1.20, а) и с косыми пазами (рис. 1.20, б). У последних опорные поверхности легче очищаются от стружки, поэтому их следует применять для установки в горизонтальной плоскости, а плоские - на боковых поверхностях. Выше было сказано, что две опорные пластины реализуют три опорные точки, поэтому базирование на две пластины полностью отвечает требованиям теоретической механики. Длину пластины L выбирают в зависимости от протяженности базы.

На корпусе приспособления опорные пластины размещают обычно на возвышающихся площадках (рис.1.20, в). При изготовлении приспособления площадки обрабатывают одновременно, высоту H пластин выдерживают с отклонениями по $h6$.

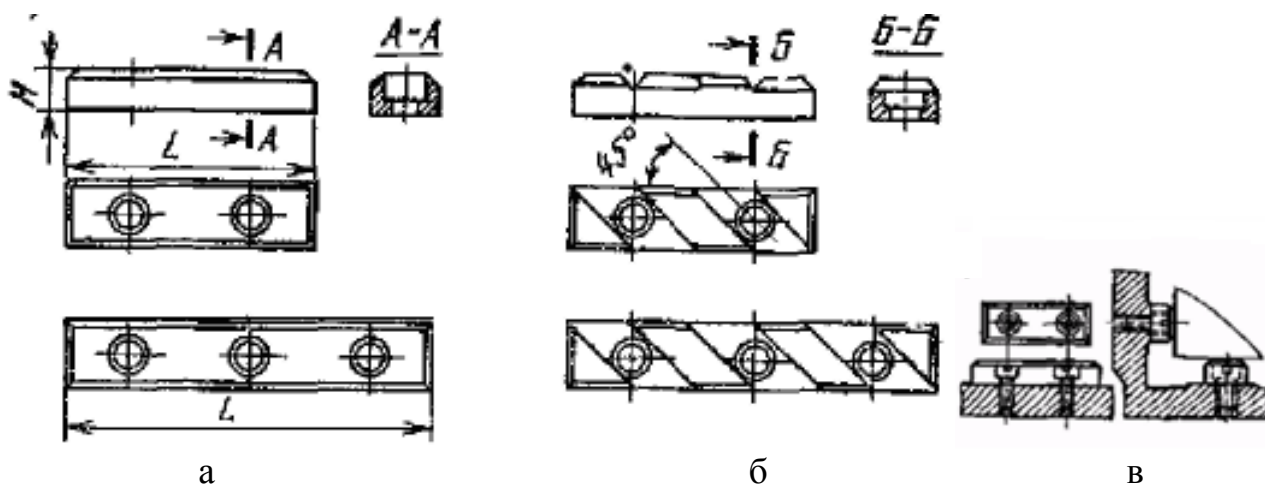


Рис. 1.20. Опорные пластины.

При необходимости опорные поверхности пластин подгоняют по краске, при этом добиваются их расположения в одной плоскости.

Иногда не удается применять стандартные пластины, и тогда приходится проектировать опорные элементы специальной конструкции. На рис. 1.21, а показано базирование заготовки 1, обработанной плоскостью с помощью одной опорной пластины 2 с двумя опорными участками, реализующими две опорные пластины. Подобное базирование приходится осуществлять в тех случаях, когда база имеет малые размеры и не представляется возможным разместить две стандартные пластины.

Базирование на плоскость опорного элемента используется только для ориентирования чисто и точно (с малой неплоскостностью) обработанных баз. Примером такого базирования является установка заготовок на плоскость магнитных плит.

Часто базирование заготовок, имеющих обработанную кольцевую поверхность фланца, производится на плоскость опорного элемента. На рис. 1.21, б показано базирование заготовки 1 кольцевой поверхностью фланца на кольцевую же плоскость $У$ бурта пальца 2 (плоскость на плоскость). Цилиндрическая поверхность пальца используется для базирования второй базы.

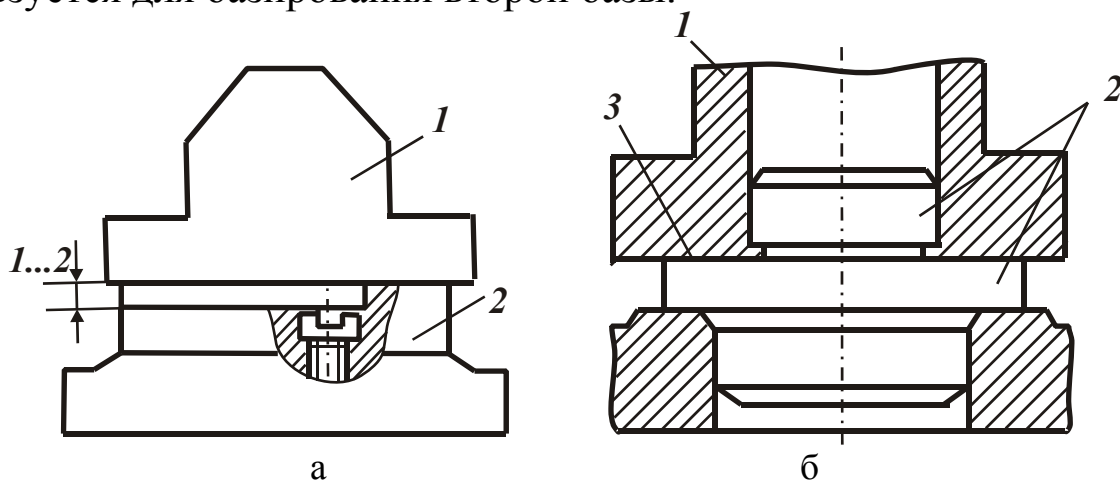


Рис. 1.21. Основные опоры специальной конструкции.

Дополнительные опоры. Если при базировании рассмотренными выше способами заготовка не получается достаточной устойчивости или жесткости при обработке (закреплении), то к основным опорным элементам разрешается добавлять любое количество дополнительных. Последние подводятся к поверхности базы после того, как осуществлено базирование заготовки с помощью основных опорных элементов. При подведении дополнительных опор достигнутое ориентирование базы не должно нарушаться. Дополнительные опоры (рис.1.22) имеют разнообразные конструкции. Одни из них подводятся к базе вручную, а другие - под действием пружин (самоустанавливаются).

ся) и после подведения фиксируются.

Клиновидная дополнительная опора (рис. 1.22, а) приводится в действие вручную. Для выдвижения вверх штыря 3 до контакта с базой необходимо переместить влево клин 1 вместе с винтом 5 за звездочку 6, зафиксированную на винте штифтом 7. Когда штырь 3 подведен к базе, его положение фиксируют вращением винта 5, при этом шарик 10, перемещаясь влево, выдвигает два кулачка 8 до соприкосновения со стенками отверстия, благодаря чему клин стопорится относительно корпуса приспособления. Колпак 2 предохраняет опору от попадания стружки, а втулка 4 - корпус от износа. Пружинное кольцо 9 сдвигает кулачки 8 при отвинчивании винта 5. Упор 12, прикрепленный винтом 11, ограничивает перемещение клина 1. Для предотвращения поворота штыря служит стопорный винт 13.

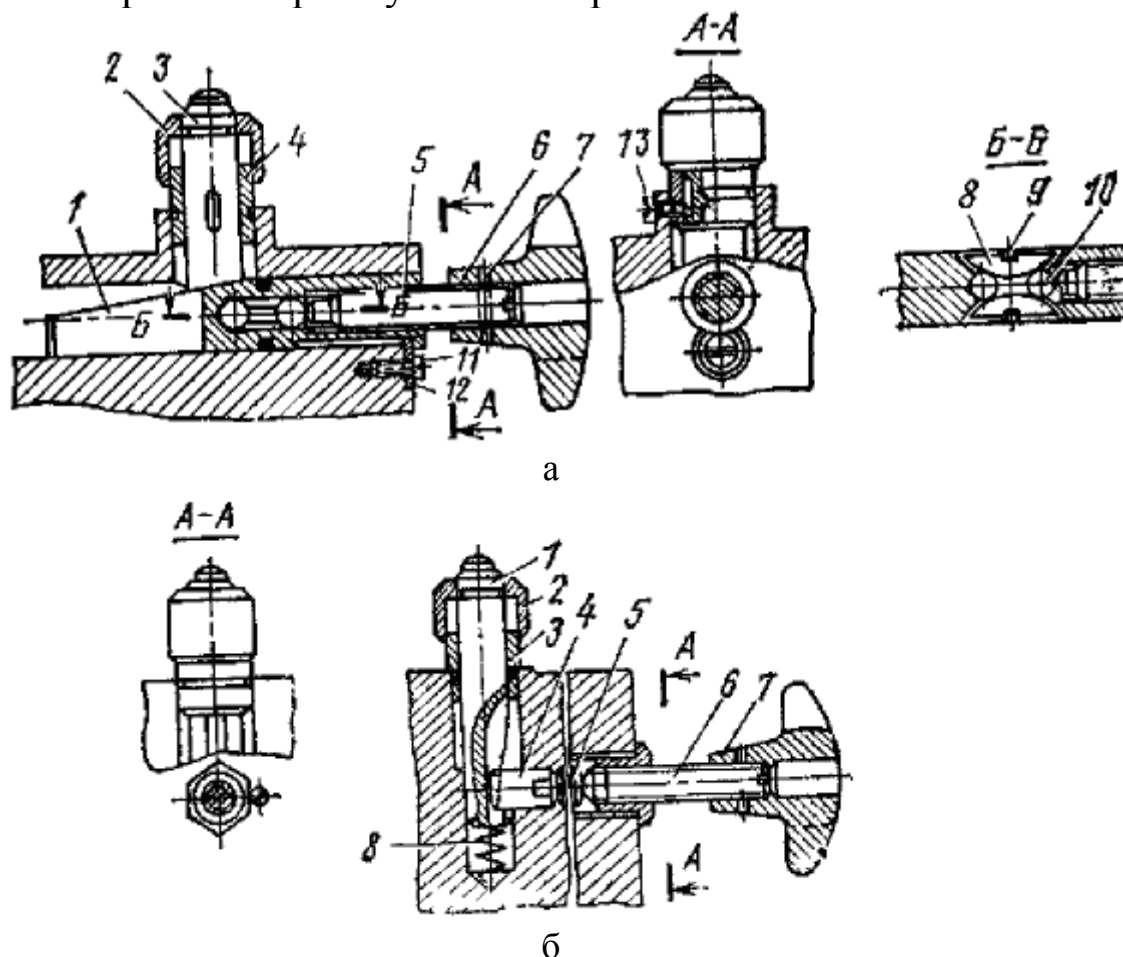


Рис. 1.22. Дополнительные опоры.

Дополнительная опора, показанная на рис. 1.22, б, приводится в действие пружиной. Эта опора стандартизирована (ГОСТ 13159-67). Здесь штырь 1 вместе с защитным колпаком 2 поднимается вверх (до соприкосновения с базой) с помощью пружины 8. В этом положении штырь 1 фиксируется поворотом звездочки 7 с винтом 6, вследствие

чего опора 5 вместе с клином 4 перемещается влево и стопорит штырь 1. Клин 4 не только стопорит штырь 1, но и, входя в паз штыря 1, препятствует его повороту. Для предохранения корпуса приспособления от износа предусмотрена втулка 3.

При всех рассмотренных способах базирования плоской главной базы погрешность должна определяться в направлении, перпендикулярном плоскости. Величина погрешности базирования зависит от состояния базы (обработана, не обработана). Для обработанных баз ее можно принимать равной нулю. Это допустимо, если обработанная база имеет малую неплоскостность, так как в этом случае плоскость базы всех заготовок будет совмещаться практически без погрешности с заданной плоскостью приспособления. При базировании необработанных баз возможна погрешность, возникающая вследствие того, что плоскость базы по отношению к заданной плоскости приспособления будет устанавливаться с перекосом из-за неровностей базы. Величина этого перекоса (угла отклонения плоскости базы от заданной плоскости приспособления) будет зависеть от высоты неровностей и расстояния между опорными точками. Зная величину неровности базы и расстояние между опорами, можно для любой точки базы определить погрешность ее базирования.

1.2.7. СПОСОБЫ БАЗИРОВАНИЯ ЗАГОТОВКИ С ГЛАВНОЙ БАЗОЙ, ИМЕЮЩЕЙ ФОРМУ НАРУЖНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Наружная цилиндрическая поверхность широко используется в качестве главной базы и наиболее часто - у заготовок типа валов, втулок и т. п. Осуществить базирование цилиндрической поверхности - значит совместить ее ось с какой-то заданной линией в приспособлении.

Применяются следующие способы базирования, различающиеся по точности, эксплуатационным удобствам и областям применения: в отверстие; с помощью двух полуотверстий; на призму; с помощью самоцентрирующего устройства.

Базирование с помощью отверстия (рис.1.23). В качестве опорного элемента при данном способе базирования чаще всего используется втулка 1, в отверстие которой заготовка 2 вставляется своей главной базой ГБ. Ось отверстия втулки располагается в приспособлении

соблениии в требуемом положении. Чтобы заготовку главной базой можно было вставить в отверстие втулки, необходимо предусматривать гарантированный зазор в соединении заготовка - втулка.

Примем следующие обозначения (рис.1.23, в): D_{min} - наименьший диаметр отверстия во втулке, мм; a_n - допуск на диаметр отверстия во втулке, мм; d_{max} - наибольший диаметр базы, мм; a - допуск на диаметр базы, мм.

При этих обозначениях диаметры базы и отверстия будут связаны зависимостью

$$D_{min} = d_{max} + \Delta,$$

где Δ - гарантированный зазор, мм.

С учетом гарантированного зазора, а также погрешностей изготовления базы и отверстия во втулке максимальный диаметральный зазор в соединении заготовка-втулка будет составлять:

$$S_{max} = a + \Delta + a_n.$$

В пределах этого зазора (рис. 1.23, а) возможно смещение оси базы относительно оси отверстия во втулке в любую сторону на величину, равную половине зазора $S_{max} / 2$.

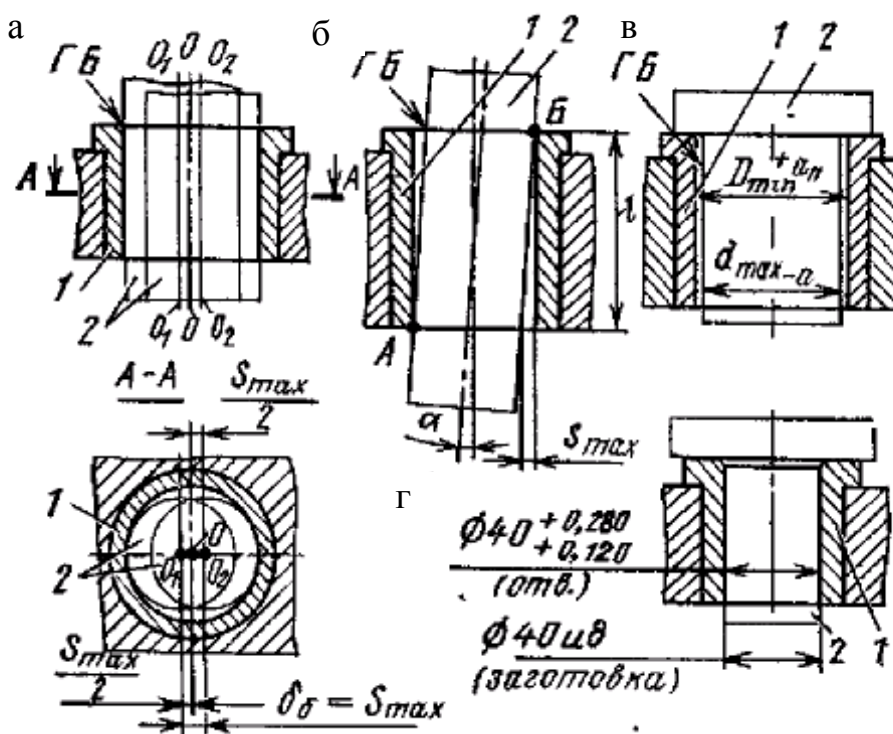


Рис. 1.23. Схема базирования заготовки с главной базой, имеющей форму цилиндрической наружной поверхности, в отверстие.

Наибольшее расстояние между крайними смещенными положениями оси базы – погрешность базирования оси базы ($\delta_{\bar{o}}$) – будет равна S_{max} , т.е. $\delta_{\bar{o}} = S_{max}$. Таким образом, погрешность базирования оси базы при данном способе базирования будет равна:

$$\delta_{\bar{o}} = a + \Delta + a_n. \quad (1.4)$$

Кроме того, в пределах зазора S_{max} возможен перекося оси базы. Угол поворота оси базы α будет определяться по формуле

$$\alpha = \text{arctg} \frac{S_{max}}{l}, \quad (1.5)$$

где S_{max} – максимальный зазор в соединении заготовка – втулка, мм; l – длина контакта базы с втулкой, мм.

Этот способ базирования используется для заготовок с базами, обработанными не грубее 9-го качества. При базах, обработанных грубее, будут большие зазоры S_{max} , а, следовательно, и значительные погрешности базирования оси базы ($\delta_{\bar{o}}$). Отверстие во втулке выполняется, как правило, по 7-9-му качествам.

Для обеспечения легкости установки базы в отверстие втулки гарантированный зазор следует выбирать в пределах одной из подвижных посадок 7-го или 9-го качеств.

На практике диаметр базы может быть выполнен с отклонениями основного вала или в системе отверстия с любыми отклонениями – от a до zc (от прессовой до широкоходовой посадки). В каждом конкретном случае следует подобрать такую комбинированную посадку для соединения заготовка – отверстие, при которой за счет отклонений отверстия обеспечивался бы гарантированный зазор Δ в рекомендуемых выше пределах.

На рис. 1.23, г приведен пример базирования заготовки 2 с базой $\text{Ø}40u8 = \text{Ø}40_{+0,06}^{+0,09}$ мм. В данном случае принята комбинированная посадка $\text{Ø}40 \frac{C11}{u8}$, при которой отклонения отверстия составляют $\text{Ø}40_{+0,120}^{+0,280}$ мм, а зазоры в посадке:

$$\Delta = 0,120 - 0,099 = 0,021 \text{ мм};$$

$$S_{max} = 0,280 - 0,060 = 0,220 \text{ мм}.$$

На сборочном чертеже (рис. 1.23, г) диаметр отверстия во втулке должен быть указан $\text{Ø}40C11$ или $\text{Ø}40_{+0,120}^{+0,280}$.

Погрешность базирования оси базы будет равна $\delta_{\delta} = S_{max} = 0,220$ мм.

Способ базирования с помощью отверстия находит широкое применение для заготовок с обработанными базами, имеющими точность не ниже указанной выше. Этот способ базирования не рекомендуется использовать для заготовок с протяженными базами, так как их трудно и долго вставлять в отверстие. При конструировании приспособления длину l втулки принимают не менее 1,5 диаметра базы, в противном случае может появиться значительный перекося оси базы α .

Базирование с помощью двух полуотверстий (рис. 1.24). В качестве опорного элемента при данном способе используются две полуштулки 1 и 2, из которых одна (1) жестко закрепляется на корпусе приспособления в требуемом положении, а вторая (2) подвижна и служит одновременно для базирования и закрепления заготовки.

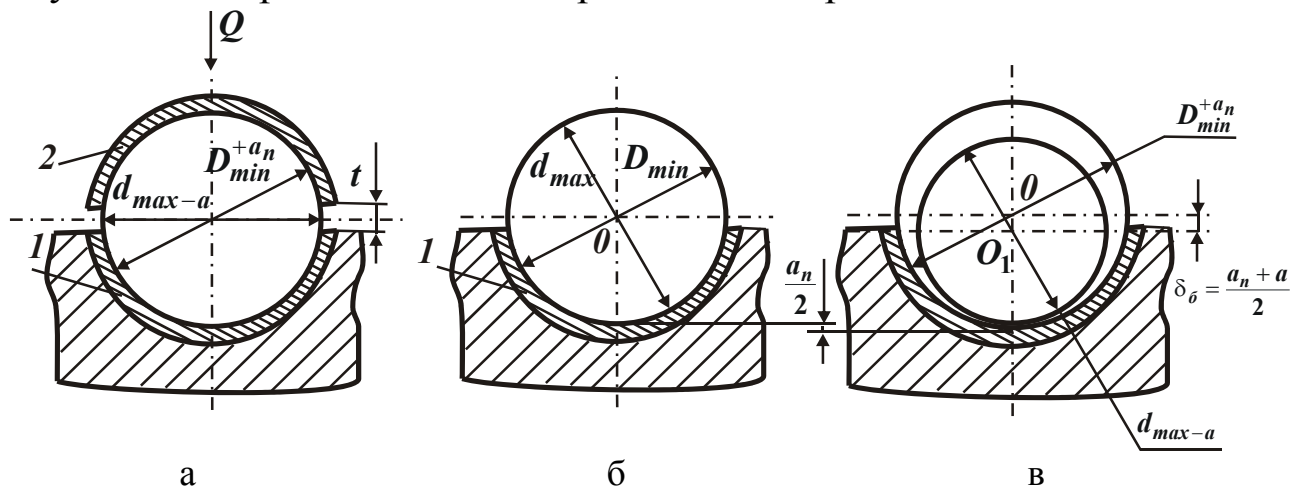


Рис. 1.24. Схема базирования заготовки с главной базой, имеющей вид цилиндрической наружной поверхности, с помощью двух полуотверстий.

На рис. 1.24, а схематично показано базирование заготовки с базой диаметром d_{max-a} с помощью полуштулок 1 и 2, имеющих отверстие диаметром $D_{min}^{+a_n}$. Отверстия в них растачиваются в приспособлении в сборе при зазоре t между полуштулками, который необходим для того, чтобы можно было закреплять заготовку, сближая подвижную полуштулку 2 с неподвижной 1. Благодаря тому, что полуштулки раскрываются, создаются удобства для установки заготовок с длинными базами и нет необходимости предусматривать гарантированный зазор между базой и отверстиями в полуштулках, поэтому при данном способе базирования $D_{min} = d_{max}$. Отверстия обычно растачиваются в полуштулках с отклонениями по Н7 или Н9.

При базировании ось базы совпадает с осью отверстия в полуштулке 1 только в том случае, когда действительный размер отверстия равен D_{min} , а базы – d_{max} . В остальных случаях вследствие погрешностей изготовления базы и отверстия в пределах допусков (a и a_n) ось базы смещается относительно оси отверстия. Наибольшее смещение имеет место тогда (рис. 1.24, в), когда и отверстие и база изготовлены с предельными отклонениями (a_n и a). В этом случае смещение оси равно $\frac{a + a_n}{2}$ и ось базы занимает положение O_1 . Максимальное смещение оси базы будет представлять собой погрешность базирования оси.

Следовательно,

$$\delta_{\sigma} = \frac{a + a_n}{2}.$$

Из сопоставлений формул (1.6) и (1.4) видно, что при рассматриваемом способе погрешность базирования оси базы примерно в два раза меньше, чем при базировании в отверстие. В связи с этим, несмотря на некоторую сложность конструкции приспособления, данный способ базирования применяется достаточно часто.

Полуштулки не стандартизованы; их конструкция соответствует конкретным условиям. Длина полуштулок выбирается равной $(1,0 \dots 1,5)D$, где D - номинальный диаметр базы в мм. При такой длине полуштулок базирование оси базы выполняется без перекоса. Перемещение полуштулки часто производится путём поворота её относительно оси, расположенной сбоку полуштулки в плоскости разреза.

Базирование на призму (рис. 1.25). Призма представляет собой деталь с двумя опорными поверхностями, расположенными под углом γ , равным 60, 90 и 120°. Чаще $\gamma = 90^\circ$. Заготовка базой D_a кладётся на призму 1. Как было показано выше (раздел 1.2.4), погрешность базирования оси базы зависит от направления: в направлении, перпендикулярном плоскости симметрии призмы, $\delta_{\sigma} = 0$; по оси симметрии призмы погрешность определяется формулой (1.2). Учитывая, что погрешность в направлении, перпендикулярном плоскости симметрии призмы, равна нулю, заготовке и призме стремятся придать такое взаимное расположение, при котором исходный размер $A \pm a$, заданный от оси базы, был бы направлен перпендикулярно плоскости симметрии призмы (рис. 1.25, а). Если же на операции вы-

держиваются два исходных размера (например, $10 \pm 0,05$ мм и $20 \pm 0,02$ мм), заданных от оси базы под углом 90° друг к другу, то заготовку располагают на призме так чтобы перпендикулярно плоскости симметрии призмы был направлен более точный размер ($10 \pm 0,05$ мм).

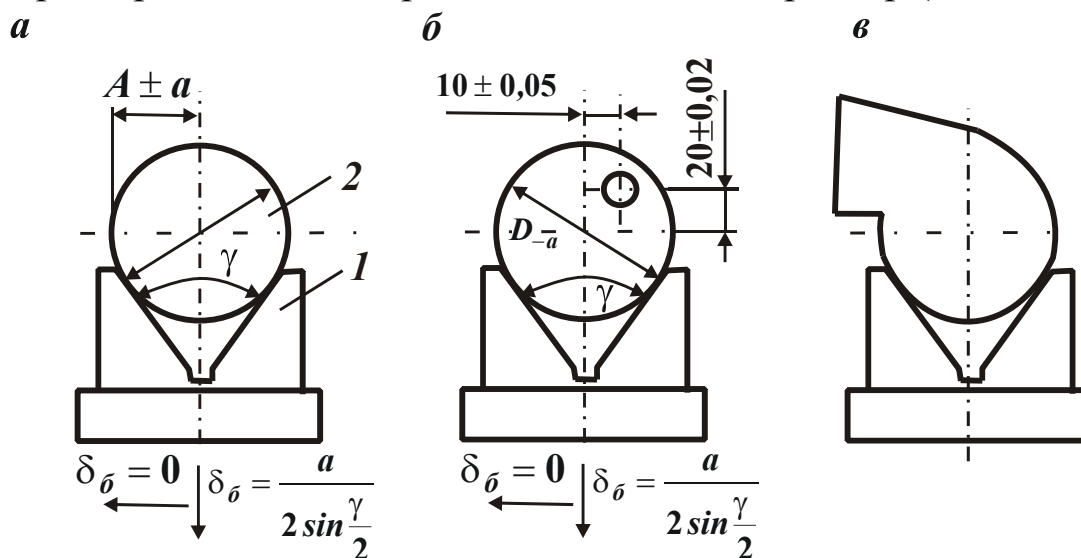


Рис. 1.25. Схема базирования заготовки с главной базой, имеющей вид цилиндрической наружной поверхности, на призму.

Данный способ отличается простотой выполнения базирования и универсальностью. Он может быть использован для базирования как обработанных, так и не обработанных баз; нет ограничений и по их длине. Его можно применять и для баз с неполной цилиндрической поверхностью (рис. 1.25, в).

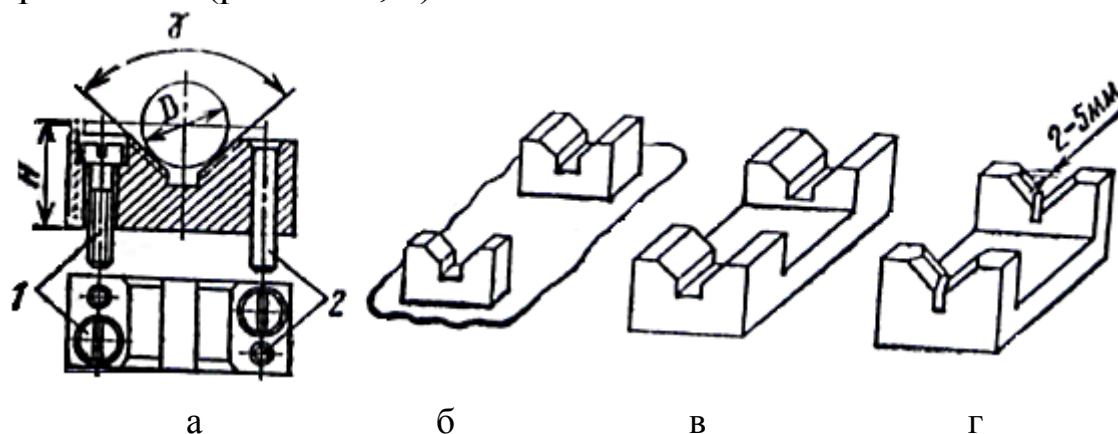


Рис. 1.26. Конструкции призм.

Конструкции призм разнообразны (рис. 1.26). Некоторые из них (рис. 1.26, а) стандартизованы (ГОСТ 12195-66).

При большой базе на корпусе приспособления приходится устанавливать две стандартные призмы, располагая их на некотором расстоянии друг от друга (рис. 2.19, б) таким образом, чтобы база ложилась на призме концами. Иногда применяют одну призму с двумя

призматическими участками (рис. 1.26, в).

Для базирования заготовок необработанной базой применяют призмы с узкими участками установочных поверхностей (рис. 1.26, г).

При сборке приспособлений призму необходимо устанавливать точно в заданном положении, для этого кроме крепежных винтов 1 предусматривается два штифта 2 (рис. 1.26, г). Размер H между основанием призмы и центром устанавливаемой базы с номинальным диаметром D используется для ориентации положения призмы на корпусе относительно элементов приспособления.

Благодаря указанным выше преимуществам этот способ базирования получил наиболее широкое распространение.

Базирование с помощью самоцентрирующего устройства.

Самоцентрирующим называется устройство, опорные поверхности которого (кулачки) подвижны и связаны между собой так, что могут одновременно и с равномерным перемещением сближаться к оси устройства или удаляться от нее, при этом кулачки надежно центрируют закрепляемую заготовку. Опорные поверхности самоцентрирующих устройств могут быть выполнены либо на кулачках (рис. 1.27, а, б), либо в виде сплошной цилиндрической поверхности тонкостенной втулки, упруго деформируемой при действии сил зажима (рис. 1.27, в).

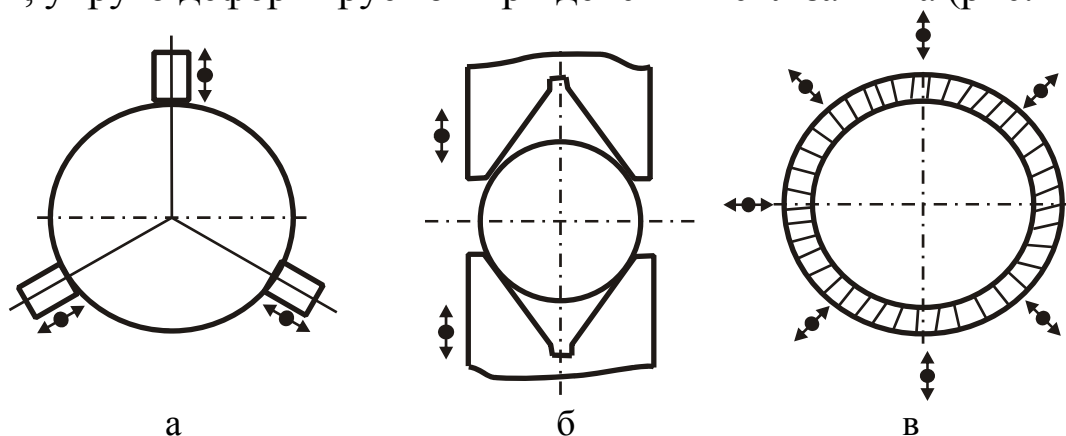


Рис. 1.27. Схема самоцентрирующих устройств: а - с тремя кулачками; б - с двумя призматическими кулачками; в - с тонкостенной упруго деформируемой втулкой.

Для перемещения опорных поверхностей в радиальном направлении служат различные механизмы, среди которых наибольшее распространение получили спирально-реечные, рычажные, клиновые, винтовые и механизмы с гидропластом. На основе этих механизмов созданы различные варианты самоцентрирующих патронов: трёхкулачковые, двухкулачковые, цанговые и гидропластные. Конструкции указанных патронов часто нормализуются в пределах отрасли.

Основное преимущество самоцентрирующих устройств состоит в том, что при установке в них заготовки погрешность базирования оси базы равна нулю. Эти устройства, кроме гидропластных и цанговых, могут быть использованы для базирования заготовок как с обработанной, так и с необработанной базой. При необработанной базе может иметь место погрешность базирования из-за погрешности формы базы (овальности). Устройство с гидропластом применяют только для установки заготовок с базовыми поверхностями, обработанными по 6-9-му квалитетам.

В заключении отметим, что при любом из рассматриваемых способов базирования заготовки наружной цилиндрической поверхностью она лишается четырех степеней свободы. У нее остаются две степени свободы: возможность перемещения вдоль оси и вращения относительно оси базы.

1.2.8. СПОСОБЫ БАЗИРОВАНИЯ ЗАГОТОВКИ С ГЛАВНОЙ БАЗОЙ, ИМЕЮЩЕЙ ФОРМУ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ОТВЕРСТИЯ

Цилиндрическое отверстие весьма часто принимается за главную базу. Осуществить базирование заготовки отверстием - это значит совместить его ось с какой-то заданной линией в приспособлении. Применяется несколько способов базирования. Наибольшее распространение получили: с помощью наружной цилиндрической поверхности; конической поверхности с малой конусностью и самоцентрирующего устройства.

Базирование с помощью наружной цилиндрической поверхности (рис. 1.28). При этом способе заготовка надевается отверстием ГБ на цилиндрическую оправку (палец), выполненную с такими отклонениями, чтобы в соединении заготовка - оправка обеспечивалась подвижная посадка 7-9-го квалитетов.

На схеме базирования (рис. 1.28, а) обозначено: D_{min}^{+a} - диаметр базы, мм; $d_{max} - a_n$ - диаметр оправки (пальца), мм; D_{min} - наименьший диаметр базы, мм; a - допуск на диаметр базы, мм; d_{max} - наибольший диаметр оправки (пальца), мм; a_n - допуск на диаметр оправки (пальца), мм;

Так как база надевается на оправку по подвижной посадке, то

$$d_{max} = D_{min} - \Delta,$$

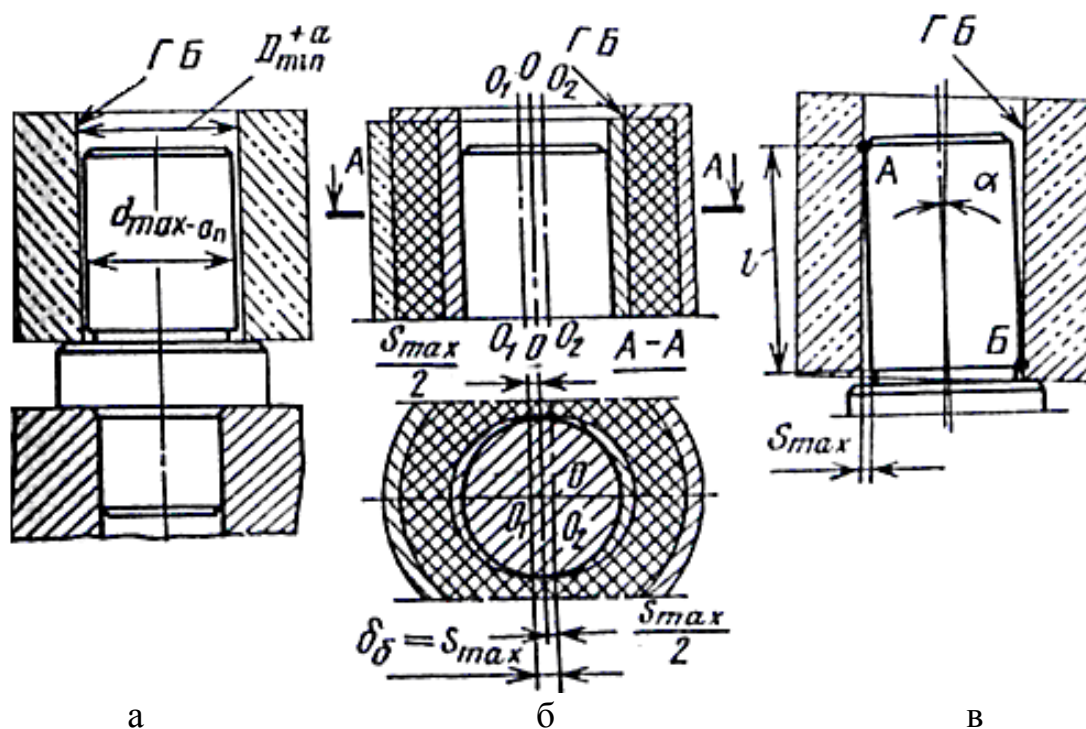


Рис. 1.28. Схема базирования с главной базой, имеющей форму цилиндрического отверстия, на цилиндрическую оправку (палец).

где Δ - гарантированный зазор, мм.

Максимальный зазор (S_{\max}) в соединении заготовка-оправка будет составлять

$$S_{\max} = a + \Delta + a_n.$$

При данном способе погрешность базирования оси базы будет равна максимальному зазору

$$\delta_6 = a + \Delta + a_n,$$

а перекос оси базы определяем из геометрических построений по формуле:

$$a = \operatorname{arctg} \frac{S_{\max}}{l},$$

где a - угол поворота оси базы, град; l - длина оправки (пальца), мм.

Чтобы перекос оси базы не превышал допустимых пределов, длину l оправки (пальца) принимают примерно $1,5D$, где D - номинальный диаметр базы, мм.

Рассматриваемый способ базирования применяется только для заготовок с базами, обработанными по 7-9-ому качеству, иначе получаются большие погрешности и перекос оси базы. Методика определения диаметра оправки аналогична рассмотренной выше. Иногда в целях повышения точности заготовку надевают на оправку не по по-

движной посадке, а по переходной или даже по неподвижной посадке (напрессовывают). В этом случае погрешность базирования оси базы равна нулю. Такой способ используется обычно при обработке заготовок на оправках, устанавливаемых в центрах станка.

Базирование с помощью конической поверхности с малой конусностью. При этом способе заготовка главной базой - отверстием одевается на оправку с малой конусностью $1:k$ (рис.1.29, а). В зависимости от действительного диаметра базы заготовка занимает соответствующее положение по длине оправки, при этом у каждой заготовки кромка отверстия всегда контактирует с поверхностью оправки, благодаря чему одна из точек оси базы совмещается с осью оправки. Чтобы полностью определить положение оси базы, заготовку надевают на оправку с натягом (ударами по торцу оправки или под прессом). В результате обеспечивается контакт базы с оправкой (рис.1.29, б) на длине l_k , достаточной для предотвращения перекоса оси базы. Таким образом, при данном способе ось базы совмещается с осью оправки без погрешности, т.е. $\delta_{\delta} = 0$.

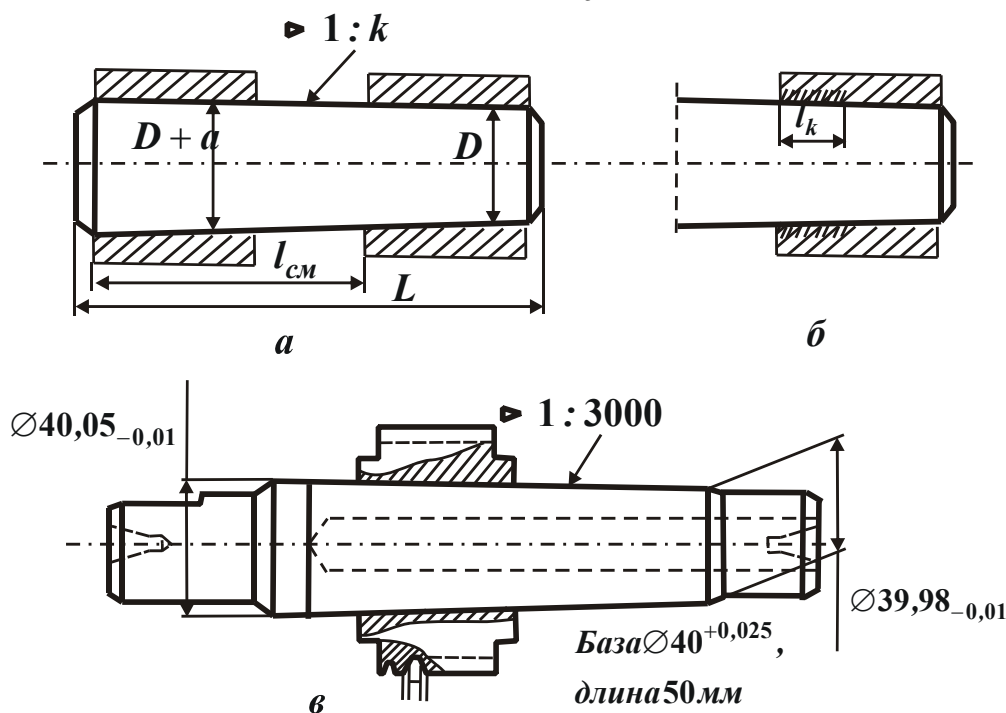


Рис. 1.29. Схема базирования заготовки с главной базой, имеющей вид цилиндрического отверстия, на наружную коническую поверхность.

Величина конусности $1:k$ принимается в пределах $1 : 3000 \dots 1:1000$. С уменьшением $1:k$ в указанных пределах увеличивается l_k , однако одновременно возрастает l_{cm} и общая длина оправки L , что нежелательно.

Данный способ базирования применяется только для заготовок с базами, обработанными не грубее 7-го качества, иначе оправки получатся недопустимо длинными. Благодаря простоте конструкции опорного элемента и высокой точности базирования оси базы ($\delta_{\delta} = 0$) он используется в инструментальном производстве при шлифовании наружной поверхности червяков, червячных фрез, долбяков и т.д. Из-за разницы в положениях заготовок по длине оправки этот способ базирования не применяют при обработке на настроенных станках.

Базирование с помощью самоцентрирующего устройства. Этот способ аналогичен рассмотренному методу базирования заготовок наружной цилиндрической поверхностью в самоцентрирующее

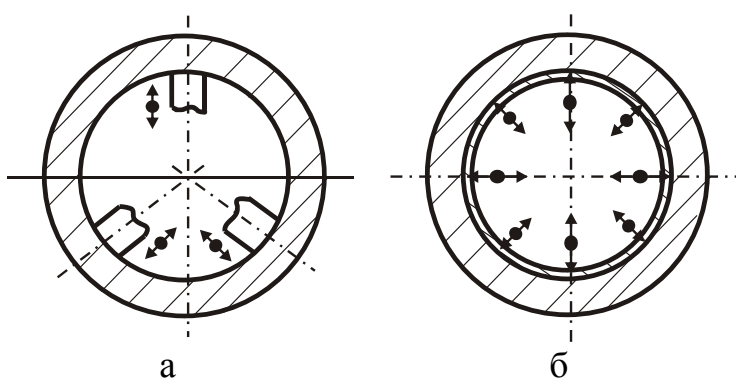


Рис. 1.30. Схема базирования заготовки с главной базой, имеющей вид цилиндрического отверстия, на самоцентрирующее устройство: а - с тремя кулачками; б - с тонкостенной втулкой, разжимаемой гидропластом, роликами и т.д.

устройство. Разница заключается лишь в том, что при базировании заготовки отверстием (рис.1.30) опорные поверхности удаляются от оси.

Для базирования заготовок отверстием могут быть использованы самоцентрирующие устройства тех же конструктивных типов, что и при установке заготовок цилиндрической наружной поверхностью.

Кроме изображённых на рис.1.30, а и б, применяются также самоцентрирующие устройства с тарельчатыми пружинами и с мембранами. При данном способе погрешность базирования оси базы равна нулю ($\delta_{\delta} = 0$).

В заключении отметим, что при любом из рассмотренных способов базирования заготовки отверстием она лишается четырех степеней свободы. У нее остаются две степени свободы: возможность перемещения вдоль оси и вращения относительно оси базы.

1.2.9. ПРАВИЛО БАЗИРОВАНИЯ ЗАГОТОВОК ГРУППОЙ БАЗ

Рассмотренные выше способы можно применять для базирования заготовок только главными базами и без корректировки нельзя

использовать для базирования дополнительными базами. Применение их в последнем случае без корректировки будет сопровождаться возникновением больших погрешностей базирования, а в ряде случаев может привести к тому, что отдельные заготовки из партии вообще не удастся поставить в приспособление. Поясним сказанное двумя примерами.

Пример 1: В заготовке (рис.1.31, а) требуется расточить отверстие диаметром d , обеспечив перпендикулярность оси отверстия к торцу Б в пределах 0,005:100 мм.

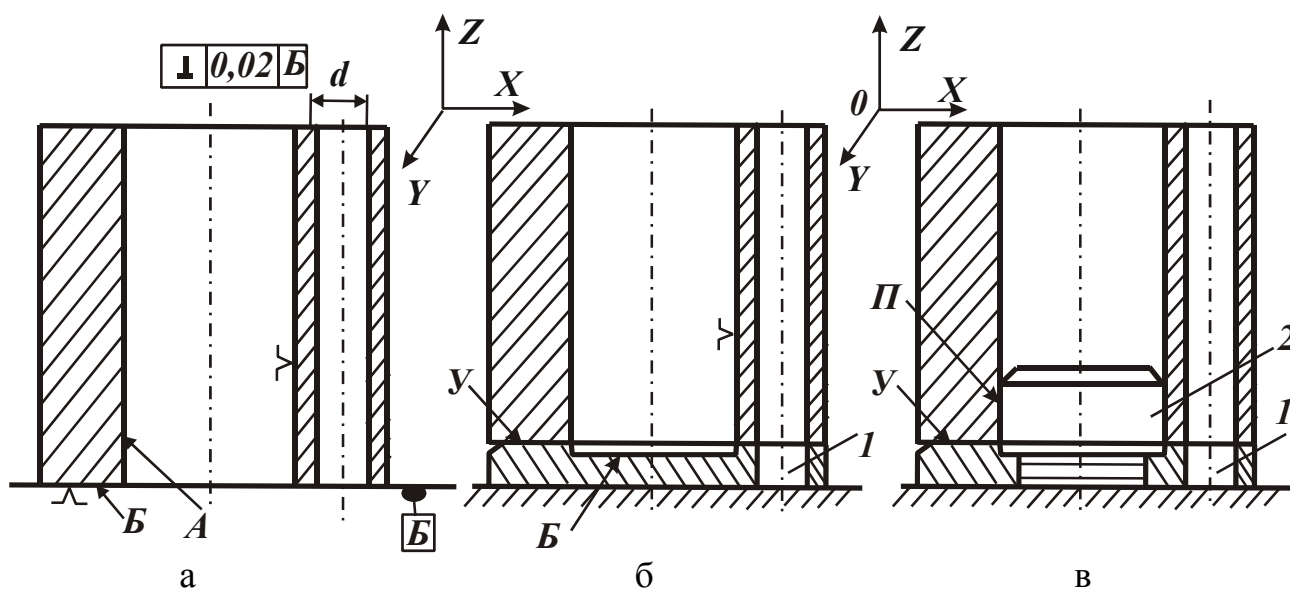


Рис. 1.31. Неправильное базирование заготовки двумя базами.

На рис.1.31, б показан случай, когда базирование каждой базы заготовки осуществляется способом, рекомендованным для главной базы соответствующей формы: торец Б - на кольцевую поверхность U бурта пальца 1, а отверстие А - на цилиндрическую поверхность Π того же пальца длиной, равной примерно двум диаметрам базы А.

Если бы обрабатываемые заготовки не имели погрешностей во взаимном расположении баз А и Б, т.е. если бы у всех заготовок партии ось отверстия А была строго перпендикулярна торцу Б, то подобное базирование заготовки было бы допустимо. Практически же почти каждая заготовка из партии будет иметь какое-то отклонение от перпендикулярности, и при ее базировании отверстием А на поверхность Π пальца 1 торец Б будет устанавливаться с перекосом относительно опорной поверхности U . В результате появится погрешность базирования торца Б заготовки, из-за которой при обработке отверстия диаметром d может быть не обеспечена требуемая перпендикулярность его оси торцу Б.

Пример 2. В кронштейне обрабатывается отверстие диаметром d , заданное размерами M и N (рис. 1.32, а).

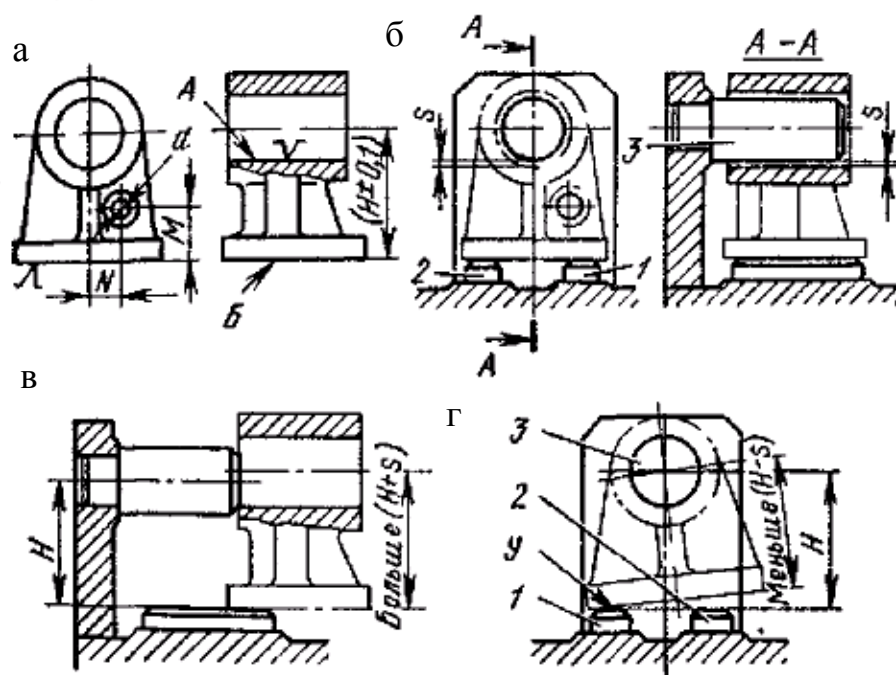


Рис. 1.32. Неправильное базирование кронштейна двумя базами.

Для каждой базы кронштейна выбран способ базирования, рекомендуемый для главной базы соответствующей формы: плоскость Б – на две опорные пластины 1 и 2, а отверстие А – на палец 3 длиной около двух его диаметров. Вследствие того, что расстояние H между базами у кронштейна может быть выполнено с отклонениями в пределах $\pm 0,1$ мм, а зазор s между стенками отверстия А и пальца 3 небольшой, ряд кронштейнов из партии с размером H в пределах допуска, но больше чем $(H + s)$, не удастся поставить в приспособление с рассматриваемым способом базирования. Заготовки же, имеющие расстояние между базами меньше, чем $(H - s)$, будучи надеты отверстием А на палец 3, могут занять в приспособлении такое положение, при котором плоскость Б кронштейна встанет с перекосом относительно опорной поверхности У пластин 1 и 2. При этом возникает погрешность базирования плоскости Б кронштейна, из-за которой могут быть не выдержаны исходные размеры M и N .

Таким образом, при базировании заготовок группой баз необходимо учитывать не только погрешность размера и формы каждой базы в отдельности, но и главным образом погрешности взаимного расположения баз: отклонения от перпендикулярности (рис.1.31, а) и параллельности (рис.1.32, а), отклонение размеров между базами (рис.1.32, а) и т.д.

Погрешности взаимного расположения баз можно не учитывать только при выборе способа базирования главной базы, так как её ориентирование осуществляется первой из группы баз. Способ же базирования дополнительных баз должен выбираться с учетом погрешностей взаимного расположения баз, при этом необходимо руководствоваться следующим правилом: при базировании заготовки группой баз ни один опорный элемент не должен лишать её тех степеней свободы, которых она уже лишена с помощью других опорных элементов.

Пользуясь этим правилом, разработку способа базирования заготовки группой баз необходимо вести в следующей последовательности.

1. Из группы баз выбрать главную (раздел 1.2.5).
2. Определить способ базирования главной базы данной формы (разделы 1.2.6-1.2.8).
3. Установить, каких степеней свободы будет лишена заготовка с помощью опорного элемента для базирования главной базы, какие степени свободы останутся.
4. Выбрать способ базирования дополнительной базы, при этом, согласно правилу, нельзя допускать, чтобы опорный элемент для базирования дополнительной базы дублировал функции, выполняемые элементом для базирования главной базы.
5. При базировании заготовок тремя базами определить способ базирования второй дополнительной базы, руководствуясь тем же правилом. Элемент для базирования второй дополнительной базы не должен дублировать функций, выполняемых элементами для базирования главной и первой дополнительной баз.

Часто удобен способ совместного базирования второй и третьей баз при рациональном распределении функций между базирующими их элементами.

Поясним применение правила базирования заготовок группой баз на примере базирования заготовки, показанной на рис.1.33, а.

Разработку способа базирования будем вести в соответствии с указанной выше последовательностью:

1. Выберем главную базу. Из двух баз (плоскость Б и отверстие А) за главную примем плоскость Б, потому что требуется обеспечить перпендикулярность оси обрабатываемого отверстия диаметром d к этой плоскости, и при базировании на плоскость Б заготовка будет занимать устойчивое положение.
2. Определим способ базирования главной базы – плоскости Б. Ис-

пользуем способ базирования на плоскость (рис.1.21, б). Так как база Б имеет форму кольца, опорный элемент также должен иметь опорную поверхность в виде кольца. Базирование главной базы показано на рис.1.33, б.

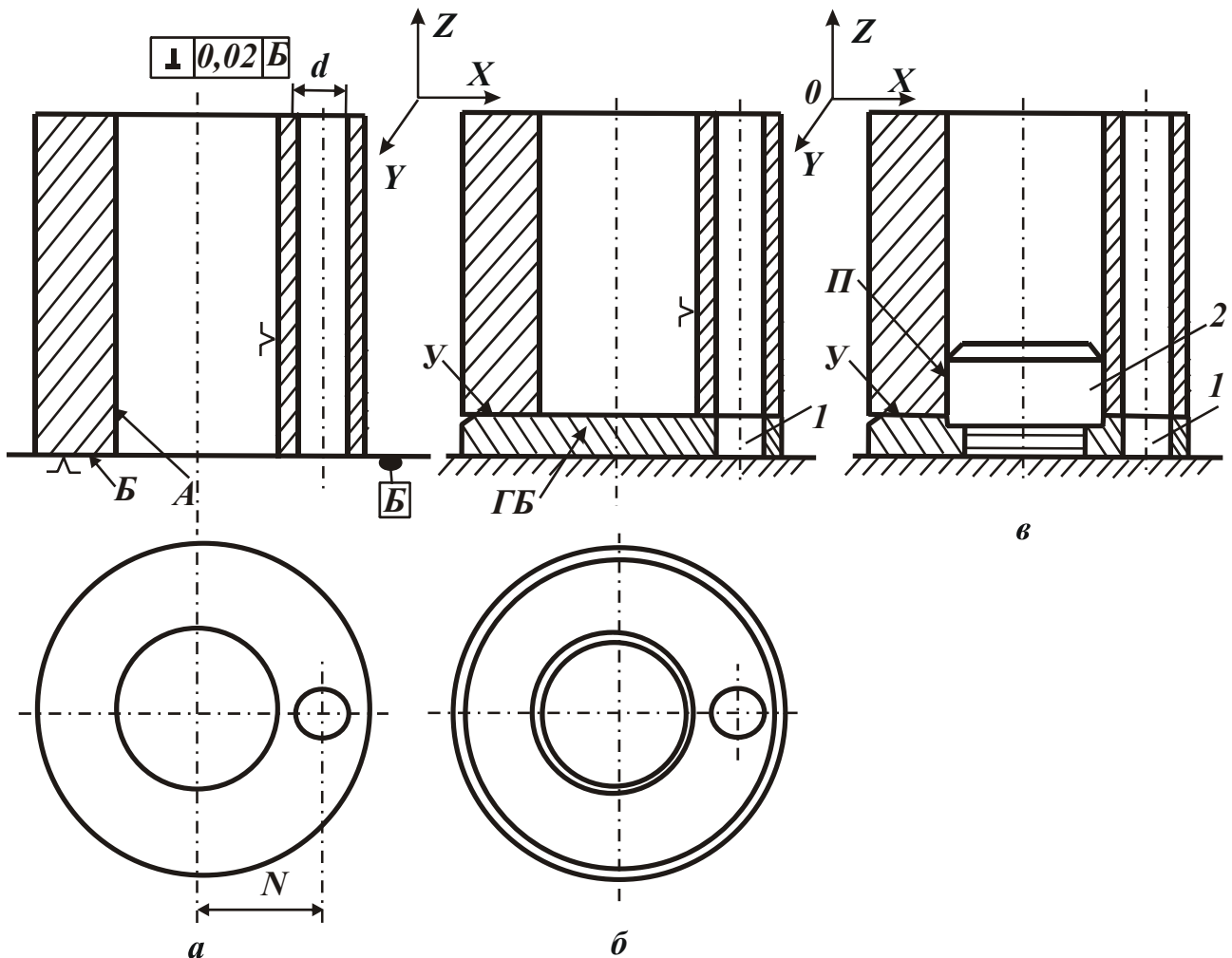


Рис. 1.33. Базирование заготовки в соответствии с правилом базирования группой баз.

3. Установим оставшиеся у заготовки степени свободы. В результате базирования главной базой заготовка лишается трех степеней свободы: перемещения по оси Z и вращения относительно осей X и Y . Следовательно, у неё остаются ещё три степени свободы: перемещение по осям X и Y , и вращение относительно оси Z .
4. Выберем способ базирования остальных баз. На рассматриваемой операции заготовка базируется двумя базами. Третья база не требуется, да и не представляется возможным её выбрать, так как у заготовки нет поверхности, которую можно было бы принять за третью базу. При базировании двумя базами у заготовки всегда остается одна степень свободы. Поэтому опорный элемент для

второй (дополнительной) базы (отверстия А) может и должен лишать заготовку только двух степеней свободы - ограничить перемещение по осям X и Y . Таким опорным элементом может быть цилиндрический палец 2 с короткой опорной поверхностью II (рис.1.33, в). Конструктивно вместо двух опорных элементов - кольца 1 и пальца 2 – можно выбрать один элемент - палец с буртом с теми же опорными поверхностями U и II .

Для отверстия А, являющегося дополнительной базой, длинный палец (рис.1.33, б) использовать нельзя, так как он лишает заготовку четырёх степеней свободы, вследствие чего будет иметь место недопустимое дублирование функций (лишение поворота относительно осей X и Y).

Поясним, какой палец нужно считать коротким, а какой длинным. Предположим, что заготовка (рис. 1.34, а) имеет две базы: плоскость Б и отверстие А диаметром D^{+a}_{min} .

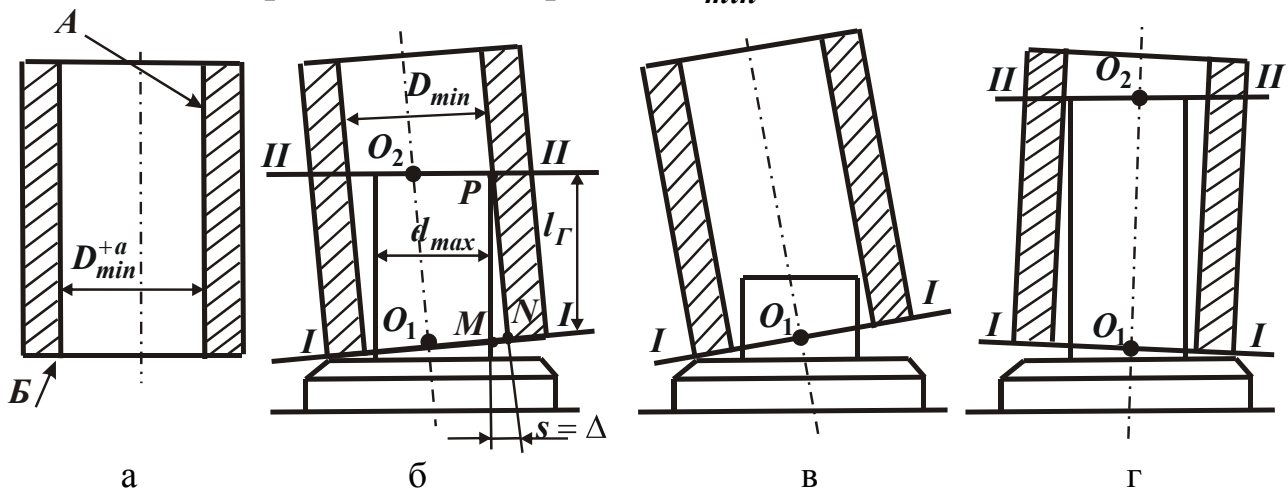


Рис. 1.34. Базирование заготовки на пальцы различной длины.

Допустимое отклонение от перпендикулярности оси отверстия А к торцу Б не более $n : 100$ мм. За главную базу примем торец Б, и базирование произведем на палец с буртом. Допустим, что палец изготовлен с максимальным диаметром d_{max} , а отверстие А – с минимальным диаметром D_{min} . В этом случае диаметральный зазор s , в соединении заготовка–палец будет минимальным и равен гарантированному зазору Δ (раздел 1.2.8).

Если при указанных условиях на палец надеть заготовку, имеющую ещё и наибольшее отклонение от перпендикулярности оси отверстия А к торцу Б ($n : 100$ мм), то при некоторой длине палец будет касаться стенок отверстия заготовки в двух сечениях I - I и II - II

(рис.1.34, б), но при этом не будет изменять её положение, достигнутое при базировании плоскостью на торец пальца. Длину пальца l_{Γ} будем называть граничной длиной, разделяющей пальцы на длинные и короткие.

При длине более l_{Γ} палец по-прежнему будет касаться стенок отверстия заготовки в двух сечениях, но при этом уже будет воздействовать на неё, поворачивая её и придавая оси отверстия соответствующее положение (рис.1.34, г). Палец длиной более l_{Γ} будет называться длинным. Он базирует ось отверстия в двух точках O_1 и O_2 лишая заготовку четырёх степеней свободы.

Палец длиной менее l_{Γ} будем называть коротким. Он базирует ось отверстия лишь в одной точке O_1 (рис.1.34, в) и лишает заготовку двух степеней свободы (перемещений по X и Y), так как контактирует с поверхностью отверстия лишь в одном сечении I - I.

В каждом конкретном случае всегда можно определить граничную длину пальца l_{Γ} из геометрических построений, пользуясь треугольником MNP (рис.1.34, б), в котором $MN = \Delta$, а $MP = l_{\Gamma}$. Зная отклонение от перпендикулярности оси отверстия к торцу заготовки ($n : 100$), можно написать $MN:MP = n : 100$, откуда

$$l_{\Gamma} = \frac{\Delta}{n} \cdot 100.$$

1.2.10. СПОСОБЫ БАЗИРОВАНИЯ ЗАГОТОВОК ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ БАЗАМИ

При базировании заготовок группой баз в качестве дополнительных баз используются те же (по форме) поверхности: плоскость, цилиндрическое отверстие и наружная цилиндрическая поверхность. Разработано несколько способов базирования заготовок этими базами.

Базирование заготовки дополнительной базой в виде плоскости. Способ базирования определяется главным образом тем, скольких степеней свободы следует лишить заготовку при базировании данной базой. Если заготовку требуется лишить одной степени свободы, то базирование плоскости выполняется на один опорный штырь (базирование плоскости В на один опорный штырь, рис.1.32, в). В данном случае плоская дополнительная база по терминологии, установленной ГОСТ 21.495-76, называется опорной. Если заготовку

необходимо лишить двух степеней свободы, то базирование производится либо на два опорных штыря (базирование плоскости на штыри 4 и 5 на рис.1.8, в), либо на опорную пластину (базирование плоскости А на рис.1.12, в). В этом случае база называется направляющей. Естественно, что базирование на опорную пластину допускается лишь для обработанной плоскости.

Следует отметить, что при любом из указанных способов каждый из опорных штырей может быть заменен одной сблокированной или плавающей опорой.

Базирование заготовки дополнительной базой в виде цилиндрического отверстия. Способ базирования определяется расположением осей отверстия по отношению к другим базам, уже получившим базирование. При этом форма других баз не имеет значения и может быть другой (плоскость, отверстие и т.д.). На практике наиболее часто встречаются три варианта расположения отверстия по отношению к другим базам.

Вариант 1. Ось отверстия перпендикулярна базе, уже получившей базирование. В качестве примера рассмотрим базирование заготовки двумя базами – плоскостью Б и отверстием А, ось которого перпендикулярна плоскости Б (рис.1.33). Такое сочетание баз весьма часто используется на практике для базирования заготовок не только двумя, но и тремя базами. Если в качестве главной базы принять плоскость, то отверстие будет дополнительной базой. Естественно, что главная база (плоскость) будет базироваться первой. Следовательно, при выборе способа базирования отверстия, оно должно рассматриваться как отверстие, ось которого перпендикулярна к базе, уже получившей базирование. Как было показано выше, для базирования отверстия в этом случае должен применяться короткий цилиндрический палец (палец 2 на рис.1.33, в).

Вариант 2. Ось отверстия параллельна базе, уже получившей базирование. Для базирования заготовки, приведенной на рис. 1.35, а, используется плоскость Б и отверстие А, ось которого параллельна плоскости Б, и расположена от нее на расстоянии $H \pm z$.

Такое сочетание баз применяется обычно при базировании заготовок тремя базами, при этом базы Б и А должны быть предварительно обработаны. У рассматриваемой заготовки третьей базой может служить задняя плоскость, перпендикулярная базе Б и оси отверстия А. При рассмотрении способа базирования для отверстия можно не учитывать третью базу, если она еще не получила ориентирования.

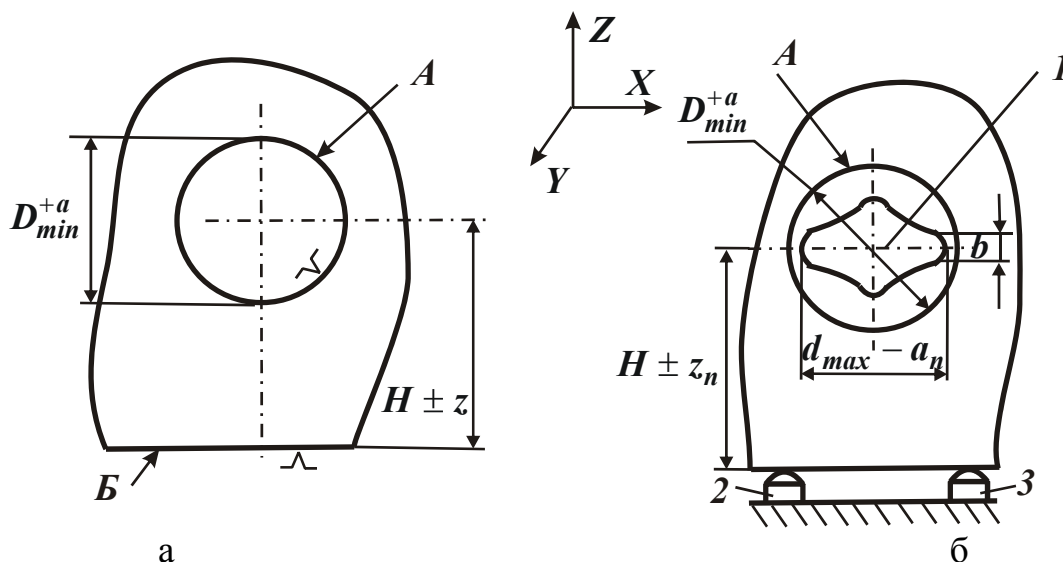


Рис. 1.35. Базирование заготовки плоскостью и отверстием, ось которого параллельна плоскости.

Допустим, что за главную базу принята плоскость Б, которой заготовка базируется на две опорные пластины 2 и 3 (рис.1.35, б). Тогда отверстие А будет дополнительной базой и его базирование будет производиться после того, как первая (главная) база уже получила базирование.

Выше было показано (раздел 1.2.9), что из-за погрешности взаимного расположения баз нельзя базировать заготовку отверстием, выполняющим роль дополнительной базы, на цилиндрический палец (рис.1.32). Чтобы было соблюдено правило базирования заготовок группой баз, необходимо вместо цилиндрического использовать срезанный палец 1 (рис.1.35, б). Он устанавливается в корпусе приспособления по посадке с натягом или переходной посадке на расстоянии $H \pm z_n$ от опорных пластин 2 и 3. Палец имеет ленточки шириной b , образованные цилиндрической поверхностью диаметром $d_{max} - a_n$. Этими ленточками он базирует ось отверстия в заготовке в направлении оси X .

Диаметр d_{max} и его отклонение a_n выбираются такими, чтобы между отверстием заготовки диаметром D_{min}^{+a} и пальцем 1 обеспечивалась подвижная посадка $g6$ или $f9$. В зависимости от конкретных условий базирования заготовки срезанный палец может быть длинным ($l \geq 1,5D$) или коротким ($l \leq D$).

Длинный палец лишает заготовку двух степеней свободы - перемещения по оси X и вращения относительно Z . Короткий палец лишает заготовку только одной степени свободы - перемещения по

оси X .

Благодаря тому, что срезанный палец (рис. 1.36, б) контактирует с отверстием только узкими ленточками, между пальцем и стенками отверстия в направлении размера H образуется значительное расстояние n , допускающее установку заготовок с погрешностями ($\pm z$) во взаимном расположении баз A и B (рис. 1.35, а). Величина расстояния n зависит от ширины ленточки b . В этом легкой убедиться, если проследить за изменением величины расстояния (зазора) между цилиндрическим пальцем (рис. 1.36, а) и отверстием 2 заготовки в направлении размера H в зависимости от положения места измерения зазора на пальце. В точке A , расположенной в диаметральной сечении II-II, это расстояние будет равно m . При приближении точки к диаметру I-I расстояние будет увеличиваться, и в точке B оно будет равно n . Легко видеть, что $n > m$. Величину n , а следовательно, ширину ленточки b у срезанного пальца 1 выбирают сообразно с величиной погрешности размера H у заготовки ($\pm z$) и приспособления ($\pm z_n$).

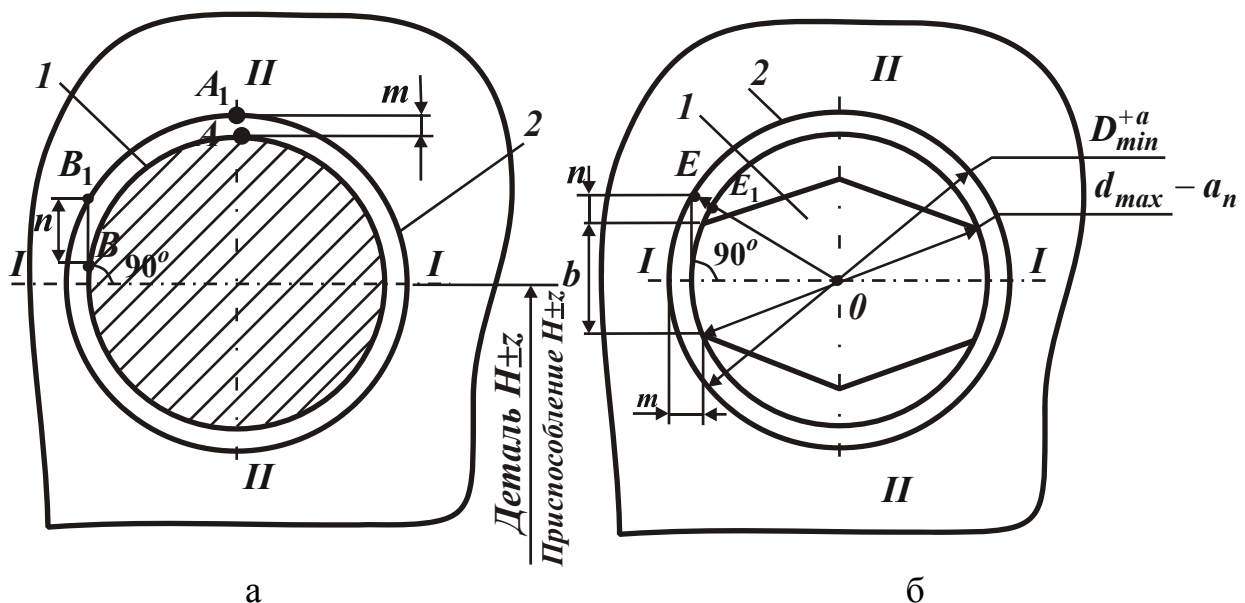


Рис. 1.36. Величина зазора в разных точках цилиндрического пальца (а) и схема к расчету ширины ленточки срезанного пальца (б).

Для обеспечения возможности надевания заготовки на палец при максимальных значениях указанных погрешностей необходимо соблюдать условие

$$n \geq z + z_n. \quad (1.7)$$

Для определения величины b можно воспользоваться неравенством (1.7) и геометрическими построениями, приведенными на рис. 1.36, б:

$$\text{из } \triangle OAB: OA^2 = OB^2 - AB^2;$$

$$\text{из } \triangle OAE : OA^2 = OE^2 - AE^2 .$$

Решая эти уравнения, получим

$$OB^2 - AB^2 = OE^2 - AE^2 .$$

Согласно принятым обозначениям (рис. 1.36, б):

$$OB = \frac{d_{max}}{2}; \quad AB = \frac{b}{2}; \quad OE = \frac{D_{min}}{2}; \quad AE = \frac{b}{2} + n ,$$

где d_{max} - наибольший диаметр срезанного пальца 1 (по цилиндрическим ленточкам); D_{min} - наименьший диаметр базы (отверстия 2 заготовки).

После подстановки этих значений в уравнение, соответствующих преобразований и пренебрежения величинами второго порядка малости (n^2) получим

$$b = \frac{(D_{min} + d_{max})(D_{min} - d_{max})}{4n} . \quad (1.8)$$

С достаточной точностью можно принять

$$(D_{min} + d_{max} = 2D_{min}) .$$

В свою очередь, $D_{min} - d_{max} = \Delta$, где Δ - гарантированный диаметральный зазор в соединении заготовка – срезанный палец (по ленточкам). Подставив эти значения в уравнение (1.8), будем иметь

$$b = \frac{D_{min}\Delta}{2n} = \frac{D_{min}\Delta}{2(z + z_n)} , \quad (1.9)$$

где b - ширина ленточки срезанного пальца при базировании заготовки на плоскость и отверстие, мм.

Рассмотренный способ базирования отверстия применим лишь при малых отклонениях $\pm z$ размера Н у заготовки, так как при больших отклонениях ширина ленточки получается настолько незначительной, что использовать срезанный палец с такой ленточкой нельзя из-за её быстрого износа.

Рассмотрим еще один пример - базирование заготовки 2 двумя отверстиями А и Б с параллельными осями (рис. 1.37).

Сочетание двух отверстий с параллельными осями чрезвычайно часто применяется в качестве баз при базировании заготовки тремя базами. Третьей базой чаще всего служит плоскость, перпендикулярная осям 1 отверстий А и Б. При этом главной базой может быть либо плоскость, либо одно из отверстий.

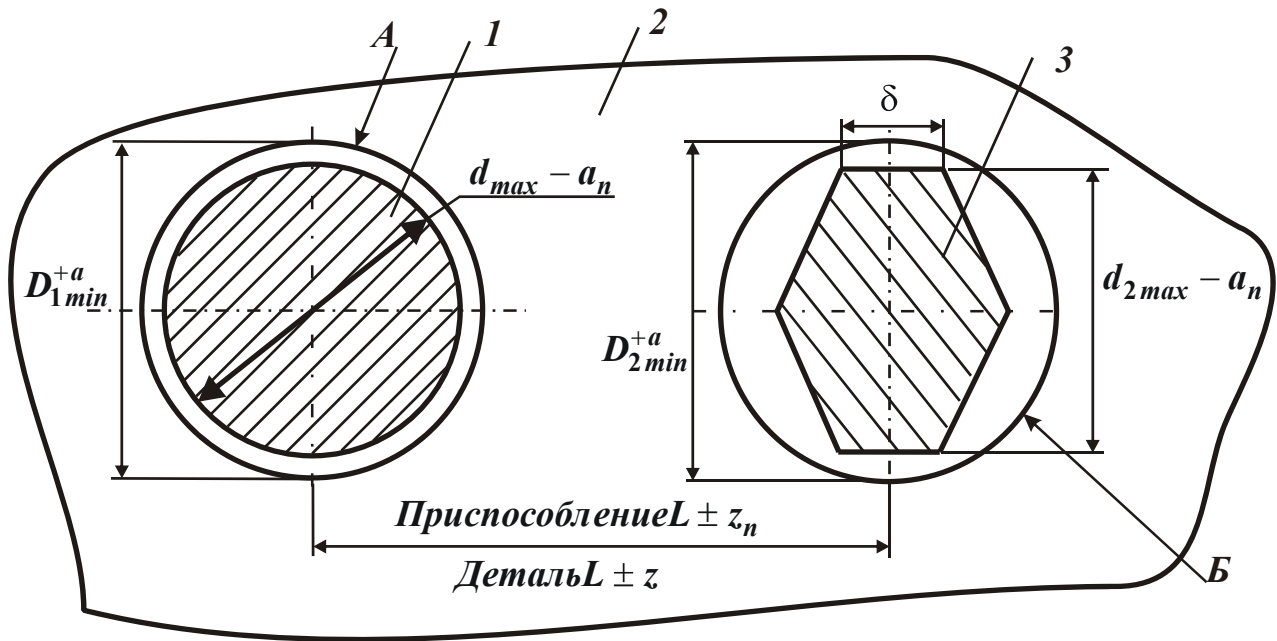


Рис. 1.37. Базирование заготовки двумя отверстиями с параллельными осями.

Рассмотрим случай, когда за главную базу принято одно из отверстий - отверстие А. Допустим, заготовка 2 базируется этим отверстием на длинный цилиндрический палец 1. Тогда отверстие Б будет дополнительной базой и его ось будет параллельна другой базе (отверстию А), уже получившей базирование.

Условие возможности надевания заготовки 2 на пальцы 1 и 3 будет определяться неравенством:

$$n \geq z + z_n - \frac{\Delta_u}{2}, \quad (1.10)$$

где n - зазор между отверстием Б и срезанным пальцем 3 в направлении размера L , мм; z - наибольшее отклонение расстояния L между осями отверстий А и Б у заготовки, мм; z_n - наибольшее отклонение расстояния L между осями пальцев 1 и 3 в приспособлении, мм; Δ_u - гарантированный зазор (диаметральный) между отверстием А и цилиндрическим пальцем, мм.

Подставив эти значения в формулу (1.9), получим

$$b = \frac{D_{2min} \Delta}{2(z + z_n) - \Delta_u}, \quad (2.11)$$

где b - ширина ленточки срезанного пальца при базировании заготовки на два отверстия с параллельными осями, мм; D_{2min} - диаметр отверстия, надеваемого на срезанный палец, мм; Δ - диаметральный зазор между отверстием заготовки и срезанным пальцем, мм.

Данный способ базирования также применим только при малых

погрешностях ($\pm z$) размера L у заготовки.

Вариант 3. Ось отверстия перпендикулярна одной базе, получившей базирование, и одновременно параллельна другой базе, также получившей базирование. Такой случай имеет место при установке заготовок тремя базами при следующих сочетаниях баз: две плоскости и отверстие; плоскость и два отверстия.

В качестве примера рассмотрим базирование заготовки 2 (рис. 1.37), имеющей три базы - плоскость и два отверстия А и Б с параллельными осями. Допустим, что плоскость (задняя, перпендикулярная осям отверстий А и Б) принята за главную базу и установлена на две опорные пластины (на рисунке не показаны). Тогда базирование первой дополнительной базы - отверстия А - следует производить по варианту 1 - на короткий цилиндрический палец, так как ось этого отверстия перпендикулярна плоскости, уже получившей базирование (на две пластины). А вторую дополнительную базу - отверстие Б - надо базировать одновременно по вариантам 1 и 2. При варианте 1 палец 3 должен быть коротким цилиндрическим, а при варианте 2 он должен быть ещё и срезанным, так как ось этого отверстия Б одновременно перпендикулярна плоскости и параллельна оси первого отверстия А. Причем обе базы уже получили базирование к моменту выбора способа базирования для отверстия Б.

В заключение можно сформулировать правила базирования заготовки дополнительной базой, имеющей форму отверстия. Заготовку следует базировать:

- 1) на короткий цилиндрический палец, если ось отверстия перпендикулярна базе, уже получившей базирование;
- 2) на срезанный палец, если ось отверстия параллельна базе, получившей базирование;
- 3) на короткий срезанный палец, если ось отверстия одновременно перпендикулярна одной и параллельна другой базе, уже получившим базирование.

При этом по пункту 2 срезанный палец может быть либо длинным, либо коротким. Длина его выбирается с учетом конкретных условий базирования (вариант 2).

Установочные пальцы, применяющиеся для базирования в рассмотренных случаях, стандартизированы (рис. 1.38).

Конструкция коротких цилиндрических пальцев, определена ГОСТ 12209–66, а коротких срезанных - ГОСТ 12210–66. Следует иметь в виду, что последним ГОСТом установлена также ширина

ленточки *b*. Она зависит от диаметра *D* цилиндрического пальца и принята для диаметров от 4 до 6 мм - 1 мм, свыше 6 до 10 мм - 2 мм, свыше 10 до 32 мм - 3 мм, свыше 32 до 40 мм - 4 мм, свыше 40 до 50 мм - 5 мм [46].

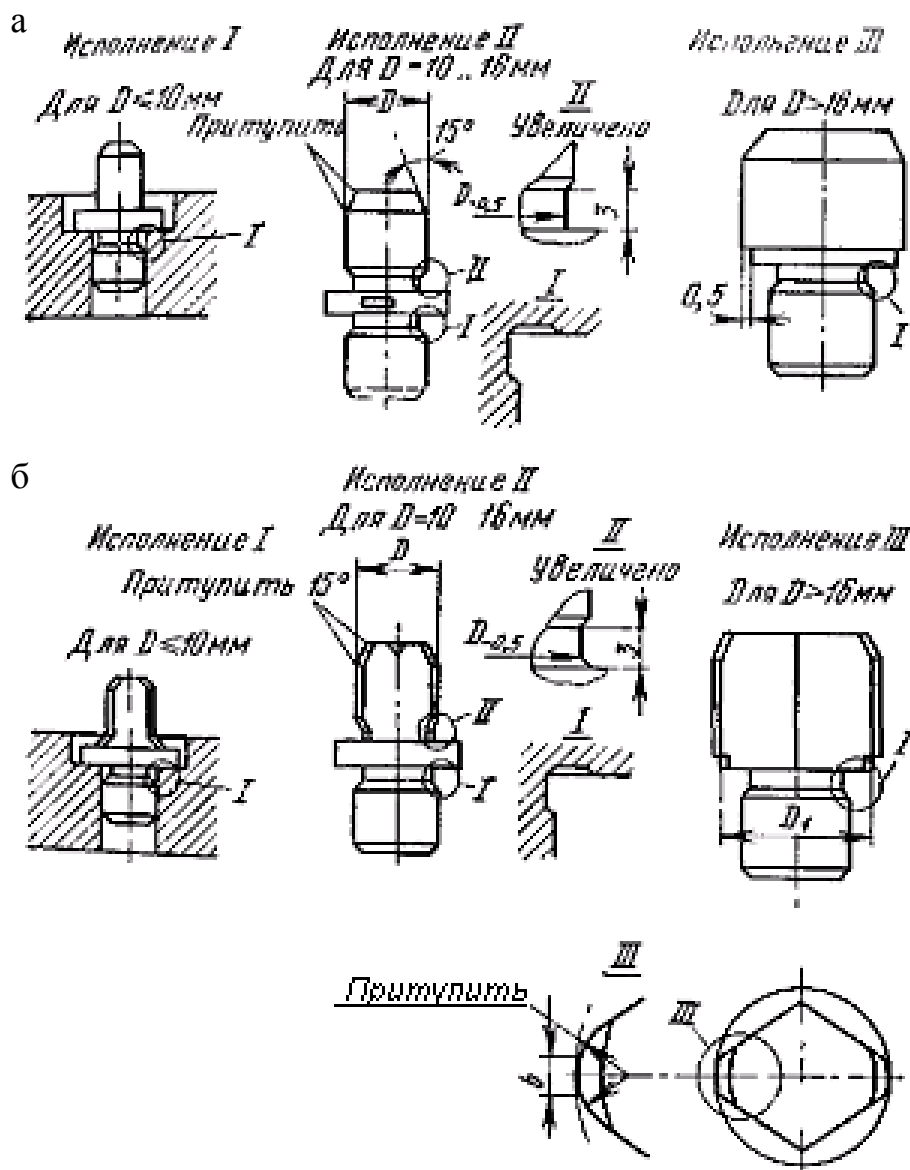


Рис. 1.38. Установочные пальцы: а - цилиндрические; б - срезанные.

Поэтому ширину ленточки, полученную путем расчёта по формуле (1.9) или (1.11), необходимо сопоставить с её шириной, установленной ГОСТом для срезанного пальца данного диаметра. Определенная расчетом ширина должна быть большей, чем установлено ГОСТом. Если она получилась меньше (даже при посадке *f9*, т. е. при наибольшем зазоре Δ), то данный способ базирования либо нельзя применять, либо следует уменьшить отклонения $\pm z$ и $\pm z_n$. При этом необходимо помнить, что уменьшение отклонений $\pm z$ ведет к удорожанию обработки заготовки на операции, где выдерживается размер

H или L , а уменьшение отклонений $\pm z_n$ - к удорожанию изготовления приспособления. Возможно также увеличение зазоров Δ и Δ_u , однако это связано с повышением погрешности базирования, так как увеличиваются перемещения и угол поворота при базировании.

Базирование заготовки дополнительной базой в виде наружной цилиндрической поверхности. Этот способ определяется расположением оси наружной поверхности по отношению к другим базам любой формы, уже получившим базирование. На практике встречаются три варианта расположения оси цилиндрической поверхности по отношению к другим базам.

Вариант 1. Ось наружной цилиндрической поверхности параллельна базе, уже получившей базирование. В качестве примера рассмотрим базирование заготовки 2 двумя базами - плоскостью Б и наружной цилиндрической поверхностью А, ось которой параллельна плоскости Б (рис. 1.39).

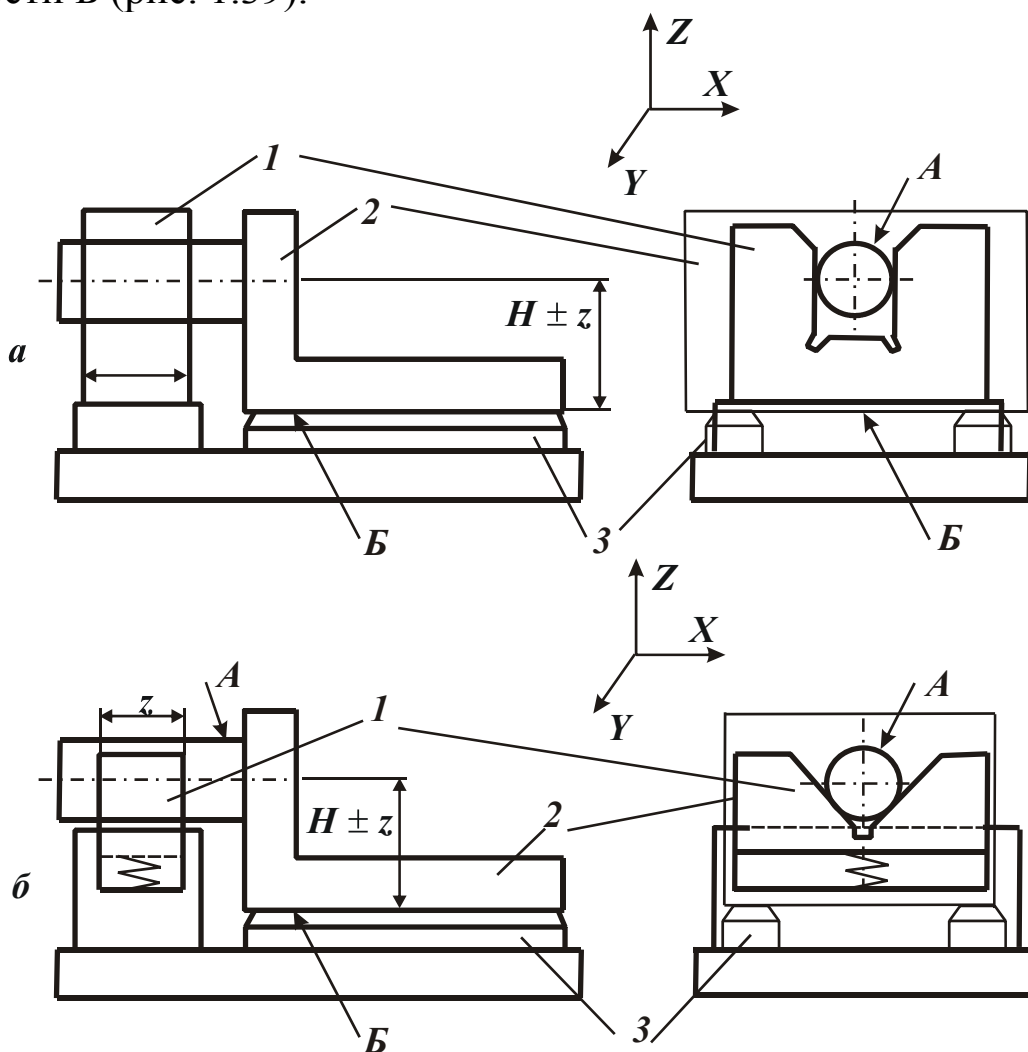


Рис. 1.39. Способы базирования заготовки дополнительной базой в виде наружной цилиндрической поверхности, ось которой параллельна базе, уже получившей базирование.

Если в качестве главной базы принять плоскость, то наружная цилиндрическая поверхность A будет дополнительной базой. Главная база базируется первой. Следовательно, при выборе способа базирования наружной цилиндрической поверхности она должна рассматриваться как дополнительная база, ось которой параллельна базе, уже получившей базирование. На практике встречаются два способа базирования такой базы: с помощью паза (рис. 1.39, а) и с помощью подвижной призмы (рис. 1.39, б). При каждом из этих способов учитывается наличие у заготовки погрешности $\pm z$ во взаимном расположении баз (погрешность размера H), а используемый для базирования опорный элемент 1 не дублирует функций, выполняемых опорными пластинами 3 (не устраняет перемещение по оси Z и не лишает поворота относительно осей X и Y). Чтобы не лишать заготовку 2 перемещения по оси Z , опорный элемент 1 по рис. 1.39, а имеет паз, направленный по оси Z , а элемент 1 (рис. 1.39, б) подвижен по оси Z .

Длина l опорного элемента 1 в направлении оси базы выбирается в зависимости от конкретных условий. Если при базировании наружной цилиндрической поверхностью заготовку необходимо лишить двух степеней свободы (перемещения по X и поворота относительно Z), то длина l должна быть принята не менее $1,5 D$, где D - номинальный диаметр базы. Опорный элемент с такой длиной l в дальнейшем будем называть длинным. Если при базировании рассматриваемой базой заготовку нужно лишить только одной степени свободы (перемещения по оси X), то l должна быть значительно меньше D - в пределах 3...10 мм. Опорный элемент с такой длиной будем называть коротким. Выбирая длину l короткого элемента, следует иметь в виду, что с уменьшением l увеличивается износ опорных поверхностей.

Области применения рассмотренных способов базирования определяются состоянием поверхности базы (наружной цилиндрической поверхности). С помощью подвижной призмы (рис. 1.39, б) можно осуществлять базирование как обработанных, так и необработанных баз. В последнем случае следует только убрать из контакта с базой среднюю часть поверхности опорного элемента подобно тому, как это сделано на рис. 1.26, в и г. С помощью паза можно базировать только обработанные базы, причем не грубее 9-го качества, иначе будут получаться) большие погрешности в направлении оси X (рис. 1.39, а).

Посадка в соединении паз - заготовка выбирается с гарантированным зазором. Методика выбора посадки такая же, как и при бази-

ровании главной базы в виде наружной цилиндрической поверхности в отверстие (раздел 1.2.7).

Вариант 2. Ось наружной цилиндрической поверхности перпендикулярна базе, уже получившей базирование. Заготовка 2, показанная на рис. 1.40, имеет две базы: плоскость Б и наружную цилиндрическую поверхность А, ось которой перпендикулярна плоскости Б.

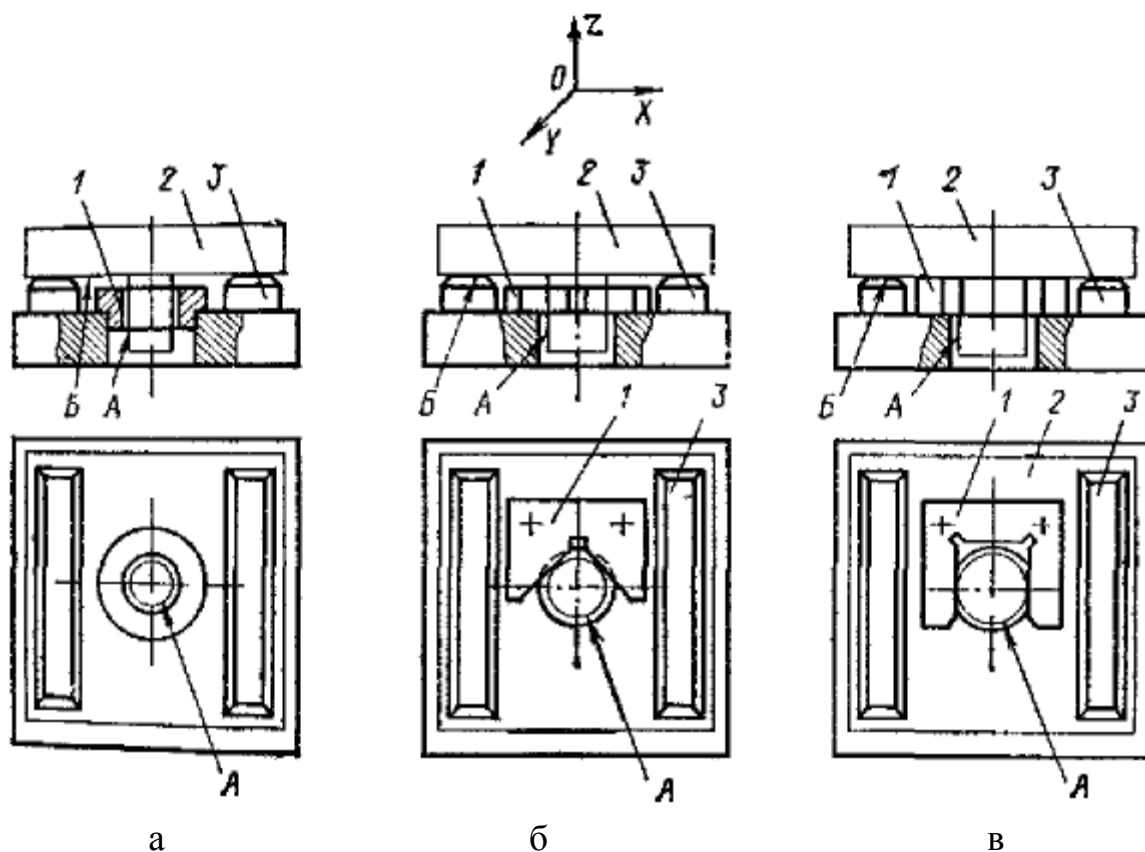


Рис. 1.40. Способы базирования заготовки дополнительной базой в виде наружной цилиндрической поверхности, ось которой перпендикулярна базе, уже получившей базирование.

Допустим, что за главную базу принята плоскость Б, базирование которой выполняется на две опорные пластины 3. Тогда наружная цилиндрическая поверхность А будет дополнительной базой, ось которой перпендикулярна к базе, уже получившей базирование. На практике встречаются три способа базирования такой базы: в короткое отверстие (рис. 1.40, а), на короткую призму (рис. 1.40, б) и с помощью короткого паза (рис. 1.40, в). Приведенные иллюстрации этих способов базирования дают представление о них и не нуждаются в пояснениях. Отметим лишь, что при базировании в отверстие (рис. 1.40, а) и с помощью призмы 1 (рис. 1.40, б) заготовка лишается двух степеней свободы - перемещений по осям X и Y, а при базировании с

помощью паза 1 (рис. 1.39, в) - одной степени свободы - перемещения по оси X . С помощью призмы 1 (рис. 1.40, б) можно базировать как обработанные, так и необработанные базы. В отверстие 1 (рис. 1.39, а) и с помощью паза 1 (рис. 1.40, в) следует базировать только обработанные базы, причем обработанные не грубее 9-го качества.

Вариант 3. Ось наружной цилиндрической поверхности параллельна одной базе, уже получившей базирование, и перпендикулярна другой базе, также получившей базирование. Этот вариант применяется при базировании заготовки тремя базами. В качестве примера рассмотрим заготовку 4 (рис. 1.41), у которой базами служат две плоскости B и B и наружная цилиндрическая поверхность A .

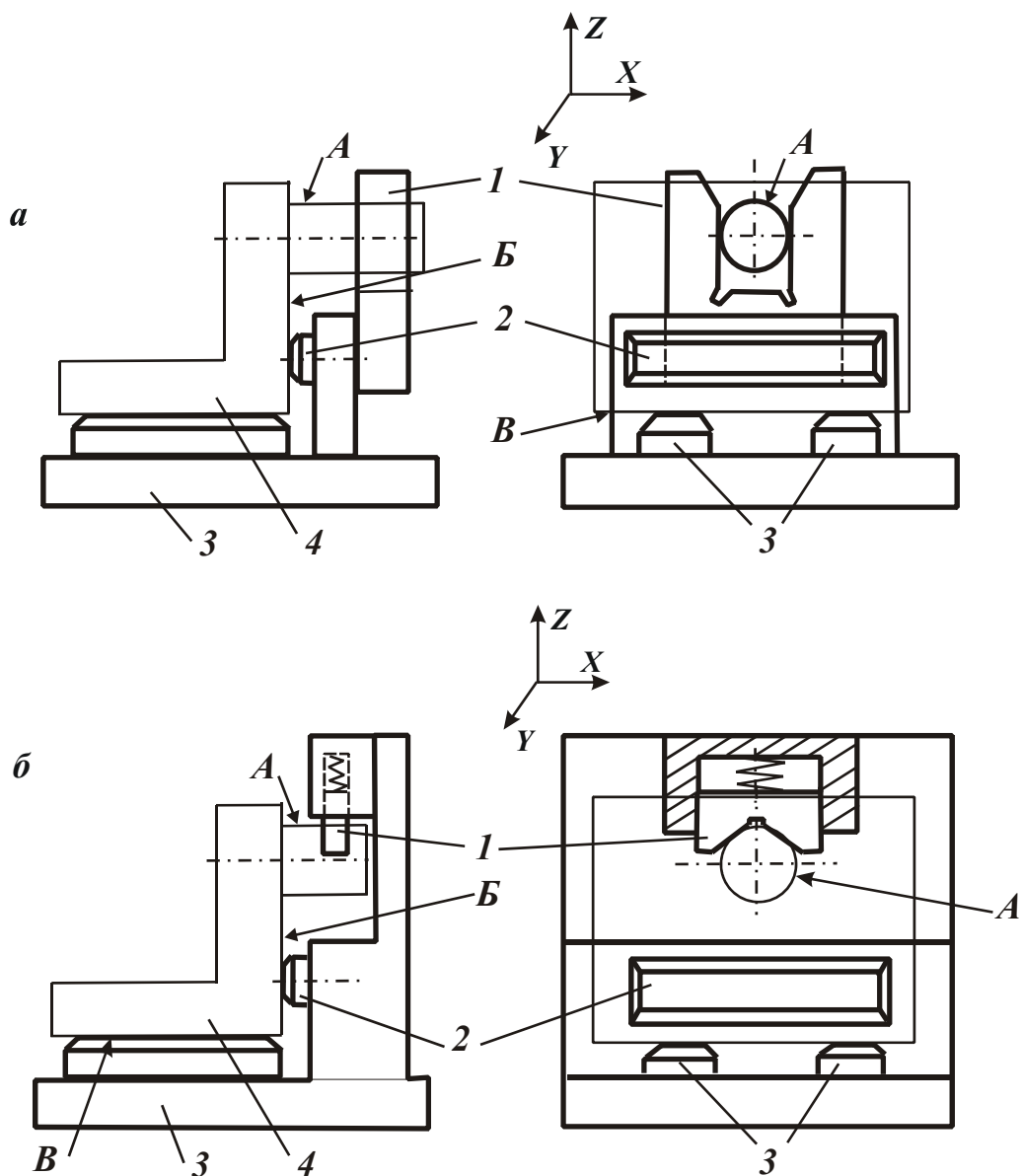


Рис. 1.41. Способы базирования заготовки дополнительной базой в виде наружной цилиндрической поверхности, ось которой параллельна одной и перпендикулярна другой базе, уже получившей базирование.

Допустим, что обе плоскости уже получили базирование: плоскость В как главная база - на две опорные пластины 3, а плоскость Б - на пластину 2. Тогда наружная цилиндрическая поверхность А оказывается перпендикулярной к одной и параллельна к другой базе, уже получившей базирование.

На практике в подобном случае применяют два способа базирования: с помощью короткого паза 1 (рис. 1.41, а) и с помощью короткой подвижной призмы 1 (рис. 1.41, б). При том и другом способе базирования заготовка с помощью опорного элемента 1 лишается одной (последней) степени свободы - перемещения по оси Х. С использованием паза базируются только обработанные базы, а с помощью подвижной призмы - как обработанные, так и необработанные.

1.2.11. ПРИМЕРЫ БАЗИРОВАНИЯ ЗАГОТОВОК ГРУППОЙ БАЗ

Базирование заготовки двумя базами. В этом случае заготовка, как правило, лишается только пяти степеней свободы. Опорный элемент, который должен базировать вторую базу, может лишать заготовку только $(5 - m)$ степеней свободы (где m - количество степеней свободы), которых лишается заготовка при базировании, главной базой. Например, если при базировании главной базой заготовка оказалась лишенной четырех степеней свободы, то опорный элемент для второй (дополнительной) базы может и должен лишать заготовку только одной степени свободы.

Рассмотрим несколько конкретных примеров.

Пример 1. Для обработки отверстий диаметром d заготовка базируется плоскостью и отверстием, перпендикулярным плоскости; обе базы обработаны (рис. 1.42, а).

Если требования параллельности осей отверстий диаметрами D_2 и d специально не оговорены, то при $l: D_1 < 1$ и достаточном диаметре D_1 за главную базу предпочтительнее принять плоскость Б, а при $l: D_1 > 1$ - отверстие А.

Если за главную базу принимается плоскость Б, то заготовка ставится этой плоскостью на кольцевую поверхность бурта пальца 1 (рис. 1.42, б), а отверстием А - как дополнительной базой - на короткий палец 1. Эта схема базирования заготовки рассматривалась выше (рис. 1.33, в). Если за главную базу принимается отверстие А, то для

базирования заготовки этим отверстием может быть выбран один из способов, рекомендованных для главной базы в виде отверстия. В данном случае базирование заготовки отверстием А можно осуществить с помощью цилиндрического пальца 1 (рис. 1.42, в), длиной 1,5 диаметра отверстия, при этом заготовка лишается четырёх степеней свободы (перемещение по X и Y и поворот ω_x и ω_y). Еще одной (пятой) степени свободы она должна быть лишена при базировании второй, дополнительной, базой - плоскостью Б. В качестве опорного элемента в этом случае можно использовать бурт наименьшего диаметра того же пальца, так как он предназначен для лишения заготовки только одной степени свободы - ограничения перемещения по оси Z (вдоль оси детали).

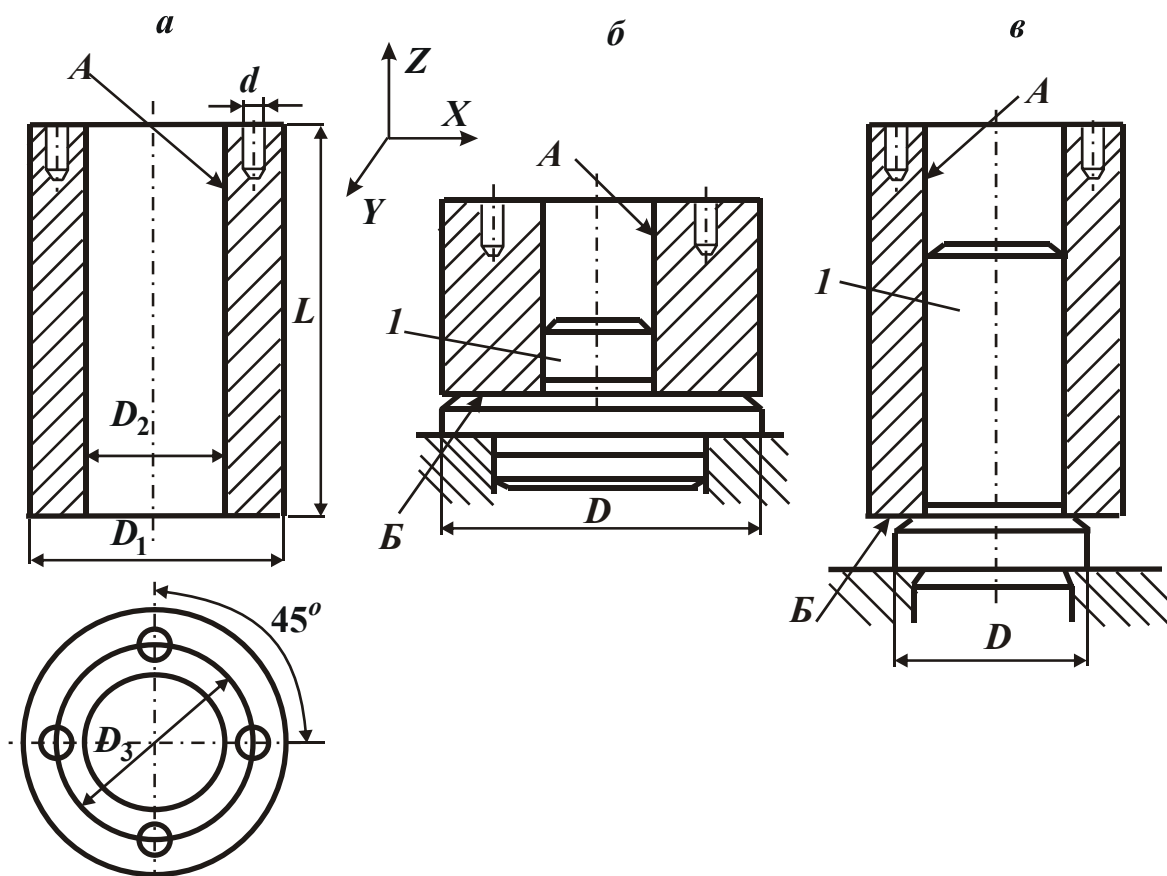


Рис. 1.42. Варианты базирования заготовки плоскостью и отверстием, ось которого перпендикулярна плоскости.

Оба метода базирования обеспечивают выполнение заданных размеров D_3 и угол 45° .

Пример 2. Для обработки отверстий диаметром d базирование заготовки выполняется плоскостью и наружной цилиндрической поверхностью, перпендикулярной плоскости; обе базы обработаны (рис. 1.43, а).

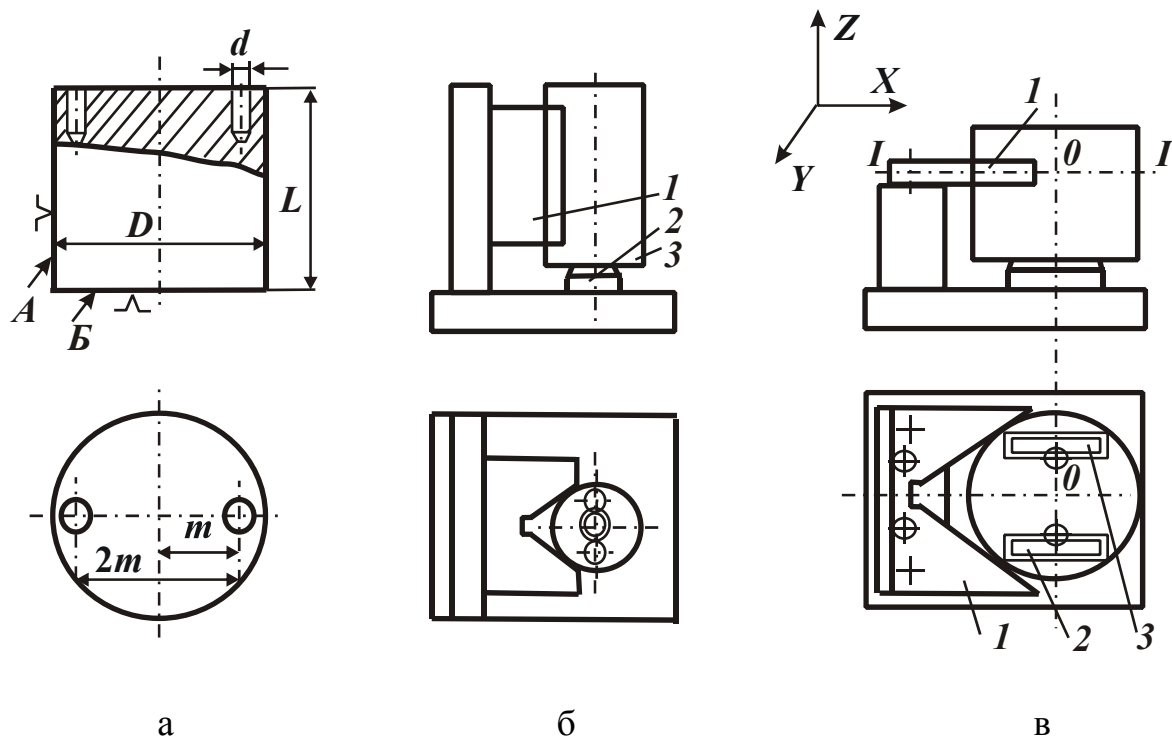


Рис. 1.43. Варианты базирования заготовки плоскостью и наружной цилиндрической поверхностью, ось которой перпендикулярна плоскости.

Как и в предыдущем примере, за главную базу здесь может быть принята поверхность А или Б. Однако при $l: D > 1$ за главную базу предпочтительнее принять цилиндрическую поверхность А, а при $l: D < 1$ и достаточном диаметре D - плоскость Б.

На рис. 1.43, б показано базирование заготовки 3 с $l: D > 1$ на призму 1, когда за главную базу принята цилиндрическая поверхность, при этом заготовка лишается четырех степеней свободы. Еще одной (пятой) степени свободы она должна быть лишена при установке второй, дополнительной, базой - плоскостью Б на опорный штырь 2 с плоской головкой.

На рис. 1.43, в представлено базирование заготовки с $l: D < 1$, когда за главную базу принята плоскость Б, установленная на две пластины 2 и 3, при этом заготовка лишается трех степеней свободы. Еще двух степеней свободы она должна быть лишена при базировании второй (дополнительной) базой - цилиндрической поверхностью А с помощью короткой призмы 1 в соответствии со способом, приведенным на рис. 1.40, б. Эта призма, центрируя лишь одну точку О оси (в сечении I-I), лишает заготовку перемещения по осям X и Y, а опорные пластины - перемещения по оси Z и вращения относительно осей X и Y.

При обоих способах установки обрабатываемую заготовку необходимо располагать по отношению к призме 1 таким образом,

чтобы линии размеров m и $2m$ (рис. 1.43, а) были направлены перпендикулярно оси симметрии призмы, при этом погрешность базирования оси заготовки, от которой заданы размеры, равна нулю.

Базирование заготовки тремя базами. На большинстве операций заготовку требуется лишить всех шести степеней свободы, для чего при её базировании необходимо использовать три базы. Рассмотрим несколько примеров.

Пример 1. Для обработки отверстия диаметром $8H11$ базирование заготовки осуществляется двумя плоскостями и отверстием; все базы обработаны. На рассматриваемой операции (рис. 1.44, а) главной базой может быть отверстие А или нижняя плоскость В.

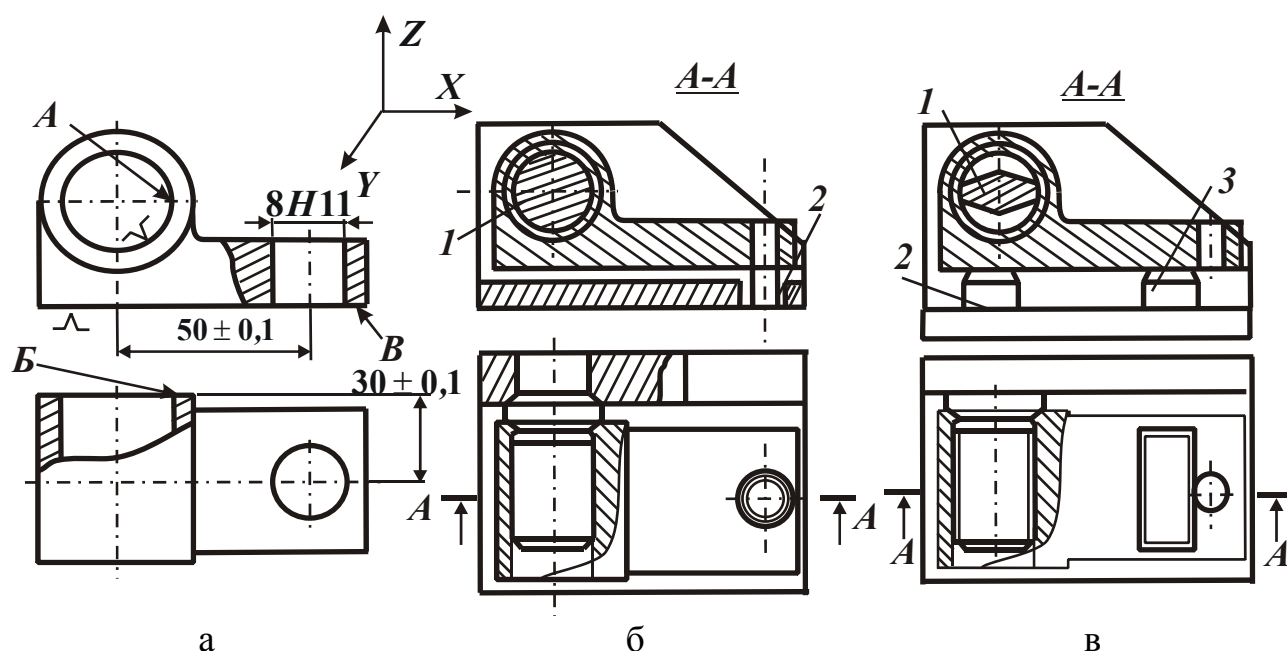


Рис. 1.44. Варианты базирования заготовки двумя плоскостями и одним отверстием.

Приняв за главную базу отверстие А, базирование заготовки можно осуществлять следующим образом (рис. 1.44, б): отверстием А на длинный палец 1 (лишается четырех степеней свободы), плоскостью Б на бурт того же пальца (лишается одной степени свободы) и плоскостью В на торец втулки 2 (лишается ещё одной степени свободы). Если же за главную базу принять нижнюю плоскость В (рис. 1.44, в), то заготовку можно базировать: плоскостью В на две опорные пластины 2 и 3 (лишается трёх степеней свободы), отверстием А с осью, параллельной плоскости В, на длинный срезанный палец 1 (лишается двух степеней свободы) и плоскостью Б на торец бурта того же пальца (лишается ещё одной степени свободы).

Оба способа базирования заготовки могут быть реализованы на практике. Они надёжно обеспечивают выполнение заданных размеров ($50 \pm 0,1$ мм и $30 \pm 0,1$ мм). Перпендикулярность оси отверстия диаметром $8H11$ к плоскости В второй способ (рис. 1.44, в) обеспечивает лучше.

Пример 2. Для обработки отверстия диаметром $30H9$ заготовка базируется двумя плоскостями и наружной цилиндрической поверхностью; база А не обработана (рис. 1.45, а).

На рассматриваемой операции из трёх баз за главную можно выбрать только нижнюю плоскость Б, которой заготовка ставится на опорную пластину 5, при этом она лишается трёх степеней свободы. Ещё двух степеней свободы её можно лишить при базировании плоскостью В на одну опорную пластину 4. Наконец, неполной наружной цилиндрической поверхностью А заготовку можно базировать способом, показанным на рис. 1.45, б, – с помощью короткой подвижной призмы 3, перемещающейся под воздействием пружины 1 в пазу планки 2. Призма 3 подвижна в направлении оси Z, чтобы не лишать заготовку возможности перемещения по этой оси, так как эта функция уже выполнена опорной пластиной 5. Короткая подвижная призма 3 лишает заготовку только одной (шестой) степени свободы - перемещения по оси X.

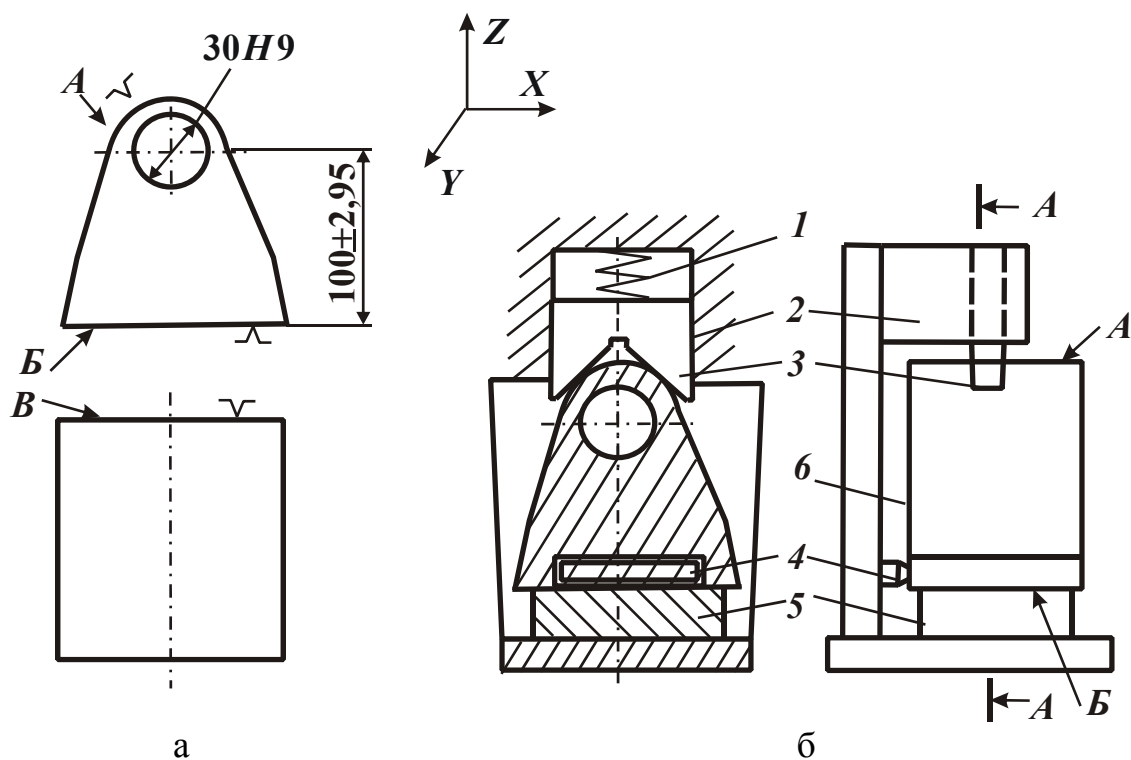
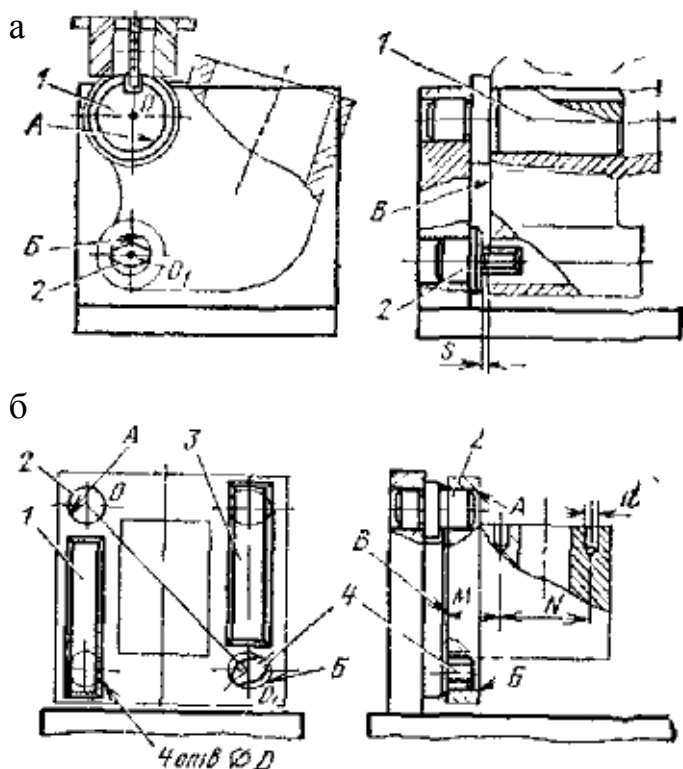


Рис. 1.45. Пример базирования заготовки двумя плоскостями и наружной цилиндрической поверхностью.

Пример 3. Заготовка базируется плоскостью с двумя отверстиями с параллельными осями; все базы обработаны. При фрезеровании проушины в заготовке типа коробки (рис. 1.46, а) за главную базу принято отверстие А.

Этим отверстием заготовка надета на длинный палец до упора плоскостью В в торец бурта того же пальца, при этом она лишается



пяти степеней свободы. При базировании третьей базой - отверстием Б - опорный элемент должен лишить её только одной степени свободы - вращения относительно оси отверстия А. Таким элементом может быть короткий срезанный палец 2, при этом ленточки на нём должны быть расположены на диаметре, перпендикулярном линии, проходящей через оси О и О₁ отверстий. Между плоскостью В и торцом бурта у срезанного пальца 2 должен оставаться зазор s , необходи-

Рис. 1.46. Примеры базирования заготовки плоскостью и двумя отверстиями.

мый для того, чтобы базирование плоскости В выполнялось только буртом пальца 1.

На операции сверления отверстий диаметром d , заданных размерами N и M (рис. 1.46, б), за главную базу принята плоскость В, которая базируется на две опорные пластины 1 и 3. Из четырёх отверстий заготовки диаметром D два, расположенные на большом расстоянии друг от друга (по диагонали прямоугольника, проведенного через оси отверстий), приняты в качестве дополнительных баз - отверстия А и Б на рис. 1.46, б. Так как оси этих отверстий перпендикулярны уже получившей базирование плоскости В, для их базирования могут быть использованы только короткие пальцы; для отверстия А - цилиндрический 2, а для отверстия Б - срезанный 4 с соответствующим расположением ленточек (на перпендикуляре к линии OO_1).

1.3. ЗАЖИМНЫЕ УСТРОЙСТВА ПРИСПОСОБЛЕНИЙ. РАСЧЁТ НАДЕЖНОСТИ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ЗАГОТОВОК

1.3.1. ПРАВИЛА ЗАКРЕПЛЕНИЯ ЗАГОТОВОК

При обработке заготовки на неё действуют силы резания. Их величина, направление и место приложения могут изменяться в процессе обработки одной поверхности. Направление и точка приложения силы резания изменяются вследствие перемещения инструмента вдоль обрабатываемой поверхности и изменения условий обработки. Силы резания и моменты, создаваемые ими, стремятся переместить и повернуть заготовку. Несмотря на это, заготовка должна сохранять в процессе обработки неизменное положение относительно опорных элементов. Для этого её необходимо надёжно закреплять.

При закреплении заготовки в приспособлении должны соблюдаться следующие основные правила:

- не должно нарушаться положение заготовки, достигнутое при её базировании;
- закрепление должно быть надёжным, чтобы во время обработки положение заготовки сохранялось неизменным;
- возникающие при закреплении смятие поверхностей заготовки, а также её деформации должны быть минимальными и находиться в допустимых пределах.

Несоблюдение любого из этих правил может привести к возникновению погрешностей обработки, а изменение положения заготовки в процессе резания - и к поломке режущего инструмента.

Выполнение указанных правил закрепления достигается благодаря рациональному выбору схемы закрепления и величины зажимного усилия Q . Выбор схемы закрепления заготовки производят одновременно с разработкой способа её базирования, добиваясь определенного относительного расположения опорных элементов, заготовки, точки приложения и направления зажимного усилия. При этом необходимо руководствоваться следующими соображениями.

Для уменьшения величины зажимного усилия при закреплении заготовки необходимо выбирать такой способ её базирования, при котором сила резания была бы направлена на какой-либо из опорных элементов, расположенных на линии действия этой силы или вблизи неё.

Для обеспечения контакта заготовки с опорным элементом и устранения возможного её сдвига при закреплении зажимное усилие

следует направлять перпендикулярно к поверхности опорного элемента. В отдельных случаях зажимное усилие можно направлять так, чтобы заготовка одновременно прижималась к поверхностям двух опорных элементов.

В целях устранения деформации заготовки при закреплении точку приложения зажимного усилия надо выбирать так, чтобы линия его действия пересекала опорную поверхность опорного элемента. Лишь при закреплении особо жёстких заготовок можно допускать, чтобы линия действия зажимного усилия проходила между опорными элементами.

Для уменьшения смятия поверхностей заготовки при закреплении необходимо уменьшать удельное давление в местах контакта зажимного устройства с заготовкой путем рассредоточения зажимного усилия. Это достигается применением в зажимных устройствах контактных элементов соответствующей конструкции, которые позволяют распределить зажимное усилие поровну между двумя или тремя точками, а иногда даже рассредоточить по некоторой протяженной поверхности.

Для уменьшения вибраций и деформаций заготовки под действием силы резания следует повышать жесткость системы заготовка–приспособление путем увеличения числа мест зажатия заготовки и приближения их к обрабатываемой поверхности.

1.3.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ЗАЖИМНЫХ УСТРОЙСТВ И ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ИХ РАСЧЕТА

Закрепление заготовки производится с помощью зажимных устройств различной конструкции. Принцип действия и конструкцию зажимного устройства конструктор выбирает исходя из конкретных условий выполнения операции: типа производства; величин сил резания, действующих на заготовку при выполнении операции; конструктивных особенностей заготовки; типа станка и т. д. Надёжность закрепления проверяется расчётами, выполняемыми на стадии проектирования приспособления.

Методика расчетов в некоторой степени определяется применяемым зажимным устройством. В связи с этим зажимные устройства целесообразно разделить на три группы (рис. 1.47).

К первой группе (рис. 1.47, а) относятся зажимные устройства, имеющие в своём составе силовой механизм (СМ) и привод (П), ко-

торый обеспечивает перемещение контактного элемента (К) и создает исходное усилие P_u , преобразуемое силовым механизмом в зажимное усилие Q . Используемые в этих устройствах приводы достаточно разнообразны: пневматические, гидравлические, пневмогидравлические, механогидравлические и т. д.

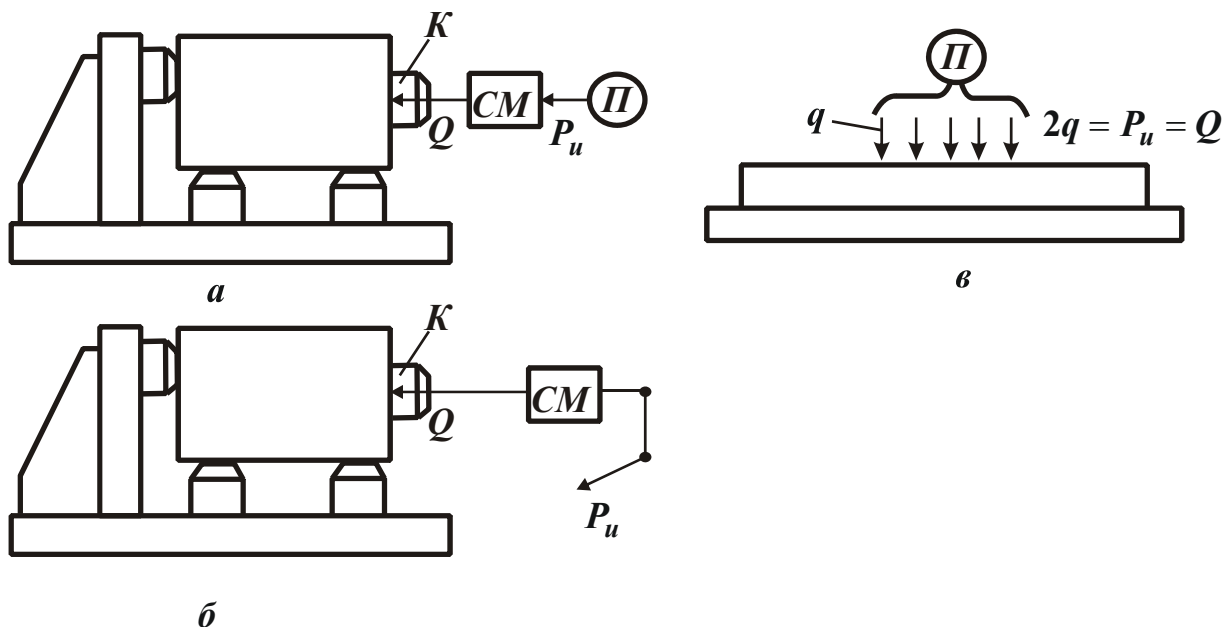


Рис. 1.47. Схемы зажимных устройств.

Во вторую группу (рис. 1.47, б) входят зажимные устройства, состоящие лишь из силового механизма, который приводится в действие непосредственно рабочим, прилагающим исходное усилие P_u на плече l . Эти устройства иногда называют зажимными устройствами с ручным приводом.

К третьей группе (рис. 1.47, в) относятся зажимные устройства, которые в своем составе не имеют силового механизма, а используемые приводы лишь условно можно называть приводами, так как они не вызывают перемещений элементов зажимного устройства и только создают зажимное усилие Q .

Усилие Q в этих устройствах является равнодействующей равномерно распределенной нагрузки q , непосредственно действующей на заготовку и создаваемой либо в результате атмосферного давления (при наличии вакуума с противоположной стороны заготовки), либо посредством магнитного силового потока. К этой группе относятся вакуумные и магнитные устройства.

Несмотря на некоторое различие в методике расчётов зажимных устройств каждой из указанных групп, основная их часть остается

общей и включает в себя следующие этапы:

- определение сил и моментов резания;
- выбор коэффициента трения f ;
- составление расчетной схемы и исходного уравнения для расчета зажимного усилия Q ;
- выбор коэффициента надежности закрепления контактного элемента K .

Этим ограничивается общность в расчёте зажимных устройств указанных групп. Дальнейший ход расчетов рассмотрим применительно к каждой из них в отдельности.

Расчёт зажимных устройств первой группы. Исходя из требуемого зажимного усилия Q и условий выполнения операции, выбирают тип силового механизма и тип привода. Основной характеристикой силового механизма является передаточное отношение, которое в этом случае называют коэффициентом усиления $i = Q/P_u$. Выбирая силовой механизм, следует иметь в виду, что с увеличением i будут уменьшаться габаритные размеры привода, что, естественно, при прочих равных условиях является большим преимуществом. По величине i , пользуясь кинематикой силового механизма или табличными данными для i , определяют исходное усилие P_u и по нему выбирают и рассчитывают привод.

Расчёт зажимных устройств второй группы. По зажимному усилию Q выбирают силовой механизм, имея в виду, что рабочий может приложить лишь вполне определенное усилие P_u .

Расчёт зажимных устройств третьей группы. По зажимному усилию Q и площади заготовки, на которой распределяется удельное усилие q , определяют требуемое усилие P_u , по которому рассчитывают необходимый вакуум для вакуумных устройств и силовой магнитный поток для магнитных устройств.

В практике встречаются приспособления 1 (рис. 1.48), в которых заготовка 2 закрепляется одновременно с нескольких сторон (рис. 1.48, а) или с одной стороны в нескольких местах (рис. 1.48, б, в).

При этом возможны два варианта: закрепление производится посредством одного зажимного устройства многократного действия; для закрепления заготовки в каждом месте используется своё, автономно работающее зажимное устройство. В последнем случае после определения зажимных усилий Q_1 и Q_2 осуществляется поочеред-

ный расчёт зажимных устройств, создающих эти усилия. При использовании многократного зажимного устройства его расчет производят исходя из усилия, равного nQ , где n - кратность зажимного устройства. Так, двукратное устройство (рис. 1.48, в) следует рассчитывать на усилие $2Q$.

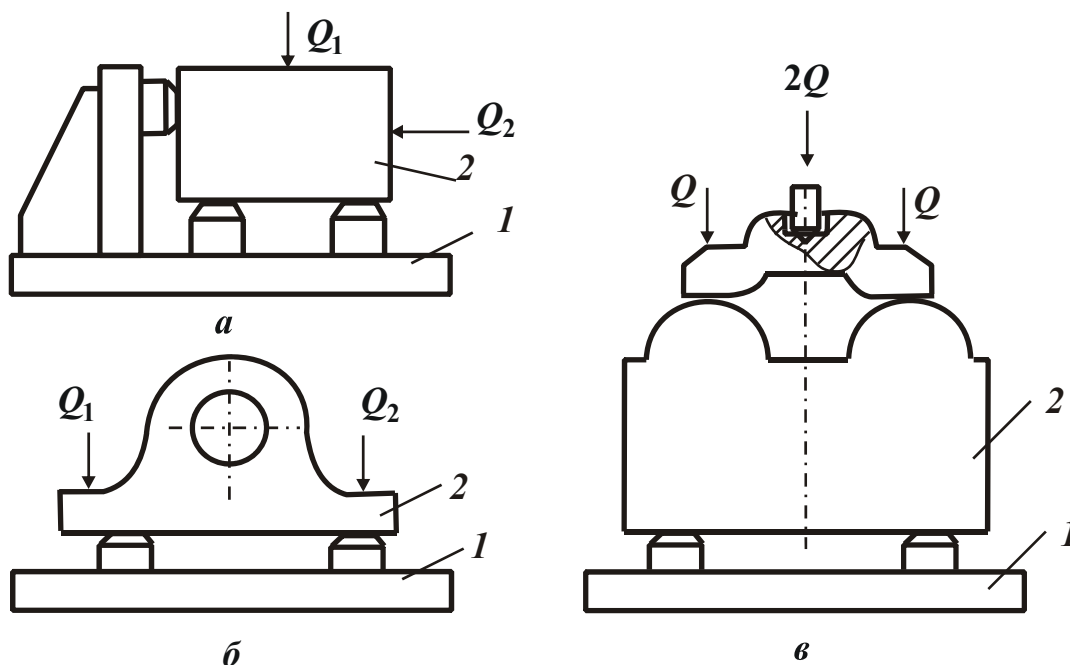


Рис. 1.48. Схемы закрепления заготовки в приспособлении.

1.3.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛ И МОМЕНТОВ РЕЗАНИЯ

Действующие на заготовку силы и моменты резания можно рассчитать по формулам, приводимым в справочниках [12, 13] и в нормативах по режимам резания [149, 150] применительно к определенному виду обработки (точению, сверлению и т. п.).

При токарной обработке резцами силу резания, действующую на заготовку, принято представлять тремя составляющими: P_z , P_y и P_x (рис. 1.49).

Величины P_z , P_y и P_x для точения и растачивания можно определить по формуле

$$P_z(P_y; P_x) = 10C_p t^{x_p} s^{y_p} v^{n_p} K_p,$$

где P_z , P_y и P_x - составляющие силы резания, Н; t - глубина резания, мм; s - подача, мм/об; v - скорость резания, м/мин.

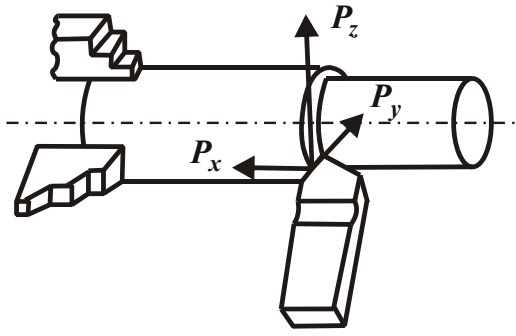


Рис. 1.49. Составляющие силы резания, действующей на заготовку при точении.

Значения C_p, x_p, y_p и n_p для каждой из составляющих силы резания приведены, например, на с. 429 в табл. 20 [13]. Значения коэффициента $K_p = K_{M_p} \cdot K_{\varphi_p} \cdot K_{\gamma_p} \cdot K_{\lambda_p} \cdot K_{r_p}$ даны, например, на с. 430...431 в табл. 21...24 [13].

При обработке на сверлильных и других станках свёрлами и зенкерами действие инструмента на заготовку

принято заменять осевой силой P_0 и крутящим моментом M . Величины P_0 и M при сверлении рассчитываются по формулам:

$$P_0 = 10C_p D^{q_p} s^{y_p} K_p; \quad M = 10C_M D^{q_M} s^{y_M} K_p;$$

а при рассверливании - по формулам:

$$P_0 = 10C_p D^{q_p} t^{x_p} s^{y_p} K_p; \quad M = 10C_M D^{q_M} t^{x_M} s^{y_M} K_p,$$

где P_0 - осевая сила резания, Н; M - крутящий момент, Н·м; t - глубина резания, мм; s - подача, мм/об.

При этом принимают: при сверлении $t = 0,5D$, а при рассверливании $t = 0,5(D - d)$, где d и D - диаметры отверстия до и после обработки, мм.

Значения постоянных C_M и C_p и показателей степени приведены, например, в табл. 31 на с. 436 [13]. Коэффициентом $K_p = K_{M_p}$ учитываются отличные от табличных механические свойства обрабатываемого материала; значения его приведены, например, на с. 430...431 в табл. 21...24 [13].

При зенкерованием из-за отсутствия расчётных формул осевую силу P_0 и крутящий момент M можно определять приближенно, рассматривая каждый зуб зенкера как расточной резец, обрабатывающий поверхность диаметром D . В частности, крутящий момент при зенкерованием можно рассчитать по формуле

$$M = 10 \frac{C_p t^{x_p} S_z^{y_p} K_p D z}{2 \cdot 1000},$$

где M - крутящий момент при зенкерованием, Н·м; C_p, x_p, y_p, K_p - коэффициенты и показатели степени для тангенциальной составляю-

щей P_z , при точении; z - число зубьев зенкера; s_z - подача на один зуб зенкера, равная s/z , - мм/зуб; s - подача, мм/об.

Значения постоянной C_p и показателей степени в формуле для крутящего момента приведены, например, на с. 429 в табл. 20, а значения коэффициента $K_p = K_{M_p}$ - на с. 430...431 в табл. 21...24 [13].

При фрезеровании действие фрезы на заготовку можно заменить силами R_1 и P_0 (рис. 1.50). Сила R_1 действует в плоскости, перпендикулярной оси фрезы, а сила P_0 - в осевом направлении. Сила (P_0) имеет место лишь при работе фрезами с винтовыми зубьями.

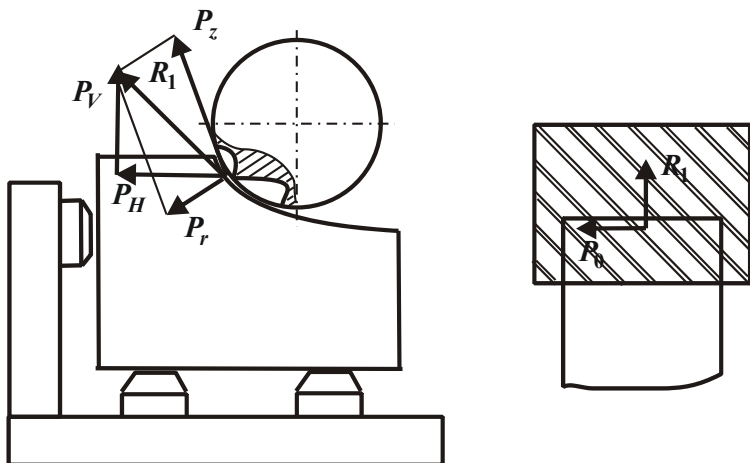


Рис. 1.50. Составляющие силы резания, возникающей при работе цилиндрической фрезой.

Силу R_1 можно разложить на окружную силу P_r , касательную к траектории движения режущей кромки, и радиальную P_r , направленную по радиусу.

Силу R_1 можно разложить на окружную силу P_r , касательную к траектории движения режущей кромки, и радиальную P_r , направленную по радиусу.

Силу R_1 можно также разложить на горизонтальную P_H и вертикальную P_V составляющие. В справочнике [13] и нормативах [149, 150] приводится формула лишь для определения окружной силы P_z . Величину окружной силы резания P_z , рассчитывают по формуле

$$P_z = 10 \frac{C_p t^{x_p} s^{y_p} B^{u_p} z}{D^{q_p} n^{w_p}},$$

где P_z - окружная сила резания, Н; z - число зубьев фрезы; n - частота вращения, об/мин; D - диаметр фрезы, мм; t и B - глубина и ширина фрезерования, мм.

Направление измерения t и B зависит от вида фрезерования (рис. 1.51).

Значения постоянной C_p и показателей степени, приведены, например, в табл. 39 справочника [13]. Коэффициент K_p в данном случае определяется только коэффициентом K_{M_p} , т. е. $K_p = K_{M_p}$. Значения K_p приведены, например, на с. 430...431 в табл. 21...24 [13].

Для остальных составляющих силы резания приводятся зависимости, выражающие их величину через окружную силу P_z [12].

В частности, при расчёте приспособлений можно пользоваться следующими зависимостями, составленными для различных условий фрезерования [45].

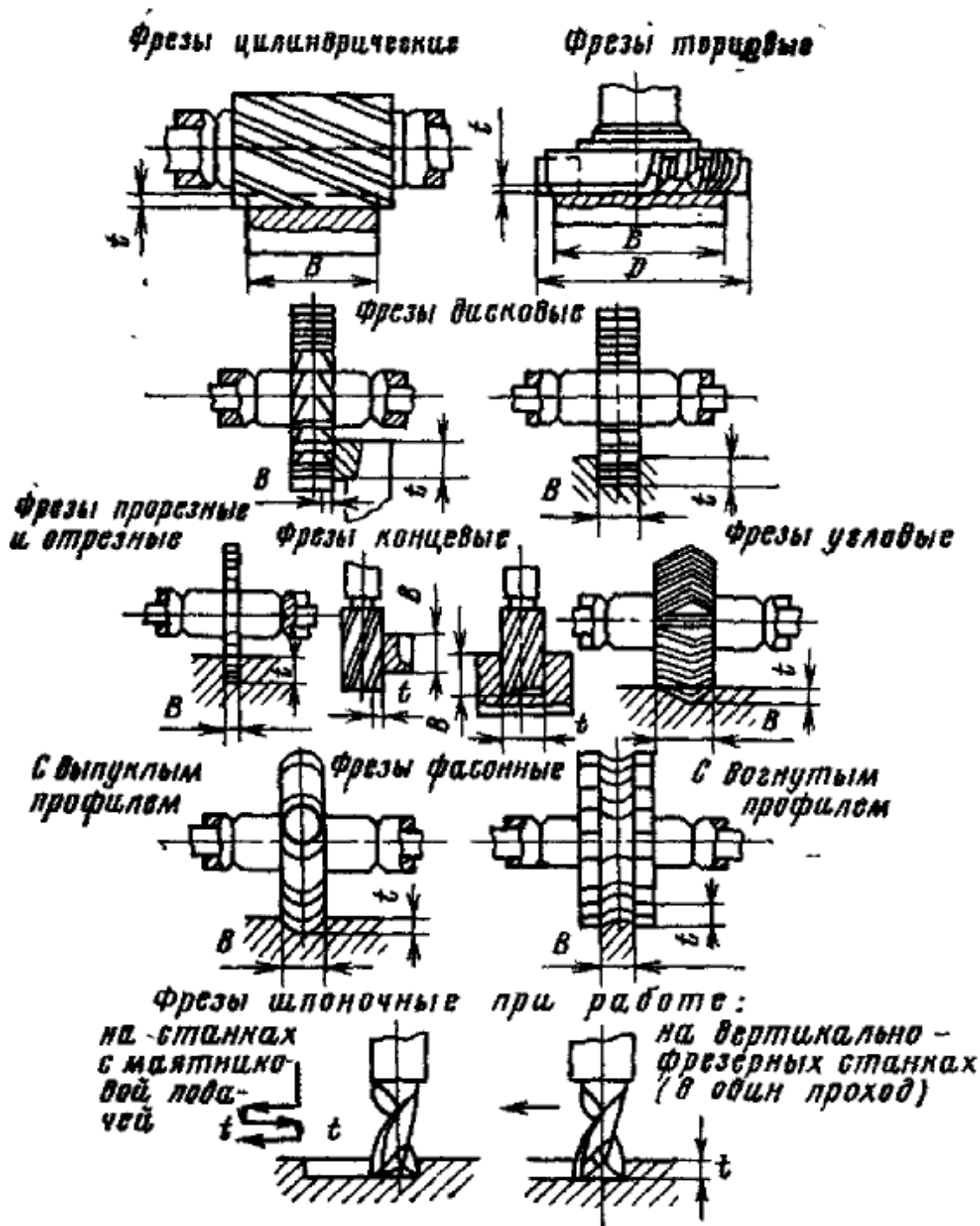


Рис. 1.51. Схемы для определения t и B при различных видах фрезерования.

Фрезерование цилиндрическими, концевыми и дисковыми фрезами. Радиальная составляющая:

$$P_r = (0,6...0,8) P_z.$$

Горизонтальная составляющая P_H , действующая в направлении подачи, и вертикальная P_V , перпендикулярная направлению подачи при встречном фрезеровании: $P_H = (1,0...1,2) P_z$ и $P_V = (0,2...0,3) P_z$.

При попутном фрезеровании: $P_H = (0,3...0,9) P_z$ и $P_V = (0,75...0,8) P_z$.

Фрезерование торцовыми фрезами. Горизонтальная составляющая, действующая в направлении подачи:

$$P_H = (0,6...0,9) P_z.$$

Осевая составляющая:

$$P_0 = (0,35...0,55) P_z.$$

1.3.4. СОСТАВЛЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ И ИСХОДНОГО УРАВНЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ЗАЖИМНОГО УСИЛИЯ

Величину необходимого зажимного усилия определяют на основе решения задачи статики, рассматривая равновесие заготовки под действием приложенных к ней сил. Для этого необходимо составить расчетную схему, т. е. изобразить на схеме базирования заготовки все действующие на нее силы - это силы и момент резания, зажимные усилия, реакции опор и силы трения в местах контакта заготовки с опорными элементами и зажимными устройствами. Расчетную схему следует составлять для наиболее неблагоприятного местоположения режущего инструмента по длине обрабатываемой поверхности.

По расчетной схеме необходимо установить направления возможного перемещения или поворота заготовки под действием сил и моментов резания, определить величину проекций всех сил на направление перемещения и составить уравнения сил и моментов.

Так как в производственных условиях могут иметь место отступления от тех условий, применительно к которым рассчитывались по нормативам силы и моменты резания, возможное увеличение их следует учесть путем введения коэффициента надёжности закрепления K и умножения на него сил и моментов резания, входящих в составленные уравнения статики.

На основании решения уравнений статики получают формулы для расчета зажимного усилия Q , обеспечивающего надёжное закрепление заготовки. Сказанное проиллюстрируем двумя простейшими примерами.

Пример 1. На операции фрезерования плоскости (рис. 1.53, а) при принятых способах базирования и схеме закрепления заготовки под действием сил резания она может только поворачиваться относительно точки О.

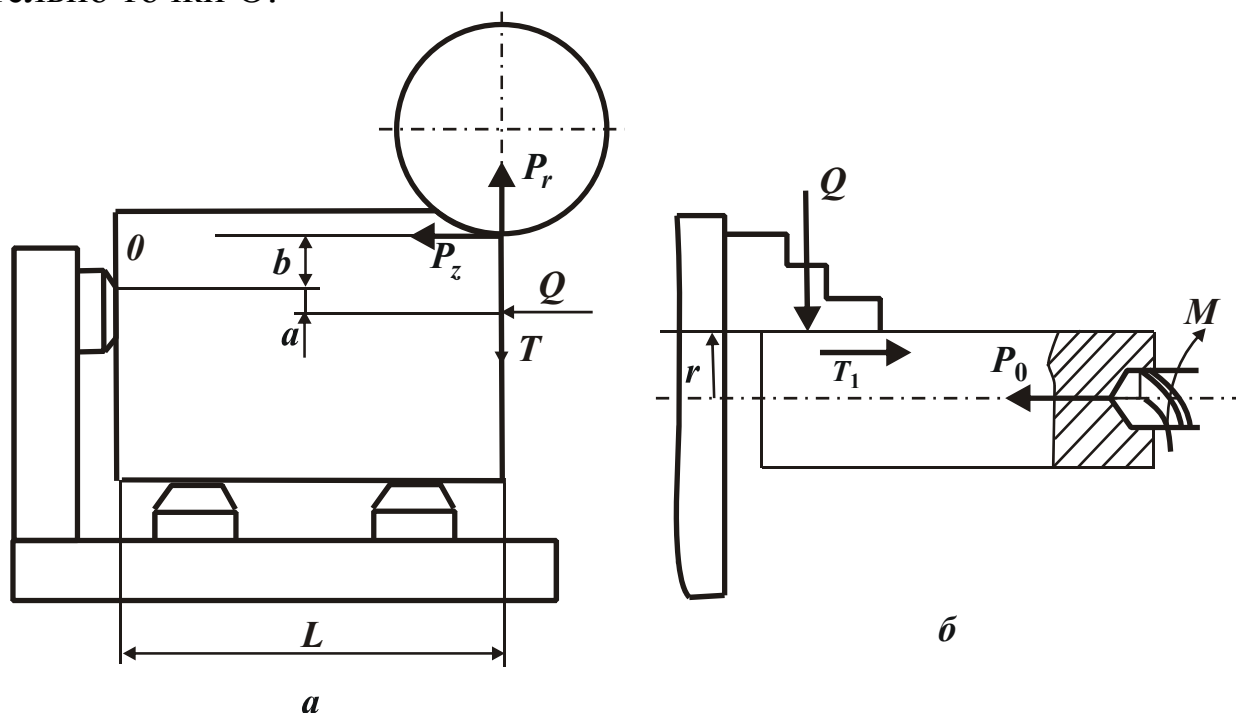


Рис. 1.52. Схемы к определению величины зажимного усилия, удерживающего заготовку: а - при фрезеровании; б - при сверлении на токарном станке.

Из условия равновесия заготовки (рис. 1.52, а) уравнение моментов будет иметь вид

$$Qa + Tl = P_z b + P_r l,$$

где T - сила трения; $T = fQ$.

После подстановки значения $T = fQ$ и введения коэффициента надёжности K , уравнение примет вид

$$Qa + Tl = K(P_z b + P_r l),$$

откуда

$$Q = \frac{K(P_z b + P_r l)}{a + fl},$$

где f - коэффициент трения между заготовкой и зажимными устройствами. Обозначения остальных величин даны на рис. 1.52, а.

Пример 2. При сверлении отверстия в заготовке, закрепленной в трёхкулачковом патроне (рис. 1.52, б), она может перемещаться вдоль кулачков под действием силы резания P_0 (усилие подачи) и провертываться в кулачках под действием момента резания M . Необходимо

приложить такое зажимное усилие, чтобы не было ни перемещения, ни провёртывания заготовки относительно кулачков. В зависимости от формы насечки на кулачках сопротивление перемещению и провёртыванию может быть различным, так как при этом могут быть разными коэффициенты трения.

Допустим, что при перемещении заготовки в кулачках вдоль её оси коэффициент трения будет f_1 , а при провёртывании - f_2 . Тогда силы трения между кулачком и заготовкой будут составлять:

при перемещении

$$T_1 = f_1 Q;$$

при провёртывании

$$T_2 = f_2 Q.$$

Определим величину зажимного усилия при условии недопустимости перемещения заготовки в кулачках. Пользуясь принятыми обозначениями (рис. 1.52, б) и имея в виду, что у патрона три кулачка, составим уравнение сил:

$$3T_1 = P_0.$$

После подстановки значения T_1 и введения коэффициента K , уравнение примет вид:

$$3f_1 Q = KP_0,$$

откуда

$$Q = \frac{KP_0}{3f_1}.$$

Теперь определим величину зажимного усилия при условии недопустимости провёртывания заготовки в кулачках. Так как заготовка зажата в трёх кулачках, уравнение моментов будет иметь следующий вид:

$$3T_2 r = M,$$

где M - момент сил резания, Н·м; T_2 - сила трения между кулачком и заготовкой при провёртывании последней, Н; r - радиус наружной цилиндрической поверхности заготовки на участке закрепления ее в кулачках, м.

После подстановки значения T_2 и введения коэффициента K , уравнение примет вид:

$$3f_2 Q r = KM,$$

откуда

$$Q = \frac{KM}{3f_2r}$$

Выбор величины коэффициента трения f . В приспособлениях силы трения возникают на поверхностях контакта заготовки с опорными элементами, а также в местах контакта зажимных устройств с поверхностью заготовки. Величина коэффициента трения зависит от многих факторов. При использовании приспособлений его определение связано с дополнительными трудностями. В приспособлениях в ряде случаев имеются трущиеся поверхности, на которых преднамеренно выполнена насечка различной формы и направленности. При закреплении зубцы насечки вдавливаются в тело обрабатываемой заготовки, причем величина вдавливания зависит от величины нормальной реакции в местах контакта. Возникающие на таких поверхностях силы, препятствующие повороту или перемещению заготовки, строго говоря, нельзя называть силами трения. Более правильно их называть *силами сопротивления перемещению*. Однако для простоты и краткости в дальнейшем будем применять термин «коэффициент трения» и обозначать его f .

Таблица 1.1.

Значения коэффициента трения f

Характеристика контактируемых поверхностей	Значения f
Обработанная поверхность заготовки контактирует с плоскостью опорных элементов (пластин, магнитной плиты и т. п.) или плоскостью контактных элементов зажимных устройств	0,10...0,15
Обработанная поверхность заготовки контактирует с опорным элементом по линии (базирование на призму) или сфере (базирование на опорный штырь со сферической головкой)	0,18...0,30
Необработанная поверхность заготовки контактирует с закалённым насечённым элементом (базирование на опорные штыри с насечённой головкой)	0,5...0,8
Контактный элемент при закреплении соприкасается с цилиндрической поверхностью заготовки (при установке в кулачках, в цанге и т. п.) и имеет:	
– гладкую поверхность	0,25
– кольцевые канавки	0,35
– крестообразные канавки	0,45
Контактный элемент соприкасается с необработанной поверхностью и имеет:	
– кольцевые канавки	0,4...0,5
– насечку	0,5...0,8

В приспособлениях встречается много различных сочетаний контактных поверхностей, различающихся по форме, состоянию поверхности, твёрдости и т. д. Значения коэффициента трения для некоторых сочетаний контактных поверхностей приведены в табл. 1.1.

Выбор величины коэффициента надёжности K . Значение коэффициента надёжности закрепления K следует выбирать дифференцированно в зависимости от конкретных условий выполнения операции и способа закрепления заготовки.

Таблица 1.2.

Значения коэффициента K_2

Способ обработки	Компонента сил резания	Значения K_2	Обрабатываемый материал
Сверление	Крутящий момент M	1,15	Чугун
	Осевая сила P_0	1,10	
Предварительное (по корке) зенкерование	Крутящий момент M	1,3	Чугун при износе по задней поверхности 1,5 мм
	Осевая сила P_0	1,2	
Предварительное точение	Тангенциальная сила P_z	1,0	Сталь и чугун
	Радиальная сила P_y	1,4	Сталь
		1,2	Чугун
	Сила подачи P_x	1,6	Сталь
Цилиндрическое предварительное и чистовое фрезерование	Окружная сила P_z	1,75-1,90	Вязкие стали
		1,2-1,4	Твердые стали и чугун
Торцевое предварительное и чистовое фрезерование	Окружная сила P_z	1,75-1,90	Вязкие стали
		1,2-1,4	Твердые стали и чугун
Шлифование	Тангенциальная сила P_z	1,15-1,20	Сталь
Протягивание	Сила резания P_z	1,55	Сталь

Его величину можно представить как произведение частных коэффициентов, каждый из которых отражает влияние определенного фактора. Следовательно:

$$K = K_0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6. \quad (1.12)$$

Коэффициент K_0 , представляющий собой гарантированный коэффициент запаса надёжности закрепления, для всех случаев следует брать равным 1,5. Коэффициент K_1 учитывает увеличение силы резания из-за случайных неровностей на заготовках. Для черновой обработки $K_1 = 1,2$; для чистовой $K_1 = 1,0$. Коэффициент K_2 учитывает увеличение силы резания вследствие затупления инструмента. Значения K_2 приведены в табл. 1.2, а остальных коэффициентов - в табл. 1.3.

Таблица 1.3.

Значения коэффициентов K_3, K_4, K_5 и K_6 .

Обозначение коэффициента	Фактор, учитываемый коэффициентом	Значение коэффициента
K_3	Увеличение силы резания при прерывистом резании	1,2 - при точении
K_4	Непостоянство зажимного усилия	1,3 - для ручных зажимных устройств; 1,0 - для пневматических и гидравлических устройств
K_5	Степень удобства расположения рукояток в ручных зажимных устройствах	1,0 - при удобном расположении и малой длине рукоятки; 1,2 - при диапазоне угла отклонений рукоятки 90°
K_6	Неопределенность из-за неровностей места контакта заготовки с опорными элементами, имеющими большую опорную, поверхность (учитывается только при наличии крутящего момента, стремящегося повернуть заготовку)	1,0 - для опорного элемента, имеющего ограниченную поверхность контакта с заготовкой; 1,5 - для опорного элемента с большой площадью контакта

Для приведенных значений коэффициентов $K_0 \dots K_6$ величина K , рассчитанная по формуле (1.12), может колебаться в значительных пределах (1,5...8,0). Если в результате расчёта по формуле (1.12) величина K окажется менее 2,5, то при расчёте надёжности закрепления её следует принять равной 2,5. Этот запас надёжности закрепления оговорен ГОСТ 12.2.029-77.

1.3.5. ВЫБОР ТИПА ЗАЖИМНОГО УСТРОЙСТВА И СИЛОВОГО МЕХАНИЗМА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОБХОДИМОГО ИСХОДНОГО УСИЛИЯ

Выбор типа зажимного устройства. После определения величины усилия Q конструктор выбирает тип зажимного устройства (рис. 1.47). Исходными данными для выбора служат: величина зажимного усилия Q ; тип производства (единичное, серийное, массовое); размеры и конфигурация заготовки; характер выполняемой операции.

Выбор типа зажимного устройства рекомендуется производить с учетом следующих общих соображений. При больших усилиях Q следует выбирать зажимные устройства первой (рис. 1.47, а) или второй (рис. 1.47, б) группы. При этом нужно иметь в виду, что зажимные устройства второй группы - ручные, требующие больших затрат вспомогательного времени на закрепление заготовки, и применять их в условиях крупносерийного и массового производства нецелесообразно. Их используют в единичном и мелкосерийном производстве. Ручные устройства с эксцентриковыми механизмами не следует применять в приспособлениях, предназначенных для станков, где приспособление с заготовкой вращается (токарных, револьверных и т.п.), так как под действием инерционных сил, приложенных к рукоятке эксцентрика, зажимное устройство может раскрепиться.

Для крупносерийного и массового производства предназначены зажимные устройства первой группы с быстродействующими приводами (пневматическими, гидравлическими и т. п.).

При малых усилиях Q и в особенности для закрепления нежестких тонкостенных заготовок с чисто обработанной плоской базой целесообразно применять зажимные устройства третьей группы (рис. 1.47, в). В силу их универсальности они могут использоваться в любом типе производства. Особое распространение они получили в приспособлениях, предназначенных для выполнения работ на плоскошлифовальных станках.

Выбор типа силового механизма. Силовые механизмы обычно выполняют роль усилителя. Его основной характеристикой является коэффициент усиления i - передаточное отношение сил. Наряду с изменением величины исходного усилия силовой механизм может также изменять его направление, разлагать на составляющие и совместно с контактными элементами обеспечивать приложение зажимного усилия в заданной точке. Иногда силовые механизмы выполня-

ют также роль самотормозящего элемента, препятствуя раскреплению заготовки при внезапном выходе из строя привода.

Силовые механизмы делятся на простые и комбинированные. Простые - состоят из одного элементарного механизма: винтового, эксцентрикового, клинового или рычажного. Комбинированные - представляют собой комбинацию нескольких (обычно двух) простых: рычажного и винтового, рычажного и эксцентрикового, рычажного и клинового и т. д.

Силовые механизмы используются в приспособлениях с зажимными устройствами как первой, так и второй группы. Для приспособлений с зажимными устройствами первой группы силовой механизм следует выбирать совместно с приводом, чтобы можно было рационально согласовать силовые возможности механизма (коэффициент усиления i) с силовыми данными привода (создаваемым исходным усилием $P_{\text{и}}$) для получения минимальных габаритных размеров зажимного устройства. Необходимо иметь в виду, что при равных исходных усилиях $P_{\text{и}}$ гидравлические приводы имеют меньшие габариты, чем пневматические. Это позволяет путем увеличения $P_{\text{и}}$ гидравлического привода использовать силовой механизм с меньшим коэффициентом усиления i , но простой конструкции и с более высоким коэффициентом полезного действия. Ввиду сложности гидравлической системы гидропривода его целесообразно применять только на гидрофицированных станках или если в цехе имеется гидросистема для обслуживания группы станков. Иногда гидропривод приводят в действие от пневмогидроусилителя. Это позволяет использовать, с одной стороны, преимущества гидропривода для уменьшения габаритов приспособления, а с другой - положительные свойства сжатого воздуха как энергоносителя, подведенного в настоящее время практически к каждому станку.

Выбор силового механизма для приспособлений с ручными зажимными устройствами производится с учетом принятого способа приведения их в действие. Используются два способа. При первом зажимное устройство приводится в действие поворотом рукоятки или гаечного ключа. В этом случае считают, что рабочий прилагает к рукоятке или ключу исходное усилие $P_{\text{и}} = 100\text{Н}$. При втором способе зажимное устройство приводится в действие поворотом звездочки, барашка и т. п. В этом случае считают, что рабочий прилагает исходное усилие $P_{\text{и}} = 30\text{Н}$. Согласно ГОСТ 12.2.029-77 этот способ можно

применять при усилии зажима Q не более $100H$ (10 кГс). Конструктор должен выбрать силовой механизм с таким коэффициентом усиления i , чтобы при принятом способе приведения в действие зажимного устройства последнее обеспечивало создание требуемого зажимного усилия Q .

Выбор конструктивной схемы силового механизма производится также с учётом конкретных условий компоновки приспособления. Выбор её облегчается тем, что в настоящее время отработано и опробовано на практике большое количество кинематических схем и конструкций силовых механизмов. Эти конструкции приводятся в справочниках и литературе по приспособлениям. Многие из них нормализованы и включены в отраслевые нормы, поэтому конструктор имеет возможность выбрать ту конструктивную схему, которая наиболее полно удовлетворяет конкретным условиям работы проектируемого приспособления.

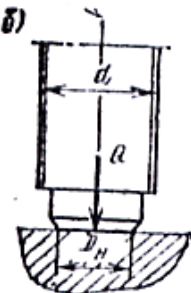
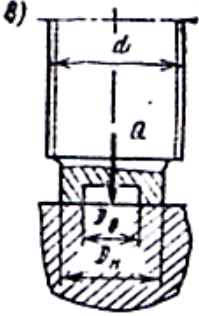
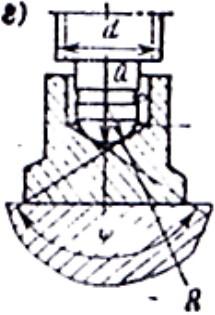
Для выбранного силового механизма необходимо определять коэффициент усиления i и исходное усилие P_u , которое должно быть приложено к силовому механизму приводов или рабочим. Расчётная формула для нахождения P_u может быть получена на основе решения задачи статики - рассмотрения равновесия силового механизма под действием приложенных к нему сил.

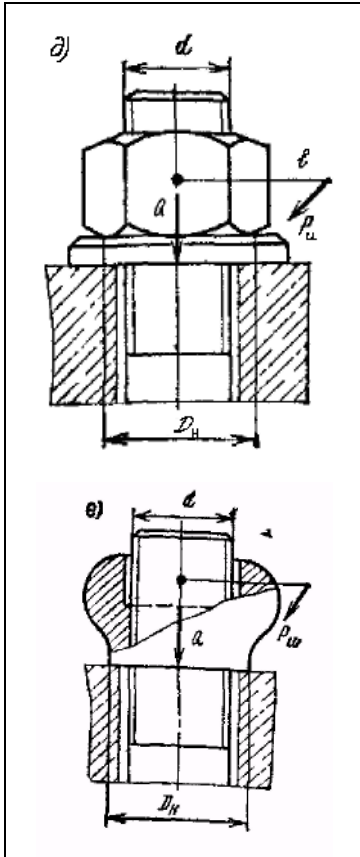
Для облегчения расчетов в табл. 1.4 и табл. 1.5 приводятся формулы для определения P_u , i и Q наиболее часто применяемых простых и комбинированных силовых механизмов.

Таблица 1.4.

Расчетные формулы для определения P_u , i и Q для простых силовых механизмов

Винтовые механизмы	
	<p>1. Вид со сферическим торцом (вариант а):</p> $P_u = \frac{r_{cp} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{np})}{l} \cdot Q; \quad i = \frac{l}{r_{cp} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{np})};$ $Q = \frac{P_u \cdot l}{r_{cp} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{np})}.$ <p>Приблизительно для винтов с резьбой М8...М52</p> $P_u = \frac{d}{10l} \cdot Q.$

	<p>2. Винт с плоским торцом (вариант б):</p> $P_u = \frac{r_{cp} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{np}) + \frac{1}{3} f D_n}{l} \cdot Q;$ $i = \frac{l}{r_{cp} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{np}) + \frac{1}{3} f D_n}; Q = \frac{P_u \cdot l}{r_{cp} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{np}) + \frac{1}{3} f D_n}.$ <p>Приблизенно для винтов с резьбой М8...М52</p> $P_u = \frac{0,1d + 0,5D_n}{l} \cdot Q.$
	<p>3. Винт с кольцевой поверхностью опорного торца (вариант в):</p> $P_u = \frac{r_{cp} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{np}) + \frac{1}{3} f \frac{D_n^3 - D_b^3}{D_n^2 - D_b^2}}{l} \cdot Q$ $i = \frac{l}{r_{cp} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{np}) + \frac{1}{3} f \frac{D_n^3 - D_b^3}{D_n^2 - D_b^2}}$ $Q = \frac{P_u \cdot l}{r_{cp} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{np}) + \frac{1}{3} f \frac{D_n^3 - D_b^3}{D_n^2 - D_b^2}}$ <p>Приблизенно для винтов с резьбой М8...М52</p> $P_u = \frac{0,1d + 0,05 \frac{D_n^3 - D_b^3}{D_n^2 - D_b^2}}{l} \cdot Q.$
	<p>4. Винт с башмаком (вариант г):</p> $P_u = \frac{r_{cp} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{np}) + f R \operatorname{ctg} \frac{\psi}{2}}{l} \cdot Q$ $i = \frac{l}{r_{cp} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{np}) + f R \operatorname{ctg} \frac{\psi}{2}}; Q = \frac{P_u \cdot l}{r_{cp} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{np}) + f R \operatorname{ctg} \frac{\psi}{2}}$ <p>Приблизенно для винтов с резьбой М8...М52</p> $P_u = \frac{0,1d + 0,15 R \operatorname{ctg} \frac{\psi}{2}}{l} \cdot Q.$



5. При использовании гайки (вариант д) и гайки-звёздочки (вариант е):

$$P_u = \frac{r_{cp} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{np}) + \frac{1}{3} f \frac{D_n^3 - d^3}{D_n^2 - d^2}}{l} \cdot Q;$$

$$i = \frac{l}{r_{cp} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{np}) + \frac{1}{3} f \frac{D_n^3 - d^3}{D_n^2 - d^2}};$$

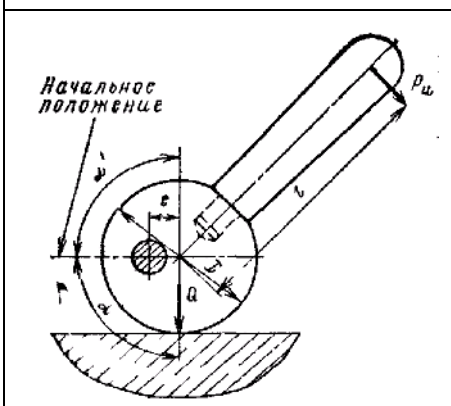
$$Q = \frac{P_u \cdot l}{r_{cp} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{np}) + \frac{1}{3} f \frac{D_n^3 - d^3}{D_n^2 - d^2}}.$$

Приближенно для винтов с резьбой М8...М52.

$$P_u \approx \frac{0,1d + 0,05 \frac{D_n^3 - d^3}{D_n^2 - d^2}}{l} \cdot Q.$$

Принятые обозначения: Q - зажимное усилие, Н; P_u - исходное усилие, Н; l - плечо, на котором прилагается усилие P_u , мм; i - коэффициент усиления силового механизма; $2r_{cp}$ - средний диаметр резьбы винтов, мм; α - угол подъема резьбы винта, град (для метрической резьбы с крупным шагом $\alpha = 2^\circ 30'$); φ_{np} - приведенный угол трения в резьбе, град ($\varphi_{np} = 10^\circ 30'$); d - диаметр резьбы винта, мм; f - коэффициент трения между опорный торцом и заготовкой, $f = 0,1 \dots 0,15$; D_n - наружный диаметр опорного торца винта или гайки, мм; D_g - внутренний диаметр опорного торца винта или гайки, мм.

Эксцентрикковые механизмы



$$P_u = \frac{e[1 + \sin(\alpha' + \varphi)]}{l} \cdot Q; \quad i = \frac{l}{e[1 + \sin(\alpha' + \varphi)]};$$

$$Q = \frac{P_u \cdot l}{e[1 + \sin(\alpha' + \varphi)]}.$$

Приближенно при $\varphi = 8^\circ$ ($f = 0,12 \dots 0,15$) и

$$\alpha' = 82^\circ, \quad P_u = \frac{2e}{l} Q$$

Принятые обозначения: P_u - исходное усилие, Н; Q - зажимное усилие, Н; i - коэффициент усиления; l - плечо, на котором прилагается усилие P_u , мм; e -

эксцентриситет эксцентрика, мм; $\alpha' = (180^\circ - \alpha)$, где α - угол поворота эксцентрика от начального положения, град; φ - угол трения в месте приложения зажимного усилия, град; $tg\varphi = f = 0,12...0,15$.

Рычажные механизмы

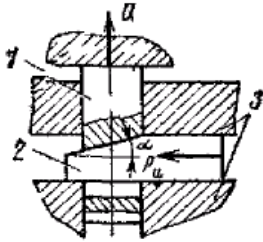
	$P_u = \frac{l_1 + l_2}{l_1 \cdot \eta} Q; \quad i = \frac{l_1}{l_1 + l_2} \eta;$ $Q = \frac{l_1}{l_1 + l_2} \eta P_u.$
	$P_u = \frac{l_1}{(l_1 + l_2) \cdot \eta} Q; \quad i = \frac{l_1 + l_2}{l_1} \eta;$ $Q = \frac{l_1 + l_2}{l_2} \eta P_u.$
	$P_u = \frac{l_2}{l_1 \cdot \eta} Q; \quad i = \frac{l_1}{l_2} \eta; \quad Q = \frac{l_1}{l_2} \eta P_u.$

Принятые обозначения: P_u - исходное усилие, Н; Q - зажимное усилие, Н; i - коэффициент усиления; l_1 и l_2 - плечи рычагов, мм; η - КПД, учитывающий потери на трение в опоре (на оси) рычага, $\eta = 0,85$.

Клиновые и клиноплунжерные механизмы

	$P_u = [tg(\alpha + \varphi) + tg\varphi_1] \cdot Q;$ $i = \frac{1}{tg(\alpha + \varphi) + tg\varphi_1};$ $Q = \frac{1}{tg(\alpha + \varphi) + tg\varphi_1} P_u.$
	$P_u = [tg(\alpha + \varphi) + tg\varphi_{1np}] \cdot Q;$ $i = \frac{1}{tg(\alpha + \varphi) + tg\varphi_{1np}};$ $Q = \frac{1}{tg(\alpha + \varphi) + tg\varphi_1} P_u.$

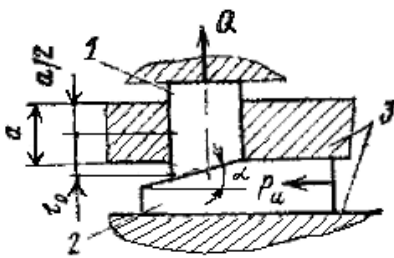
Клиновые и клиноплунжерные механизмы



$$P_u = \frac{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi) + \operatorname{tg} \varphi_1}{1 - \operatorname{tg} \varphi_2 \operatorname{tg}(\alpha + \varphi)} \cdot Q;$$

$$i = \frac{1 - \operatorname{tg} \varphi_2 \operatorname{tg}(\alpha + \varphi)}{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi) + \operatorname{tg} \varphi_1};$$

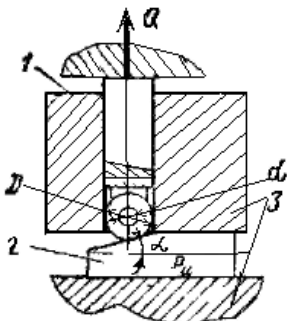
$$Q = \frac{1 - \operatorname{tg} \varphi_2 \operatorname{tg}(\alpha + \varphi)}{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi) + \operatorname{tg} \varphi_1} P_u.$$



$$P_u = \frac{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi) + \operatorname{tg} \varphi_1}{1 - \frac{3l_0}{a} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi) \operatorname{tg} \varphi_2} \cdot Q;$$

$$i = \frac{1 - \frac{3l_0}{a} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi) \operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi) + \operatorname{tg} \varphi_1};$$

$$Q = \frac{1 - \frac{3l_0}{a} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi) \operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi) + \operatorname{tg} \varphi_1} P_u.$$



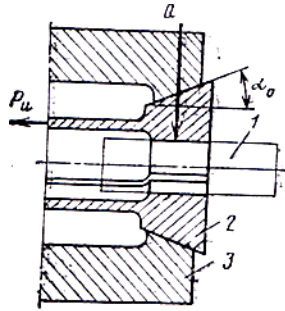
$$P_u = \frac{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{np}) + \operatorname{tg} \varphi_1}{1 - \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{np}) \operatorname{tg} \varphi_2} \cdot Q;$$

$$i = \frac{1 - \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{np}) \operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{np}) + \operatorname{tg} \varphi_1};$$

$$Q = \frac{1 - \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{np}) \operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{np}) + \operatorname{tg} \varphi_1} P_u.$$

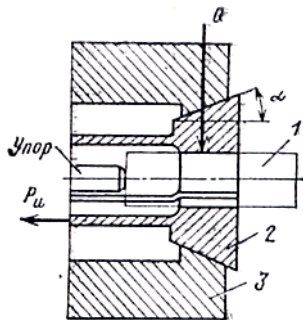
Принятые обозначения: P_u - исходное усилие, Н; Q - зажимное усилие, Н; i - коэффициент усиления; α - угол клина, град; φ - угол трения между плунжером 1 и клином 2, град ($\operatorname{tg} \varphi = f = 0,1 \dots 0,15$); φ_1 - угол трения между клином 2 и корпусом 3, град ($\operatorname{tg} \varphi_1 = f_1 = 0,1 \dots 0,15$); φ_{np} - приведенный угол трения между клином 2 и роликом, град ($\operatorname{tg} \varphi_{np} = f \frac{d}{D}$); φ_2 - угол трения между плунжером 1 и корпусом 3, град ($\operatorname{tg} \varphi_2 = f_2 = 0,1 \dots 0,15$); φ_{1np} - приведенный угол трения между клином 2 и роликом, град ($\operatorname{tg} \varphi_{1np} = f_1 \frac{d}{D}$); a и l_0 - размеры механизма, мм.

Цанговые (многоклиновые) механизмы



$$P_u = \operatorname{tg}(\alpha + \varphi) \cdot Q; \quad i = \frac{1}{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi)};$$

$$Q = \frac{1}{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi)} \cdot P_u.$$



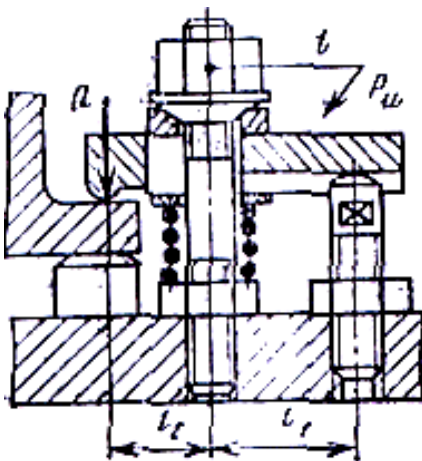
$$P_u = [\operatorname{tg}(\alpha + \varphi) + \operatorname{tg} \varphi_1] \cdot Q; \quad i = \frac{1}{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi) + \operatorname{tg} \varphi_1};$$

$$Q = \frac{1}{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi) + \operatorname{tg} \varphi_1} P_u.$$

Принятые обозначения: P_u - исходное усилие, Н; Q - зажимное усилие, Н; i - коэффициент усиления; α - угол конуса цанги 2, град; φ - угол трения между цангой 2 и корпусом 3, град ($\operatorname{tg} \varphi = f = 0,1 \dots 0,15$); φ_1 - угол трения между заготовкой 1 и цангой 2, град.

Таблица 1.5.

Расчетные формулы для определения P_u , i и Q комбинированных силовых механизмов.



$$P_u = \frac{r_{cp} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{np}) + \frac{1}{3} f \frac{D_n^3 - d^3}{D_n^2 - d^2} \cdot \frac{l_1 + l_2}{l_1 \cdot \eta}}{l} \cdot Q;$$

$$i = \frac{l}{r_{cp} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{np}) + \frac{1}{3} f \frac{D_n^3 - d^3}{D_n^2 - d^2} \cdot \frac{l_1 + l_2}{l_1} \cdot \eta};$$

$$Q = \frac{l}{r_{cp} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{np}) + \frac{1}{3} f \frac{D_n^3 - d^3}{D_n^2 - d^2} \cdot \frac{l_1 \eta}{l_1 + l_2}} \cdot P_u.$$

	$P_u = \frac{r_{cp} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{np})}{l} \cdot \frac{l_2}{l_1 \cdot \eta} \cdot Q;$ $i = \frac{l}{r_{cp} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{np})} \cdot \frac{l_1}{l_2} \cdot \eta;$ $Q = \frac{l}{r_{cp} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{np})} \cdot \frac{l_1 \cdot \eta}{l_2} \cdot P_u.$
	$P_u = \frac{r_{cp} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{np}) + \frac{1}{3} f \frac{D_H^3 - d^3}{D_H^2 - d^2}}{l} \cdot \frac{l_1 + l_2}{l_1 \cdot \eta} \cdot Q$ $i = \frac{l}{r_{cp} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{np}) + \frac{1}{3} f \frac{D_H^3 - d^3}{D_H^2 - d^2}} \cdot \frac{l_1}{l_1 + l_2} \cdot \eta;$ $Q = \frac{l}{r_{cp} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{np}) + \frac{1}{3} f \frac{D_H^3 - d^3}{D_H^2 - d^2}} \cdot \frac{l_1 + l_2}{l_1} \cdot \eta \cdot P_u.$
	$P_u = \frac{r_{cp} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{np})}{l} \cdot \frac{l_2}{l_1 \cdot \eta \cdot \cos \theta} \cdot Q;$ $i = \frac{l}{r_{cp} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{np})} \cdot \frac{l_1 \cdot \cos \theta}{l_2} \cdot \eta;$ $Q = \frac{l}{r_{cp} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{np})} \cdot \frac{l_1 \cdot \cos \theta}{l_2} \cdot \eta \cdot P_u.$
	$P_u \approx \frac{e[1 + \sin(\alpha' + \varphi)]}{l} \cdot \frac{l_2 \cdot \cos \theta}{l_1 \cdot \eta} \cdot Q;$ $i \approx \frac{l}{e[1 + \sin(\alpha' + \varphi)]} \cdot \frac{l_1}{l_2 \cdot \cos \theta} \cdot \eta;$ $Q \approx \frac{l}{e[1 + \sin(\alpha' + \varphi)]} \cdot \frac{l_1 \cdot \eta}{l_2 \cdot \cos \theta} \cdot P_u.$

	$P_u = \frac{H}{H - 3l_1 f} \cdot Q;$ $i = 1 - \frac{3l_1}{H} \cdot f;$ $Q = \left(1 - \frac{3l_1}{H}\right) \cdot P_u.$
	$P_u = \frac{l_2}{l_1} \cdot \frac{\cos \theta}{\cos \theta_1} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot Q;$ $i = \frac{l_1}{l_2} \cdot \frac{\cos \theta_1}{\cos \theta} \cdot \eta;$ $Q = \frac{l_1}{l_2} \cdot \frac{\cos \theta_1}{\cos \theta} \cdot \eta \cdot P_u.$
	$P_u = 2 \operatorname{tg}(\theta + \beta) \cdot \operatorname{tg} \theta_1 \cdot \frac{1}{\eta} \cdot Q;$ $i = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\operatorname{tg}(\theta + \beta)} \cdot \frac{1}{\operatorname{tg} \theta_1} \cdot \eta;$ $Q = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\operatorname{tg}(\theta + \beta)} \cdot \frac{1}{\operatorname{tg} \theta_1} \cdot \eta \cdot P_u.$
	$P_u = \frac{l_3}{l_1} \cdot \frac{l_1 + l_2}{l_1} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot Q;$ $i = \frac{l_4}{l_3} \cdot \frac{l_1}{l_1 + l_2} \cdot \eta;$ $Q = \frac{l_4}{l_3} \cdot \frac{l_1}{l_1 + l_2} \cdot \eta \cdot P_u.$
	$P_u = \frac{l_2 [\operatorname{tg}(\theta + \beta) + \operatorname{tg} \varphi_1]}{l_1 \cdot \eta} \cdot Q;$ $i = \frac{l_1 \cdot \eta}{l_2 [\operatorname{tg}(\theta + \beta) + \operatorname{tg} \varphi_1]};$ $Q = \frac{l_1 \cdot \eta}{l_2 [\operatorname{tg}(\theta + \beta) + \operatorname{tg} \varphi_1]} \cdot P_u.$

	$P_u = \frac{\operatorname{tg}(\theta + \beta) + \operatorname{tg} \varphi_{1np}}{\eta} \cdot \frac{l_2}{l_1} \cdot Q;$ $i = \frac{\eta}{\operatorname{tg}(\theta + \beta) + \operatorname{tg} \varphi_{1np}} \cdot \frac{l_1}{l_2};$ $Q = \frac{\eta}{\operatorname{tg}(\theta + \beta) + \operatorname{tg} \varphi_{1np}} \cdot \frac{l_1}{l_2} \cdot P_u.$
	$P_u = \frac{2 \operatorname{tg}(\theta + \beta)}{\eta} \cdot \frac{l_2}{l_1} \cdot Q;$ $i = \frac{\eta}{2 \operatorname{tg}(\theta + \beta)} \cdot \frac{l_1}{l_2};$ $Q = \frac{\eta}{2 \operatorname{tg}(\theta + \beta)} \cdot \frac{l_1}{l_2} \cdot P_u.$
	$P_u = 2 \operatorname{tg}(\theta + \beta) \cdot \frac{l_2}{l_1} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot Q;$ $i = \frac{\eta}{2 \operatorname{tg}(\theta + \beta)} \cdot \frac{l_1}{l_2};$ $Q = \frac{\eta}{2 \operatorname{tg}(\theta + \beta)} \cdot \frac{l_1}{l_2} \cdot P_u.$
	$P_u = \frac{2 \operatorname{tg}(\theta + \beta)}{1 - \frac{3l_0}{a} \operatorname{tg}(\theta + \beta) \operatorname{tg} \varphi_2} \cdot Q;$ $i = \frac{1 - \frac{3l_0}{a} \operatorname{tg}(\theta + \beta) \operatorname{tg} \varphi_2}{2 \operatorname{tg}(\theta + \beta)};$ $Q = \frac{1 - \frac{3l_0}{a} \operatorname{tg}(\theta + \beta) \operatorname{tg} \varphi_2}{2 \operatorname{tg}(\theta + \beta)} \cdot P_u.$
	$P_u = \frac{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi) + \operatorname{tg} \varphi_1}{1 - \frac{3l_0}{a} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi) \operatorname{tg} \varphi_2} \cdot \frac{l_2}{l_1 \eta} \cdot Q;$ $i = \frac{1 - \frac{3l_0}{a} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi) \operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi) + \operatorname{tg} \varphi_1} \cdot \frac{l_1}{l_2} \eta;$ $Q = \frac{1 - \frac{3l_0}{a} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi) \operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi) + \operatorname{tg} \varphi_1} \cdot \frac{l_1}{l_2} \eta \cdot P_u.$

	$P_u = \frac{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{np}) + \operatorname{tg} \varphi_1}{1 - \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{np})} \cdot \frac{l_2}{l_1} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot Q;$ $i = \frac{1 - \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{np})}{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{np}) + \operatorname{tg} \varphi_1} \cdot \frac{l_1}{l_2} \eta;$ $i = \frac{1 - \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{np})}{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{np}) + \operatorname{tg} \varphi_1} \cdot \frac{l_1}{l_2} \eta \cdot P_u.$
<p>Принятые обозначения: θ и θ_1 - углы между плечами рычага и направлением действия силы, град; β - дополнительный угол к углу θ, которым учитываются потери на трение скольжения в шарнирах ($\beta = \arcsin f \cdot d / L = 1^\circ$). В табл. 1.5 сохранены обозначения, принятые ранее (в табл. 1.4) для соответствующих простых механизмов, входящих в рассматриваемый комбинированный механизм.</p>	

Рассмотрим несколько силовых механизмов, расчёты которых специфичны - отличаются от приведенных.

Механизмы с гидропластом. Применяются две разновидности механизмов с гидропластом: многозвенные (рис. 1.53, а) и с тонкостенной упруго деформируемой втулкой 1 (рис. 1.53, б). В этих силовых механизмах рабочей средой, с помощью которой создается гидростатическое давление в закрытой полости, является гидропласт 3.

Многозвенные механизмы (рис. 1.53, а). Сила зажима Q рабочим плунжером 1 определяется по формуле

$$Q = \left(\frac{D}{d} \right)^2 \eta P_u - q,$$

где Q - зажимное усилие, Н; D - диаметр рабочего плунжера 1, мм; d - диаметр нажимного плунжера 2, мм; P_u - исходное усилие, Н; η - КПД, равный 0,90...0,95; q - усилие возвратной пружины, Н.

Исходное усилие рассчитывается по формуле:

$$P_u = (Q + q) \cdot \left(\frac{d}{D} \right)^2 \cdot \frac{1}{\eta}.$$

Механизмы с тонкостенной упруго деформируемой втулкой (рис. 1.53, б). Зажимное усилие Q , максимальный передаваемый момент (момент трения) M_{max} , исходное усилие P_u на плунжере 2 и основные размеры втулок для этих механизмов можно определить, пользуясь методикой, изложенной на с. 56...65 [151]. Порядок расчета следующий.

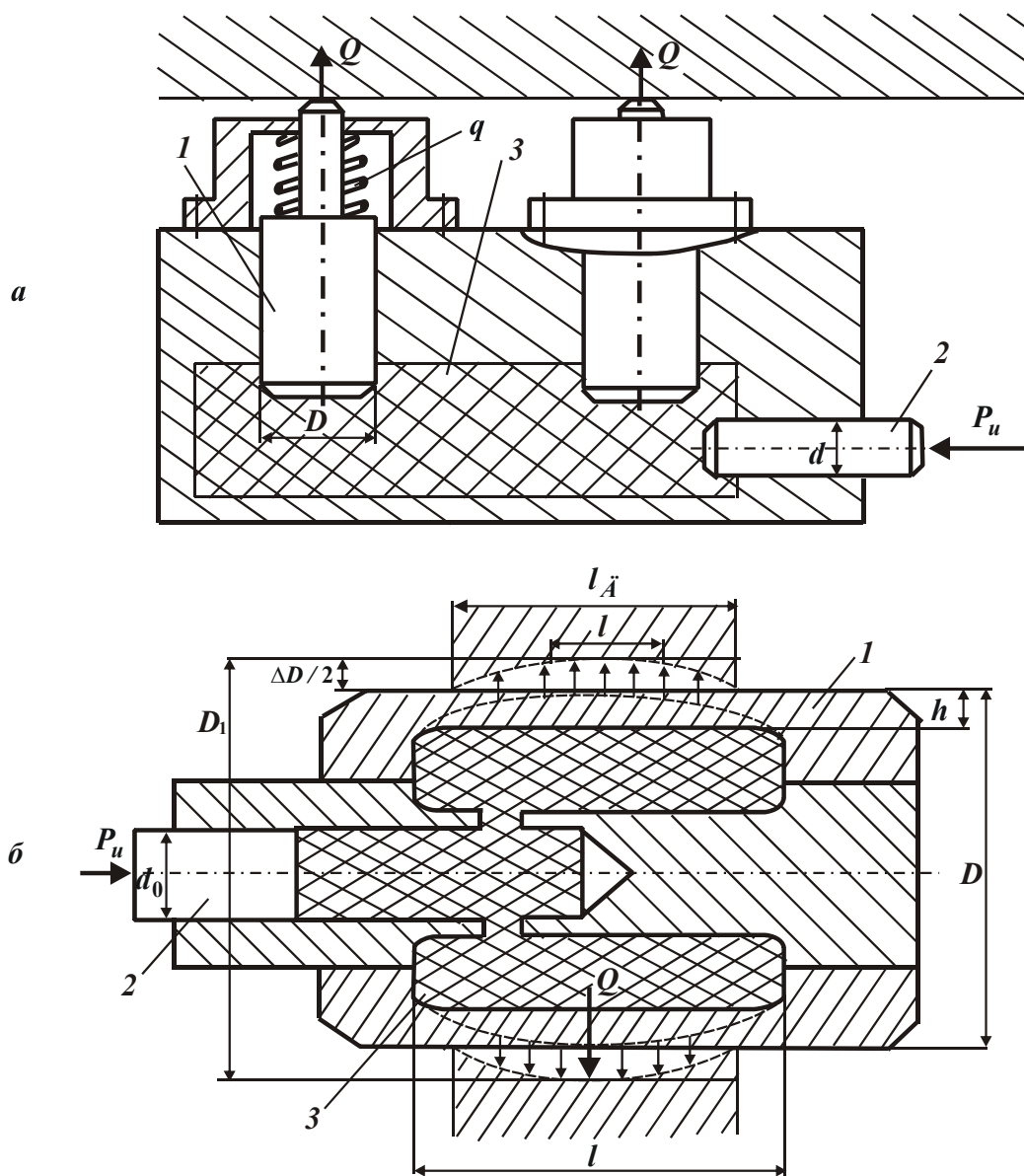


Рис. 1.53. Силовые механизмы с гидропластом: а - многозвенные; б - с тонкостенной упруго деформируемой втулкой.

1. Выбирают посадку для соединения заготовка – опорный элемент. Посадка заготовки на опорный элемент (на втулку 1 на рис. 1.53, б) по диаметру D должна быть подвижной с гарантированным зазором. Если диаметр базы заготовки выполнен с отклонениями отверстия, то для диаметра D втулки 1 следует назначать отклонения по $f7...f9$.
2. Определяют длину тонкостенной части втулки $l = (1...1,3) l_D$, где l_D - длина заготовки, мм.
3. По табл. 20 в работе [151] назначают толщину тонкостенной части втулки h , мм.
4. Рассчитывают максимальный зазор S_{max} между заготовкой и втулкой в свободном состоянии, мм.

5. По формуле $2l_0 = 2,6D\sqrt{h/D}$ (где D - диаметр втулки, мм), находят характеристический показатель $2l_0$ и устанавливают, является ли втулка длинной ($l > 2l_0$) или короткой ($l < 2l_0$).
6. Определяют допускаемую упругую деформацию втулки ΔD , мм. Принимают:

для длинных втулок

из хромистых сталей: $\Delta D \approx 0,003D$;

из конструкционных сталей: $\Delta D \approx 0,002D$;

для коротких втулок

из хромистых сталей: $\Delta D \approx 0,003[1 - \varphi(x)]$;

из конструкционных сталей: $\Delta D \approx 0,002[1 - \varphi(x)]$.

Величины $\varphi(x)$ даны в табл. 1.6; $x = 0,9 \frac{l}{\pi D}$.

7. Рассчитывают зажимной натяг, мм:

$$\delta = \Delta D - S_{max}.$$

8. Определяют гидростатическое давление:

$$p = \frac{2\Delta DEh}{D^2} \text{ - для втулок } l > 0,3D;$$

$$p = \frac{1,25\Delta DEh}{Dl} \text{ - для втулок } l < 0,3D,$$

где p и E - в МПа, а ΔD и h - в мм.

9. Находят зажимное усилие Q :

$$Q = 5 \cdot 10^5 \frac{2h}{D} \sqrt{\frac{2h}{D}} \delta D,$$

где Q - в Н; h , D и δ - в мм.

10. Определяют силу F , удерживающую заготовку от осевого перемещения и поворота:

$$F = fQ = 5 \cdot 10^5 \frac{2h}{D} \sqrt{\frac{2h}{D}} \delta D f,$$

где f - коэффициент трения; F - в Н; h , D и δ - в мм.

11. Рассчитывают максимальный передаваемый крутящий момент:

$$M_{max} = F \frac{D}{2}, \quad M_{max} = 2,5 \cdot 10^2 \frac{2h}{D} \sqrt{\frac{2h}{D}} \delta D^2 f,$$

где M_{max} - в Н; h , D и δ - в мм.

12. Находят исходное усилие P_u , которое необходимо приложить к плунжеру 2 (рис. 1.53, б), чтобы создать зажимное усилие Q :

$$P_u = \frac{\pi d_0^2}{4} p,$$

где P_u - исходное усилие, действующее на плунжер 2, Н; d_0 - диаметр плунжера 2, мм; p - гидростатическое давление, МПа (формула для его определения указана выше).

Таблица 1.6.

Числовые значения $\varphi(x)$

x	$\varphi(x)$	x	$\varphi(x)$	x	$\varphi(x)$
0,0	1,0	0,8	0,64	1,6	0,20
0,1	0,99	0,9	0,57	1,7	0,16
0,2	0,97	1,0	0,51	1,8	0,12
0,3	0,93	1,1	0,45	1,9	0,09
0,4	0,88	1,2	0,39	2,0	0,07
0,5	0,82	1,3	0,34	2,1	0,04
0,6	0,76	1,4	0,28	2,2	0,02
0,7	0,70	1,5	0,24	2,3	0,01

Полученные данные для M_{max} следует сопоставить с моментом от сил резания $M_{рез}$. Заготовка не будет проворачиваться, если удовлетворяется условие:

$$M_{max} > KM_{рез},$$

где K - коэффициент надежности закрепления.

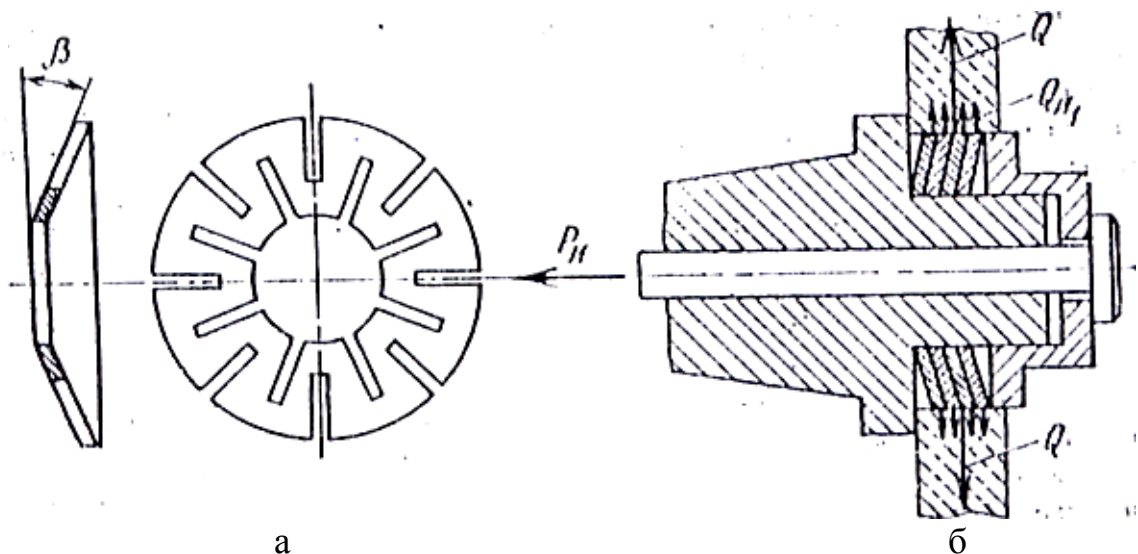


Рис. 1.54. Силовые механизмы с пластинчатыми пружинами: а - пружина; б - закрепление заготовки на оправке с пластинчатыми пружинами.

Механизмы с пластинчатыми пружинами. Пластинчатые (тарельчатые) пружины (рис. 1.54, а) применяются в приспособлениях для базирования и закрепления заготовок с цилиндрическими базами (рис. 1.54, б).

Пластинчатая пружина представляет собой вогнутую шайбу в форме усеченного конуса с несквозными прорезами. При приложении осевой силы P_u происходит приращение наружного (посадочного) диаметра пружины. В зависимости от размера пружины приращение ее диаметра может составлять 0,1...0,4 мм.

Расчетные формулы для определения P_u и Q для одной пружины имеют следующий вид

$$P_{u1} = 1,33 \cdot \operatorname{tg}(\beta - 2^0) \cdot Q_1; \quad Q_1 = \frac{P_{u1}}{1,33 \cdot \operatorname{tg}(\beta - 2^0)},$$

где P_{u1} - исходное усилие (осевая сила), необходимое для сжатия одной пружины, Н; Q_1 - зажимное усилие, создаваемое одной пружиной, Н; β - угол прогиба пружины в свободном состоянии, град ($\beta = 10...12^\circ$).

Количество пружин для передачи всего крутящего момента, равного $KM_{рез}$, определяется по формуле

$$n = \frac{KM_{рез}}{M_k},$$

где n - число пружин, установленных в механизме; $M_{рез}$ - момент резания, Н·м; K - коэффициент надёжности закрепления; M_k - крутящий момент трения, создаваемый одной пружиной при приложении осевой силы P_{u1} и передаваемой заготовке, Н·м.

Величину момента трения M_k , передаваемого одной пружиной, для конкретной выбранной пружины можно найти в табл. 24 на с. 70...72 [151].

Исходное усилие P_u и зажимное усилие Q для комплекта пружин, установленных в зажимном механизме, определяются по формулам:

$$P_u = P_{u1} \cdot n = 1,33 \cdot \operatorname{tg}(\beta - 2^0) \cdot Q_1 \cdot n;$$

$$Q = Q_1 \cdot n = \frac{P_{u1} \cdot n}{1,33 \cdot \operatorname{tg}(\beta - 2^0)},$$

где P_u - исходное усилие, Н; Q - зажимное усилие, Н.

Обозначения остальных величин приведены выше.

Механизмы с мембранами. В приспособлениях применяются чашечные (рис. 1.55, а) и рожковые (рис. 1.55, б) мембраны. Зажим заготовки в мембране может осуществляться как силой упругости, так и усилием, создаваемым приводом. В первом случае мембрану перед установкой заготовки деформируют усилием P_u , чтобы можно было создать зазор и вставить заготовку, а затем после ее установки усилие P_u снимают, и мембрана силами упругости закрепляет заготовку.

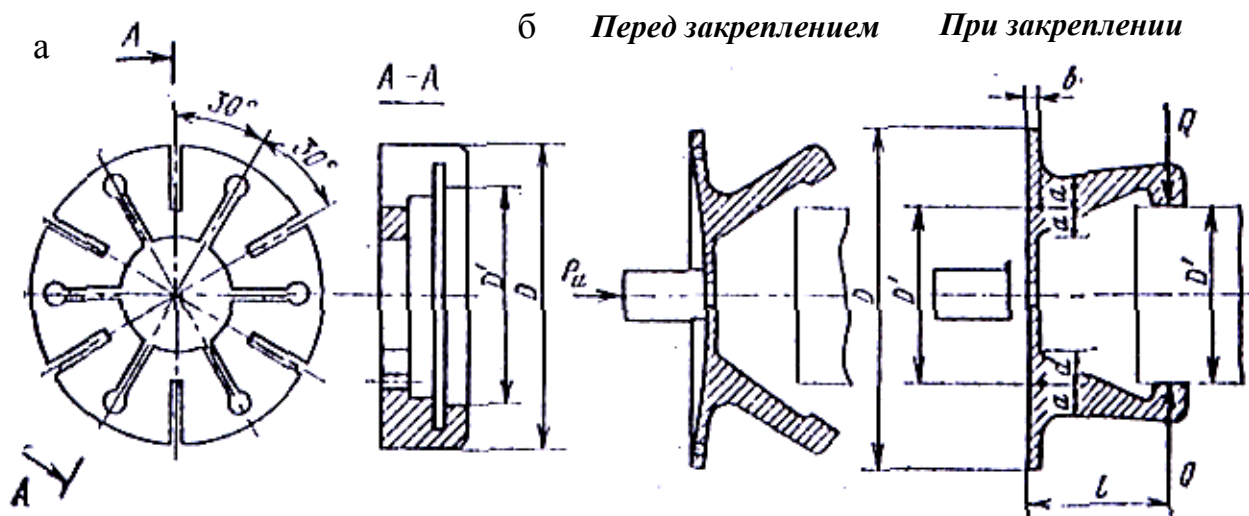


Рис. 1.55. Мембраны: а – чашечная; б – рожковая.

Расчет рожковой мембраны, закрепляющей заготовку силами упругости, рекомендуется производить в следующей последовательности.

1. Определяем зажимное усилие Q на одном кулачке (рожке)

$$Q = 10^3 \frac{KM_{рез}}{nfr},$$

где Q - зажимное усилие, Н; $M_{рез}$ - момент от сил резания, в Н·м; n - число кулачков у мембраны ($n = 6...12$); f - коэффициент трения между заготовкой и кулачком ($f = 0,15...0,18$); r - радиус базы заготовки $\left(r = \frac{D}{2}\right)$, мм; K - коэффициент надежности закрепления.

2. Находим величину момента, вызывающего изгиб диска мембраны:

$$M_{изг} = \frac{Qnl}{2\pi r},$$

где $M_{изг}$ - распределенный по окружности радиусом r момент, вызывающий изгиб диска мембраны, Н; l - расстояние от середины кулачков до средней плоскости мембраны, мм; Q , n и r - то же, что в п.1.

3. Выбираем наружный диаметр мембраны D . Принимаем $D = (1,3...3)D^1$, где D^1 - диаметр базы заготовки, мм.

4. Рассчитываем толщину диска мембраны b (в мм) по соотношению $b = 0,025D$.

5. Определяем отношение $\frac{D}{2r}$, а по нему - величину момента заделки $M_{зад}$, Н·м, в долях от $M_{изг}$, пользуясь табл. 1.7.

Таблица 1.7

Значения $M_{зад}$ в зависимости от $\frac{D}{2r}$

$\frac{D}{2r}$	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00
$M_{зад}$	0,825	0,675	0,590	0,565	0,555	0,565	0,575	0,585

6. Рассчитываем цилиндрическую жесткость изгиба мембраны B :

$$B = \frac{Eb^3}{10^3 \cdot 12(1 - \mu^2)},$$

где B - цилиндрическая жесткость изгиба мембраны единичной ширины, Н·м; E - модуль упругости, МПа ($E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа); b - толщина мембраны, м; $\mu = 0,3$.

7. Находим угол φ разжима кулачков (рожков) при закреплении заготовки с наименьшим предельным размером установочной базы (D'_{min}):

$$\varphi = \frac{M_{зад}r}{10^3 \cdot B(1 + \mu)},$$

где φ - угол разжима кулачков, рад.

8. Определяем угол φ' максимального разжима кулачков:

$$\varphi' \approx \varphi + \frac{\delta}{2l} + \frac{\Delta}{2l},$$

где δ - допуск на диаметр D' базы заготовки, мм; $\Delta = 0,01...0,03$ мм - зазор между базой заготовки и кулачками перед установкой заготовки с наибольшим диаметром базы D_{max} .

9. Рассчитываем исходное усилие P_u , необходимое для разжима кулачков перед закреплением заготовки:

$$P_u = \frac{4 \cdot 10^3 \pi B \varphi'}{r \ln \frac{D}{2r}}.$$

1.4. ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ

1.4.1. РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТА

Проектирование любого изделия включает разработку комплексной технической документации, содержащей чертежи, расчёты, технико-экономические обоснования, пояснительную записку и другие материалы, необходимые для производства изделия.

Проектирование осуществляется по стадиям и завершается созданием конструкторской рабочей документации: *техническое предложение, эскизный проект, технический проект, рабочая документация*. Таким путём могут разрабатываться и приспособления. Однако на практике при проектировании приспособлений, как правило, ограничиваются разработкой технического проекта и конструкторской технической документации.

Задание на проектирование приспособления разрабатывает технолог. Перед началом конструирования приспособления задание рассматривается совместно технологом и конструктором, после чего оно выдается либо в виде оперативного эскиза с технологической картой, либо в виде чертежа детали с необходимыми указаниями. В том и другом случае конструктор получает информацию об уже обработанных и обрабатываемых на данной операции поверхностях заготовки, а также о типе станка и режимах резания. Часто в заданиях указываются базы для базирования заготовки в приспособлении на данной операции, а также схемы её закрепления. Если эти указания конструктору не даны, он должен выбрать их самостоятельно. Рассмотрим последовательность проектирования приспособления и содержание его отдельных этапов.

Выбор группы приспособления в зависимости от типа производства осуществляется перед началом его конструирования. В условиях

массового и крупносерийного производства используются специальные приспособления, в средне- и мелкосерийном, а также единичном – переналаживаемые: УСП, УНП, СРП, СНП. Выбор наиболее экономически целесообразной группы производится на основе соответствующих экономических расчётов.

Выбор способа установки приспособления на станке также должен предшествовать началу его конструирования, так как от этого в некоторой степени зависят схема закрепления заготовки и конструкция зажимных устройств, а также общая компоновка приспособления.

Выбор баз и способа базирования заготовки. Базы могут быть указаны технологом, например, на операционном эскизе или выбираются конструктором. Для выбранных баз конструктор разрабатывает способ базирования заготовки, руководствуясь правилом ориентирования заготовок группой баз (раздел 1.2.9).

Выбор точки приложения и направления зажимного усилия производится обычно одновременно с выбором способа базирования. Необходимость согласования схемы закрепления и способа базирования заготовки обусловлена стремлением учесть многие факторы, влияющие на точность обработки, надёжность закрепления, компактность приспособления, удобство снятия и установки заготовки и т. д. (раздел 1.3).

Выбор конструкции опорных элементов осуществляется с учетом выбранного способа базирования по рекомендациям, приведенным в справочниках по приспособлениям, ГОСТах и отраслевых нормалам. Как правило, следует использовать стандартные нормализованные элементы.

Выбор контактного элемента, силового механизма и привода производится с учётом конкретных условий выполнения данной операции по рекомендациям, приведенным в разделе 1.3.5. Кроме того, необходимо учитывать и *правила техники безопасности*, предусмотренные, например, ГОСТ 12.2.029-77. В частности, суммарные расчётные усилия зажимных элементов приспособлений должны превышать максимальные силы резания не менее чем в 2,5 раза; самотормозящиеся эксцентриковые быстродействующие устройства допускается применять при развиваемом расчётном усилии зажима, не превышающем 220 Н (220 кгс), а гайки-барашки и гайки-звездочки - при усилии зажима не более 100 Н (10 кгс).

При выборе конструктивной схемы силового механизма и всего

зажимного устройства рекомендуется пользоваться справочниками и другой литературой по приспособлениям, где приведено большое количество апробированных конструкций, обладающих надёжностью, высокой производительностью и удобством эксплуатации. Многие из них нормализованы и включены в отраслевые нормы. Использование нормализованной конструкции зажимного устройства даст возможность сократить сроки проектирования приспособления, повысить его надёжность и производительность.

Выбор направляющих элементов для инструмента производится в зависимости от конкретных условий выполнения операции по рекомендациям, приведенным в работах [45, 46].

Разработка компоновки приспособления осуществляется на уровне технического проекта. В большинстве случаев выполненная опытным конструктором компоновка после соответствующих согласований и некоторой корректировки оформляется как сборочный чертеж приспособления. В связи с этим при её разработке учитываются требования ГОСТ по правилам выполнения чертежей деталей сборочных, общих видов, габаритных и монтажных, а также рекомендации по оформлению сборочных чертежей приспособлений. Приведем некоторые из этих рекомендаций.

Сборочные чертежи приспособлений следует выполнять в масштабе 1:1. Обрабатываемую заготовку необходимо изображать на них во всех проекциях (а в ряде случаев – и режущий инструмент). Эти рекомендации продиктованы стремлением предотвратить возможные ошибки при конструировании приспособления из-за выбора несоответствующих элементов конструкции, недоучёта требований удобства и снятия заготовки и др.

Чертеж компоновки должен содержать необходимое число проекций и разрезов, благодаря которым можно было бы получить полное представление об устройстве и принципе действия приспособления.

Чтобы можно было осуществить проверочный расчёт точности обработки, на чертеже должны быть представлены все используемые при расчёте размеры элементов приспособления с допусками, а также указаны предельные отклонения формы и расположения его поверхностей (опорных элементов относительно посадочных поверхностей, направляющих элементов относительно опорных и т.д.) в соответствии с ГОСТ 2.308-79.

Чертеж рекомендуется начинать с изображения обрабатываемой

заготовки, а затем дополнять его изображением опорных элементов и зажимных устройств в соответствующих положениях относительно заготовки, направляющих элементов для режущего инструмента и оформлением корпуса приспособления. Обрабатываемую заготовку удобно изображать тонкими линиями карандашом с разрезами для выявления способа ее базирования и закрепления. Необходимо помнить, что на чертеже за главный принимается вид приспособления, установленного на столе станка и наблюдаемого со стороны рабочего места.

При компоновке приспособления следует учитывать также *правила техники безопасности*, предусмотренные ГОСТ 12.2.029-77:

- конструкция приспособления должна обеспечивать свободный выход стружки, сток смазочно-охлаждающей жидкости, а при необходимости - иметь устройства для их удаления;
- она должна также обеспечивать безопасность установки и снятия, предотвращать возможность их самопроизвольного спада при установке;
- в приспособлениях, предназначенных для обработки заготовок массой свыше 12 кг, должна предусматриваться возможность свободной закладки и съёма стропов, клещей и других захватных устройств для перемещения устройств с помощью грузоподъёмных механизмов;
- масса кантуемого вручную приспособления вместе с закреплённой заготовкой не должна превышать 16 кг;
- приспособления массой до 16 кг, устанавливаемые без применения средств механизации, должны иметь устройства и поверхности, обеспечивающие безопасность и удобство их установки и снятия;
- приспособления массой свыше 16 кг должны иметь устройства (рым-болты, цапфы и т.п.), обеспечивающие сохранение устойчивости приспособлений при перемещении их грузоподъёмными механизмами;
- рым-болты для транспортировки станочных приспособлений должны выбираться в зависимости от их массы и схемы строповки (например, по ГОСТ 4751-73);
- у приспособлений с механизированным (пневматическим, гидравлическим и т.д.) зажимом зазор между контактным элементом и заготовкой не должен превышать 5 мм или должны быть предусмотрены меры, обеспечивающие безопасность работ.

После разработки конструкции приспособления приступают к расчётам.

Расчёт зажимных устройств для обеспечения надёжного закрепления заготовки производится по методике, изложенной на в разделах 1.3.3 - 1.3.5.

Расчёт точности сконструированного приспособления осуществляется по методикам, приведенным в работах [45,462].

Расчёты прочности деталей и узлов приспособления. Кинематические расчеты. Эти расчеты необходимы при обработке заготовок со значительными усилиями резания, при разработке механизированных и автоматизированных быстродействующих приспособлений и в некоторых других случаях. Все они выполняются по методикам, изложенным в учебниках по таким общеинженерным дисциплинам, как сопротивление материалов, теория машин и механизмов, детали машин и др.

Расчёты экономической целесообразности применения сконструированного приспособления производятся по методике, изложенной, например, в работе [45]. Этими расчётами практически заканчивается разработка технического проекта приспособления. Если они подтвердили правильность принятых конструкторских решений, то технический проект передается на согласование руководителю и технологу. После его согласования и утверждения приступают к разработке рабочей документации – оформлению сборочного чертежа и рабочих чертежей деталей.

1.4.2. ОФОРМЛЕНИЕ СБОРОЧНОГО ЧЕРТЕЖА

Как уже указывалось выше, выполненный квалифицированным конструктором чертеж компоновки приспособления часто оформляется в сборочный чертеж. В связи с этим рассмотрим те добавления, которые нужно сделать на чертеже компоновки, чтобы он был оформлен как сборочный чертеж.

Во-первых, следует проставить позиции и составить спецификацию.

Во-вторых, - выбрать и проставить основные размеры. При выборе габаритных размеров приспособления, его отдельных узлов и деталей необходимо руководствоваться ГОСТом по нормальным линейным размерам, разработанным на основе предпочтительных чисел и их рядов [45,46]. Согласно этому ГОСТу при выборе линейных

размеров предпочтение следует отдавать числам из рядов с более крупной градацией чисел:

$R_a 5$ - 1-я степень предпочтительности для размеров любых видов, линейных радиусов, радиусов выхода инструмента;

$R_a 10$ - 2-я степень предпочтительности для размеров любых видов, радиусов, получаемых фрезерованием шлицевыми и радиусными фрезами, ширины канавок, пазов и буртиков, расстояний между отверстиями;

$R_a 20$ - для линейных размеров любых классов точности, диаметров окружностей, на которых расположены центры отверстий;

$R_a 40$ - для диаметров и длин 8-го и более грубых квалитетов точности; расстояний между отверстиями, расположенными на прямых линиях; размеров уступов и глубин [45].

Отступление от указанных правил при назначении линейных размеров допускается только в тех случаях, когда они определены методом расчёта и выбор данного расчётного размера исключает возможность выбора по той же таблице другого, связанного с ним, размера.

После выбора линейных размеров на сборочном чертеже должны быть проставлены: габаритные размеры; размеры посадочных поверхностей приспособления с отклонениями; размеры опорных поверхностей опорных элементов, на которые базируется заготовка, с отклонениями; размеры, определяющие расположение рабочих поверхностей направляющих элементов относительно опорных элементов, с отклонениями; диаметр отверстия в кондукторных втулках с отклонениями. Если используются быстросменные кондукторные втулки, то для каждой из них должны быть указаны своя позиция и диаметр отверстия с соответствующими отклонениями и указаниями.

В-третьих, необходимо составить технические условия, которые должны включать указания: о выверке и пригонке (если они требуются) отдельных элементов приспособления при его сборке; о непоказанных на чертеже предельных отклонениях формы и расположения поверхностей; маркировке приспособления; смазке подвижных механизмов; окраске поверхностей; методе транспортировки и хранения приспособления; допустимом износе кондукторных втулок и других элементов; периодичности контроля тех или иных размеров, проставленных на сборочном чертеже; об особых условиях, обеспечивающих безопасное выполнение операций с использованием приспособления.

1.5. ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Задачи 1-3. Определить погрешность базирования при выполнении размеров: H_1, H_2, H_3, H_4, H_5 (рис 1.56 - рис.1.58).

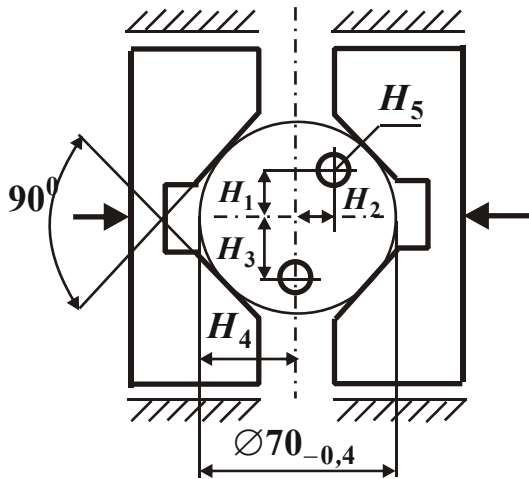


Рис.1.56.

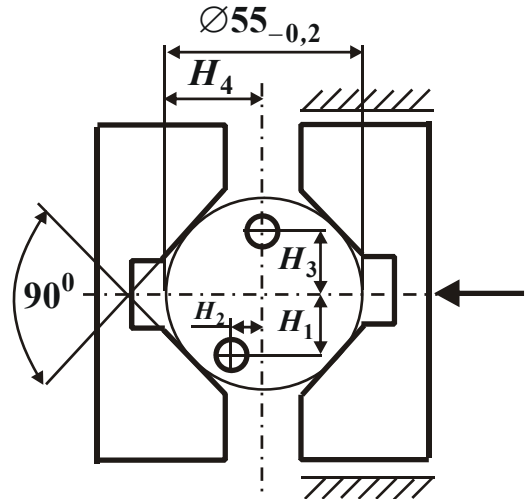


Рис.1.57.

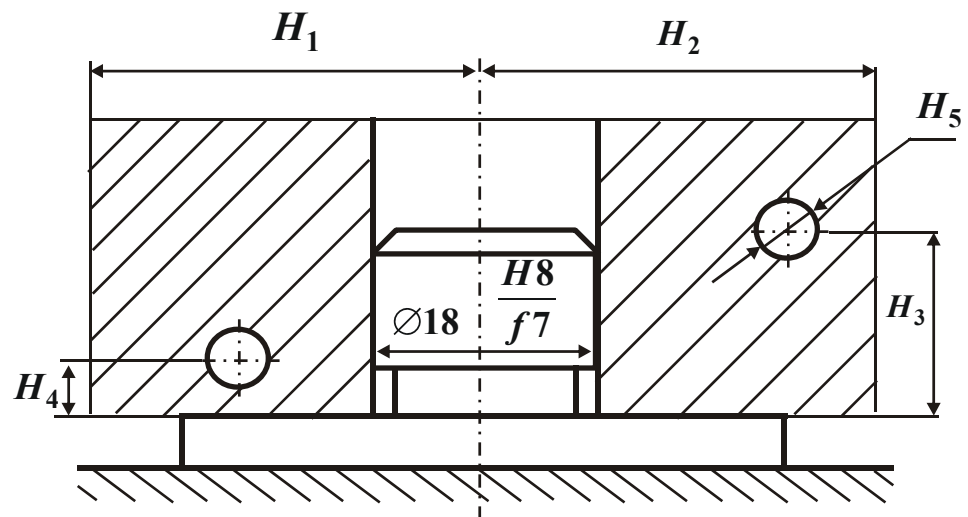


Рис.1.58.

Задача 4. Определить силу зажима W (рис.1.59), если $P_Z = 5000$ Н; $P_r = 2000$ Н; $H_1 = 50$ мм; $H_2 = 20$ мм; $H_3 = 250$ мм; $f = 0,15$; $K_n = 2,5$. Здесь обозначено: P_Z, P_r – силы резания; H_1, H_2, H_3 – размеры; f, K_n – коэффициенты трения и надёжности (запаса), соответственно.

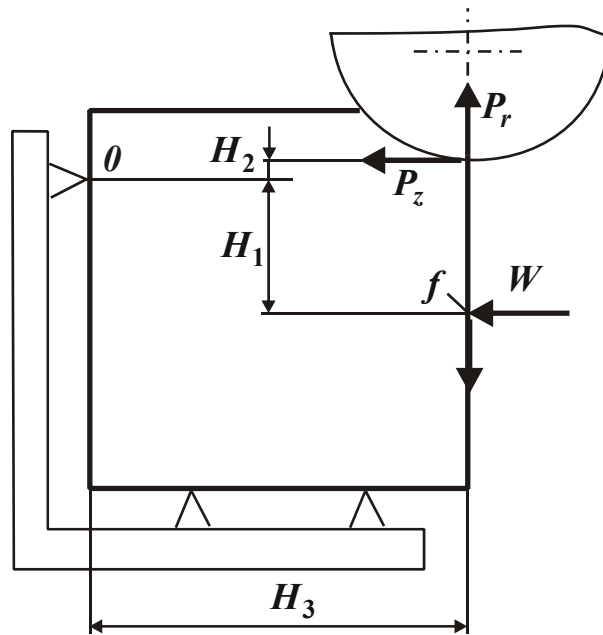


Рис.1.59.

Задача 5. Определить силу зажима W (рис.1.60), если $M = 6 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $P_0 = 300 \text{ Н}$; $R_1 = 30 \text{ мм}$; $f = 0,15$; $K_n = 2,5$. Здесь обозначено: M , P_0 – момент и сила резания, соответственно; R_1 – радиус заготовки; f , K_n – коэффициенты трения и надёжности, соответственно.

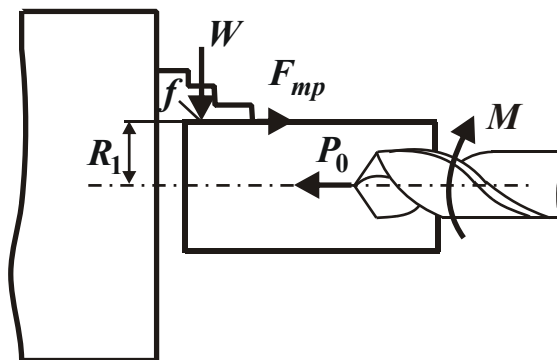


Рис.1.60.

Задача 6. Определить силу зажима W (рис.1.61), если $M = 6 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $P_0 = 300 \text{ Н}$; $R_1 = 30 \text{ мм}$; $R_2 = 25 \text{ мм}$; $f_1 = 0,15$; $f_2 = 0,18$; $K_n = 2,5$. Здесь обозначено: M , P_0 – момент и сила резания, соответственно; R_1 , R_2 – размеры; f_1 , f_2 – коэффициенты трения; K_n – коэффициент надёжности.

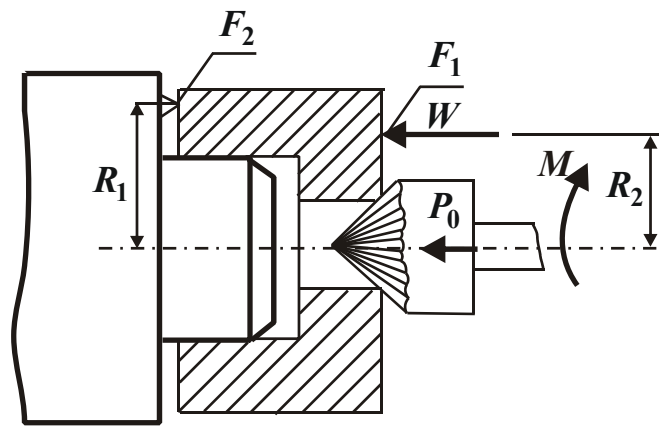


Рис.1.61.

ГЛАВА 2

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ДИАГНОСТИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

2.1. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ РЕЗЬБОШЛИФОВАНИИ

В данной главе приведены новейшие исследования по применению компьютерных технологий для разработки автоматизированных технологических систем шлифования (на примере резьбошлифования, плоского и круглого шлифования). Исследования выполнены проф. Ларшиным В. П. и инж. Лищенко Н. В.

Известно, что физико-механическое состояние поверхностного слоя резьбы ходовых винтов определяется теплонапряженностью процесса резьбошлифования, которую характеризуют температурой шлифования и глубиной образующегося дефектного слоя. В свою очередь для определения этих параметров необходимо знать *плотность теплового потока* в зоне контакта шлифовального круга с заготовкой. При шлифовании резьбы полукруглого профиля фактическая глубина шлифования по профилю является переменной, кроме того, условия работы боковых сторон профиля шлифовального круга существенно отличаются от условий работы вершины круга. Следовательно, и плотность теплового потока может быть распределена неравномерно по профилю.

Ввиду этого аналитическое определение температуры шлифования с переменной плотностью теплового потока является сложной задачей. Поэтому чаще всего для математического моделирования тепловых полей используют численные методы решения краевых задач теплопроводности, реализуемые с помощью стандартных пакетов прикладных программ.

Например, пакет прикладных программ (далее – программа) FemLAB реализует метод конечных элементов для решения краевых задач теплопроводности с различными краевыми условиями. Также программа FemLAB применяется для решения физических задач в области акустики, диффузии, электростатики, гидродинамики и сопротивления материалов.

Для решения в FemLAB краевой задачи теплопроводности необходимо сформировать 1D, 2D или 3D твердотельную модель в этой программе или с помощью любой программы твердотельного

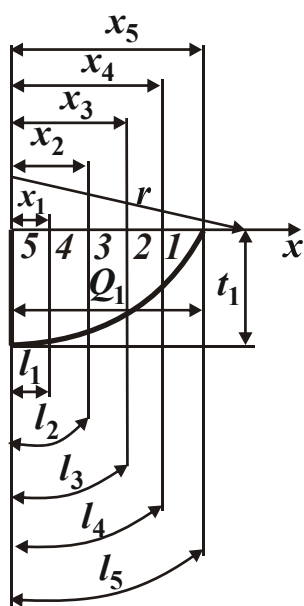


Рис. 2.1. Сечение срезаемого слоя на первом проходе резбошлифования: a_1 - полуширина сечения среза; r - радиус профиля шлифовального круга; t_1 - глубина шлифования; x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 - координаты исследуемых (дискретных) участков (участки 1-5) профиля; l_1, l_2, l_3, l_4, l_5 - длины дуг контакта в поперечном сечении.

моделирования с последующим импортированием модели в программу FemLAB. Результат решения дифференциального уравнения теплопроводности представляется в виде геометрической модели с наложенным на него тепловым полем, каждый цвет которого соответствует определенной температуре шлифования. Шкала цветов, представленная рядом с данной геометрической моделью, позволяет наглядно представить изменение температурного поля по координатам. Имеется возможность получения графика изменения температуры по глубине поверхностного слоя.

В качестве примера рассмотрим результаты моделирования теплового поля при постоянной и переменной по профилю резбовой канавки ходового винта плотности теплового потока q . В первом случае $q = 40 \text{ Вт/мм}^2$ и не зависит от

угловой координаты φ , а во втором случае q зависит от угла φ и изменяется дискретно от участка к участку, например, в соответствии с табл. 2.1 для десяти рассматриваемых участков профиля (рис.2.1).

Таблица 2.1

Номер участка	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$q, \text{ Вт/мм}^2$	26,41	38,26	43,21	45,56	46,49	46,49	45,56	43,21	38,26	26,41

В обоих случаях задан материал заготовки – сталь 8ХФ, радиус профиля канавки $R=3$ мм, время действия теплового источника $\tau = 0,145$ с.

Для решения поставленной задачи создается двухмерная модель, например, в программе AutoCAD, сохраняемая и импортируемая в программу FemLAB в формате dxf (рис.2.2).

Далее в программе FemLAB в библиотеке материалов выбирается требуемый материал с фиксированными теплофизическими параметрами. Если требуемого материала нет, то необходимо задать следующие параметры с клавиатуры: временной коэффициент δ_{ts} , теплопроводность k , плотность ρ , удельная теплоемкость C_ρ , мощность имеющихся источников Q и скорость по координатам x и y (рис.2.3).

Уравнение теплопроводности общего вида в окне программы FemLAB (рис.2.3) для данного случая принимает вид

$$1 \cdot \rho \cdot C_\rho \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} + \nabla(-k \nabla T) = 0 + \rho \cdot C_\rho \cdot 0 \cdot \nabla T \quad (2.1)$$

ИЛИ

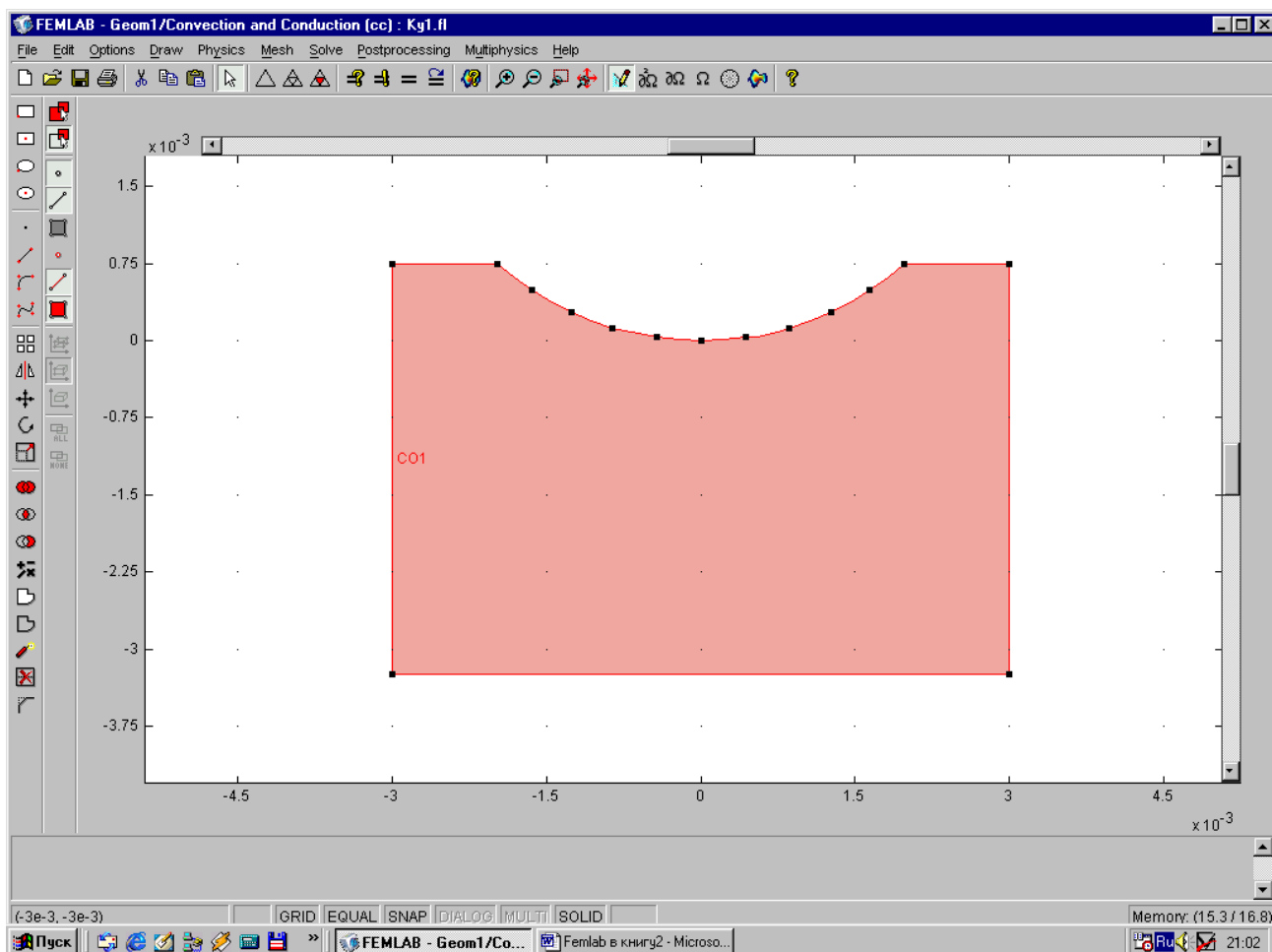


Рис. 2.2. Окно программы FemLAB с двухмерной моделью.

$$\rho \cdot C_{\rho} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} + \nabla(-k \nabla T) = 0. \quad (2.2)$$

Обозначим $k = \lambda$ и примем, что $\lambda = \text{const}$. Тогда

$$\rho \cdot C_{\rho} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = -\nabla(-\lambda \nabla T) \quad (2.3)$$

ИЛИ

$$\rho \cdot C_{\rho} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \nabla^2 T. \quad (2.4)$$

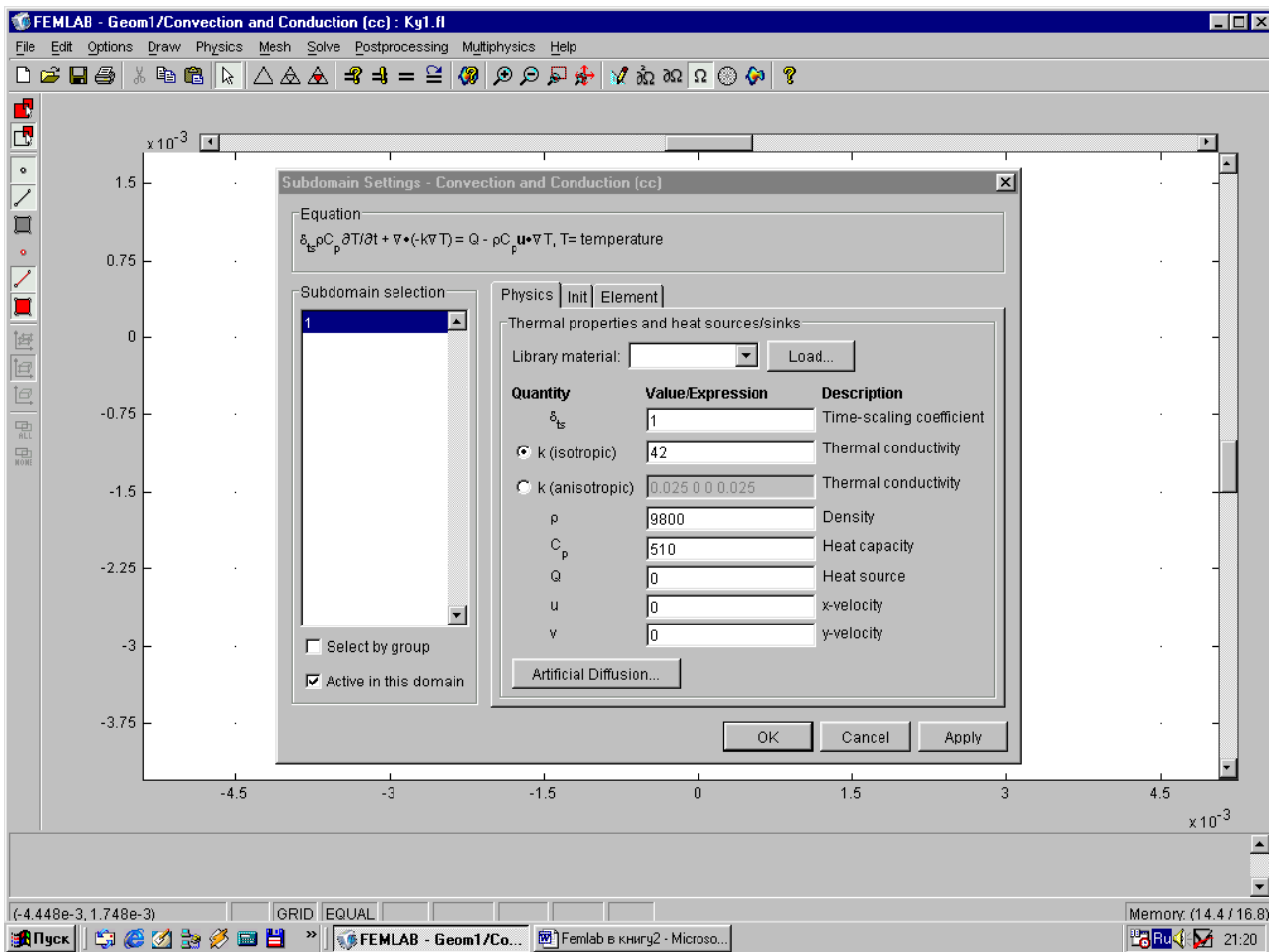


Рис.2.3. Окно программы FemLAB для задания параметров материала и теплового источника.

Так как в пакете FemLAB открыт лист 2D (двухмерная задача), то получим:

$$\rho \cdot C_{\rho} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (2.5)$$

или

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_{\rho}} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right). \quad (2.6)$$

Известно [337], что

$$\frac{\lambda}{\rho \cdot C_{\rho}} = a. \quad (2.7)$$

Тогда

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right). \quad (2.8)$$

Таким образом, имеем двухмерную (двухкоординатную) задачу (координаты x и y), т.е. $T = T(x, y)$. После перехода от декартовой системы координат к полярной, получим [204]

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} \right), \quad (2.9)$$

где r - радиус-вектор рассматриваемой точки в полярной системе координат; φ - угол поворота радиус-вектора r .

Уравнение (2.9) также двухмерное (двухкоординатное, координаты r и φ). В соответствии с этим уравнением необходимо найти температуру шлифования в любой точке пространства как функцию радиус-вектора r этой точки и угла его поворота φ , т.е. $T = T(r, \varphi)$. Таким образом, уравнения (2.8) и (2.9) идентичны и отличаются только использованием системы координат: декартовой и полярной, соответственно.

Выполним моделирование температурного поля для рассматриваемого выше примера при переменном $2,41 \leq q \leq 46,49$ Вт/мм² (рис. 2.4 - рис. 2.7.) и при постоянном тепловом потоке $q = 40$ Вт/мм² (рис. 2.8 - рис. 2.11) по профилю шлифовального круга. Дополнительно рассмотрен случай при переменном тепловом потоке $q = q(\varphi)$, когда на левом ($q_{лев.}$) и правом ($q_{пр.}$) участках профиля $q(\varphi) = const$: $q_{лев.} = 33,5$ Вт/мм² и $q_{пр.} = 51,5$ Вт/мм².

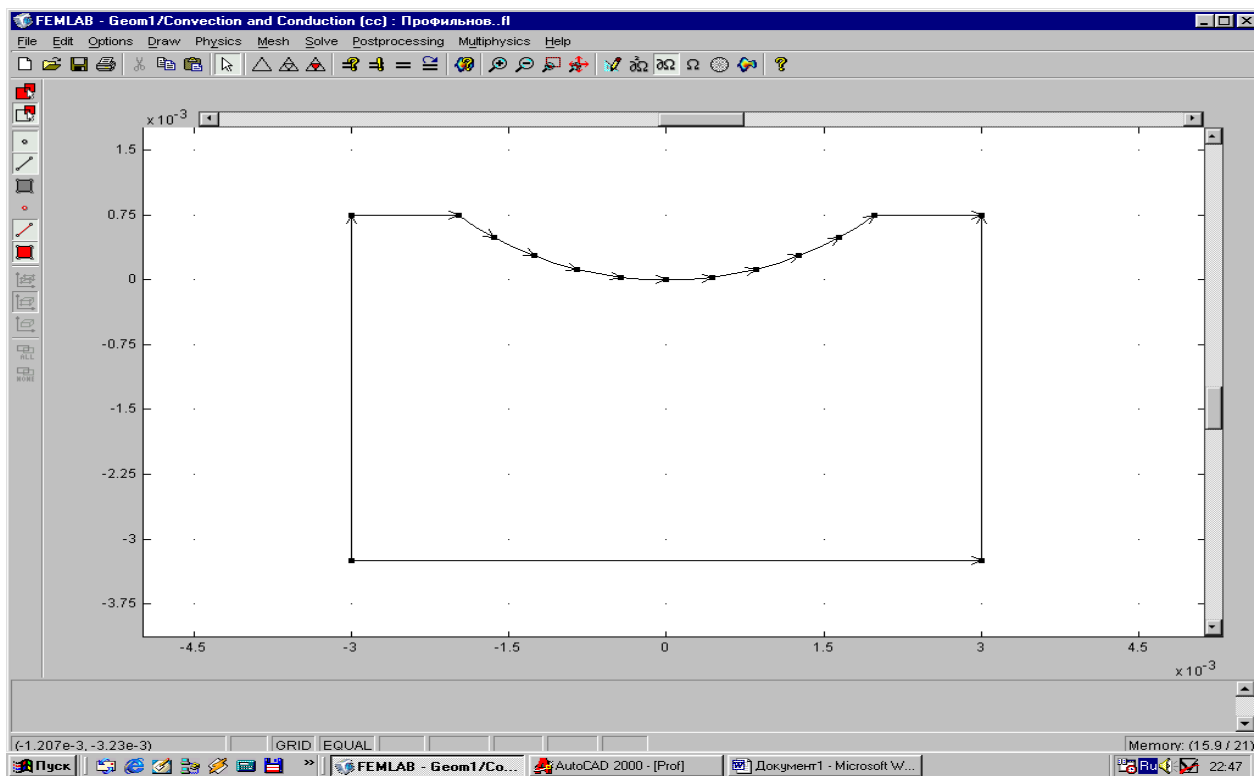


Рис.2.4. Исходная геометрическая модель при $q(\varphi) = var$.

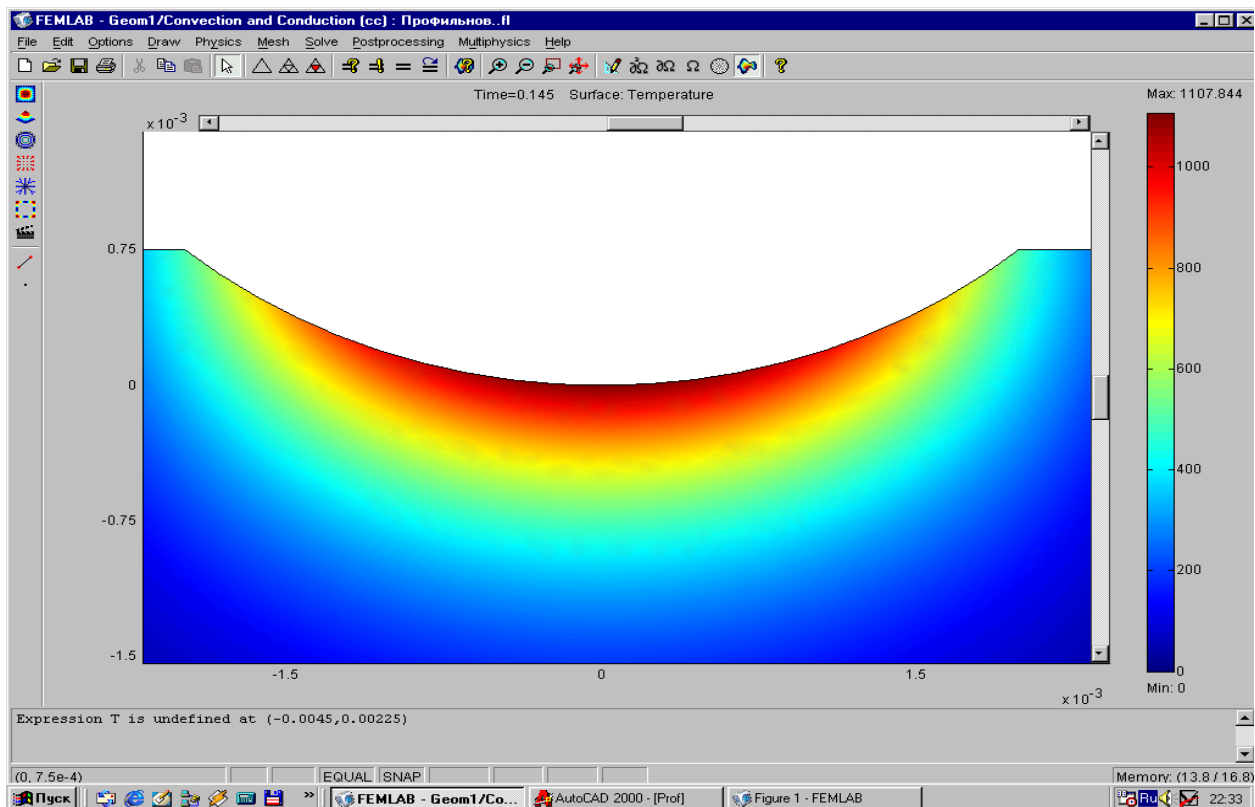


Рис.2.5. Модель (в тонах) температурного поля при $q(\varphi) = var$.

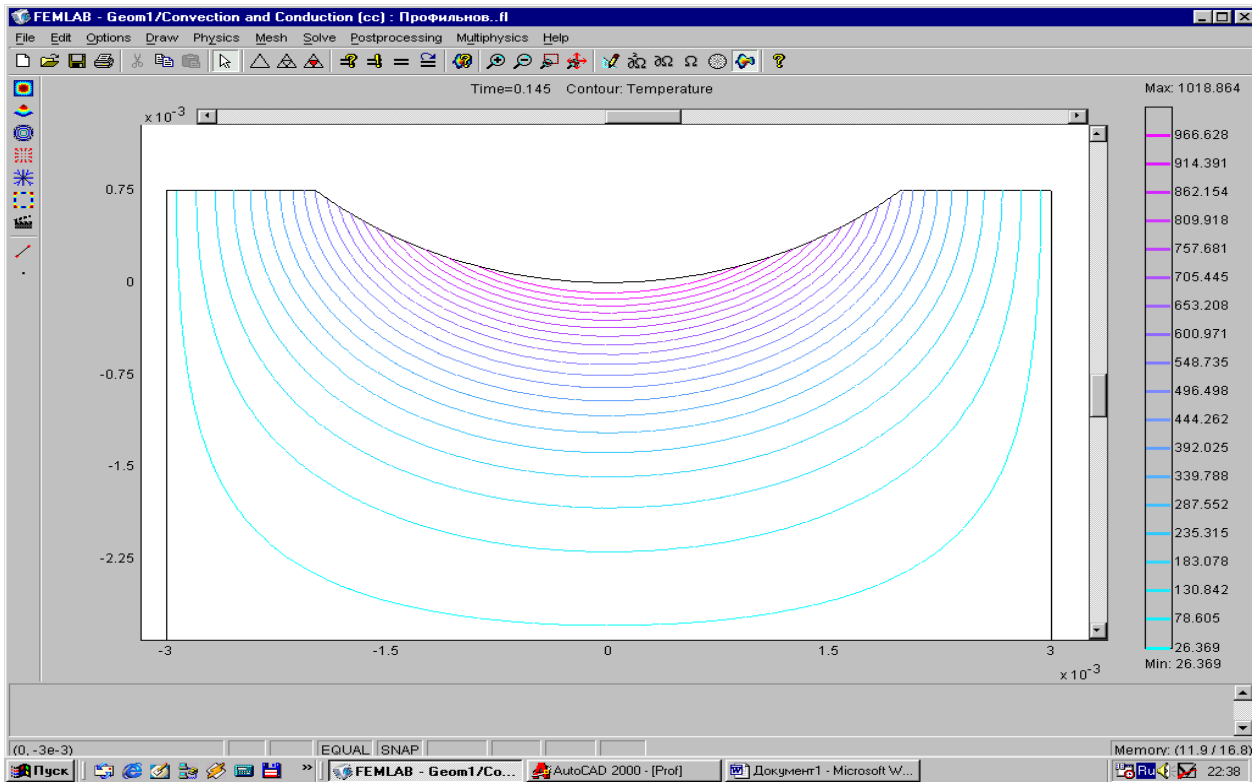


Рис.2.6. Модель (в изотермах) температурного поля при $q(\varphi) = var$.

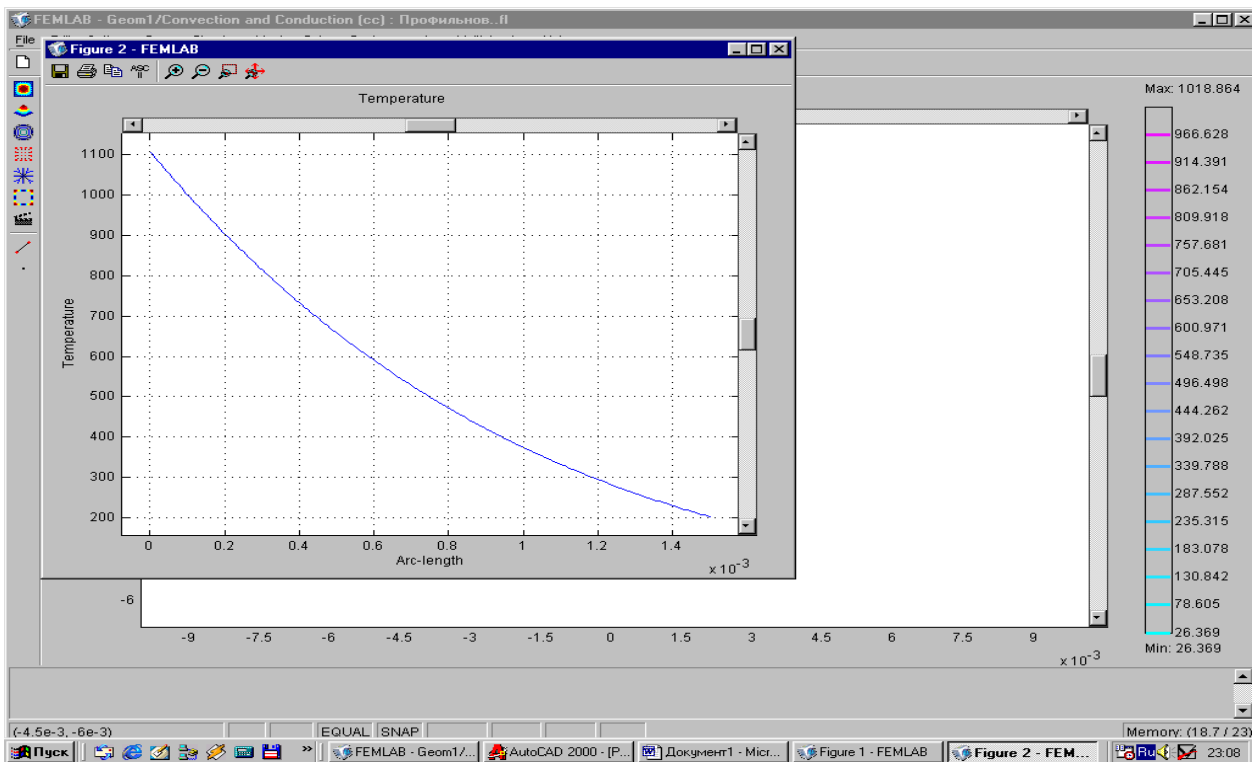


Рис.2.7. Распределение температуры по глубине поверхностного слоя при $q(\varphi) = var$ и $\varphi = 0$.

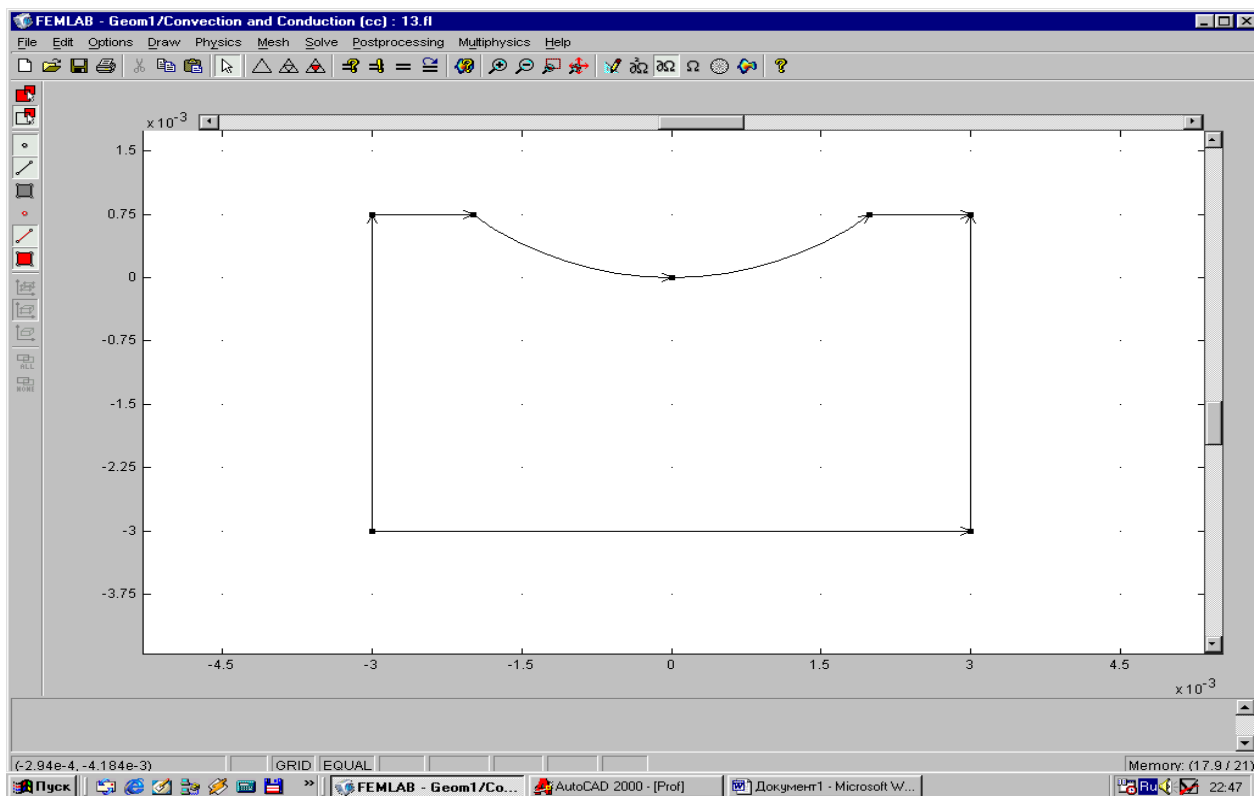


Рис.2.8. Исходная геометрическая модель при $q(\varphi) = const$.

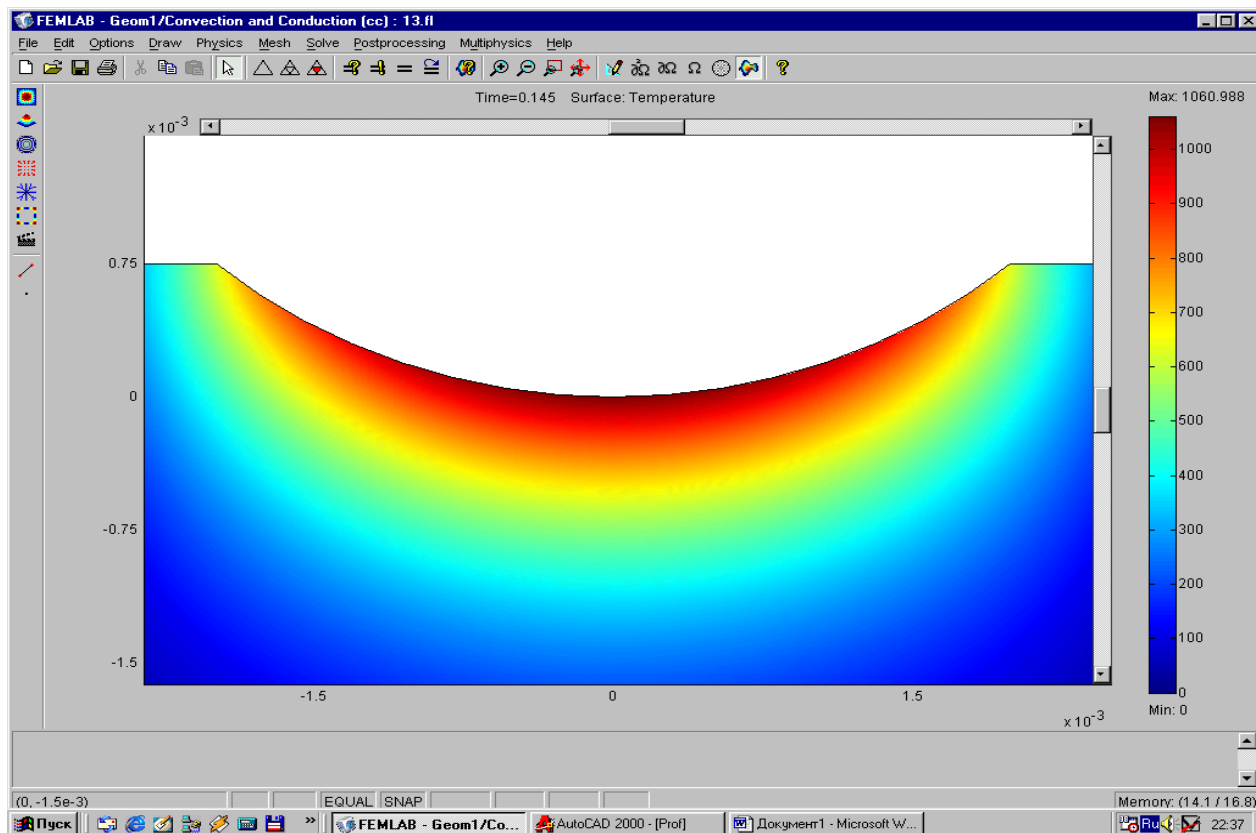


Рис.2.9. Модель (в тонах) температурного поля при $q(\varphi) = const$.

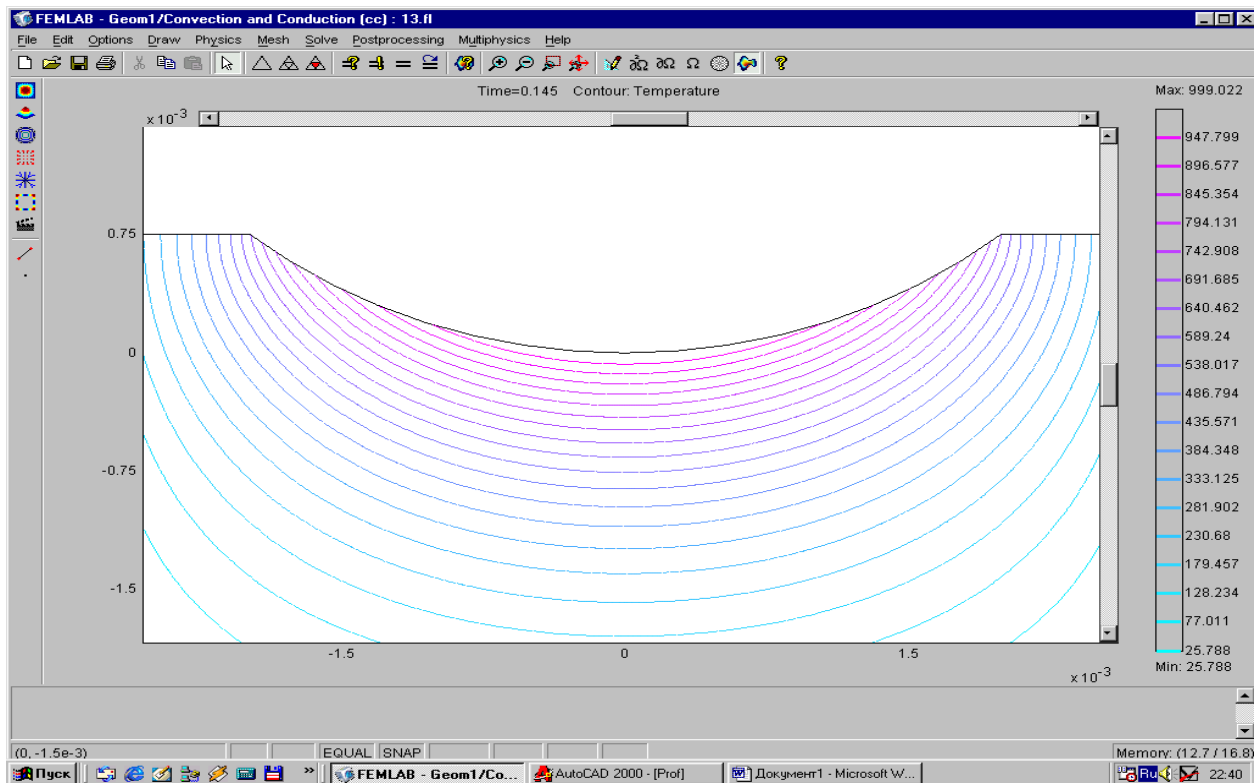


Рис.2.10. Модель (в изотермах) температурного поля при $q(\varphi) = const$.

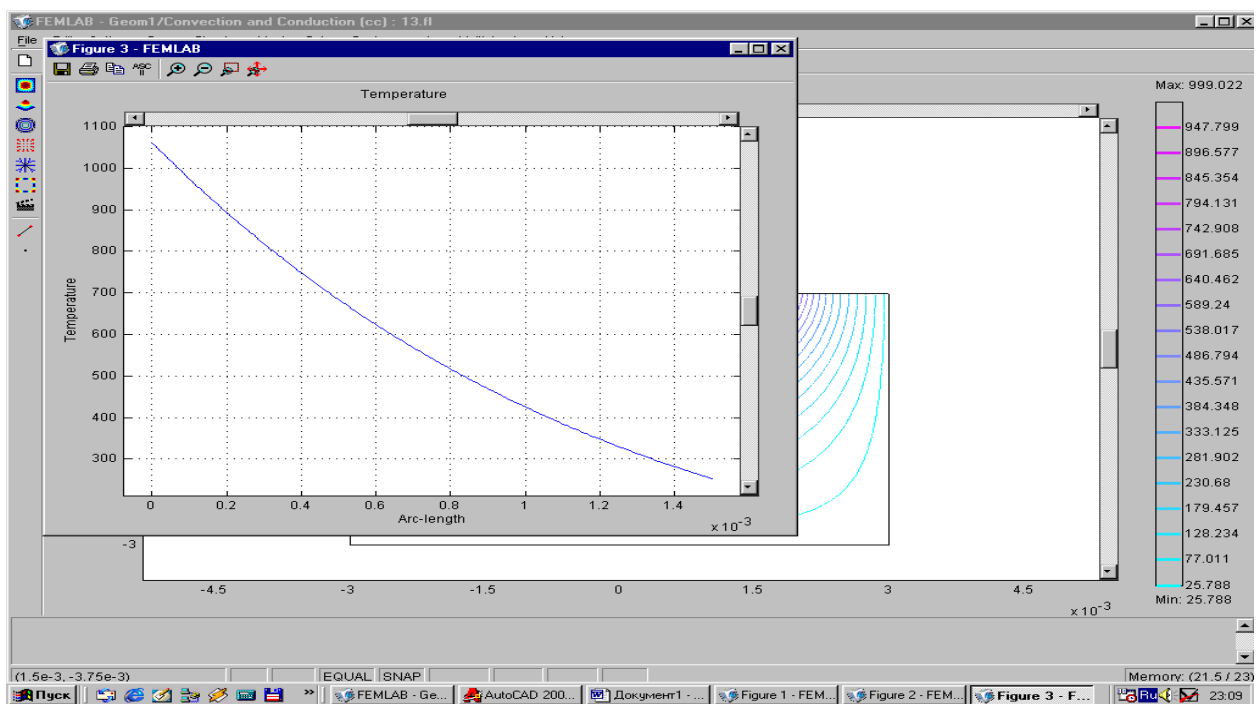
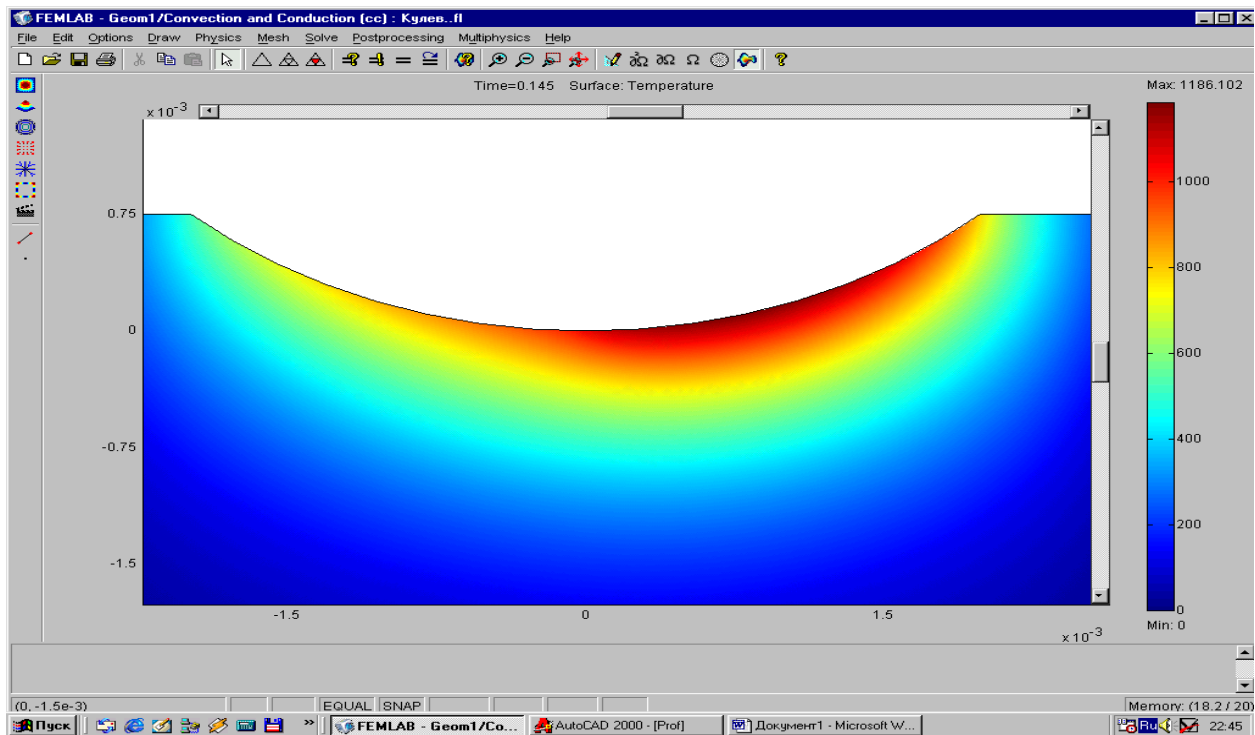
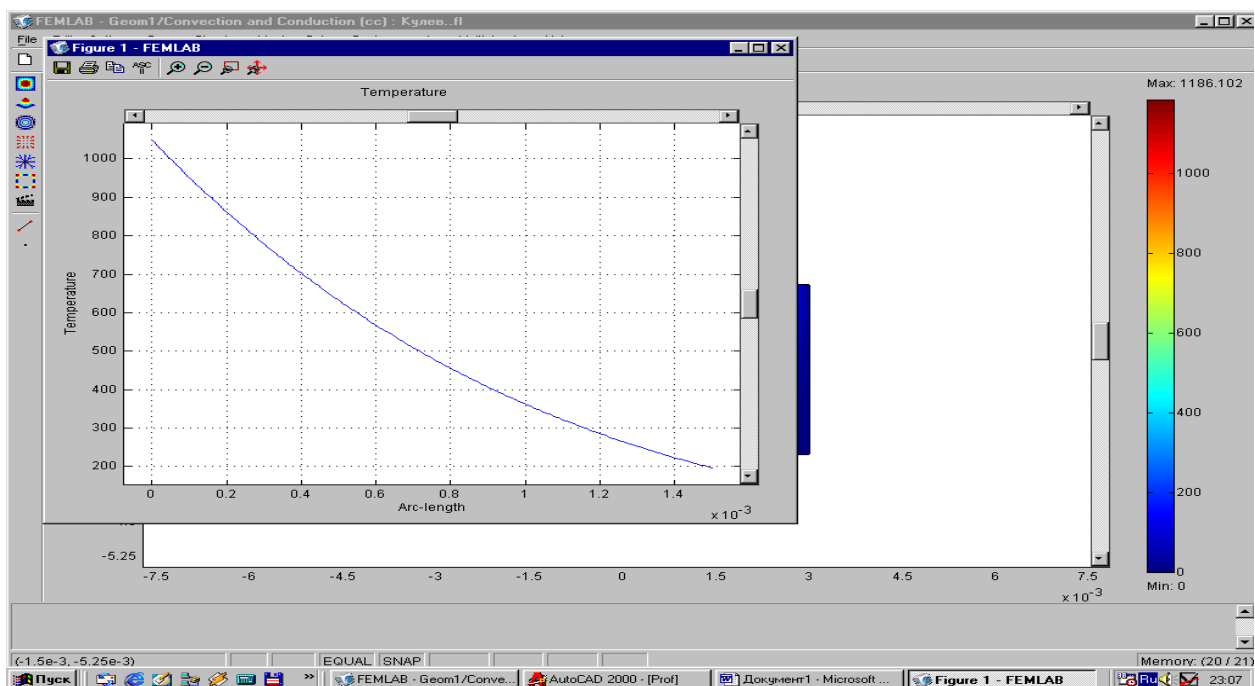


Рис.2.11. Распределение температуры по глубине поверхностного слоя при $q(\varphi) = const$ и $\varphi = 0$.



а



б

Рис.2.12. Модель (в цвете) температурного поля при $q(\varphi) = var$ при исходной геометрической модели по рис.2.8 (а) и распределение температуры по глубине поверхностного слоя при $q(\varphi) = var$ и $\varphi = 0$ (б).

Как следует из анализа приведенных рисунков (рис.2.4 - рис.2.12) распределение температуры по глубине поверхностного слоя, особенно в нижележащих глубинных слоях, определяется средним значением $q(\varphi)$ по профилю шлифовального круга (или по наиболее близкому к исследуемой точке участку этого профиля). Выполненные исследования температурного поля подтверждают известный *принцип местного влияния* академика Рыкалина Н. Н. и обуславливают правомерность моделирования температурного поля в глубинных слоях материала аналитическими решениями, полученными при среднем значении $q(\varphi) = const$.

2.2. РАЗРАБОТКА СПОСОБА КОМПЬЮТЕРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ШЛИФОВАНИЯ

Диагностика технологической системы и управление процессом должны осуществляться в режиме реального времени. Отсюда вытекают дополнительные требования к разработанному инструментарию: учет фактических параметров функционирующей технологической системы шлифования и обеспечение необходимой достоверности получаемой информации. При диагностике и управлении в режиме реального времени необходимо использовать корректировку уравнения математической модели, позволяющую «привязывать» это уравнение к реальным условиям обработки. Такая «привязка» аналогична учету начальных и граничных условий при решении дифференциального уравнения теплопроводности, что позволяет из бесконечного множества возможных решений выбрать одно единственное, соответствующее указанным краевым условиям.

Таким образом, необходимо разработать способ шлифования, включающий коррекцию уравнения математической модели процесса для идентификации этого уравнения по следующим неопределенным параметрам: $\lambda, a, T_{кр}$ и $m(\eta)$.

Сущность предлагаемого способа заключается в определении глубин резания при шлифовании в соответствии с технологическим критерием максимальной производительности. Способ включает коррекцию уравнения математической модели, основанную на определении и фиксации параметров шлифования в некоторых характерных «точках», характеризующих состояние технологической системы. Такой «точкой» может быть, например, момент перехода состояния по-

верхностного слоя из недефектного в дефектное (момент образования шлифовочного прижога с глубиной дефектного слоя $h_\delta \rightarrow 0$). Этот момент можно контролировать с помощью специальных измерительных преобразователей или в заводских условиях визуально.

Например, при шлифования резьбы полукруглого профиля способ реализуется следующим образом. Известно, что глубину h_δ дефектного слоя можно найти из уравнения температурного поля для цилиндрического теплового источника

$$T = -\frac{2}{\pi} \cdot \frac{q \cdot R}{\lambda} \cdot \int_0^\infty \left[1 - \exp\left(-\frac{a \cdot \tau}{R^2} \cdot \zeta^2\right) \right] \times \\ \times \frac{J_0\left(\zeta \cdot \frac{r}{R}\right) \cdot Y_1(\zeta) - Y_0\left(\zeta \cdot \frac{r}{R}\right) \cdot J_1(\zeta)}{\zeta^2 \cdot [J_1^2(\zeta) + Y_1^2(\zeta)]} d\zeta, \quad (2.10)$$

где τ - время действия теплового источника, с; R - радиус граничной цилиндрической поверхности, м; ζ - переменная интегрирования; r - текущий радиус-вектор рассматриваемой точки, м; J_0, J_1 - функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка; Y_0, Y_1 - функции Бесселя второго рода нулевого и первого порядка; q - плотность теплового потока, Вт/м².

Для определения глубины h_δ дефектного слоя принимают $r = R + x$, где x - расстояние от поверхности до рассматриваемой точки (глубина, на которой находится рассматриваемая точка). Следовательно, при $x = h_\delta$ получим

$$r = R + h_\delta. \quad (2.11)$$

При этом величину h_δ можно найти из условия

$$T - T_{кр} = 0, \quad (2.12)$$

где T - температура, определяемая по формуле (2.10).

Уравнение (2.12) можно записать в общем виде

$$T(t_0, V, h_\delta) = T_{кр}. \quad (2.13)$$

Формула (2.13) позволяет определить глубину h_δ дефектного слоя с учетом влияния на нее глубины резания t_0 . Причем, связь между h_δ и t_0 в формуле (2.13) неявная.

Максимальная температура в зоне шлифования [204]

$$T_{max} = \frac{2m(\eta) \cdot q}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{a\tau}{\pi}}. \quad (2.14)$$

Если на поверхности контакта температура равна критической, то для этой точки примем: $q = q_0$ и $\tau = \tau_0$. Тогда на основании выражения (2.14), получим

$$T_{кр} = \frac{2m(\eta) \cdot q_0}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{a\tau_0}{\pi}}. \quad (2.15)$$

Известно, что плотность теплового потока для любой точки контакта профильного шлифовального круга с заготовкой определяется по формуле [27]

$$q = \psi \cdot A_{y\partial} \cdot V \cdot \frac{t_N}{L}, \quad (2.16)$$

где ψ - коэффициент теплового потока, который характеризует долю тепловой энергии, переходящей в заготовку; $A_{y\partial}$ - удельная работа шлифования, Дж/мм³; t_N - нормальная к профилю круга глубина шлифования, мм; $L = \sqrt{D \cdot t_e}$ - длина дуги контакта в направлении вектора скорости заготовки, мм; t_e - вертикальная глубина шлифования (в направлении поперечной подачи круга), мм; D - диаметр шлифовального круга, мм; d - диаметр заготовки, мм; $\tau = \frac{L}{V}$ - время действия теплового источника, с.

С учетом формулы (2.16) можно определить величину q_0 в формуле (2.15), а именно

$$q_0 = \psi \cdot A_{y\partial} \cdot \frac{V_0 \cdot t_{N0}}{L_0}, \quad (2.17)$$

где $L = \sqrt{D \cdot t_{e0}}$ - длина дуги контакта на настроенном проходе, при которой образуется шлифовочный дефект (в дальнейшем - рассматриваемая точка), м; t_{e0} - поперечная подача в рассматриваемой точке, м; t_{N0} - нормальная составляющая глубины шлифования в рассматриваемой точке, м; V_0 - скорость заготовки в рассматриваемой точке, м/с.

Из формул (2.15) и (2.16) получим

$$T_{кр} = \frac{2m(\eta)}{\lambda} \cdot \frac{\psi \cdot A_{y\partial} \cdot V_0 \cdot t_{N0}}{\sqrt{D \cdot t_{e0}}} \cdot \sqrt{\frac{a\tau_0}{\pi}}. \quad (2.18)$$

Здесь

$$\tau_0 = \frac{\sqrt{D \cdot t_{\epsilon 0}}}{V_0}. \quad (2.19)$$

Из формулы (2.18) получим выражение

$$\mathcal{E}_{y\delta} = \psi \cdot A_{y\delta} = \sqrt{\frac{\pi}{a}} \cdot \sqrt{D \cdot t_{\epsilon 0}} \cdot \frac{T_{кр} \cdot \lambda}{2m(\eta) \cdot t_{N0} \cdot \sqrt{V_0}}, \quad (2.20)$$

где $m(\eta)$ - коэффициент формы, который определяется из условия преемственности уравнений, описывающих выделение тепла от плоского источника ($R \rightarrow \infty$) и от цилиндрического источника (радиус профиля R).

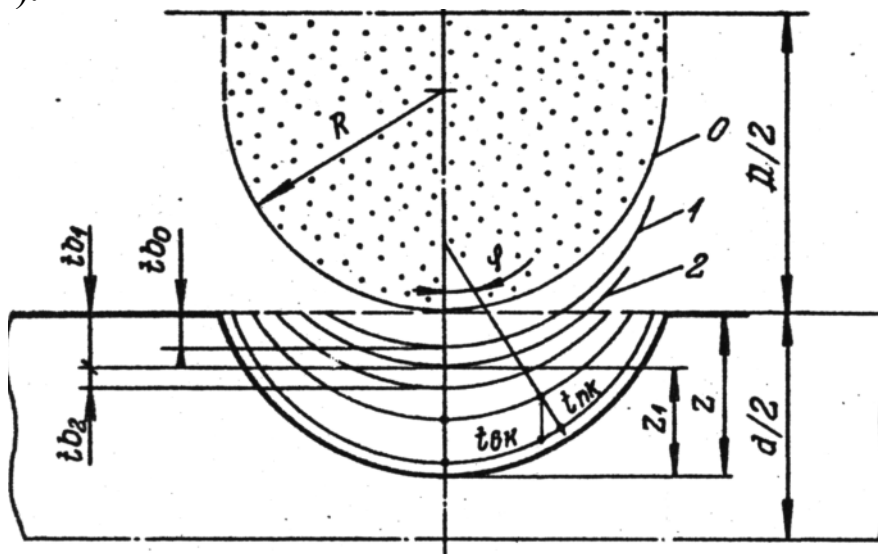


Рис.2.13. Схема формирования резбовой канавки.

Коэффициент формы $m(\eta)$ находим как отношение температуры поверхности ($x = 0$) от цилиндрического источника ($T_{кр(рез)}$) к температуре поверхности от плоского источника тепла ($T_{кр(пл)}$). При $x = 0$ указанные температуры определяются по формулам [27]

$$T_{кр(пл)} = \frac{2q_0}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{a\tau_0}{\pi}}; \quad (2.21)$$

$$T_{кр(рез)} = -\frac{2}{\pi} \cdot \frac{q \cdot R}{\lambda} \cdot \int_0^{\infty} \left[1 - \exp\left(\frac{a\tau}{R^2} \xi^2\right) \right] \frac{I_0(\xi) \cdot Y_1(\xi) - Y_0(\xi) \cdot I_1(\xi)}{\xi^2 [I_1^2(\xi) + Y_1^2(\xi)]} d\xi. \quad (2.22)$$

С учетом формул (2.21) и (2.22), получим

$$m(\eta) = \frac{T_{кр(рез)}}{T_{кр(пл)}} = \frac{R}{\sqrt{a\tau_0\pi}} \cdot \int_0^{\infty} \left[1 - \exp\left(\frac{a\tau}{R^2} \xi^2\right) \right] \times$$

$$\times \frac{I_0(\xi) \cdot Y_1(\xi) - Y_0(\xi) \cdot I_1(\xi)}{\xi^2 (I_1^2(\xi) + Y_1^2(\xi))} d\xi. \quad (2.23)$$

Видно, что коэффициент $m(\eta)$ в какой-то мере зависит и от времени воздействия теплового источника τ_0 , т.е. $m(\eta) = m(\eta, \tau_0)$.

По своему физическому смыслу величина $\mathcal{E}_{y\delta}$ характеризует долю тепловой энергии шлифования, которая поступает в заготовку в рассматриваемой «точке» состояния технологической системы (т.е. в момент перехода состояния поверхностного слоя из недефектного в дефектное). Причем выражение (2.20) характеризует фактическое состояние технологической системы шлифования с учетом индивидуальных особенностей всех элементов технологической системы (станок, приспособление, инструмент, заготовка). Анализ выражения (2.20) показывает, что отмеченные ранее неопределенные параметры процесса $\lambda, a, T_{кр}$ и $m(\eta)$ входят в это выражение в конкретном сочетании, которое можно представить в виде комплекса

$$K = \frac{T_{кр} \cdot \lambda}{m(\eta) \cdot \sqrt{a}}. \quad (2.24)$$

Этот комплекс имеет размерность $[\frac{Вт \cdot с^{0,5}}{м^2}]$.

Таким образом, указанные неопределенные параметры, т.е. $\lambda, a, T_{кр}$ и $m(\eta)$, влияют на процесс шлифования не разрозненно (каждый в отдельности), а в виде конкретного сочетания K .

Найденное по формуле (2.20) численное значение $\mathcal{E}_{y\delta}$ можно использовать для оценки других состояний технологической системы, т.е. других «точек» состояния, которые находятся в окрестности рассмотренной точки. Можно предположить, что чем меньше удаление этих «точек» от точки перехода поверхностного слоя из недефектного состояния в дефектное, тем более достоверным (объективным) является значение $\mathcal{E}_{y\delta}$ при характеристике фактических условий шлифования. Таким образом, при известных глубинах резания $t_{\delta 0}$ и t_{N0} и скорости заготовки $V = V_0$ на настроенном проходе (точке образования прижога) на основании формулы (2.15), справедливой в момент появления дефектного слоя, можно вычислить фактическую удельную энергию $\mathcal{E}_{y\delta}$, поступающую в заготовку при шлифовании, по формуле (2.20), а затем использовать вычисленное значение

$\mathcal{E}_{y\delta} = \psi \cdot A_{y\delta}$ при нахождении плотности теплового потока по формуле (2.16) и далее - при определении температуры шлифования.

Другими словами, в формуле (2.10) плотность теплового потока определяют по формуле (2.16), в которой произведение $\psi \cdot A_{y\delta}$, найденное по формуле (2.20), известно. Т.е. формула для определения плотности теплового потока q в выражении (2.10) с учетом формулы (2.16) будет иметь следующий вид

$$q = \mathcal{E}_{y\delta} \cdot \frac{V \cdot t_N}{L}, \quad (2.25)$$

где $\mathcal{E}_{y\delta}$ - число, найденное по формуле (2.20) в точке образования прижога.

Если $\mathcal{E}_{y\delta}$ известно (по данным настроечного прохода), то текущую температуру шлифования можно найти на основании формулы (2.10):

$$T(x) = -\frac{2}{\pi} \cdot \frac{\mathcal{E}_{y\delta} \cdot \frac{V \cdot t_N}{\sqrt{\frac{D \cdot d \cdot t_e}{D+d}}} \cdot R}{\lambda} \cdot \int_0^\infty \left[1 - \exp \left(-\frac{a \cdot \sqrt{\frac{D \cdot d \cdot t_e}{D+d}}}{R^2} \cdot \xi^2 \right) \right] \times$$

$$\times \frac{J_0 \left(\xi \frac{R+x}{R} \right) \cdot Y_1(\xi) - Y_0 \left(\xi \frac{R+x}{R} \right) \cdot J_1(\xi)}{\xi^2 \cdot [J_1^2(\xi) + Y_1^2(\xi)]} d\xi. \quad (2.26)$$

Увеличивая глубину шлифования с определенным шагом, определяют глубину дефектного слоя x из уравнения

$$T(x) - T_{кр} \Big|_{x=h_\delta} = 0. \quad (2.27)$$

Найденную глубину дефектного слоя h_δ сравнивают с оставшимся припуском. Итерацию глубины шлифования осуществляют до тех пор, пока дефектный слой не станет равным оставшемуся припуску. Найденное значение глубины шлифования фиксируют. Аналогично находят распределение припуска на другие проходы шлифования с учетом уменьшения оставшегося припуска на сумму ранее найденных глубин резания.

2.3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ДИАГНОСТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ

Качество поверхностного слоя резьбы ходовых винтов шариковых передач формируется на резьбошлифовальных операциях. Известно, что физико-механическое состояние поверхностного слоя резьбы ходовых винтов определяется теплонапряженностью процесса резьбошлифования, которая часто приводит к появлению шлифовочных прижогов и трещин. Указанные шлифовочные дефекты оказывают отрицательное влияние на эксплуатационные свойства деталей машин и приборов.

В связи с необходимостью непрерывного улучшения качества ответственных деталей машин в современном машиностроении широкое распространение получили компьютерные технологии. Например, появилось новое направление - CALS - технологии (Continuous Acquisition and Life cycle Support - непрерывная информационная поддержка жизненного цикла изделия). Сущность этого направления заключается в сборе информации по всем этапам жизненного цикла изделия (конструирование, технологическая подготовка производства, производство и эксплуатация) [429]. Наибольшей сложностью по сбору информации отличается этап производства. Поэтому очень часто информация, характеризующая этот этап, полностью отсутствует. Известно, что эффективным средством информационной поддержки этого этапа являются системы сбора данных, которые в настоящее время изготавливают на основе компьютеров, в частности на основе IBM совместимых PC (далее IBM PC).

Известно, что развитие современных систем ЧПУ осуществляется на основе так называемой открытой архитектуры как по аппаратному (hardware), так и программному (software) обеспечению этих систем. Например, новое поколение станков с ЧПУ основано на системотехнике IBM PC и строится по принципу открытой архитектуры. Такой подход обеспечивает независимость пользователя от производителя систем ЧПУ (СЧПУ) и позволяет существенно увеличить рабочие подачи и скорость резания при высокой точности движения режущей кромки инструмента по заданному контуру. Кроме того, появляются новые технологические возможности обеспечения бездефектного высокопроизводительного шлифования на основе встроенных компьютерных систем диагностики и управления. Применительно к операциям шлифования становится возможной диагностика тех-

нологической системы по температурному критерию в зоне резания или по температурным деформациям обрабатываемой детали. Также возможно управление процессом резбошлифования путем определения глубин резания на проходы, исходя из обеспечения бездефектной высокопроизводительной обработки. Другими словами, открытая архитектура СЧПУ позволяет производить как диагностику самого станка, так и диагностику (и отработку) технологических процессов с одновременной их оптимизацией. При этом для эффективного управления и диагностики используются контуры тока и скорости, которые в десятки раз быстрее контура положения.

Для применения компьютерных технологий на этапе изготовления (обработка, сборка) машин нужны новые концепции компьютеризации технологических систем. Предлагается следующая концепция построения систем диагностики для процессов резания: каждый технологический переход операции характеризует определенное состояние технологической системы, т.е. сколько технологических переходов, столько и состояний технологической системы. Каждое из указанных состояний характеризуется своими технологическими показателями или одним и тем же показателем, величина которого нормируется индивидуально для каждого состояния технологической системы. Например, таким технологическим показателем можно выбрать температуру шлифования. Так как для работы системы диагностики необходима соответствующая программная поддержка (MathCAD, MathLAB, Excell и другие программные продукты), следовательно, для такой системы (по крайней мере на этапе её создания) нужен компьютер типа IBM PC. Рассматривая объект автоматизации (технологическая система резбошлифования) как одно из периферийных устройств IBM PC, можно прийти к выводу о необходимости разработки аппаратного и программного интерфейса применительно к этому объекту. Точно так же поступают, например, при подключении к IBM PC любого другого стандартного внешнего устройства (принтера, сканера, монитора и т.п.).

Требования к точности прецизионных резьб ходовых винтов шарико-винтовых передач возрастают по мере совершенствования технологии их изготовления. Технологическая система резбошлифования (ТС) включает три основных элемента, расположенных в пространстве в определенной взаимосвязи: заготовка, шлифовальный круг, правящий ролик. ТС - это временная конструкция, которую собирает технолог для механической обработки отдельных поверхно-

стей заготовки. В производственных условиях расположение этих элементов и их геометрические параметры определяют методом пробных проходов и промеров, что является достаточно трудоемкой процедурой, особенно при правке точечными правящими инструментами. В этой связи *вопросы определения погрешностей взаимного расположения указанных элементов в пространстве и их влияние на форму и геометрические параметры окончательно сформированной резьбы относятся к числу актуальных* в технологии машиностроения. Задачи подобного типа до сих пор решались на основе одно- и двухмерного моделирования указанных элементов технологической системы при использовании определенных допущений. Например, расчет площади пятна контакта производили только на основе двухмерной геометрической модели сечения срезаемого слоя материала при допущении, что наклон круга на угол подъема резьбы не влияет на площадь пятна контакта. Ошибки в определении площади пятна контакта приводят в свою очередь к погрешностям определения температуры шлифования, которые в свою очередь не позволяют оптимизировать цикл съема припуска (заключающийся в определении оптимальных режимов шлифования). Как следствие, найденные таким образом режимы шлифования не обеспечивали наивысшую производительность.

Рассмотрим определение площади пятна контакта с помощью двухмерного моделирования. Анализ литературных источников показал, что применительно к резьбе полукруглого профиля имеется следующая формула для определения площади пятна контакта [376].

Для первой нитки шлифовального круга (или первого прохода резьбошлифования) площадь пятна контакта определяется

$$S_1 = 2 \sqrt{\frac{D \cdot d}{D + d}} R \arccos \left[\frac{R - t_1}{R} \right] \int_0^{\sqrt{\sqrt{R^2 - x^2} - (R - t_1)}} \sqrt{\sqrt{R^2 - x^2} - (R - t_1)} dx, \quad (2.28)$$

где t_1 - глубина шлифования на первой нитке (или первом проходе), мм; x - переменная интегрирования.

Однако эта формула определяет не площадь поверхности контакта, а площадь её проекции на плоскость. Для уточнения расчетной формулы рассмотрим схему на рис.2.14.

Известно, что для первой нитки шлифовального круга (или первого прохода резьбошлифования) площадь пятна контакта S_1 [376]

$$S_1 = \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} L(l) dl, \quad (2.29)$$

где $L(l)$ - длина дуги контакта в направлении вектора скорости детали, зависящая от длины дуги в поперечном сечении l .

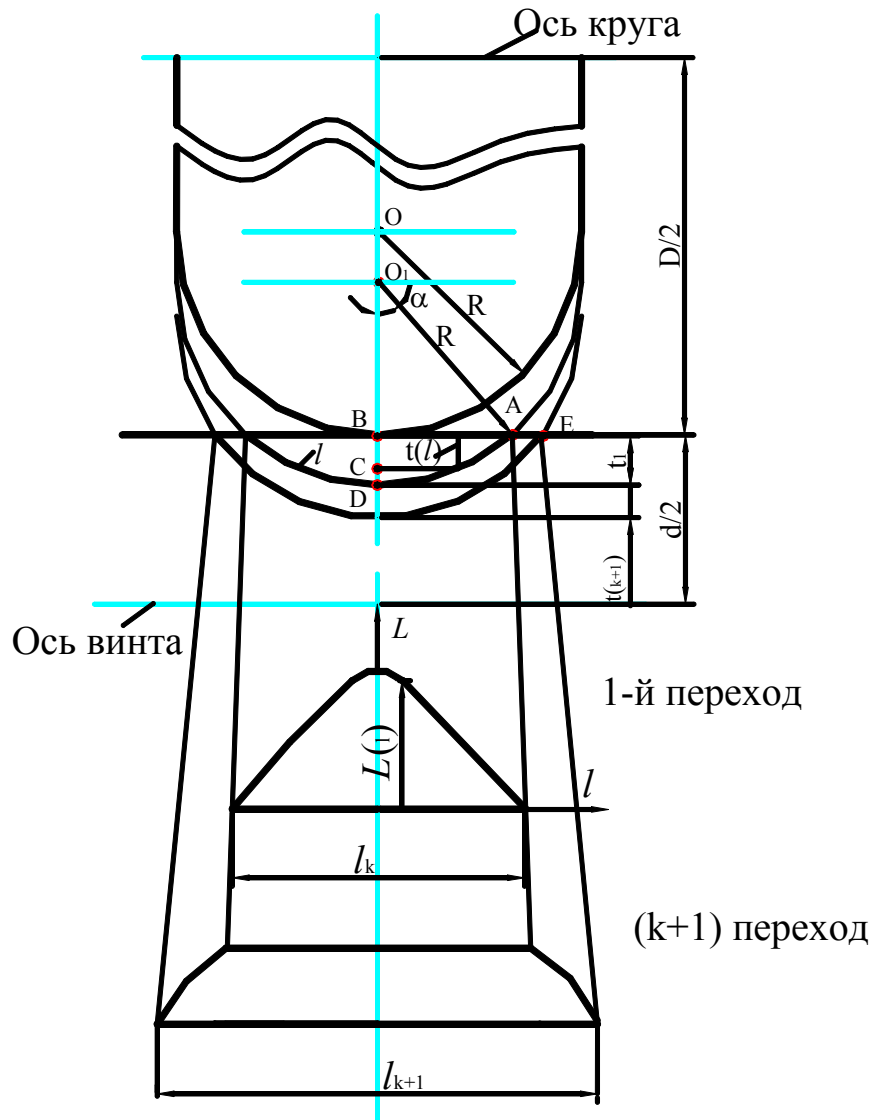


Рис.2.14. Расчетная схема для определения площади пятна контакта между кругом и изделием.

Известно, что длина дуги l окружности радиуса R связана с её центральным углом α следующей зависимостью

$$l = R \cdot \alpha. \quad (2.30)$$

Из треугольника O_1AB (рис.2.14) определяется угол α

$$\alpha = \arccos \frac{R - t_1}{R}. \quad (2.31)$$

Тогда

$$l = R \cdot \arccos \frac{R - t_1}{R}. \quad (2.32)$$

Длина дуги в продольном сечении шлифовального круга определяется для мгновенной координаты l по известной формуле [376]

$$L(l) = \sqrt{\frac{D \cdot d}{D + d}} \cdot t(l), \quad (2.33)$$

где $t(l)$ - мгновенная глубина резания в зависимости от длины дуги контакта l .

Из геометрической схемы на рис.2.14 можно установить зависимость $t(l)$ от длины дуги контакта l , т.е.

$$\begin{aligned} t(l) &= t_1 - CD = t_1 - (R - O_1C) = t_1 - (R - R \cos \alpha) = \\ &= t_1 - R \left(1 - \cos \frac{l}{R} \right) = R \cos \frac{l}{R} - (R - t_1). \end{aligned} \quad (2.34)$$

С учетом выражений (2.30) - (2.33), получаем

$$S_1 = 2 \sqrt{\frac{D \cdot d}{D + d}} \int_0^{R \arccos \frac{R - t_1}{R}} \sqrt{R \cos \frac{l}{R} - (R - t_1)} dl, \quad (2.35)$$

где t_1 - глубина шлифования на первом проходе, мм; x - переменная интегрирования.

Для всех остальных ниток шлифовального круга, начиная со второй (или остальных проходов, начиная со второго), расчетная формула для определения площади пятна контакта имеет вид [376]

$$S_{k+1} = \sqrt{\frac{D \cdot d}{D + d}} t_{k+1} \cdot R \left[\arccos \frac{R - \sum_{i=1}^n t_i}{R} + \arccos \frac{R - \sum_{i=1}^{k+1} t_i}{R} \right], \quad (2.36)$$

где t_i - глубина шлифования на любом i - ом проходе.

Выполним сравнительный расчет площади пятна контакта по формулам (2.28) и (2.35) при следующих исходных данных: $D = 0,400$ м; $d = 0,050$ м; $R = 0,003$ м; $0 \leq t_1 \leq 2,1$ мм (рис.2.15).

Как видно из рис.2.15, площади пятна контакта, вычисленные по формулам (2.28) и (2.35) отличаются. Различие составляет от 0,8% до 18% (в зависимости от величины t_1). Уменьшение погрешности расчета площади пятна контакта приводит к более точному определению температуры шлифования и глубины дефектного слоя.

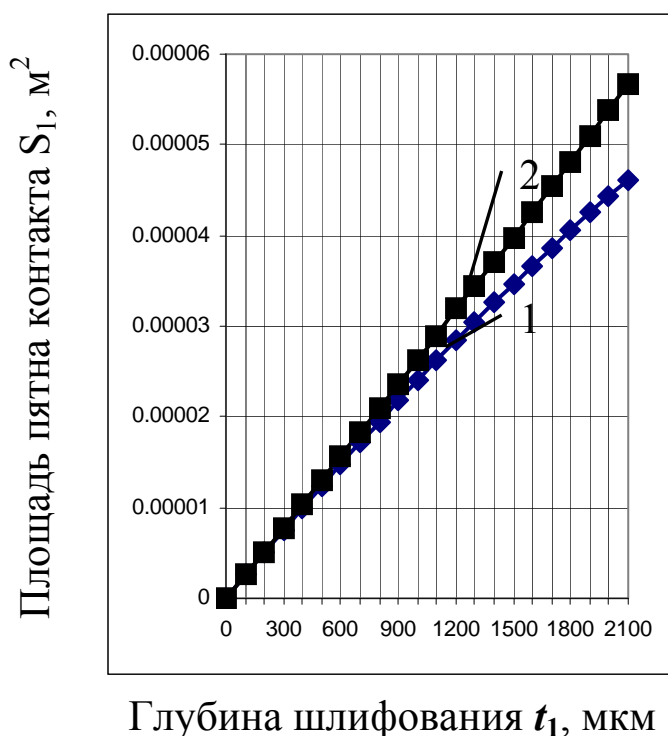


Рис.2.15. Зависимость площади пятна контакта от глубины шлифования: 1 - расчет по уравнению (2.28); 2 - расчет по уравнению (2.35).

Современный уровень развития средств и программного обеспечения вычислительной техники позволяет осуществлять трехмерное геометрическое моделирование элементов технологической системы резьбошлифования, находящихся в определенной взаимосвязи. Исследование трехмерной геометрической модели позволяет решать ряд геометрических задач:

- 1) разработка способа профилирования шлифовальных кругов для обеспечения требуемых параметров резьбы по форме и размерам профиля (зная форму и геометрические параметры резьбы, заданные на чертеже детали, определить форму и геометрические параметры правящего ролика при известном его пространственном положении относительно шлифовального круга и обрабатываемой заготовки);
- 2) определение площади пятна контакта круга с деталью при расчетах температуры шлифования;
- 3) оценка неравномерности температурного поля по ширине профиля, исходя из данных п.2;
- 4) определение интенсивности съема припуска ($\text{мм}^3/\text{с}$) при расчетах силы резания, удельной работы шлифования и т.п.;
- 5) теоретическое исследование влияния погрешностей настройки технологической системы на указанные выше параметры, напри-

мер, влияние погрешности настройки круга на угол подъема резьбы, на площадь пятна контакта и температуру шлифования.

Сегодня имеются несколько программных продуктов, позволяющих осуществить пространственное геометрическое моделирование: Solid Works, MasterCAM, ProEngineer, AutoDeskInventor и др. Ниже рассмотрено построение геометрической модели технологической системы (ТС) при помощи программы конструкторского проектирования AutoDeskInventor. Сущность методики построения геометрической модели ТС заключается в следующем.

1. Построение геометрической 2D - 3D - модели заготовки с предварительным нанесением на ее участке резьбы требуемого шага и профиля.
2. Построение вспомогательной плоскости A' (рис.2.16), касательной к цилиндрической поверхности заготовки и проходящей через прямую 1—2 (образующую цилиндра), которая параллельна оси заготовки O .
3. Перемещение плоскости A' перпендикулярно линии $1O'3$ и фиксация ее в точке O' , которая принадлежит оси шлифовального круга. Новое положение плоскости A' соответствует плоскости A на рис.2.16.
4. Установка угла наклона шлифовального круга на угол подъема резьбы осуществляется поворотом плоскости шлифовального круга относительно оси $1O'3$. На рис.2.16 угол наклона шлифовального круга определяется углом между линиями 4 и 5, выходящими из точки O' (линия 5 характеризует нулевой угол наклона шлифовального круга $\varphi=0$). Наклон круга на угол φ в противоположную сторону характеризуется линией 6, также проходящей через точку O' .

Обеспечение и контроль выполнения при моделировании вышеперечисленных пунктов является необходимым условием адекватности трехмерного геометрического моделирования ТС. Для иллюстрации результатов моделирования на рис.2.16 представлен вид элементов ТС (кроме правящего ролика), на котором видно взаимное положение шлифовального круга и заготовки в процессе формообразования правой резьбы при шлифовании от заднего центра к переднему.

Анализ этого рисунка позволяет установить, что он соответствует шлифованию правой резьбы, а его достоверность подтверждается совпадением с соответствующим видом реальной ТС резьбошлифования.

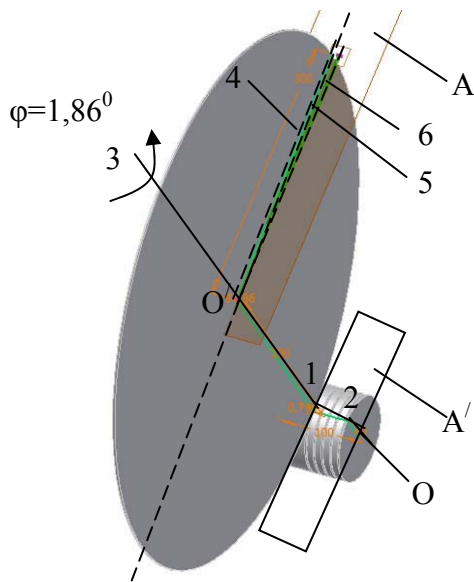


Рис.2.16. Схема построения 3-мерной геометрической модели технологической системы резбошлифования.

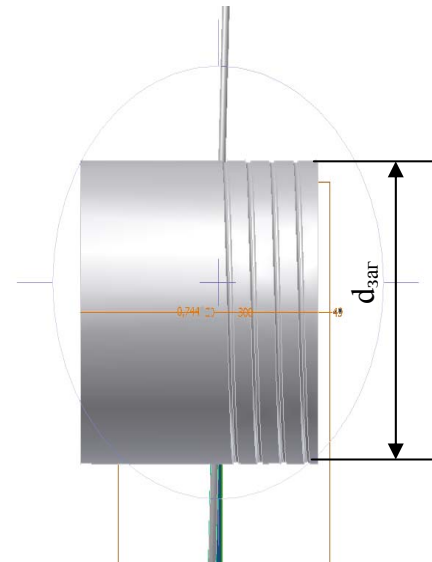


Рис.2.17. Технологическая система резбошлифования (главный вид).

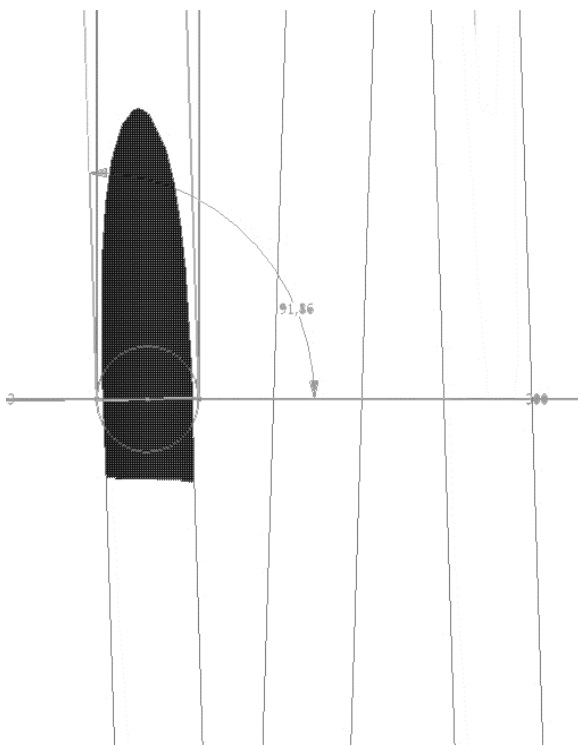


Рис.2.18. Пятно контакта шлифовального круга с заготовкой на первом переходе (результат моделирования).

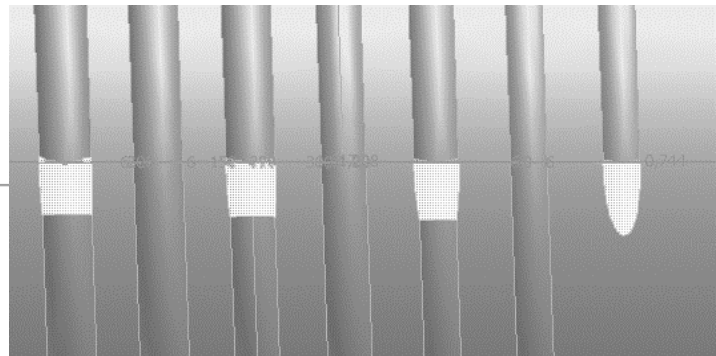


Рис.2.19. Пятно контакта шлифовального круга с заготовкой на четырех переходах (результат моделирования).

На рис.2.16 и рис.2.17 приняты следующие геометрические параметры: диаметр шлифовального круга $D_{шк} = 300$ мм, диаметр заготовки $d_3 = 98$ мм, шаг нарезаемой резьбы $P = 10$ мм, угол подъема

винтовой линии $\varphi = \arctg \frac{P}{\pi d_3} = 1,86^\circ$.

Разработанная модель использована для определения формы, размеров и площади пятна контакта, изображенных на рис.2.18 и рис.2.19.

Геометрические параметры элементов ТС соответствовали принятым в модели. Распределение припуска по технологическим переходам резьбошлифования представлены в табл.2.2. Там же приведены результаты расчета площади пятна контакта по двухмерной (упрощенной модели) и описанной выше трехмерной модели ТС (расчёт выполнен встроенными средствами программы AutoDeskInventor).

Таблица 2.2

Результаты расчета площади пятна контакта по двухмерной и трехмерной моделям

Номер прохода	1	2	3	4
Глубина шлифования, мм	0,744	0,464	0,409	0,383
Площадь пятна контакта по двухмерной модели S_K , мм ²	25	28,99	33,35	37,06
Площадь пятна контакта по трехмерной модели S_K , мм ²	27,285	33,247	37,737	41,935
Относит. погрешность, %	8,4	12,8	11,6	11,6

Видно, что различие в результатах расчета составляет до 13 %, что дает возможность в инженерных расчетах использовать формулы для расчета площади пятна контакта, полученные двухмерным моделированием.

При использовании IBM - совместимых персональных компьютеров (ПК) принято различать аппаратный и программный интерфейсы, под которыми понимают электронные устройства (конструктивное исполнение) и программное обеспечение (обслуживающие программы), соответственно. В состав аппаратного интерфейса компьютерной системы диагностики и управления (СКДУ) входят следующие основные части (рис.2.20): блок индикации, имитатор непрерывных сигналов, имитатор дискретных сигналов, внешний индикатор LSP, микроконтроллер МК, персональный компьютер ПК. Также в состав аппаратного интерфейса входят: ПАМ - датчик мощности,

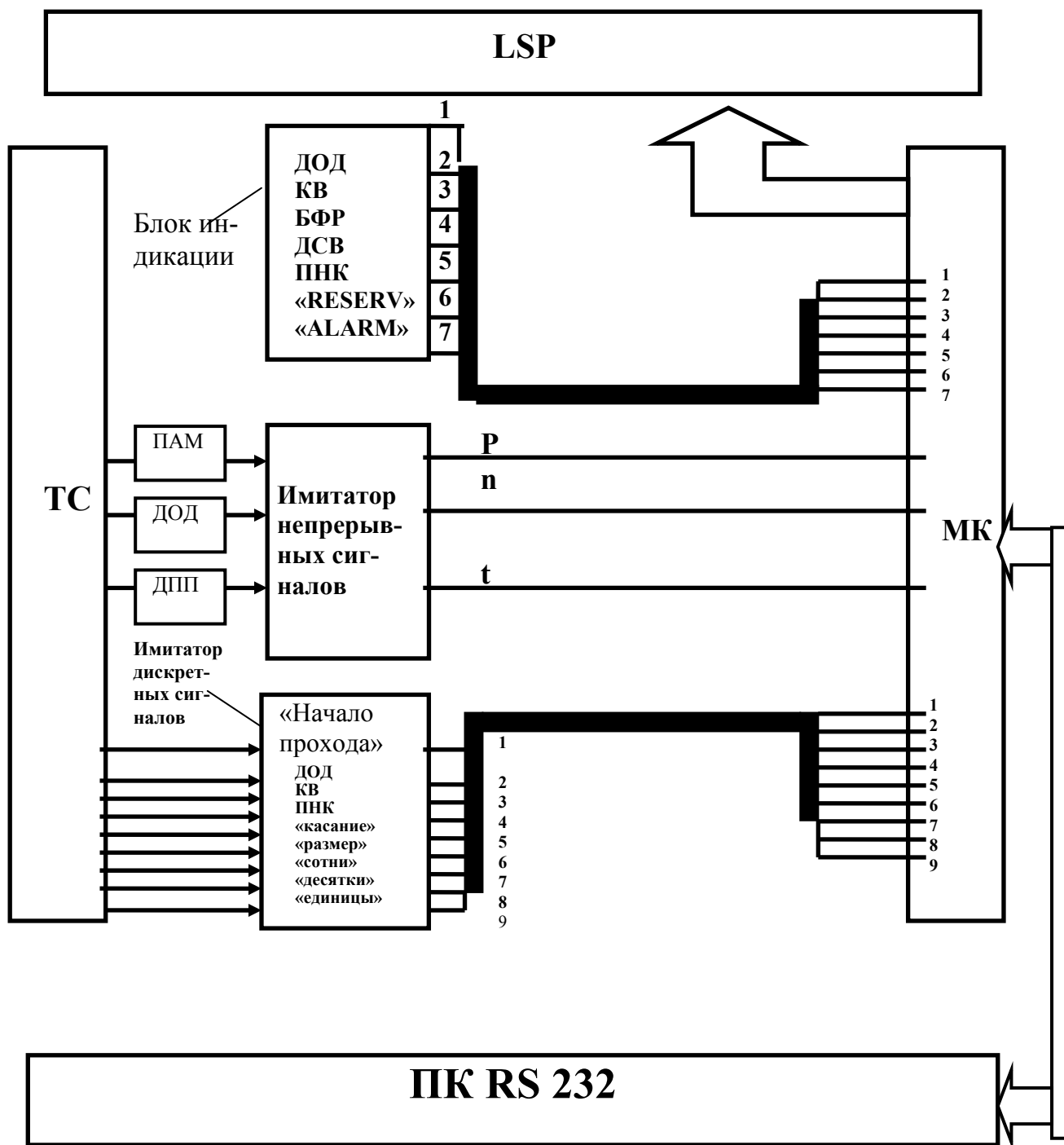


Рис.2.20. Функциональная схема СКДУ.

ДПП - датчик поперечной подачи, ДОД - датчик оборотов детали, КВ - конечный выключатель конца прохода, БФР - блок фиксации резания, ДСВ - датчик смены винта, ПНК - прибор неразрушающего контроля, «RESERV» - зарезервированная ячейка для сигнала, «ALARM» - сигнал предостережения, ПАМ - преобразователь активной мощности, ДС - датчик скорости, ДГШ - датчик глубины шлифования, ДД - датчик деформации, «касание» - сигнал касания круга и заготовки, «размер» - сигнал достижения заданного размера, «сотни», «десятки»,

«единицы» - сигналы имитатора глубины шлифования, LSP - жидкокристаллический цифровой индикатор, RS \approx 232 - стандартный последовательный интерфейс, ТС - технологическая система, МК - микроконтроллер, ПК - персональный компьютер, ИМ - исполнительный механизм станка.

Датчик оборотов детали ДОД конструктивно выполнен в виде датчика угла поворота заготовки, например, фотоэлектрического датчика. С его помощью определяют текущее положение профиля круга относительно заготовки в направлении её оси.

Датчик конца перехода КВ конструктивно выполнен в виде конечного выключателя, имеющегося на станке.

Блок фиксации резания БФР, с помощью которого определяется момент касания шлифовального круга с заготовкой. При врезании круга в обрабатываемую деталь (в начале технологического перехода резьбошлифования) сигнал мощности превышает пороговый уровень, на который настроен БФР, и на выходе этого блока появляется сигнал логической единицы.

Блок вычета мощности холостого хода БВМ предназначен для уменьшения погрешности измерения мощности, затрачиваемой на шлифование. За счет использования всей шкалы измерения мощности (или разрядной сетки компьютера) для измерения полезной ее части, которая расходуется на шлифование.

Датчик смены винта ДСВ. Формирует сигнал о снятии обработанной заготовки со станка.

«RESERV» - зарезервированный вход, предназначенный для расширения системы в процессе ее модернизации.

Первичные измерительные преобразователи предназначены для получения информации о фактическом состоянии технологической системы резьбошлифования, основным компонентом которой является резьбошлифовальный станок РШС. Преобразователь активной мощности ПАМ предназначен для измерения активной мощности шлифования. Датчик скорости ДС в системе диагностики служит для измерения частоты вращения заготовки, на основании которой может быть найдена окружная (линейная) скорость заготовки. Прибор неразрушающего контроля ПНК (механический или элетромагнитный) предназначен для контроля состояния поверхностного слоя детали, в частности для определения момента перехода состояния поверхностного слоя из недефектного в дефектное. Датчик осевой деформации ДОД позволяет контролировать не только текущую осевую деформа-

цию заготовки, но также крайние осевые положения заднего центра РШС в момент установки и снятия заготовки.

Разработаны пять алгоритмов работы СКДУ.

Первый алгоритм работы СКДУ реализует режим сбора технологических данных, характеризующих технологический процесс резбошлифования всех обработанных винтов (включая все проходы обработки этих винтов) (рис.2.21).

Уровень P снимается непрерывно. Если этот уровень изменяется по величине и по скорости одновременно (нарушены заданные в программе пороги по уровню ($c1$) и скорости ($c2$) - они задаются в программе), то формируется сигнал БФР=1, который разрешает подсчёт импульсов от датчика оборотов детали (ДОД) до заданного числа N (например $N=5$). В этот момент ($N=5$) компьютер из непрерывно поступающих аналоговых сигналов берет усредненные значения сигналов P, n, t (например, усредненные за секунду по десяти точкам синхронно с частотой сети). Эти данные переводятся в натуральные единицы по формулам градуировки в программе MathCAD.

Математические модели (ММ) градуировки преобразователя активной мощности (ПAM) (работает в трёх режимах чувствительности) сведены в табл.2.3.

Таблица 2.3

Значения коэффициентов математической модели для мощности в зависимости от чувствительности ПAM

Чувствительность ПAM	Низкая	Средняя	Высокая
Математическая модель градуировки	$P = ax + b$		
	$a = 494,97$	$a = 298,04$	$a = 105,13$
	$b = -293,94$	$b = -126,48$	$b = -46,729$
Примечание: 1. a, b – коэффициенты Вт/В и Вт, соответственно. 2. Индексы i, j – опущены.			

ММ градуировки для преобразователя частоты вращения заготовки (датчик скорости детали (ДСД)) определяется

$$n = k_n \cdot U_n, \quad (2.37)$$

где k_n - коэффициент; $k_n = 0,125$ (об/мин)/В.

ММ градуировки преобразователя глубины шлифования (датчик глубины шлифования (ДГШ)) определяется

$$t = k_t \cdot U_t, \quad (2.38)$$

где k_t - коэффициент; $k_t = 0,2$ мм/В.

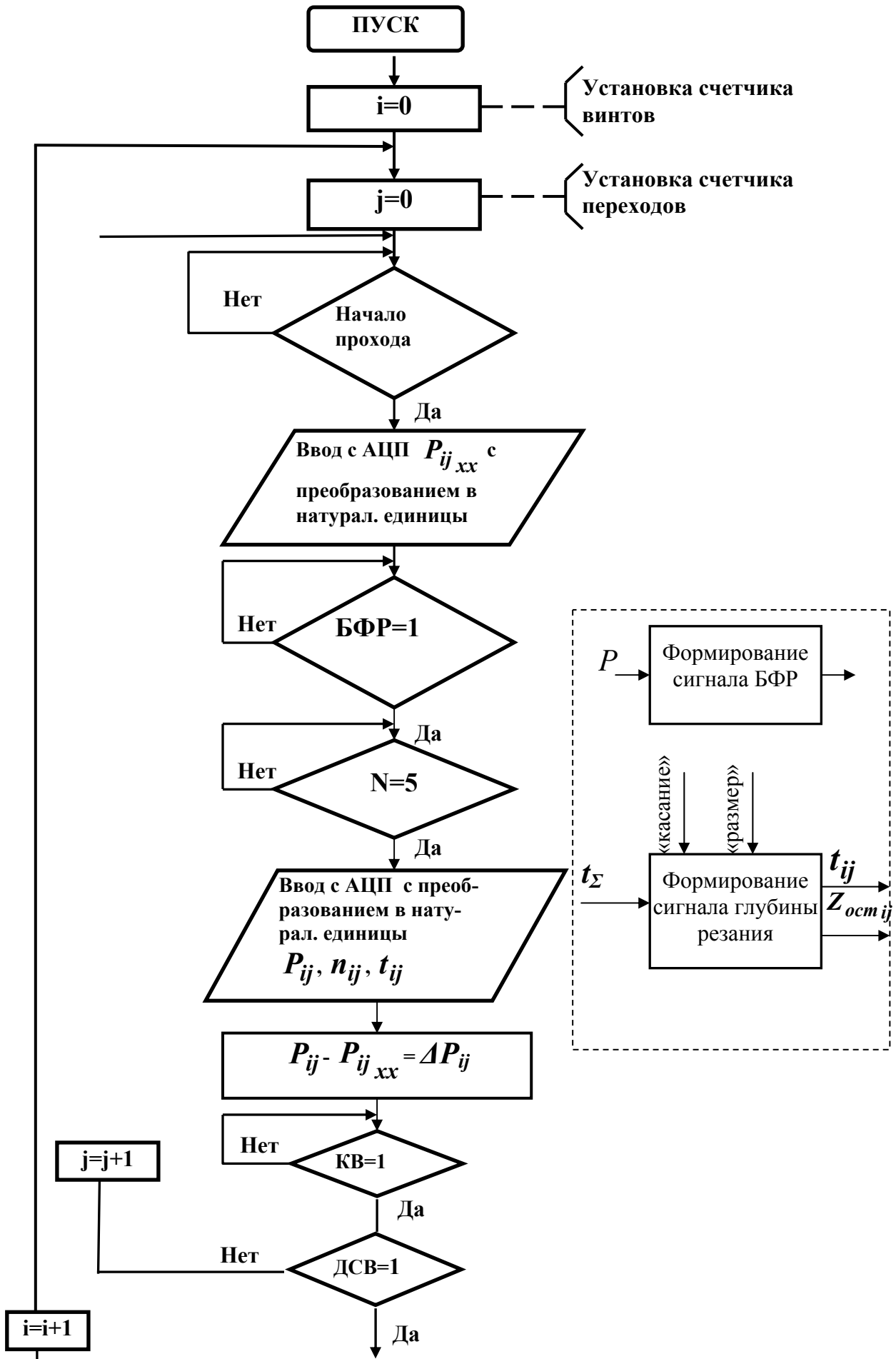


Рис.2.21. Блок-схема алгоритма работы СКДУ в режиме сбора данных.

Мощность шлифования ΔP_{ij} определяют (программным путем) по формуле

$$\Delta P_{ij} = P_{ij} - P_{ijxx}, \quad (2.39)$$

где P_{ij}, P_{ijxx} - соответственно мощность, потребляемая электродвигателем привода шлифовального круга в режиме работы и холостого хода, Вт.

Запоминание уровня сигнала P_{ijxx} происходит каждый раз при появлении сигнала БФР=1 (алгоритм формирования сигнала БФР=1 представлен выше).

Сформировать ячейку памяти для системы сбора данных:

- определить адрес этой ячейки;
- записать туда следующие числа: 1 - номер обрабатываемого винта; 2 - номер прохода шлифования; 3 - параметры, характеризующие этот проход: текущую дату и время суток, $\Delta P_{ij}, P_{ij}, n_{ij}, t_{ij}$, где i, j - номера винтов и проходов, соответственно.

Далее система находится в состоянии ожидания сигнала КВ=1 (конец прохода). При появлении сигнала КВ=1 счетчик числа проходов увеличивает свое содержимое на 1. Подготавливается следующая ячейка для записи данных в системе сбора данных (ССД). Ячейка – это область памяти, в которой содержатся данные следующего вида (номер винта, номер прохода, а также мощность $\Delta P_{ij}, P_{ij}$, глубина шлифования t_{ij} , скорость n_{ij}). После этого система переходит в режим ожидания сигнала БФР=1, после появления которого опять подсчитывается число оборотов детали, и когда оно становится, например, N=5, формируется новая ячейка памяти по описанной выше схеме. Затем система переходит в режим ожидания сигнала КВ=1 и т.д. до появления сигнала ДСВ=1. Алгоритм формирования сигнала ДСВ=1 следующий: контролируется аналоговый уровень сигнала ДСВ и когда он превышает известную величину, например, 4,5 В, должен сработать дискретный преобразователь (например, на основе операционного усилителя типа УТ), который вырабатывает сигнал логической единицы (сигнал ДСВ=1). После появления сигнала ДСВ=1 счетчик винтов увеличивает свое содержимое на 1 и формируется очередная ячейка для записи данных в ССД. Запись производится по описанному выше алгоритму до появления нового сигнала ДСВ=1 (между сигналами ДСВ=1 несколько раз появляется сигнал

КВ=1, по которому осуществляется запись данных по проходам на интервале времени обработки одного и того же винта).

Причем появление сигналов БФР=1, КВ=1, ДОД=1, ДСВ=1 должно сопровождаться включением соответствующих индикаторов на передней панели УСО.

Таким образом, в ССД в процессе работы станка формируется база технологических данных (БД), характеризующих технологический процесс резьбошлифования всех обработанных винтов (и всех проходов обработки этих винтов). Эта БД непрерывно пополняется и пользователь в любой момент времени имеет возможность узнать ее текущее состояние (например, сколько винтов обработано к данному моменту времени). Эта база данных должна иметь управление от СУБД, например, от СУБД типа MS ACCESS. Пользователь может получить информацию из этой БД по любому характеризующему ее признаку. Например, он может получить данные, характеризующие обработку на 3-ем проходе 5-го винта или данные по обработке в указанный день и интервал времени суток.

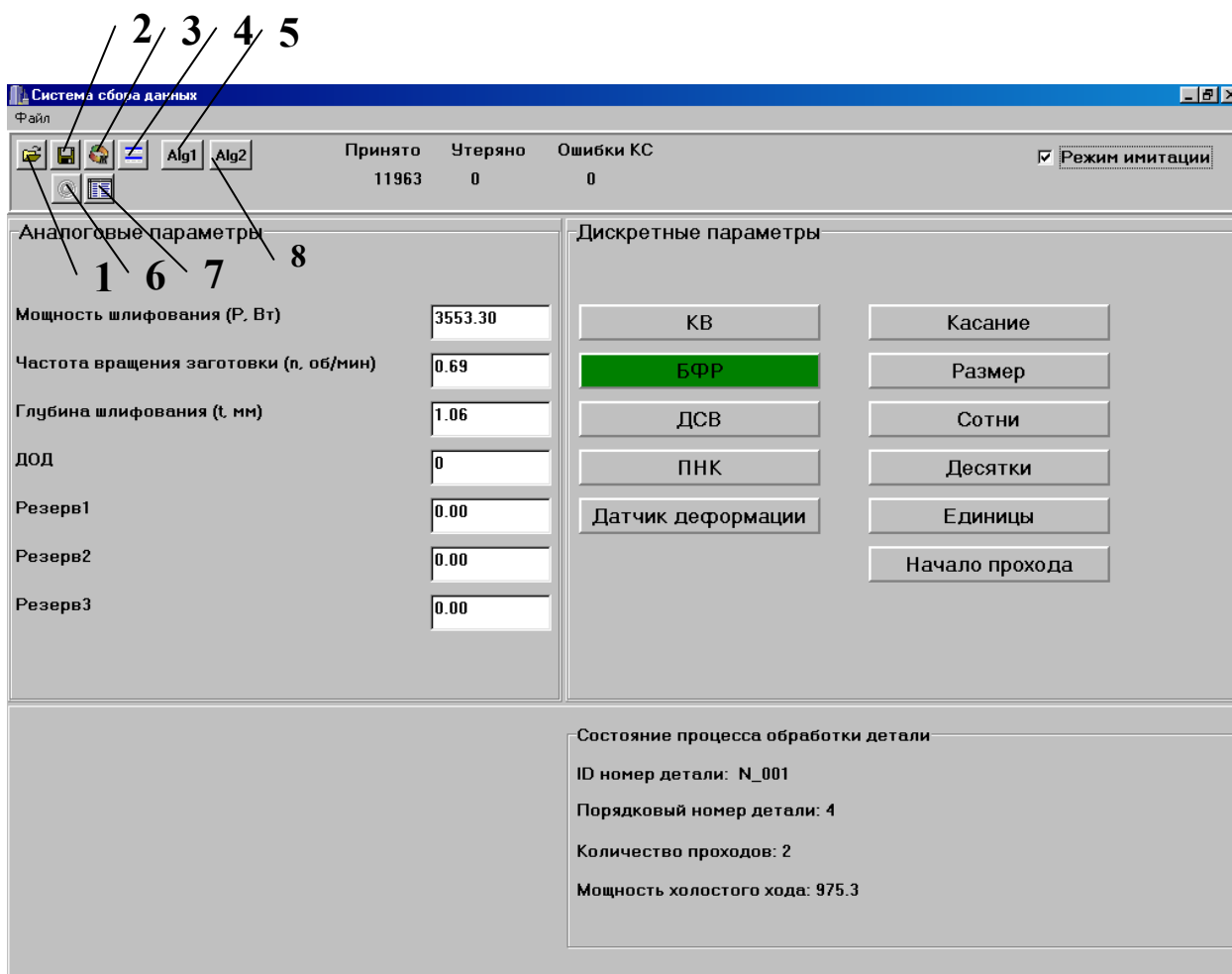


Рис.2.22. Вид окна в ССД для задания входных сигналов мощности, скорости детали и глубины шлифования.

Например, запишем рабочую базу данных (рабочую БД) на операции резьбошлифования двух заготовок ходовых винтов. На первой заготовке припуск удаляется за два прохода, на второй - за три прохода.

1. Для имитации обработки первой заготовки установить уровни мощности P (3553,30 Вт), скорости заготовки n (0,69 об/мин), глубины шлифования t (1,06 мм) (рис.2.22). Каждые 100 мс (5 раз за 0,5 с) осуществляется сканирование сигналов, т.е. фиксируется результат усреднения по 5 точкам, например,

$$P_i = \frac{P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5}{5}. \quad (2.40)$$

Для появления сигнала БФР (зеленый индикатор клавиши БФР) необходимо увеличить уровень мощности. Индикатор БФР появляется после установки уровня мощности P .

2. После появления сигнала БФР=1 тумблером, имитирующим датчик оборотов детали (ДОД) отсчитывается число оборотов, равное, например, пяти. В этот момент осуществляется запись значений P , n и t в рабочую БД. При этом горит индикатор записи (рис.2.23).

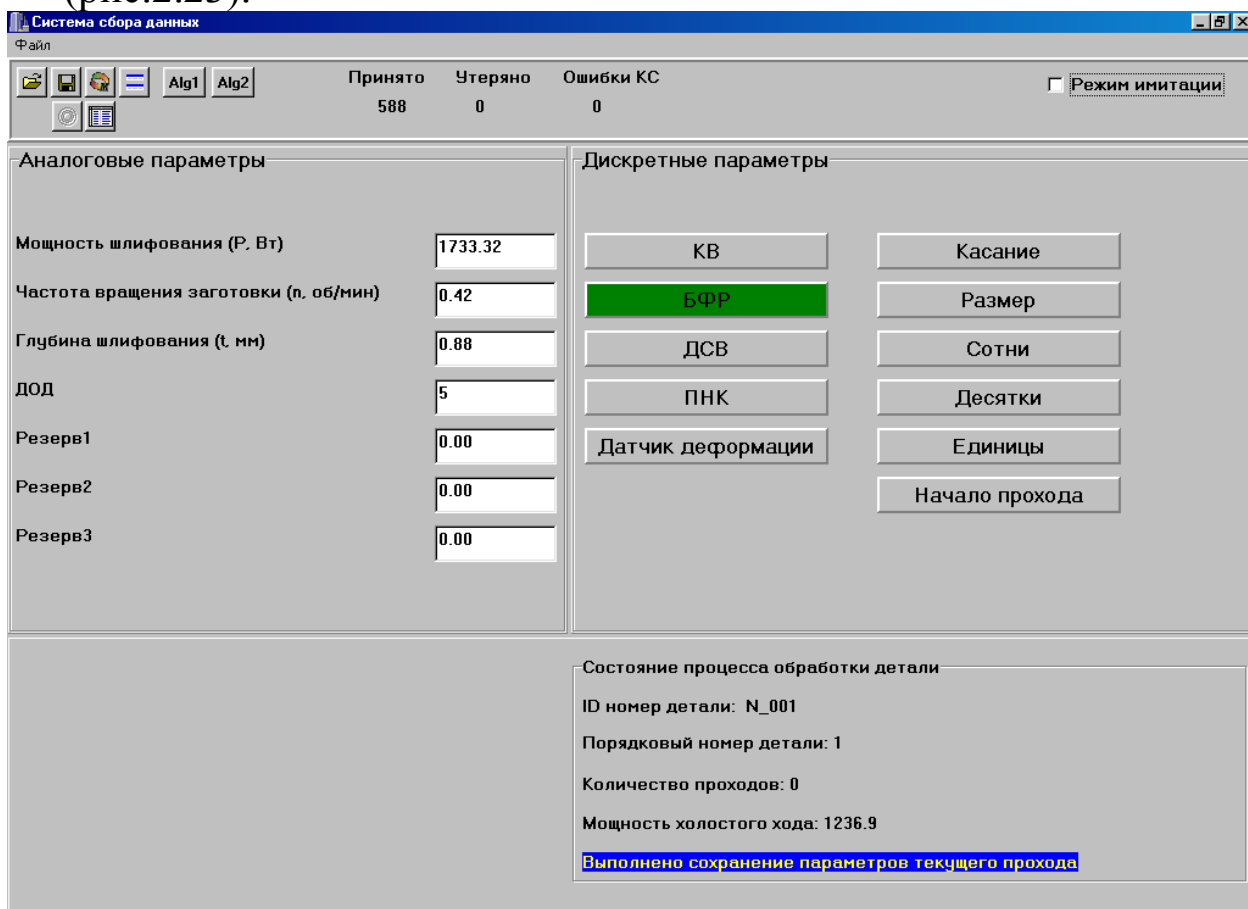


Рис.2.23. Вид окна в ССД в момент сохранения сигналов мощности шлифования, скорости детали и глубины шлифования в рабочую БД.

3. Уменьшить уровень мощности (поворотом ручки потенциометра). Через 1 с после этого должен потухнуть индикатор БФР.
4. Нажать тумблер, имитирующий сигнал КВ (зеленый индикатор клавиши КВ).

Для имитации второго прохода первой заготовки повторяют пункты 1-4. Их повторяют столько раз, сколько проходов обработки заготовки. В данном примере два раза.

5. Нажать клавишу ДСВ для имитации снятия первой заготовки со станка.

Для имитации обработки второй заготовки повторяются п.1-5.

Для просмотра рабочей БД необходимо нажать кнопку 1 на панели инструментов (рис.2.22). Сформированная рабочая БД показана на рис.2.24, из которого видно, что каждая обработанная деталь характеризуется идентификационным номером, порядковым номером, датой и временем обработки, номером прохода, мощностью, скоростью детали и глубиной резания.

1

Время работы ССД, с	ID номер детали	Порядковый № детали	Дата+время	Номер прохода	Р. Вт	n, об/мин	t, мм	ДОД
54	N_001	1	14.08.05 12:38:13	1	491.52	0.42	1.05	5
153	N_001	1	14.08.05 12:39:52	2	531.98	0.49	0.85	5
243	N_002	2	14.08.05 12:41:22	1	798.47	0.45	0.84	5
285	N_002	2	14.08.05 12:42:04	2	391.83	0.50	0.92	5
329	N_002	2	14.08.05 12:42:48	3	435.26	0.54	1.00	5

Рис.2.24. Вид окна в ССД рабочей БД.

В процессе формирования рабочей БД в ССД существует возможность записи теневой БД (рис.2.25). Для этого необходимо нажать кнопку 2 на панели инструментов (рис.2.22). В момент записи горит индикатор записи теневой БД (кнопку 6 на рис.2.22). При повторном нажатии на ту же кнопку запись теневой БД отключается. Для отображения записанной теневой БД нажать кнопку 7 (рис.2.22).

Для генерации (переноса информации в стандартную табличную форму) сформированных рабочей БД и теневой БД в текстовый файл на панели инструментов (рис.2.24 и рис.2.25) имеется кнопка 1. Для

просмотра сохраненных баз данных в папке Ssd выбрать папку с базой данных за интересующий интервал времени (рис.2.26).

1

Порядковый № детали	Дата+время	P, Вт	n, об/мин	t, мм	ДОД
4	14.08.05 12:31:22	1632.64	0.20	1.01	0
4	14.08.05 12:31:22	1620.80	0.20	1.01	0
4	14.08.05 12:31:22	1630.67	0.20	1.01	0
4	14.08.05 12:31:22	1605.99	0.20	1.01	0
4	14.08.05 12:31:22	1593.16	0.20	1.01	0
4	14.08.05 12:31:22	1613.89	0.20	1.01	0
4	14.08.05 12:31:22	1635.60	0.20	1.01	0
4	14.08.05 12:31:22	1596.12	0.20	1.01	0
4	14.08.05 12:31:22	1631.66	0.20	1.01	0
4	14.08.05 12:31:22	1616.85	0.20	1.01	0
4	14.08.05 12:31:27	1607.97	0.20	1.01	0
4	14.08.05 12:31:27	1604.02	0.20	1.01	0
4	14.08.05 12:31:27	1591.19	0.20	1.01	0

Рис.2.25. Вид окна в ССД теневой БД.

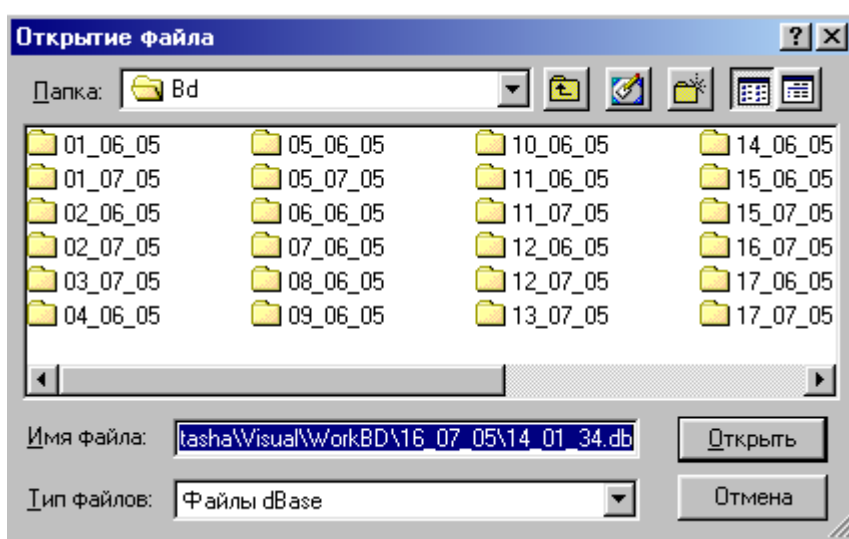


Рис.2.26. Выбор папки с базой данных.

Второй алгоритм работы СКДУ реализует цикл обучения, в котором определяют критическую температуру в точке появления шлифовочного дефекта (рис.2.27). Для этого непрерывно увеличивают глубину резания до появления шлифовочного дефекта. В момент появления дефектного слоя фиксируют режимные параметры шлифования: мощность шлифования P_{ij}^* , скорость заготовки n_{ij}^* и глубину шлифования t_{ij}^* .

В качестве исходных данных необходимо задать теплофизические параметры a (м²/с), λ (Вт/м·°С), геометрические параметры: радиус профиля канавки R , (м), диаметр шлифовального круга D (м), диаметр детали d (м).

Затем определяют площадь пятна контакта S_{ij}^* по формуле

$$S_{ij}^* = 2 \cdot \sqrt{\frac{D \cdot d}{D + d}} \cdot \int_0^{R(\arccos(\frac{R-t_{ij}^*}{R}))} \sqrt{R \cos\left(\frac{l}{R}\right) - (R - t_{ij}^*)} dl. \quad (2.41)$$

Плотность теплового потока q находят следующим образом:

$$q_{ij}^* = \frac{P_{ij}^*}{S_{ij}^*}. \quad (2.42)$$

Мощность шлифования определяют по формуле (2.39).

Время действия теплового источника τ_{ij}^* для любого j -ого прохода

$$\tau_{ij}^* = \frac{\sqrt{\frac{D \cdot d}{D + d}} \cdot t_{ij}^*}{V_{ij}^*}. \quad (2.43)$$

Скорость заготовки при шлифовании V_{ij}^*

$$V_{ij}^* = \frac{\pi \cdot n_{ij}^* \cdot R}{30}. \quad (2.44)$$

Рассчитываем критерий Фурье F_0

$$F_{0ij}^* = \frac{a \cdot \tau_{ij}^*}{R^2}. \quad (2.45)$$

Далее рассчитываем температуру по следующей формуле

$$T_{кр} = -\frac{2}{\pi} \cdot \frac{q_{ij}^* \cdot R}{\lambda} \cdot \int_0^\infty \left[1 - \exp\left(-\frac{a \cdot \tau_{ij}^*}{R^2} \cdot \xi^2\right) \right] \times \\ \times \frac{J_0\left(\xi \frac{r}{R}\right) \cdot Y_1(\xi) - Y_0\left(\xi \frac{r}{R}\right) \cdot J_1(\xi)}{\xi^2 \cdot [J_1^2(\xi) + Y_1^2(\xi)]} d\xi. \quad (2.46)$$

Верхний предел интеграла выбирается в зависимости от числен-

ного значения критерия Фурье (табл.2.4)

Таблица 2.4.

Значения верхнего предела интегрирования

F_0	$(0-1) \times 10^{-5}$	$(1-20) \times 10^{-5}$	$(20-600) \times 10^{-5}$	$(600-50 \times 10^2) \times 10^{-5}$	$(50 \times 10^2 - 200 \times 10^2) \times 10^{-5}$	$> 200 \times 10^2 \times 10^{-5}$
<i>limit</i>	$100 \times 10^3 - 700 \times 10^3$	$100 \times 10^3 - 22 \times 10^3$	$22 \times 10^3 - 9 \times 10^3$	$9 \times 10^3 - 8 \times 10^3$	$1 \times 10^3 - 8 \times 10^3$	1×10^3

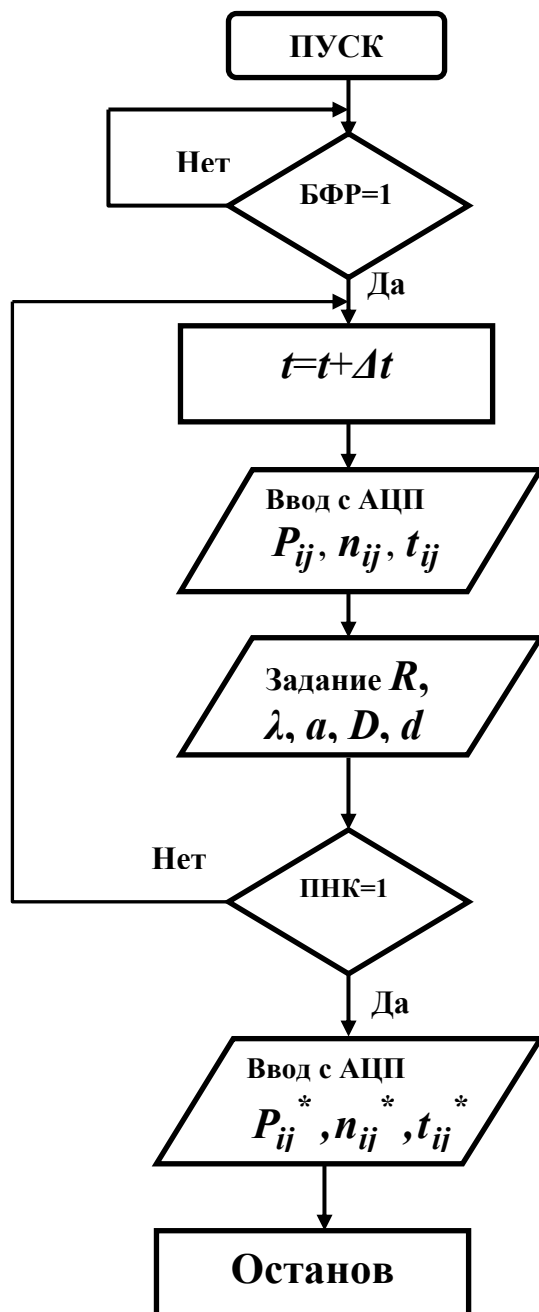
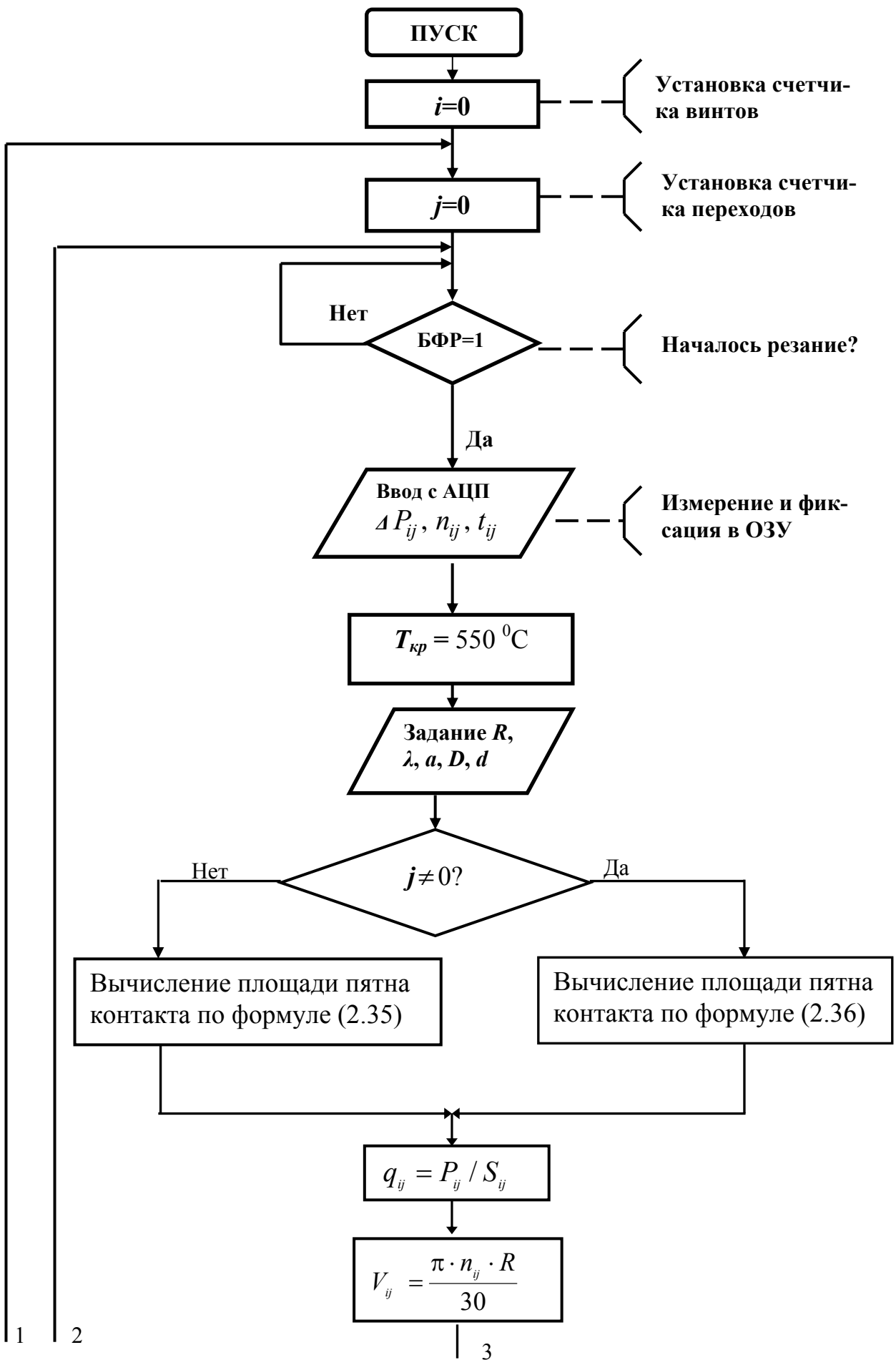


Рис.2.27. Блок-схема алгоритма цикла обучения.

Третий алгоритм работы СКДУ (рис.2.28) реализует сценарий работы СКДУ в режиме диагностики процесса, заключающейся в проверке условия образования дефектного слоя ($T > T_{кр}$) с периодической



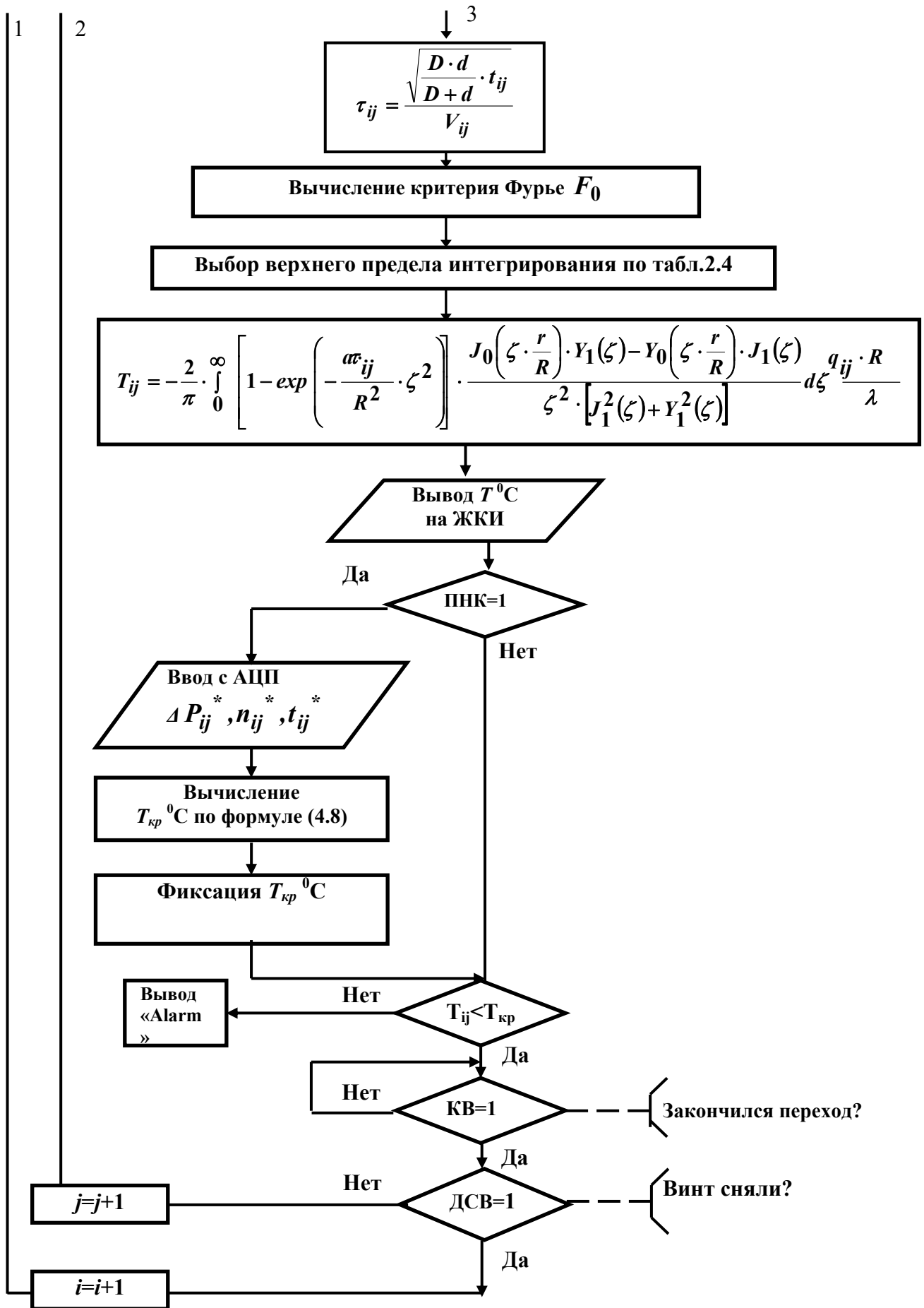


Рис. 2.28. Блок-схема алгоритма работы СКДУ в режиме диагностики.

коррекцией значения $T_{кр}$ в момент появления шлифовочного прижога. При этом значение $T_{кр}$ в начале работы системы можно определить с помощью цикла обучения или задать в качестве исходного параметра.

Для контрольного примера расчета температуры шлифования (в зоне обработки) в программе MathCAD в качестве исходных данных необходимо задать теплофизические параметры $a=8,4 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\lambda = 42$ Вт/м·°С; геометрические параметры: радиус профиля канавки $R = 3 \cdot 10^{-3}$ м, диаметр шлифовального круга $D = 400 \cdot 10^{-3}$ м, диаметр детали $d = 40 \cdot 10^{-3}$ м.

Площадь S пятна контакта для первого прохода находят по формуле (2.35), а для остальных проходов - по формуле (2.36).

Рассчитывают температуру шлифования T , используя формулы (2.37 - 2.43) и табл.2.4, и выводят значение температуры на монитор ПК.

В момент появления сигнала ПНК=1 определяют (по измеренным в этот момент P_{ij}^* , n_{ij}^* , t_{ij}^*) температуру шлифования $T = T_{кр}$. Полученная в этот момент времени температура шлифования является критической $T_{кр}$ (при этой температуре на поверхности образуется шлифовальный прижог).

Здесь следует остановиться и отметить важность полученного результата для теории и практики шлифования труднообрабатываемых материалов. Впервые удалось без применения прямого метода измерения температуры определить критическую температуру, при которой в данном режиме шлифования происходит изменение состояния поверхностного слоя (образование шлифовочного дефекта). Важность этого результата вытекает из того факта, что величина $T_{кр}$ не является постоянной, она зависит от скорости тепловых процессов при шлифовании (из работ Д.Г. Евсеева известно, что с увеличением скорости изменения температурного поля величина $T_{кр}$ увеличивается).

Найденную температуру $T_{кр}$ фиксируют на время прохода и сравнивают с ранее определённой текущей температурой шлифования T . Если $T > T_{кр}$, то вырабатывается предупреждающий сигнал «ALARM» (по этому сигналу работа станка может быть остановлена). Далее работа системы осуществляется по блок-схеме алгоритма (рис.2.28).

Например, запишем рабочую базу данных (БД) для операции

резьбошлифования заготовки ходового винта. Припуск удаляется за два прохода. Диаметр обрабатываемой заготовки $d = 0,040$ м; радиус профиля шлифовального круга $R = 0,003$ м; коэффициенты тепло- и температуропроводности $\lambda = 42$ Вт/м \cdot °С, $a = 8,4 \cdot 10^{-6}$ м 2 /с, соответственно; критическая температура $T_{кр} = 550$ °С; диаметр шлифовального круга $D = 0,4$ м.

1. Для имитации обработки заготовки устанавливают уровни мощности P (495,46 Вт), скорости заготовки n (10 об/мин), глубины шлифования t (0,77 мм). Для появления сигнала БФР (зеленый индикатор клавиши БФР) увеличивают уровень мощности. Индикатор БФР появляется после установки уровнем мощности P порогового значения.
2. Вводят исходные данные, необходимые для расчета температуры шлифования в программе MathCAD. Для этого надо нажать кнопку 8 (рис.2.29).

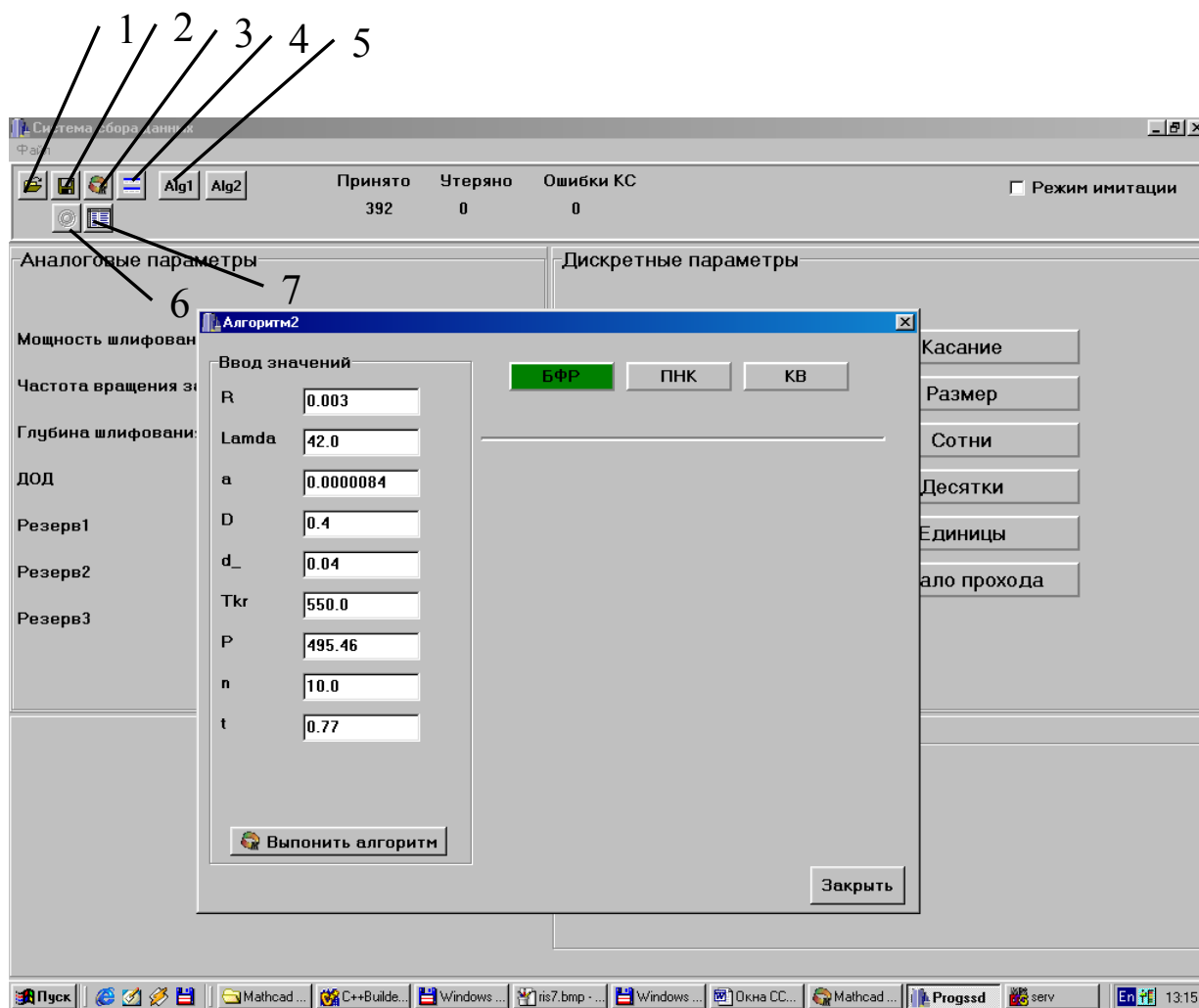


Рис.2.29. Окно в интерфейсе системы сбора данных при задании входных данных.

3. После появления сигнала БФР=1 тумблером, имитирующим датчик оборотов детали (ДОД) отсчитывают число оборотов, равное, например, пяти. В этот момент осуществляют запись значений P , n и t в рабочую БД.
4. Расчет температуры шлифования в программе MathCAD производится в соответствии с файлом (рис.2.30).

:= 

D:\SSD\math2.txt

R := Matrix_{0,0} λ := Matrix_{0,1} a := Matrix_{0,2} D := Matrix_{0,3} d := Matrix_{0,4}

Tkr := Matrix_{0,5} P := Matrix_{0,6} n := Matrix_{0,7} t := 0.001Matrix_{0,8}

PNK := Matrix_{0,9} KB := Matrix_{0,10} n_perexod := Matrix_{0,11} + 1 Sum_t := 0.001Matrix_{0,12}

R = 3×10^{-3} λ = 42 a = 8.4×10^{-6} D = 0.4 d = 0.04

Tkr = 550 P = 474.74 n = 10 t = 6.8×10^{-4}

PNK = 0 KB = 1 n_perexod = 2 Sum_t = 1.45×10^{-3}

$$V := \pi \cdot n \cdot \frac{0.5d}{30} \quad \tau := \frac{\sqrt{D \cdot \frac{d \cdot t}{D + d}}}{V} \quad \tau = 0.237$$

V = 0.021

$$S := \begin{cases} S \leftarrow 2 \cdot \sqrt{D \cdot \frac{d}{D + d}} \cdot \int_0^{R \cdot \arccos\left(\frac{R-t}{R}\right)} \sqrt{R \cdot \cos\left(\frac{l}{R}\right) - (R-t)} dl & \text{if } n_perexod = 1 \\ S \leftarrow \sqrt{D \cdot \frac{d \cdot t}{D + d}} \cdot R \cdot \left[\arccos\left[\frac{R - \text{Sum}_t}{R}\right] + \arccos\left[\frac{[R - (\text{Sum}_t - t)]}{R}\right] \right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$q := \frac{P}{S}$$

$$q = 1.808 \times 10^7$$

$$S = 2.626 \times 10^{-5}$$

$$F0 := a \cdot \frac{\tau}{R^2}$$

$$VX := \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \cdot 10^{-5} \\ 20 \cdot 10^{-5} \\ 600 \cdot 10^{-5} \\ 50 \cdot 10^{-3} \\ 200 \cdot 10^{-3} \\ 100000 \cdot 10^{-3} \end{pmatrix} \quad VY := \begin{pmatrix} 700 \cdot 10^3 \\ 100 \cdot 10^3 \\ 22 \cdot 10^3 \\ 9 \cdot 10^3 \\ 8 \cdot 10^3 \\ 1 \cdot 10^3 \\ 1 \cdot 10^3 \end{pmatrix}$$

x := 0

lim := linterp(VX, VY, F0)

Tt := READ("D:\Ssd\T.txt")

$$T := \begin{cases} T \leftarrow 0 \\ -2 \cdot \left[\int_0^{\lim} \left(1 - \exp\left(-a \cdot \frac{\text{tau}}{R^2} \cdot \zeta^2\right) \right) \cdot \frac{J_0\left(\zeta \cdot \frac{R+x}{R}\right) \cdot Y_1(\zeta) - Y_0\left(\zeta \cdot \frac{R+x}{R}\right) \cdot J_1(\zeta)}{\zeta^2 \cdot (J_1(\zeta) \cdot J_1(\zeta) + Y_1(\zeta) \cdot Y_1(\zeta))} d\zeta \cdot \frac{q \cdot R}{\lambda} \right] & \text{if PNK} = 0 \\ T \leftarrow \frac{\quad}{\pi} \\ T \leftarrow \text{otherwise} \end{cases}$$

WRITE("D:\SSd\T.txt") := T

T = 571.136

PNK = 0

$$Tkr := \begin{cases} t \leftarrow 0 \\ Tkr & \text{if PNK} = 0 \\ -2 \cdot \left[\int_0^{\lim} \left(1 - \exp\left(-a \cdot \frac{\text{tau}}{R^2} \cdot \zeta^2\right) \right) \cdot \frac{J_0\left(\zeta \cdot \frac{R+x}{R}\right) \cdot Y_1(\zeta) - Y_0\left(\zeta \cdot \frac{R+x}{R}\right) \cdot J_1(\zeta)}{\zeta^2 \cdot (J_1(\zeta) \cdot J_1(\zeta) + Y_1(\zeta) \cdot Y_1(\zeta))} d\zeta \cdot \frac{q \cdot R}{\lambda} \right] & \text{otherwise} \\ t \leftarrow \frac{\quad}{\pi} \end{cases}$$

Tkr = 550

Alarm := if(T > Tkr, 1, 0) Alarm = 1

Out₀ := n_perexod

Out₁ := P

Out₂ := n

Out₃ := t · 1000

Out₄ := T

Out₅ := Tkr

Out₆ := PNK

Out₇ := Alarm



D:\SSD\out2.txt

Out

Рис.2.30. Содержание файла.

Затем появляется окно с результатами выполнения алгоритма (рис.2.31).

Из рис.2.31 видно, что температура шлифования на первом проходе $T = 912,7^{\circ}\text{C}$. При этом мощность резания $P = 511,3$ Вт, скорость вращения заготовки $n = 10$ об/мин, глубина шлифования $t = 0,77$ мм. Видно, что температура шлифования превышает критическую температуру, поэтому появляется индикация кнопки Alarm.

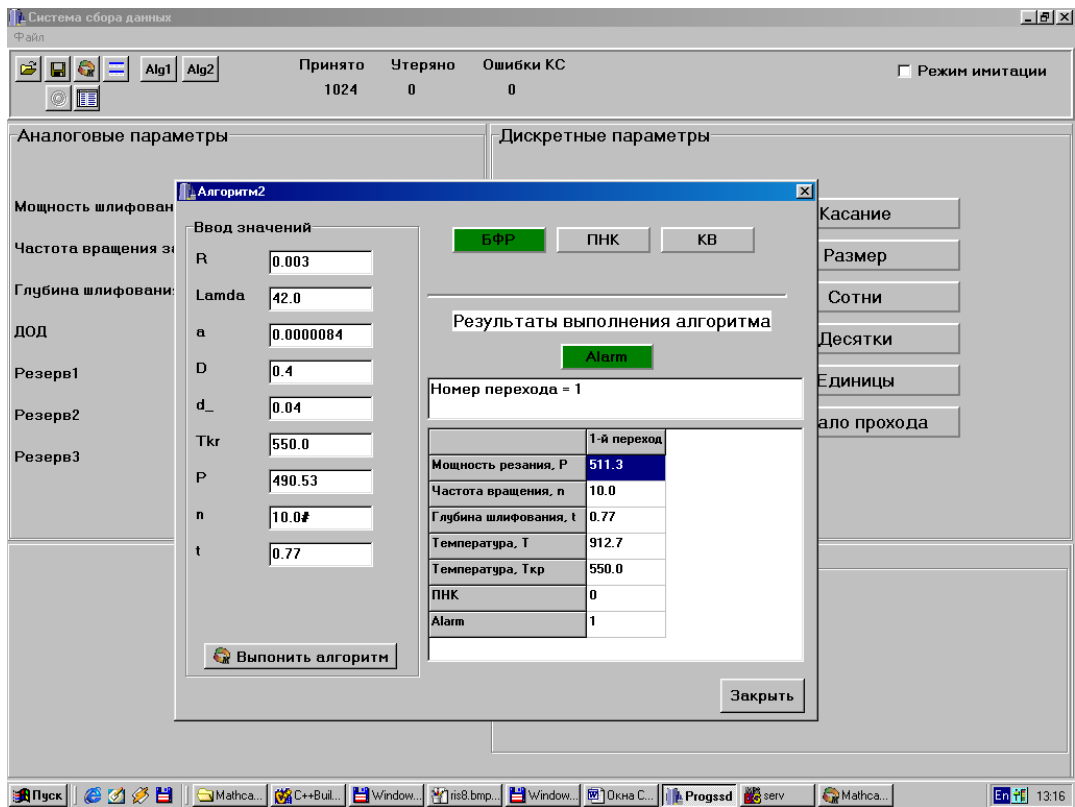


Рис.2.31. Окно в интерфейсе системы сбора данных на первом переходе после выполнения алгоритма.

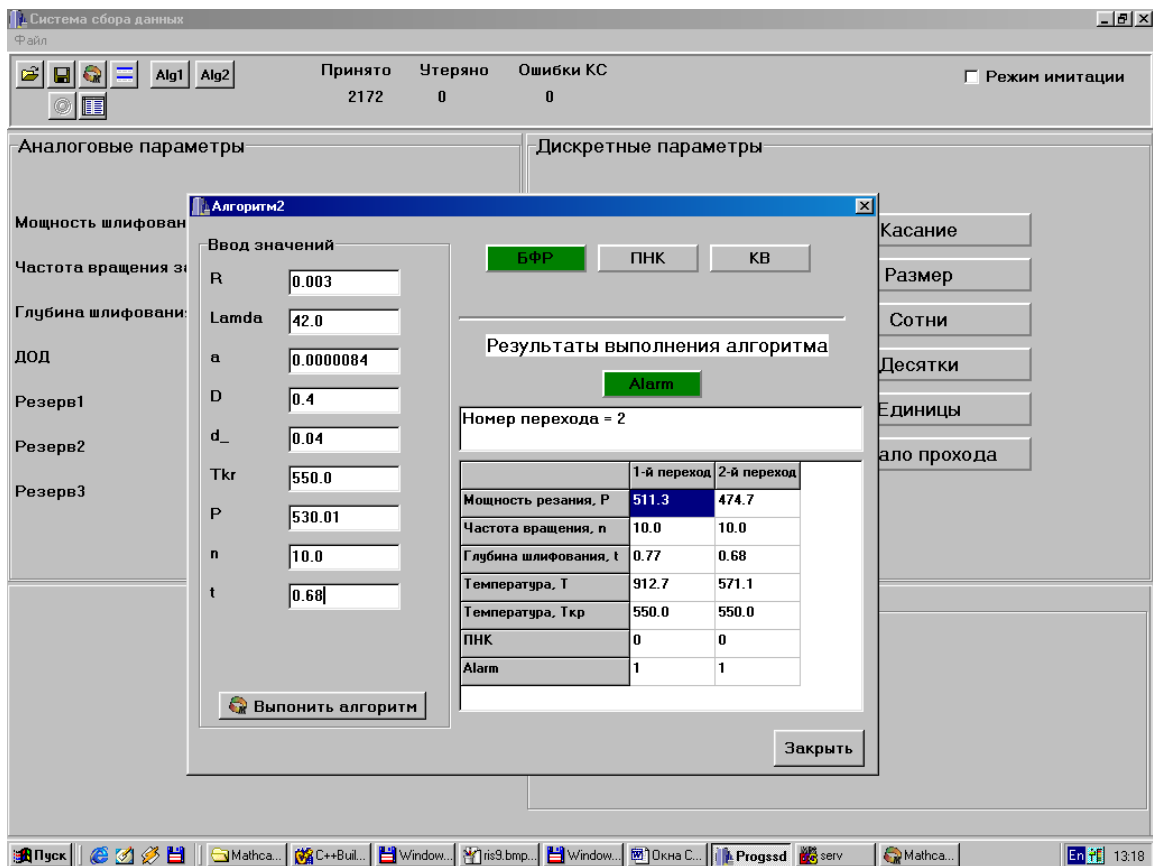


Рис.2.32. Окно в интерфейсе системы сбора данных на втором переходе после выполнения алгоритма.

5. Уменьшают уровень мощности (поворотом ручки потенциометра). Через 1 с после этого должен исчезнуть индикатор БФР.
6. Включают тумблер, имитирующий сигнал КВ (зеленый индикатор клавиши КВ).

Для имитации второго прохода заготовки повторяют пункты 1-4. Их повторяют столько раз, сколько проходов обработки заготовки. В данном случае два раза. Например, при входных данных на втором переходе, показанных на рис.2.32, получают температуру шлифования $T = 571,1^{\circ}\text{C}$.

7. Нажимают клавишу ДСВ для имитации снятия первой заготовки со станка.

Четвертый алгоритм работы СКДУ реализует режим «оценка состояния технологической системы шлифования - рекомендация в виде вывода требуемых глубин резания на проходы шлифования». После установки рабочим (или системой ЧПУ станка) глубины резания на первый проход система (СКДУ), во-первых, оценивает соответствие этой глубины требуемому состоянию поверхностного слоя резьбы и, во-вторых, подготавливает рекомендуемое значение глубины резания на следующий проход, после того, как предыдущий проход будет закончен. Такая информация может использоваться также при обработке следующей заготовки винта. Для этого при выполнении очередного прохода СКДУ определяет фактическую интенсивность шлифования (объем металл, удаляемый за единицу времени) [376]

$$Q_{ij} = \omega \left[R_k \left(a \sqrt{R^2 - a^2} + R^2 \arcsin \frac{a}{R} \right) + \frac{a^3}{3} + (R_e^2 - R_k^2 - R^2) \cdot a \right], \quad (2.47)$$

где ω - угловая скорость вращения изделия, $\omega = \frac{\pi n}{30}$; R - радиус профиля шлифовального круга; R_e - радиус винта; a - ширина области интегрирования.

Причём
$$a = R \sin \left(\arccos \left(\frac{R - t_{ij}}{R} \right) \right), \quad (2.48)$$

$$R_k = R_e + R - \sum_{j=1}^k t_{ij}. \quad (2.49)$$

Также определяют удельную работу шлифования, которая будет использоваться при нахождении глубины резания на последующий

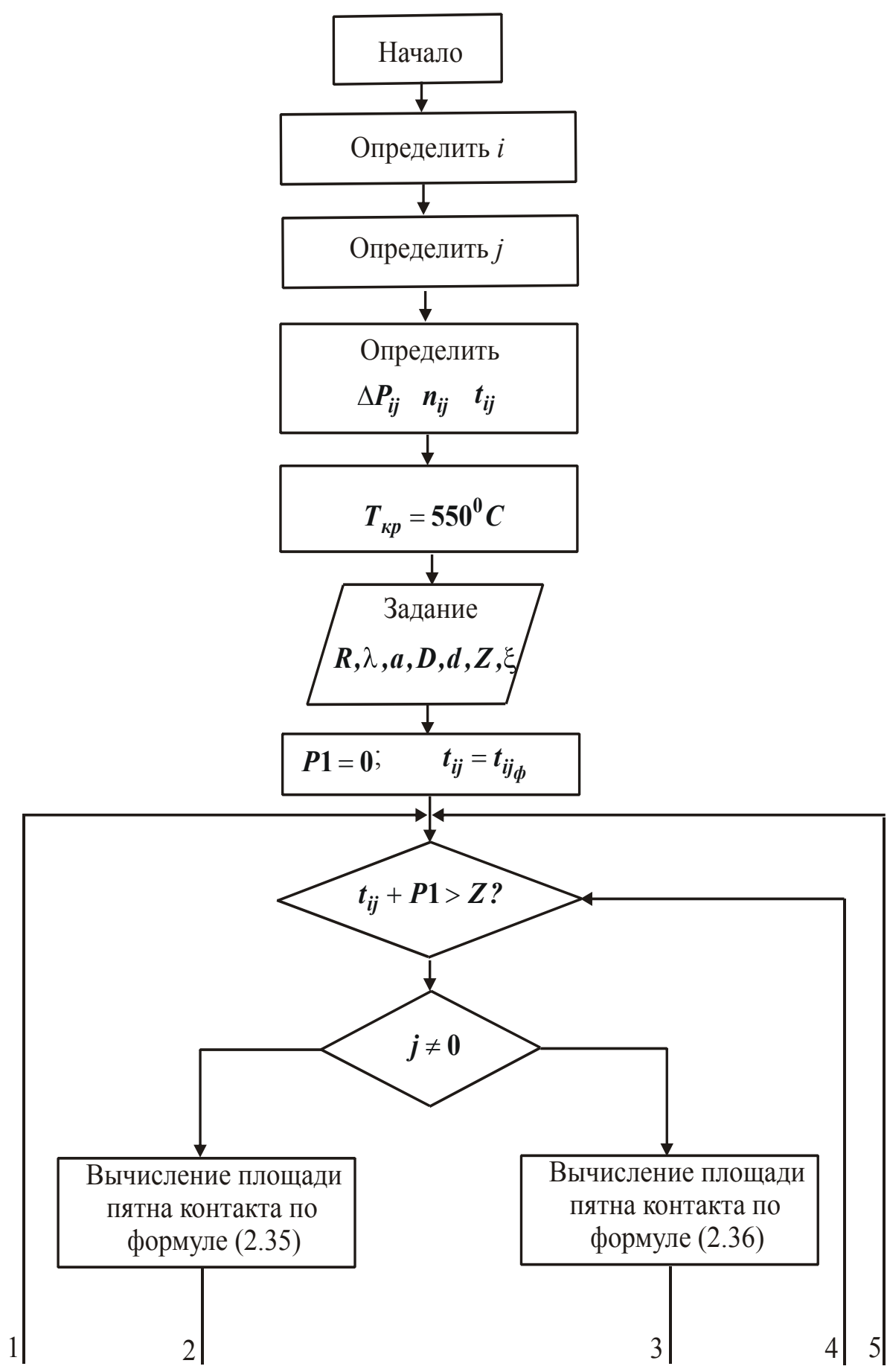
проход:

$$A_{удij} = \frac{P_{ij}}{Q_{ij}}. \quad (2.50)$$

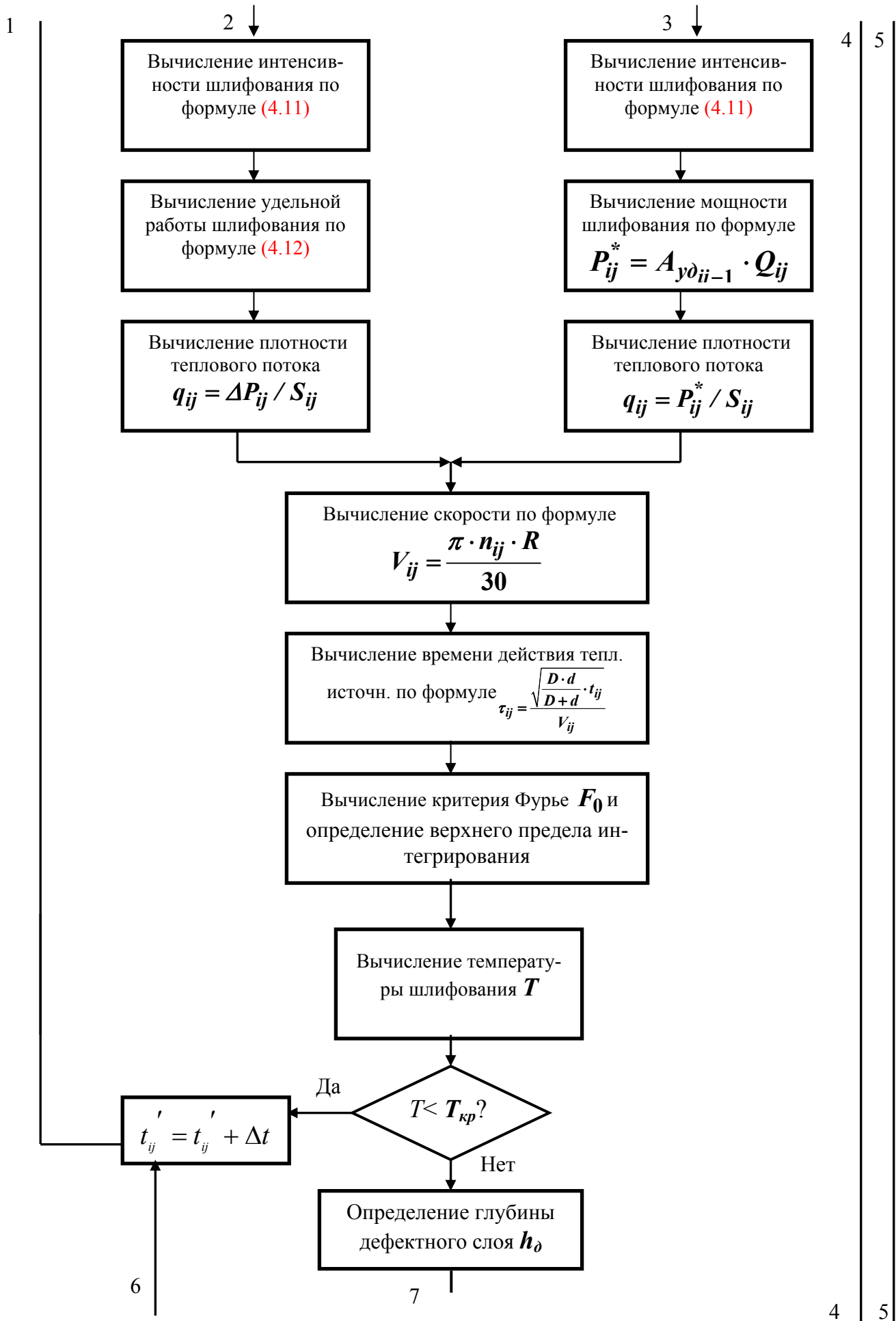
Во время последующего прохода на станке опять определяют интенсивность шлифования и удельную работу, значение которой используется при нахождении следующей глубины и т.д. Глубины резания на проходы определяют исходя из технологического критерия максимальной производительности шлифования, в соответствии с которым глубину резания определяют из условия, что глубина дефектного слоя, образующегося при многопроходном шлифовании, уменьшается от прохода к проходу, но всякий раз остаётся равной величине оставшегося припуска (или части его). Программа расчета распределения припуска на проходы состоит из нескольких программ (их количество равно количеству проходов шлифования). Каждая из этих программ осуществляет расчёт оптимальной глубины резания на текущий проход (во время этого прохода на станке) и расчет рекомендуемой глубины на последующий проход. Здесь важно отметить, что, во-первых, программа расчёта распределения припуска на проходы шлифования работает одновременно с программой сбора технологических данных о процессе и, во-вторых, СКДУ в данном случае работает в *режиме управления* процессом (при осуществлении предыдущих алгоритмов СКДУ работала в *режиме диагностики*). Блок-схема, описывающая алгоритм определения рекомендуемой глубины шлифования, например, на первый проход и требуемой глубины шлифования на второй проход представлена на рис.2.33.

Пятый алгоритм работы СКДУ позволяет рассчитывать распределение припуска на проходы шлифования (созданы программные версии этого алгоритма для резьбошлифования, плоского и круглого шлифования) на этапе подготовки управляющих программ для станка с ЧПУ. Отличительной особенностью алгоритма работы системы является экспериментальное определение точки образования шлифовочного дефекта с фиксацией в этой точке режимных параметров и вычисление в этот момент удельной тепловой энергии, переходящей в заготовку. Удельная тепловая энергия характеризует фактическое состояние технологической системы шлифования с учетом индивидуальных особенностей всех элементов технологической системы (станок, приспособление, инструмент, заготовка).

Блок-схема алгоритма представлена на рис.2.34.



1 | 2 | 3 | 4 | 5



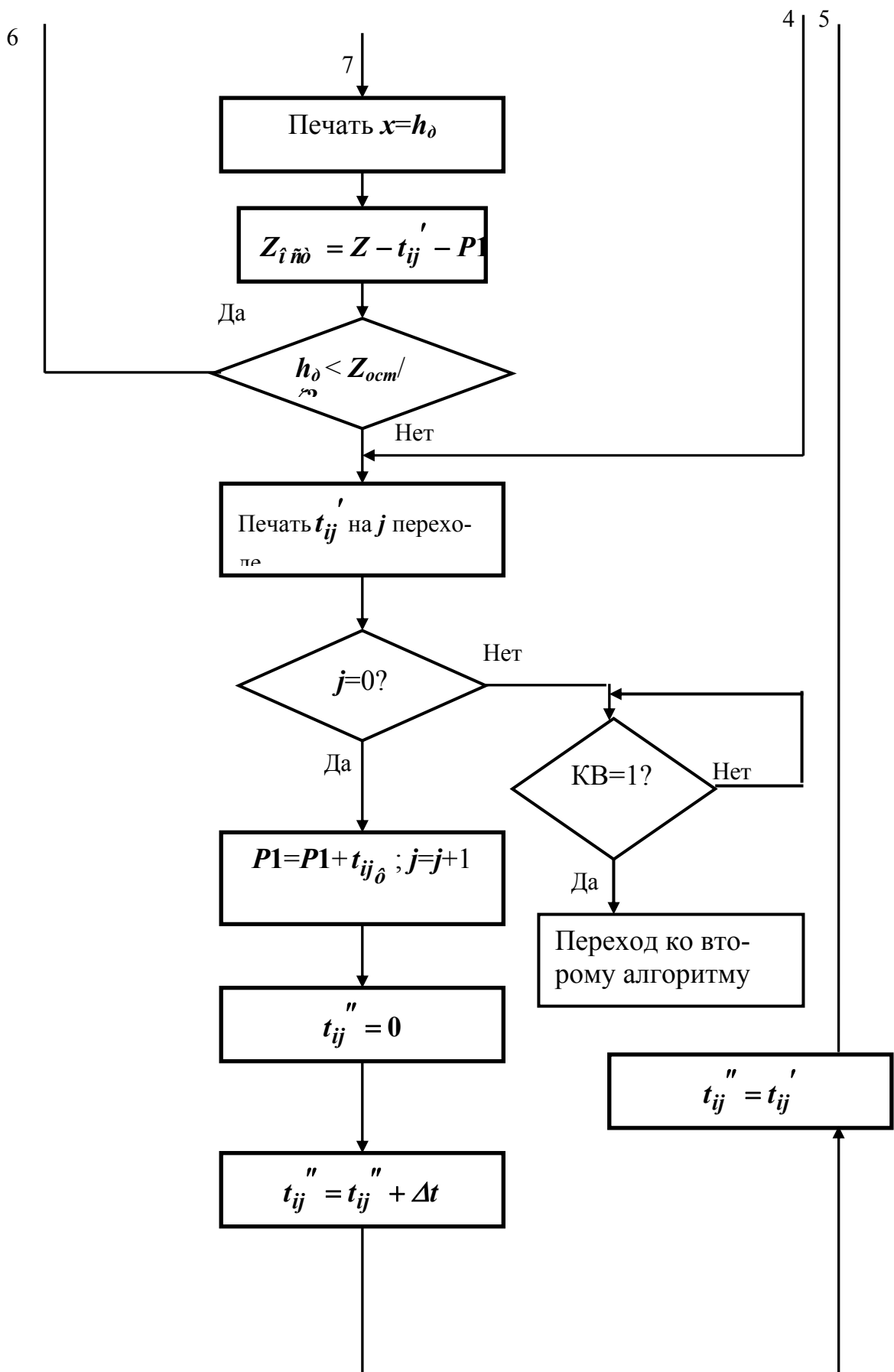
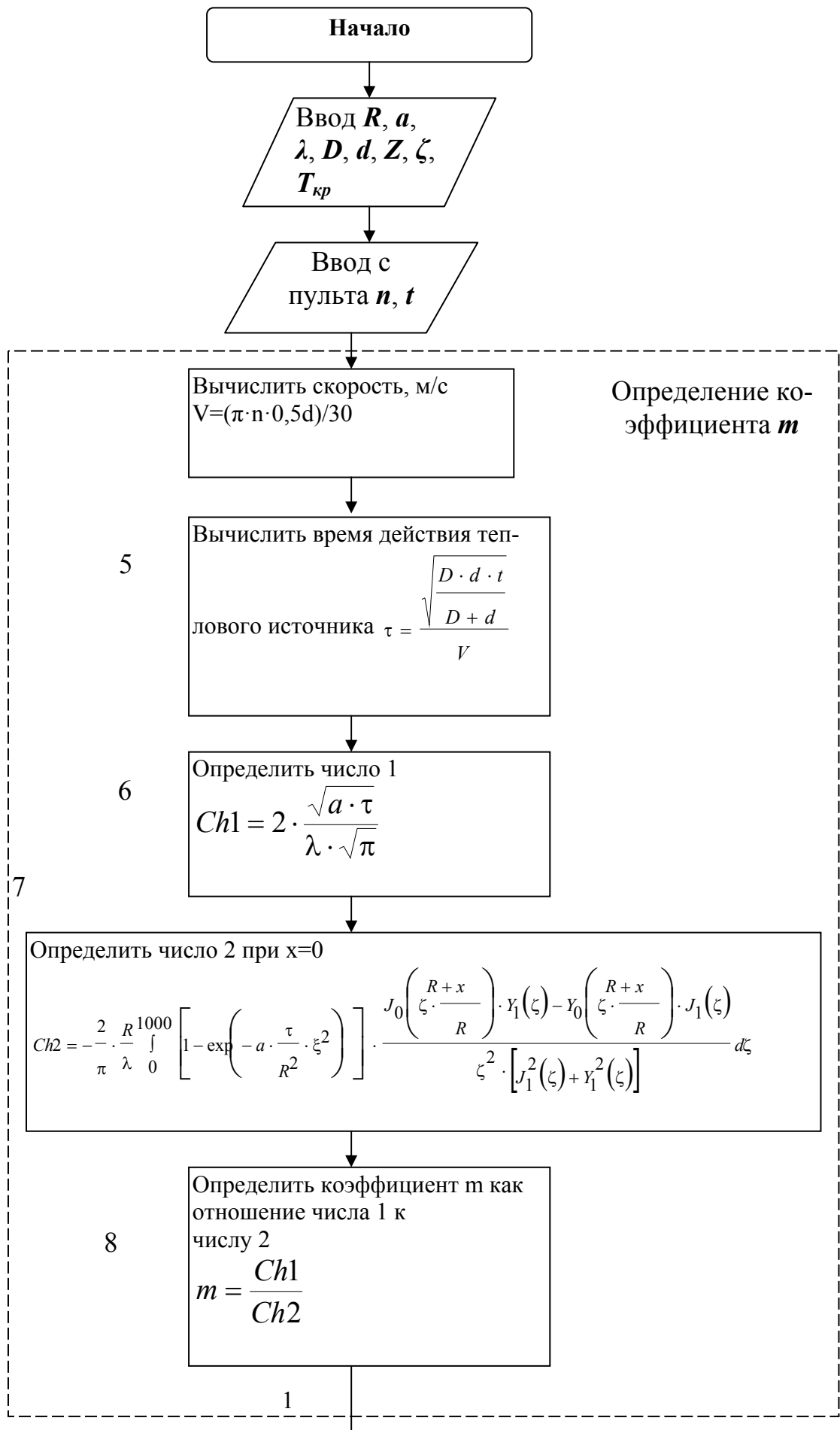
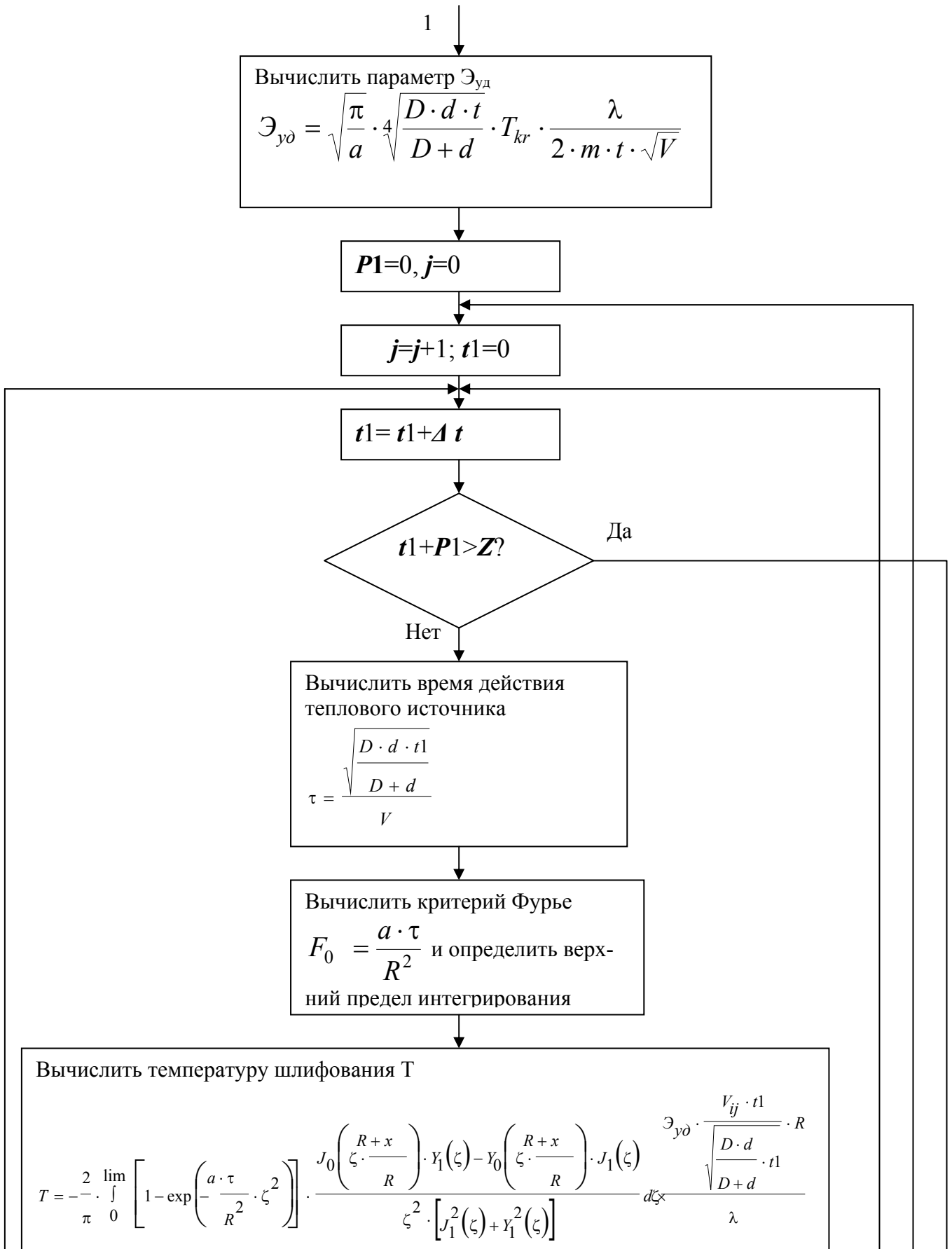


Рис.2.33. Блок-схема алгоритма работы СКДУ в режиме управления.





2

3

4

5

6

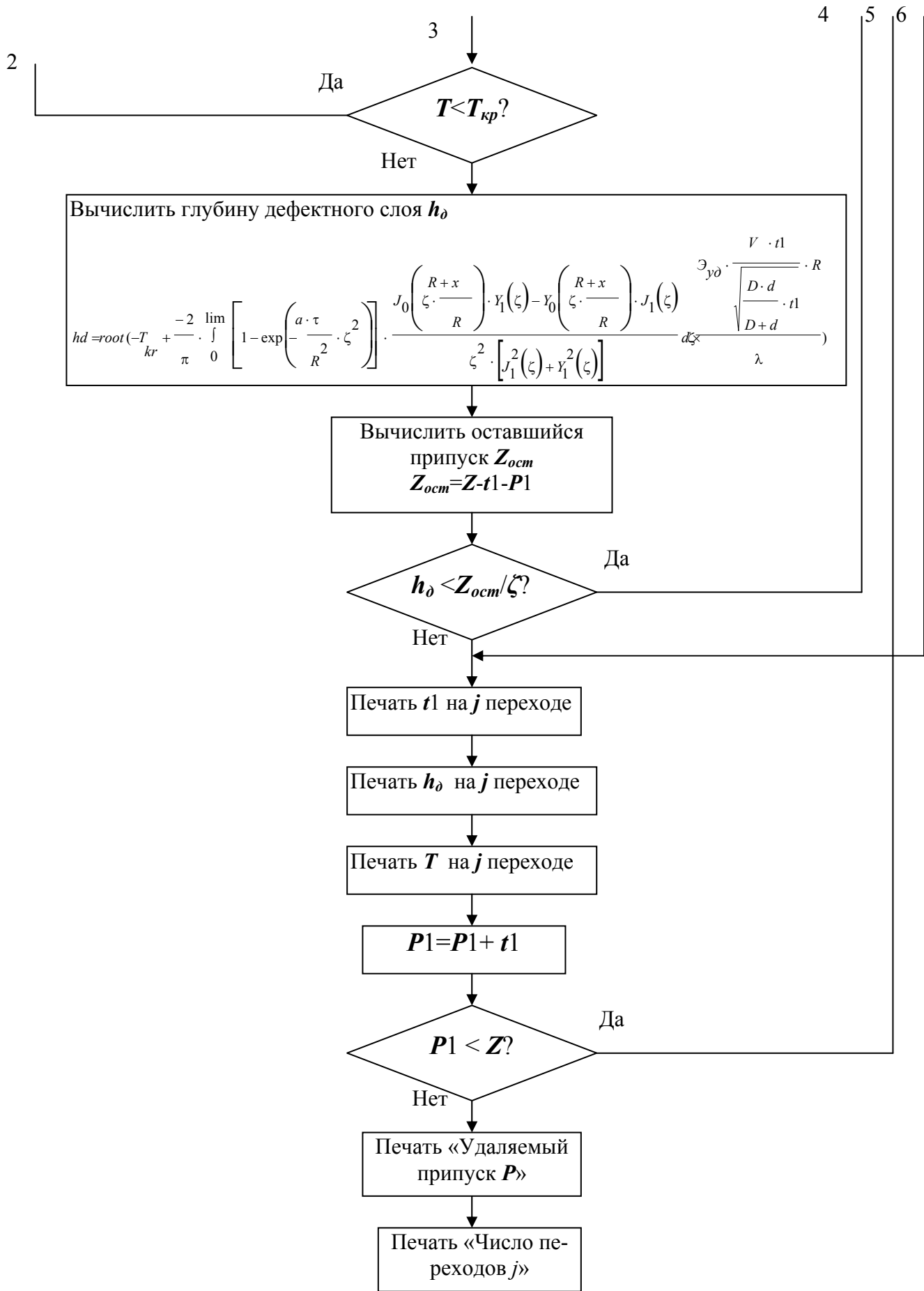


Рис.2.34. Блок-схема алгоритма расчета распределения припуска.

В блоке 2 в качестве исходных данных задают радиус профиля резьбы R (м), коэффициенты тепло- λ (Вт/м⁰С) и температуропроводности a (м²/с), диаметры шлифовального круга D (м) и обрабатываемой детали d (м), общий припуск на обработку Z (м), коэффициент запаса по прижогу ζ , критическую температуру $T_{кр}$ (°С). В блоке 3 с клавиатуры вводят значения скорости n (об/мин), глубины шлифования t (м), предварительно найденные в цикле обучения на станке. В блоках 4-8 вычисляют коэффициент формы m . В блоке 9 вычисляют параметр $\mathcal{E}_{уд}$. В блоке 10 производят операцию присваивания переменным $P1$ (сумма предыдущих глубин резания к моменту определения текущей) и j (число переходов шлифования) нулевому значению. В блоке 11 переменная j увеличивает свое содержимое на 1 и переменной t_1 первоначально присваивают нулевое значение, а блоке 12 переменная t_1 будет изменять свое значение на Δt . В блоке 13 производят операцию сравнения суммы текущей глубины t_1 и суммы глубин $P1$, найденной к данному моменту времени с общим припуском Z . Если условие 13 выполняется, переходим к блоку 21, где осуществляется печать глубины шлифования, при которой произошло выполнение условия 13. Если условие 13 не выполняется, то переходим к блоку 14, где определяют время действия теплового источника τ (с). В блоке 15 вычисляют значение критерия Фурье F_0 и определяют верхний предел интегрирования по табл.2.4

В блоке 16 определяют температуру шлифования T . В блоке 17 сравнивают найденную температуру шлифования T с заданной критической температурой $T_{кр}$. Если условие 17 выполняется, переходят к блоку 12, где увеличивается глубина шлифования. Если условие 17 не выполняется, определяют глубину дефектного слоя h_d . Затем находят оставшийся припуск $Z_{ост}$ (блок 19) и переходят к блоку 20, в котором сравнивают дефектный слой с оставшимся припуском. Если условие 20 выполняется, то переменная t_1 увеличивает свое содержимое на шаг итерации (блок 12) до нарушения условия 20. Тогда в этот момент становится известной глубина шлифования t_1 , при которой дефектный слой равен оставшемуся припуску. Осуществляют печать этой глубины (блок 21), дефектного слоя (блок 22) и температуры шлифования (блок 23). Далее в блоке 24 переменной $P1$ присваивают новое значение – сумма старого значения $P1$ и найденной глубины шлифования. После первого прохождения по блок-схеме $P1$

имеет значение t_1 , при втором ($t_1 + t_2$). В блоке 25 сравнивают переменную $P1$ с общим припуском Z . В случае выполнения условия 25 программа переходит к блоку 26, 27, где печатают значения удаляемого припуска $P1$ и число переходов j , за которое этот припуск был удален.

Например, при следующих исходных данных: $R=0,003$ м; $D=0,374$ м; $d=0,024$ м; $Z=2,311 \cdot 10^{-3}$ м; $a=8,4 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\lambda=42$ ВТ/м⁰С; $n=2$ об/мин; $t=1,2 \cdot 10^{-3}$ м, получены коэффициент $m=0,605$, $\mathcal{E}_{y\delta}=1,397 \cdot 10^{10}$ Дж/м³. Получили следующее распределение припуска на проходы: $t_1=1,66 \cdot 10^{-3}$ м; $t_2=6,6 \cdot 10^{-4}$ м.

При разработке программы приняты следующие обозначения (табл.2.5 и рис.2.35).

Программа расчета распределения припуска написана на языке программирования, встроенного в пакет MathCAD (рис.2.36).

Таблица 2.5

$T_{кр}$	$m(\eta)$	λ	τ	$Z_{осм.}$	$\mathcal{E}_{y\delta}$	h_δ
T_{kr}	mu_n	$Lambda$	tau	Z_{ost}	E_{ud}	h_d

$$\begin{aligned}
 & n := 2 \qquad t := 1.2 \cdot 10^{-3} \qquad \xi := 1 \qquad \text{Lamda} := 42 \qquad D := 374.6 \cdot 10^{-3} \qquad d := 24.148 \cdot 10^{-3} \\
 & \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \text{Tkr} := 550 \\
 & \tau := \sqrt{\frac{D \cdot \frac{d \cdot t}{D + d}}{V}} \\
 & V := \pi \cdot n \cdot \frac{0.5d}{30} \\
 & Ch1 := 2 \cdot \frac{\sqrt{a \cdot \tau}}{\text{Lamda} \cdot \sqrt{\pi}} \\
 & x := 0 \\
 & Ch2 := \frac{-2 \cdot R}{\pi \cdot \text{Lamda}} \cdot \int_0^{1000} \left(1 - \exp\left(-a \cdot \frac{\tau}{R^2} \cdot \zeta^2\right) \right) \cdot \frac{J_0\left(\zeta \cdot \frac{R+x}{R}\right) \cdot Y_1(\zeta) - Y_0\left(\zeta \cdot \frac{R+x}{R}\right) \cdot J_1(\zeta)}{\zeta^2 \cdot (J_1(\zeta) \cdot J_1(\zeta) + Y_1(\zeta) \cdot Y_1(\zeta))} \\
 & mu_n := \frac{Ch2}{Ch1} \qquad Eud := \sqrt{\frac{\pi}{a}} \cdot \sqrt[4]{D \cdot \frac{d}{D+d} \cdot t \cdot \text{Tkr}} \cdot \frac{\text{Lamda}}{2 \cdot mu_n \cdot t \cdot \sqrt{V}} \\
 & dt := 10^{-5}
 \end{aligned}$$

Рис. 2.35. Фрагмент файла с принятыми обозначениями.

```

Out := t1 ← 0
      P1 ← 0
      j ← 0
      hd ← 0
      T ← 0
      tau ← 0
      while 1
        hd ← 0
        t1 ← t1 + dt
        if (P1 + t1) > Z
          Out0,j ← t1
          Out1,j ← hd
          Out2,j ← T
          Out3,j ← P1 + t1
          Out4,j ← j + 1
          return Out
        tau ←  $\sqrt{\frac{D \cdot d \cdot t1}{D + d}}$ 
        F0 ←  $a \cdot \frac{\text{tau}}{R^2}$ 
        lim ← linterp(VX, VY, F0)
        x ← 0
        T ←  $\frac{-2}{\pi} \cdot \int_0^{\text{lim}} \left( 1 - \exp\left(-a \cdot \frac{\text{tau}}{R^2} \cdot \zeta^2\right) \right) \cdot \frac{J0\left(\zeta \cdot \frac{R+x}{R}\right) \cdot Y1(\zeta) - Y0\left(\zeta \cdot \frac{R+x}{R}\right) \cdot J1(\zeta)}{\zeta^2 \cdot (J1(\zeta) \cdot J1(\zeta) + Y1(\zeta) \cdot Y1(\zeta))} d\zeta \cdot R \cdot \frac{\text{Eud} \cdot V \cdot t1}{\text{Lamda} \cdot \sqrt{D \cdot \frac{d \cdot t1}{D + d}}}$ 
        continue if T < Tkr
        hd ← wurzel  $\left[ -\text{Tkr} + \frac{-2}{\pi} \cdot \int_0^{\text{lim}} \left( 1 - \exp\left(-a \cdot \frac{\text{tau}}{R^2} \cdot \zeta^2\right) \right) \cdot \frac{J0\left(\zeta \cdot \frac{R+x}{R}\right) \cdot Y1(\zeta) - Y0\left(\zeta \cdot \frac{R+x}{R}\right) \cdot J1(\zeta)}{\zeta^2 \cdot (J1(\zeta) \cdot J1(\zeta) + Y1(\zeta) \cdot Y1(\zeta))} d\zeta \cdot R \cdot \frac{\text{Eud} \cdot V \cdot t1}{\text{Lamda} \cdot \sqrt{D \cdot \frac{d \cdot t1}{D + d}}} \right], x$ 
        Zost ← Z - t1 - P1
        continue if hd <  $\frac{Zost}{\xi}$ 
        Out0,j ← t1
        Out2,j ← T
        Out1,j ← hd
        P1 ← P1 + t1
        if P1 < Z
          t1 ← 0
          j ← j + 1
        otherwise
          Out3,j ← P1
          Out4,j ← j + 1
          return Out
        continue
      return Out
    Out3,j ← P1
    Out4,j ← j
  Out

```

$$\text{Out} = \begin{pmatrix} 1.64 \times 10^{-3} & 6.8 \times 10^{-} \\ 6.797 \times 10^{-4} & 0 \\ 677.282 & 371.891 \\ 0 & 2.32 \times 10^{-} \\ 0 & 2 \end{pmatrix}$$

$j := \text{Out}_{4,1} \quad j = 2$
 $P := \text{Out}_{3,1} \quad P = 2.32 \times 10^{-3}$

Рис.2.36. Текст программы в пакете MathCAD.

Расчет распределения припуска на переходы шлифования можно выполнить в интерфейсе системы сбора данных. Нажав на кнопку 1 (рис.2.37), открывается окно *Алгоритм 1*, где вводятся входные данные в программу MathCAD. Для выполнения расчета необходимо нажать кнопку 2 (*Выполнить алгоритм*).

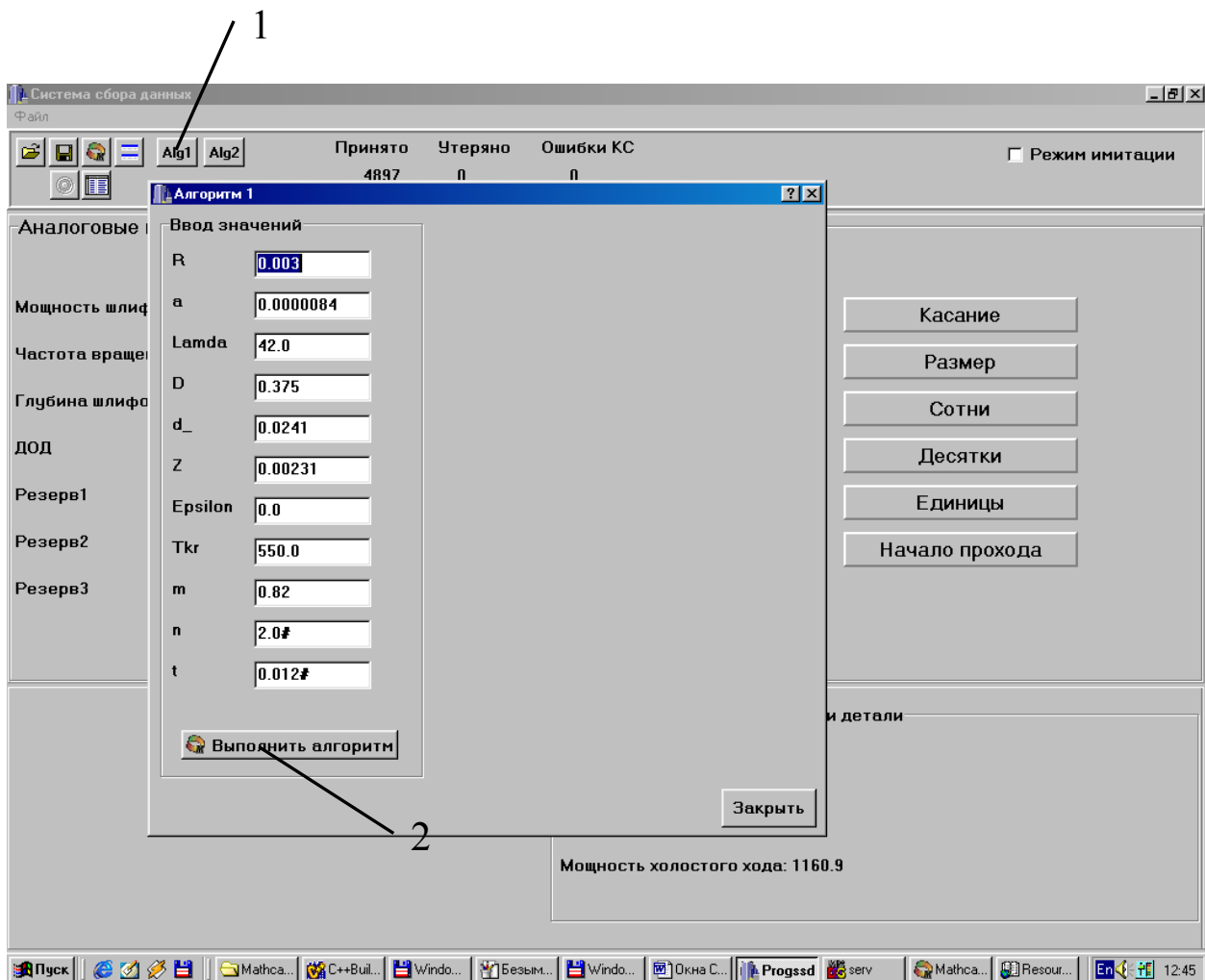


Рис.2.37. Окно системы сбора данных при выполнении алгоритма.

После выполнения программы, в окне *Алгоритм 1* появляются результаты выполнения программы (рис.2.38).

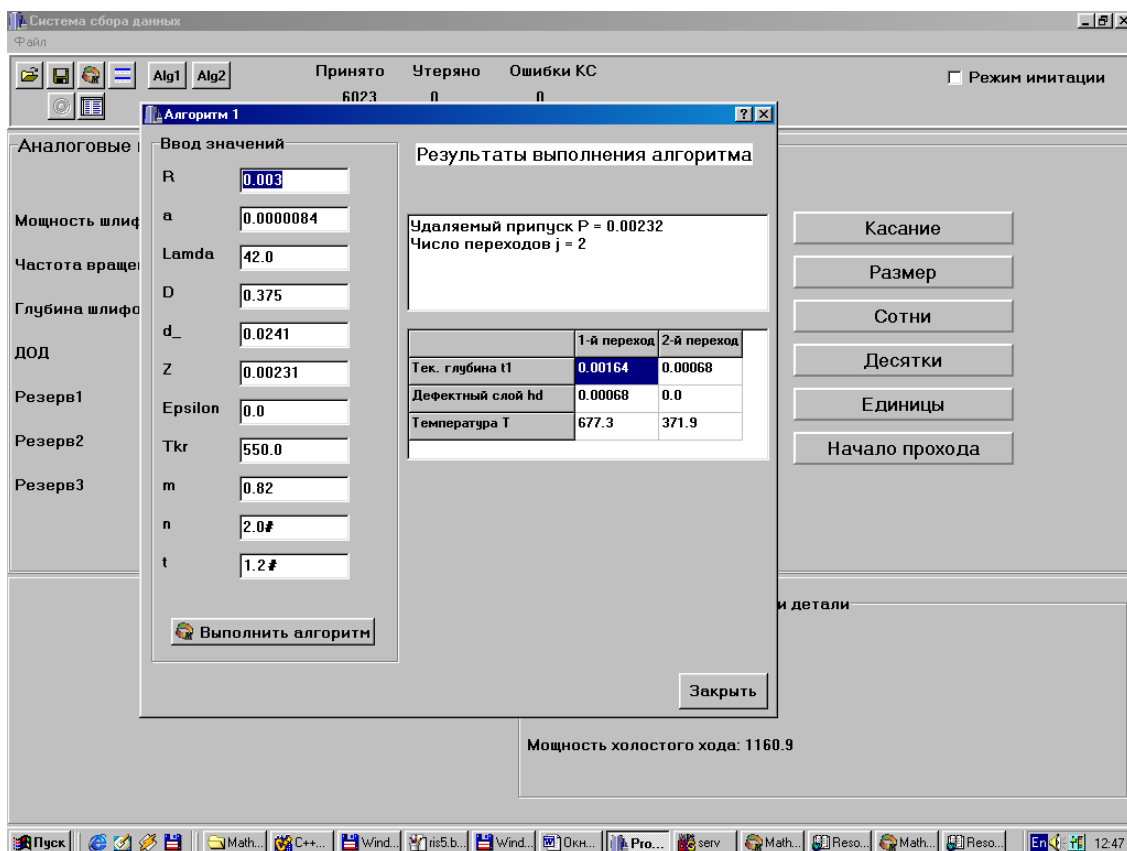


Рис.2.38. Окно системы сбора данных с результатами выполнения алгоритма.

2.4. ПРОГРАММИРОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ И МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ

Программирование включает три этапа: программирование микроконтроллера ATMEGA8; установка «драйвера» ССД; проверка работоспособного состояния ССД на имитаторе (проверка результатов программирования).

1.1. Программирование микроконтроллера ATMEGA8.

- Установить программу Code Vision CVavr1-24-0-crack.zip, в которой имеется программа - «программатор» (chip - «programmer»).
- В меню Tools - chip - «programmer» - chip (выпадающее меню) - ATMEGA8.
- Вставить устройство программатора (шинный формирователь на микросхеме SN74НС245N, 8 резисторов, светодиод, подключенные к шине LPT компьютера ленточным 8-проводным кабелем) в разъем для программирования X1.

- В меню Read - Chip signature должно появиться окно с описанием кристалла как признак того, что контроллер (ATMEGA8) готов к программированию (т.е. идентифицирован).
- Меню Program - Erase Chip. Стирает предыдущую программу контроллера.
- Меню File - Load Flash. В появившемся окне выбрать halt1.hex или halt1.bin и нажать кнопку *Открыть*.
- Меню Program - Flash. Осуществляется программирование контроллера. Если эта операция проведена корректно, то не появится сообщение.
- Отсоединить устройство программатора от разъема для программирования X1 (на плате с микроконтроллером ATMEGA8).
- Снять питание на контроллере (разорвать цепь блока питания +5В), чтобы контроллер вышел из режима программирования.

Произвести настройку ПК для возможности работы в программе «драйвер ССД» (папка Ssd). Для этого зайти в *Мой компьютер* → *Панель управления* → *Язык и стандарты* → *Закладка Числа* и поставить точку как разделитель целой и дробной частей числа.

1.2. Установка программы-«драйвер ССД» (Ssd).

- Скопировать папку Ssd на жесткий диск ПК.
- Включить интерфейсный кабель в COM порт компьютера (COM1) – разъем db9 на принципиальной схеме (8 штырьков).

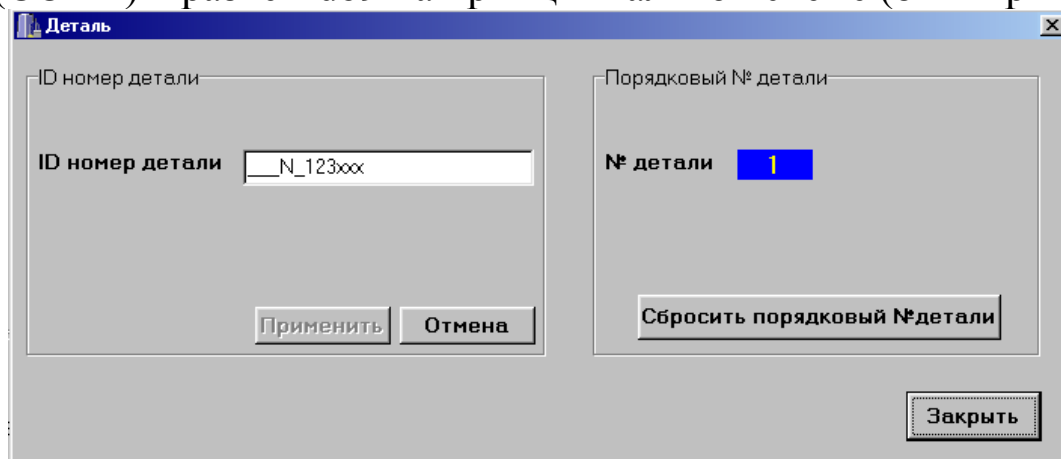


Рис.2.39. Вид окна в ССД для задания номера детали.

- Запустить программу progSSD.exe (щелкнуть на нее). Появится окно для задания идентификационного номера детали. В случае отсутствия ввода номера детали, ей присваивается порядковый номер (рис.2.39). При отключении ССД в памяти сохраняется номер последней детали, которая была обработана с ССД.

1.3. Проверка работоспособного состояния ССД.

Например, запишем рабочую базу данных (БД) на операции резьбошлифования двух заготовок ходовых винтов. На первой заготовке припуск удаляется за два прохода, на второй - за три прохода.

1. Для имитации обработки первой заготовки установить уровни мощности P (1574,41 Вт), скорости заготовки n (3,06 об/мин), глубины шлифования t (0,95 мм). Каждые 100 мс (5 раз за 0,5 с) осуществляется сканирование сигналов, т.е. фиксируется результат усреднения по 5 точкам, например,
$$P_i = \frac{P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5}{5}.$$

Для появления сигнала БФР (зеленый индикатор клавиши БФР) необходимо увеличить уровень мощности. Индикатор БФР появляется после установки уровня мощности P (рис.2.40).

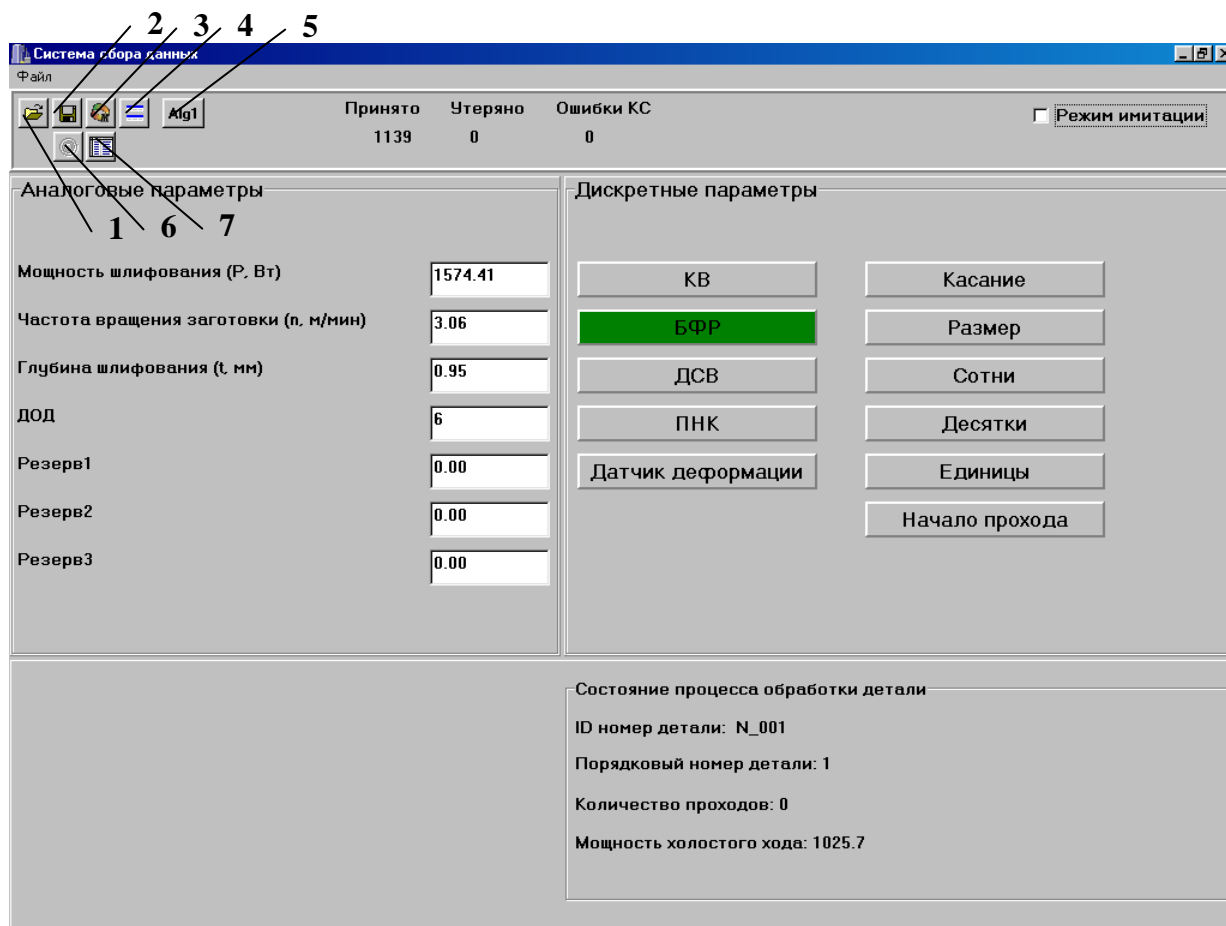


Рис.2.40. Вид окна в ССД для задания входных сигналов мощности, скорости детали и глубины шлифования.

2. После появления сигнала БФР=1 тумблером, имитирующим датчик оборотов детали (ДОД) отсчитывается число оборотов, равное, например, пяти. В этот момент осуществляется запись значений P , n и t в рабочую БД. При этом горит индикатор записи (рис. 2.41).

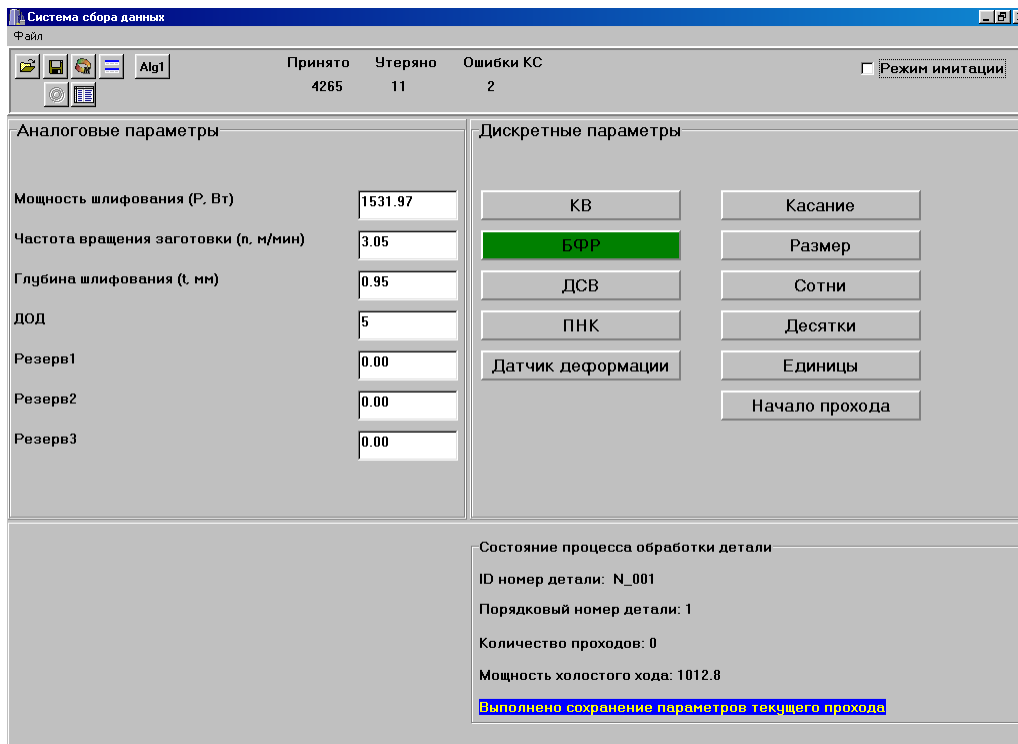


Рис.2.41. Вид окна в ССД в момент сохранения сигналов мощности, скорости детали и глубины шлифования в рабочую базу данных.

3. Уменьшить уровень мощности (поворотом ручки потенциометра). Через 1 с после этого должен потухнуть индикатор БФР.
4. Нажать тумблер, имитирующим сигнал КВ (зеленый индикатор клавиши КВ).

Для имитации второго прохода первой заготовки повторяют пункты 1-4. Их повторяют столько раз, сколько проходов обработки заготовки. В данном случае два раза.

5. Нажать клавишу ДСВ для имитации снятия первой заготовки со станка.

Для имитации обработки второй заготовки повторяются п.1-5.

Для просмотра рабочей БД необходимо нажать кнопку 1 на панели инструментов (рис. 2.42). Сформированная рабочая БД показана на рис. 2.42, из которого видно, что каждая обработанная деталь характеризуется идентификационным номером, порядковым номером, датой и временем обработки, числом проходов, мощностью, скоростью детали и глубиной резания.

Для генерации (переноса информации в стандартную табличную форму) сформированных рабочей БД и теневой БД в текстовый файл на панели инструментов (рис. 2.42 и рис. 2.43) имеется кнопка 1. Для просмотра сохраненных баз данных в папке Ssd выбрать папку с базой данных за интересующий интервал времени (рис. 2.44).

Время работы ССД, с	ID номер детали	Порядковый № детали	Дата+время	Число проходов	Р, Вт	л, м/мин	t, мм	ДОД
95	N_001	1	26.07.05 20:28:09	1	537.90	3.03	0.95	5
213	N_001	1	26.07.05 20:30:07	2	597.12	3.06	0.75	5
366	N_002	2	26.07.05 20:32:40	1	525.07	3.03	0.91	5
427	N_002	2	26.07.05 20:33:41	2	545.80	2.75	0.73	5
505	N_002	2	26.07.05 20:34:59	3	568.50	2.73	0.59	5

Рис.2.42. Вид окна в ССД рабочей БД.

Время записи БД, с	ID номер детали	Порядковый № детали	Дата+время	Р, Вт	л, м/мин	t, мм	ДОД
0.5	N_002	2	26.07.05 20:38:44	978.28	2.80	0.59	0
1.0	N_002	2	26.07.05 20:38:44	986.17	2.80	0.59	0
1.5	N_002	2	26.07.05 20:38:44	967.42	2.77	0.59	0
2.0	N_002	2	26.07.05 20:38:44	968.41	2.77	0.59	0
2.5	N_002	2	26.07.05 20:38:44	975.32	2.80	0.59	0
3.0	N_002	2	26.07.05 20:38:44	979.26	2.78	0.59	0
3.5	N_002	2	26.07.05 20:38:44	980.25	2.79	0.59	0
4.0	N_002	2	26.07.05 20:38:44	973.34	2.77	0.59	0
4.5	N_002	2	26.07.05 20:38:44	972.35	2.78	0.59	0
5.0	N_002	2	26.07.05 20:38:44	970.38	2.77	0.59	0
5.5	N_002	2	26.07.05 20:38:49	983.21	2.80	0.59	0
6.0	N_002	2	26.07.05 20:38:49	977.29	2.79	0.59	0
6.5	N_002	2	26.07.05 20:38:49	974.33	2.78	0.59	0
7.0	N_002	2	26.07.05 20:38:49	980.25	2.78	0.59	0
7.5	N_002	2	26.07.05 20:38:49	971.37	2.78	0.59	0

Рис.2.43. Вид окна в ССД теневой БД.

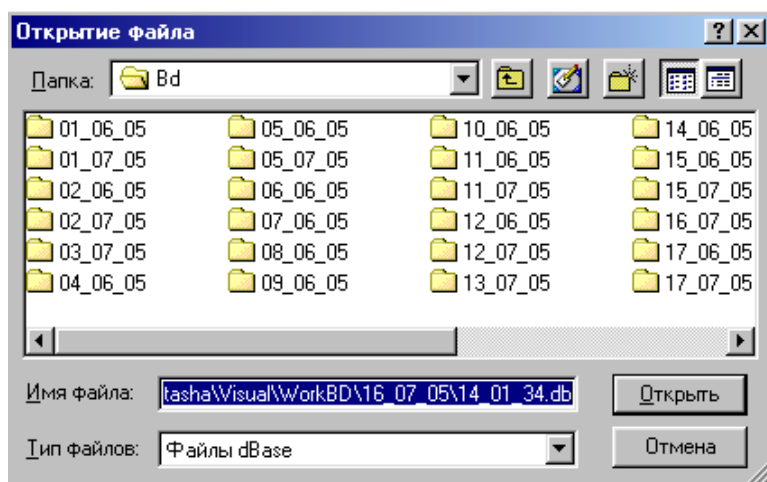


Рис.2.44. Вид окна при выборе папки с БД.

ГЛАВА 3

СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ (САПР) ДЛЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

3.1. ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ САПР ДЛЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

3.1.1. ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИИ И ПРОЕКТНЫЕ ПРОЦЕДУРЫ, РЕАЛИЗУЕМЫЕ В САПР

В состав развитых машиностроительных САПР входят в качестве составляющих системы CAD, CAM и CAE.

Функции CAD - систем в машиностроении подразделяют на функции двумерного и трехмерного проектирования. К функциям 2D относят черчение, оформление конструкторской документации; к функциям 3D – получение трехмерных геометрических моделей, метрические расчеты, реалистичную визуализацию, взаимное преобразование 2D и 3D - моделей. В ряде систем предусмотрено также выполнение процедур, называемых процедурами позиционирования, к ним относят компоновку и размещение оборудования, проведение соединительных трасс.

Среди CAD - систем различают системы нижнего, среднего и верхнего уровней. Первые из них иногда называют «легкими» системами, они ориентированы преимущественно на 2D - графику, сравнительно дешевы, основной аппаратной платформой для их использования являются персональные ЭВМ. Системы верхнего уровня, называемые также «тяжелыми», дороги, более универсальны, ориентированы на геометрическое твердотельное и поверхностное 3D-моделирование, оформление чертежной документации в них обычно осуществляется с помощью предварительной разработки трехмерных геометрических моделей. Системы среднего уровня по своим возможностям занимают промежуточное положение между «легкими» и «тяжелыми» системами.

К важным характеристикам CAD – систем относятся параметризация и ассоциативность. Параметризация подразумевает использование геометрических моделей в параметрической форме, т. е. при представлении части или всех параметров объекта не константами, а переменными. Параметрическая модель, находящаяся в базе данных, легко адаптируется к разным конкретным реализациям и потому может использоваться во многих конкретных проектах. При этом появ-

ляется возможность включения параметрической модели детали в модель сборочного узла с автоматическим определением размеров детали, диктуемых пространственными ограничениями. Эти ограничения в виде математических зависимостей между частью параметров сборки отражают ассоциативность моделей.

Параметризация и ассоциативность играют важную роль при проектировании конструкций узлов и блоков, состоящих из большого числа деталей. Действительно, изменение размеров одних деталей оказывает влияние на размеры и расположение других. Благодаря параметризации и ассоциативности изменения, сделанные конструктором в одной части сборки, автоматически переносятся в другие части, вызывая изменения соответствующих геометрических параметров в этих частях.

Основные функции САМ – систем: разработка технологических процессов, синтез управляющих программ для технологического оборудования с ЧПУ, моделирование процессов обработки, в том числе построение траекторий относительного движения инструмента и заготовки в процессе обработки, генерация постпроцессоров для конкретных типов оборудования с ЧПУ, расчет норм времени обработки.

Функции САЕ – систем довольно разнообразны, так как связаны с проектными процедурами анализа, моделирования, оптимизации проектных решений. В состав машиностроительных САЕ – систем прежде всего включают программы для выполнения следующих процедур:

- моделирование полей физических величин, в том числе анализ прочности, который чаще всего выполняется в соответствии с МКЭ;
- расчет состояний моделируемых объектов и переходных процессов в них средствами макроуровня;
- имитационное моделирование сложных производственных систем на основе моделей массового обслуживания и сетей Петри.

Основными частями программ анализа с помощью МКЭ являются библиотеки конечных элементов, препроцессор, решатель и постпроцессор.

Библиотеки конечных элементов содержат их модели – матрицы жесткости. Очевидно, что модели конечных элементов будут различными для разных задач (анализ упругих или пластических деформаций, моделирование полей температур, электрических потенциалов и т. п.), разных форм конечных элементов (например, в двумерном

случае – треугольные или четырехугольные элементы), разных наборов координатных функций.

Исходные данные для препроцессора – геометрическая модель объекта, чаще всего получаемая из подсистемы конструирования. Основная функция препроцессора – представление исследуемой среды (детали) в сеточном виде, т. е. в виде множества конечных элементов.

Решатель – программа, которая ассемблирует (собирает) модели отдельных конечных элементов в общую систему алгебраических уравнений и решает эту систему одним из методов разреженных матриц.

Постпроцессор служит для визуализации результатов решения в удобной для пользователя форме. В машиностроительных САПР это графическая форма. Пользователь может видеть исходную (до нагружения) и деформированную формы детали, поля напряжений, температур, потенциалов и т. п. в виде цветных изображений, в которых палитра цветов или интенсивность свечения характеризуют значения фазовой переменной.

Программно-методические комплексы одного уровня по своим функциональным возможностям приблизительно равноценны, новые достижения, появившиеся в одном из ПМК, в скором времени реализуются в новых версиях других комплексов. Поэтому для первого знакомства с возможностями ПО машиностроительных САПР достаточно рассмотреть характеристики одного из комплексов. Рассмотрим структуру ПО САПР и его функциональные возможности на примере комплекса программ Pro/Engineer.

Комплекс насчитывает несколько десятков программ (модулей), которые подразделены на группы программ конструкторского проектирования механических объектов, промышленного дизайна, функционального моделирования, технологического проектирования, обмена данными.

Базовые модули конструкторского проектирования предназначены для твердотельного и поверхностного моделирования, синтеза конструкций из базовых элементов формы, поддержки параметризации и ассоциативности, проекционного черчения и разработки чертежей с простановкой размеров и допусков.

Пользователь может пополнять библиотеку БЭФ оригинальными моделями. Синтез трехмерных моделей сложной формы возможен вытягиванием плоского контура по нормали к его плоскости, его про-

тягиванием вдоль произвольной пространственной кривой, вращением контура вокруг заданной оси, натягиванием между несколькими заданными сечениями. Синтез сборок выполняется вызовом или ссылкой на библиотечные элементы, их модификацией, разработкой новых деталей. Детали сборки можно нужным образом ориентировать в пространстве. Далее следует ввести ассоциативные (сопрягающие) связи.

Дополнительные модули конструкторского проектирования имеют более конкретную, но узкую специализацию. Примерами таких модулей могут служить модули конструирования панелей из композиционных материалов, разработки штампов и литейных прессформ, трубопроводных систем, сварных конструкций, разводки электрических кабелей и жгутов.

Модули функционального моделирования используют как препроцессоры и постпроцессоры в программах конечно-элементного анализа (нанесение сетки конечных элементов, визуализация результатов анализа), для анализа теплового состояния конструкций, оценки виброустойчивости и др.

Основные модули технологического проектирования служат для моделирования технологических процессов фрезерной, токарной, электроэрозионной обработки и для разработки постпроцессоров для систем управления оборудованием с ЧПУ.

Модули обмена данными (конверторы форматов данных) должны обеспечивать возможности импорта и экспорта данных в другие САЕ/CAD/CAM-системы.

В САПР крупных предприятий обычно используют программы разных уровней. Связано это с тем, что более 80 % всех процедур конструирования можно выполнить на CAD - системах нижнего и среднего уровней, кроме того, «тяжелые» системы дороги. Поэтому предприятие приобретает лишь ограниченное число экземпляров (лицензий) программы верхнего уровня, а большинство клиентских рабочих мест обеспечивается экземплярами программ нижнего или среднего уровней.

При этом возникает проблема обмена информацией между разнотипными CAD – системами. Она решается путем использования языков и форматов, принятых в CALS-технологиях, хотя для неискаженной передачи геометрических данных с помощью промежуточных унифицированных языков приходится преодолевать определенные трудности.

3.2. ПРИМЕРЫ ПРОГРАММ САПР

К числу мировых лидеров в области CAD/CAM/CAE – систем верхнего уровня относятся системы Unigraphics (компания EDS), САПА (Dessault Systemes), Pro/Engineer (PTC). Продолжают использоваться также системы I-DEAS (EDS), CADD5 (PTC) и EUCLID3 (Matra Datavision).

Система Unigraphics – универсальная система геометрического моделирования и конструкторско-технологического проектирования, в том числе разработки больших сборок, прочностных расчетов и подготовки конструкторской документации. Система многомодульная. В конструкторской части (подсистема САД) имеются средства для твердотельного конструирования, геометрического моделирования на основе сплайновых моделей поверхностей, создания чертежей по 3D-модели, проектирования сборок (в том числе с сотнями и тысячами компонентов) с учетом ассоциативности, анализа допусков и др. В технологической части (подсистема САМ) предусмотрены разработка управляющих программ для токарной и электроэрозионной обработки, синтез и анализ траекторий инструмента при фрезерной трех – и пяти координатной обработке, при проектировании прессформ, штампов и др. Для инженерного анализа (подсистема САЕ) в систему включены модули прочностного анализа с использованием МКЭ с соответствующими пре- и постпроцессорами, кинематического и динамического анализа механизмов с определением сил, скоростей и ускорений, анализа литейных процессов пластических масс.

Другая система верхнего уровня САПР позволяет заказчику генерировать собственный вариант САПР сквозного проектирования – от создания концепции изделия до технологической поддержки производства и планирования производственных ресурсов. В системе реализовано поверхностное и твердотельное 3D – моделирование и оптимизация характеристик изделий. Возможны фотореалистическая визуализация, восстановление математической модели из материального макета. Система масштабируема. Предлагаются типовые конфигурации, в том числе варианты для полнофункционального сквозного проектирования сложных изделий и проектирования комплектующих на небольших и средних предприятиях.

Аналогичные возможности реализованы и в других «тяжелых» САПР.

Значительно дешевле обходится приобретение САПР среднего

уровня. На Украине получили распространение системы компаний Autodesk, Solid Works Corporation, Beantly, Топ Системы, Аскон, Интермех, Вее-Pitron и некоторых других. Все эти системы ориентированы в первую очередь на платформу Wintel, как правило, имеют подсистемы конструкторско-чертежную 2D, твердотельного 3D – моделирования, технологического проектирования, управления проектными данными, ряд подсистем инженерного анализа и расчета отдельных видов машиностроительных изделий, а также библиотеки типовых конструктивных решений.

Широкое распространение в Украине и за рубежом получило ПО машиностроительных САПР компании Autodesk.

Линия современных программных систем конструкторского проектирования фирмы Autodesk включает ряд систем, среди которых наиболее развитыми следует считать системы AutoCAD Mechanical Desktop и Inventor.

Система Mechanical Desktop (МДТ) предназначена для параметрического 3D – моделирования, ассоциативного конструирования, распределенного проектирования в сети Internet, оформления 2D-документации. Построена на графическом ядре ACIS. Имеется управляющая программа САД – менеджер со средствами настройки, конфигурирования и управления рабочими группами.

Система Inventor предназначена для твердотельного параметрического проектирования, ориентирована на разработку больших сборок с сотнями и тысячами деталей, имеет развитую библиотеку стандартных элементов. В основе системы также лежит графическое ядро ACIS. Построение 3D – моделей возможно выдавливанием, вращением, по сечениям, по траекториям. Из 3D – модели можно получить 2D – чертежи и спецификации материалов. Поддерживается коллективная работа над проектом, в том числе в пределах одной и той же сборки. Предусмотрена автоматическая проверка кинематики, размеров детали с учетом положения соседних деталей в сборке. Значительные удобства работы конструкторов обусловлены тем, что ассоциативные связи задаются не путем описания операций с параметрами и уравнений, а непосредственно определением формы и положения компонентов.

Реальность 3D моделирования заключается в том, что полный отказ от 2D данных невозможен. Передовая САПР Autodesk Inventor Series 10 обеспечивает выполнение всех этапов проектирования деталей и изделий в единой среде разработки, набор функций которой за-

висит от выполняемого этапа.

Основные преимущества.

Программный комплекс Autodesk Inventor Series 10 занимает одно из первых мест по использованию в промышленности, поскольку содержит все необходимые для выполнения проектов инструменты. Autodesk Inventor Series позволяет разрабатывать серии изделий. Комплекс включает в себя:

- Autodesk Inventor 10 для 2D и 3D моделирования и подготовки технической документации;
- AutoCAD Mechanical 2006, являющийся приложением AutoCAD 2006 и предназначенный для создания 2D машиностроительных чертежей и детализованных чертежей. Эта программа позволяет использовать файлы в формате DWG;
- Autodesk Vault 2006 – программу централизованного управления данными проекта.

В Autodesk Inventor Series 10 эти приложения объединены в один программный комплекс, обеспечивающий надежный переход от двумерного моделирования к трехмерному. Теперь можно постепенно разрабатывать трехмерные модели, одновременно поддерживая существующие проекты. Поддерживается работа с файлами в формате DWG. Удобный пользовательский интерфейс позволяет:

- разрабатывать серии изделий;
- создавать качественные изделия, производя минимум исправлений;
- создавать проекты с минимальными затратами времени;
- быстро переходить к готовым чертежам;
- управлять и обмениваться проектной информацией;
- быстро освоить программу.

Построение эскизов и наложение зависимостей является первым этапом проектирования. Эта технология известна давно. В новой версии программы упор сделан на работу с деталями, основанными на механической взаимосвязи, а не на геометрических описаниях. Функции выполнения расчетов, генераторы компонентов, задание правил проектирования позволяют автоматизировать создание деталей и изделий на основе реальных параметров: скорости, мощности, свойств материала. Функции выполнения расчетов позволяют снизить затраты времени и повысить эффективность проектирования. Большое число функций позволяют производить вычисления по математическим формулам и физическим методикам. Эти функции используют-

ся как при проектировании, так и при проверке моделей изделий. Программа позволяет быстро проектировать, анализировать и создавать компоненты машин и механизмов на основе функциональных требований и спецификаций. При проектировании деталей и изделий можно задавать такие параметры, как мощность, скорость, вращающий момент, свойства материала, рабочие температуры и условия смазки. Вы можете создавать и обновлять по мере надобности спецификацию изделий, сокращая вероятность ошибок при их изготовлении. Сведения о деталях и сборочных узлах мгновенно обновляются и помещаются в спецификацию. Расстановка номеров позиций производится автоматически. Большой набор параметров позволяет изменить вид спецификации для соответствия стандартам предприятия.

Autodesk Inventor Series 10 поддерживает операции импорта и экспорта файлов в форматах, используемых в машиностроительном проектировании. Это обеспечивает возможность совместной работы с пользователями других САПР и систем автоматизированного управления производством. Поддерживается импорт файлов в следующих форматах: DWG, DXF™, ProE®, SAT, IGES и STEP. Экспорт файлов деталей и изделий производится в форматах SAT, IGES, STEP и STL. При экспорте доступна служба Autodesk® Buzzsaw®. Файлы рисунков можно экспортировать в форматы DWG (с полным соответствием слоев), Autodesk® DWF™ (Design Web Format™) и DXF.

В число продуктов Autodesk входит ряд других программ автоматизированного проектирования, в том числе Autodesk Data Exchange – набор конверторов для взаимного преобразования данных из форматов DXF и SAT (формат ядра ACIS) в такие форматы, как STEP, IGES, VDA-FS.

Ряд продуктов, интегрированных с программами проектирования компании Autodesk, создан компаниями, входящими в ассоциацию Mechanical Applications Initiative производителей прикладного ПО. Среди них следует отметить программу Dynamic Designer Motion (компания Mechanical Dynamics), предназначенную для расчетов динамики и кинематики механизмов (в том числе трехмерных). Элементами являются модели шарниров, пружин, сухого трения, ударных нагрузок.

Программа Dynamic Designer Motion имеет связи с группой программ конечно-элементного анализа Cosmos. Например, программу Cosmos/DesignSTAR можно использовать как автономно, так и в связке с программами Inventor и Solid Edge, а программу Cos-

mos/Works – с программой SolidWorks. С помощью этих программ проводят анализ деформированного состояния деталей, стационарных и нестационарных тепловых процессов, динамики жидкостей и газов, низкочастотных электромагнитных полей, определяют собственные частоты колебания конструкций.

Система твердотельного параметрического моделирования механических конструкций Solid Works (компания Solid Works Corporation) построена на графическом ядре Parasolid, разработанном в Unigraphics Solution. Синтез конструкции начинается с построения опорного тела с помощью операций типа выдавливания, протягивания или вращения контура с последующим добавлением и (или) вычитанием тех или иных тел. Используется технология граничного моделирования (B-representation) с аналитическим или сплайновым описанием поверхностей. При проектировании сборок на основе БЭФ можно задавать различные условия взаимного расположения деталей, автоматически контролировать зазоры и отсутствие взаимопересечения деталей. Предусмотрены IGES, DXF, DWG – интерфейсы с другими системами.

Среди САПР среднего уровня, наряду с продуктами зарубежных фирм, неплохо зарекомендовали себя системы российских разработчиков – это прежде всего системы Компас (компания Аскон) и T-Flex CAD (Топ Системы).

В системе Компас для трехмерного твердотельного моделирования используется оригинальное графическое ядро. Синтез конструкций выполняется с помощью булевых операций над объемными примитивами, модели деталей формируются путем выдавливания или вращения контуров, построением по заданным сечениям. Возможно задание зависимостей между параметрами конструкции, расчет массинерционных характеристик. Разработка проектно-конструкторской документации, в том числе различных спецификаций, выполняется подсистемой Компас-График. Имеются библиотеки с данными о типовых деталях и графическими изображениями, а также программы специального назначения (проектирование тел вращения, пружин, металлоконструкций, трубопроводной арматуры, штамповой оснастки, выбора подшипников качения, раскроя листового материала и т.д.). Проектирование технологических процессов выполняется с помощью подсистемы Компас-Автопроект, программирование объемной обработки на станках с ЧПУ – с помощью подсистемы ГЕММА-3D. Ряд необходимых функций управления проектными данными

возложено на подсистему Компас-Менеджер.

Подсистема трехмерного твердотельного моделирования T-Flex CAD 3D в САПР T-Flex CAD построена на базе ядра Parasolid. Геометрическое ядро Parasolid фирмы Unigraphics Solutions позволяет пользователям T-FLEX CAD 3D моделировать трехмерные детали и сборочные конструкции любой сложности. Реализована двунаправленная ассоциативность, т. е. изменение параметров чертежа автоматически вызывает изменение параметров модели и наоборот. При проектировании сборок изменение размеров или положения одной детали ведет к корректировке положения других. Модель 3D может быть получена непосредственно по имеющемуся чертежу, или с помощью выталкивания, вращения, линейчатой операции, лофтинга, оболочки, тела по траектории, литейного уклона, трубопровода, сглаживания, булевых операций (сложения, вычитания, пересечения), создания линейных и круговых массивов, отсечения, пружины, спирали. Операция сглаживания позволяет создавать сопряжения с постоянным и переменным радиусом. При сглаживании с переменным радиусом изменение от начального радиуса к конечному может задаваться как линейным, так и нелинейным законами. Оптимизация – один из мощных инструментов конструктора, позволяющий подбирать наилучшие параметры детали (изделия) без рутинной ручной подгонки геометрии. Благодаря модулю оптимизации модели, в T-FLEX CAD гораздо легче определить параметры тел заданного объема, масс–инерционных характеристик, равновесия, балансировки и т.п. Система T-FLEX CAD 3D SE позволяет минимизировать затраты на подготовку чертежной документации по созданным в T-FLEX CAD 3D видам и разрезам трехмерной модели или импортированным из других систем трехмерным моделям. Отличительной особенностью T-FLEX CAD 3D от аналогичных систем является возможность располагать на «листе» 2D окна несколько рабочих поверхностей (плоскостей). Это дает возможность не только параметризовано увязать виды, но и наиболее естественным образом работать над 3D обводами судов по теоретическим чертежам или проектировать гребной винт в цилиндрической системе координат и решать другие задачи. Для параметрического проектирования и оформления конструкторско-технологической документации служит подсистема T-Flex CAD 2D, для управления проектами и документооборотом – подсистема T-Flex DOCs. Использование метода проектирования «сверху вниз» – от сборочного чертежа к детализовке, позволяет исключить

работу с внешними переменными, что значительно облегчает работу. При этом, в расчетных моделях, некоторые значения исходных параметров изделия можно получать непосредственно из контекста сборки. В результате упрощается передача переменных между фрагментами, связанных через сборку. Технологию построения расчетных моделей изделий по 2D ассоциативным связям на сегодня предлагает пока только T-FLEX.

Построение чертежей деталей в контексте сборки наиболее эффективно создает взаимосвязанную ассоциативную сборочную модель на основе сканированных эскизов, чертежей, схем или импортированных параметрических и непараметрических чертежей. Трехмерная сборка в T-FLEX CAD является полностью параметрической – она состоит из отдельных параметрических деталей, связанных между собой. Это означает, что при изменении размера или положения какой-либо детали, другие будут автоматически скорректированы. Проектирование может осуществляться как от детали к сборке, так и наоборот – от сборки к детали. По этой схеме конструктор создает проект сразу как сборочный. Детали проектируются в рамках одной и той же сборки, причем их геометрические элементы (границы, ребра и т.д.) могут быть использованы для проектирования других деталей. При этом, естественно, доступен весь арсенал средств моделирования. В любой момент деталь может быть выгружена в отдельный файл, и использоваться для получения чертежей или вставки в другие сборки.

При этом она остается в исходной сборке, и будет автоматически обновляться. Это значит, что деталь в упрощенном виде можно задать в сборке, затем выгрузить как деталь в отдельный файл, добавить с помощью операций моделирования необходимые элементы, после чего она автоматически будет откорректирована в сборке. То же самое произойдет и в обратном направлении. Если параметры, определяющие деталь в сборке изменить, то деталь будет модифицирована не только в сборочной модели, но и в отдельном файле-детали, в который она была выгружена. Машиностроительная библиотека включает около 240 стандартов различных стандартных компонентов.

В подсистеме технологического проектирования T-Flex/ТехноПро выполняются синтез технологических процессов, расчет технологических размеров, выбор режущего и вспомогательного инструмента, формирование технологической документации, в том числе операционных и маршрутных технологических карт, ведомо-

стей оснастки и материалов, карт контроля. Подготовка программ для станков с ЧПУ осуществляется в подсистеме T-Flex ЧПУ. Кроме названных основных подсистем в состав T-Flex CAD включен ряд программ для инженерных расчетов деталей, проектирования штампов и пресс-форм.

В САПР Cadmech 2000 белорусской компании Интермех входят программы AVS для выпуска конструкторской документации, Techcard для технологической подготовки производства, LCAD для планирования производственных цехов и участков. Для собственно конструкторского 3D-проектирования Интермех использует программы компании Autodesk.

Разработкой продуктов для САПР литейного производства занимается компания Moldflow, ее программы Part Adviser и Mold Adviser предназначены для моделирования процессов литья пластмасс.

3.2. ОБЩИЕ ПОДХОДЫ И АЛГОРИТМЫ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ В РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

При решении задач проектирования изделий различного уровня сложности необходимо выполнять конструкторские задачи, связанные с двухмерным черчением и трехмерным моделированием. Выполнять поставленные перед конструктором задачи наиболее рациональным путем позволяет использование обобщенных алгоритмов создания новых изделий. Выполнение построения чертежей в системах автоматизированного проектирования имеют разный подход в зависимости от возможности системы. При выполнении конкретной разработки необходимо исходить из необходимости и достаточности выполнения двухмерных чертежей или потребности создания трехмерных моделей, для разработки управляющих программ для специализированных САПР и затем выполнения чертежей для создания библиотек отдельных деталей и сборочных узлов. Последовательно проанализируем алгоритмы создания двухмерных чертежей, а затем трехмерных объектов и сборочных изделий.

Рассмотрим алгоритмы и технологию выполнения чертежей в различных САПР.

Чертежи можно выполнять в САПР не использующих параметризацию, например AutoCAD, AutoCAD Mechanical, а также с использованием параметризации, например, Компас, T-Flex, Inventor и т.д.

3.2.1. АЛГОРИТМ СОЗДАНИЯ ЧЕРТЕЖЕЙ В САПР AUTOCAD (AUTOCAD MECHANICAL)

Последовательно рассмотрим алгоритм построения детали и технологию выполнения алгоритма, а затем алгоритм построения сборочного узла и технологию выполнения алгоритма.

3.2.1.1. АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ДЕТАЛИ «КОРПУС»

Чертеж детали «Корпус 01M8.030.000» состоит из трех изображений (рис. 3.1): вида спереди, вида сверху, вида слева. На виде спереди использован местный разрез. Вид слева совмещен с половиной разреза. Алгоритм состоит из общей части для всего чертежа и частей построения каждого вида.

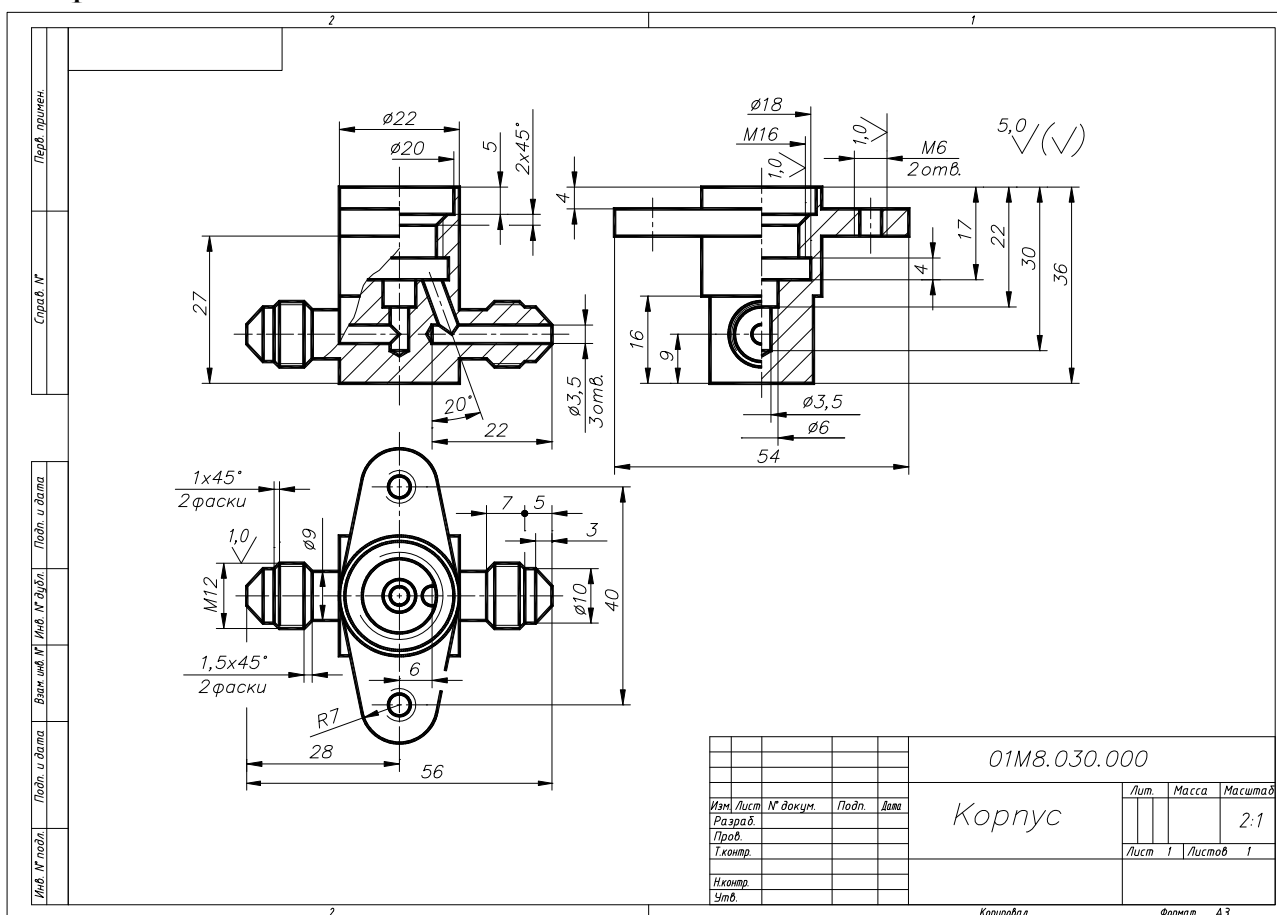


Рис. 3.1. Чертеж детали «Корпус 01M8.030.000».

Общая часть алгоритма построения

1. Подготовка рабочего поля чертежа и настройка системы.
2. Создание и настройка необходимых слоев чертежа.
3. Построение осевых линий взаимосвязанных видов.

4. Построение каркасных (габаритных линий) видов.
5. Нанесение линейных размеров (горизонтальных и вертикальных).
6. Нанесение радиальных и диаметральных размеров.
7. Нанесение угловых размеров.
8. Нанесение односторонних размеров.
9. Нанесение размеров от общей базы.
10. Коррекция размеров (добавление знаков диаметра, метрической резьбы, обозначение фаски).
11. Подготовка и вывод форматных рамок и основной надписи чертежа в области компоновки чертежа.
12. Создание знака шероховатости в виде блока и размещения его в необходимых местах.
13. Заполнение основной надписи чертежа.
14. Сохранение чертежа на жесткий диск.
15. Вывод чертежа на принтер (Плоттер).

Алгоритм построения вида спереди

1. Построение левой половины внешнего контура.
2. Зеркальное отображение внешнего контура относительно вертикальной оси – создание внешнего контура.
3. Построение линии обрыва для местного разреза.
4. Построение линий внутреннего контура для части вида.
5. Построение линий внутреннего контура для местного разреза.
6. Штриховка местного разреза.

Алгоритм построения вида сверху

1. Построение верхней половины внешнего контура.
2. Зеркальное отображение внешнего контура относительно горизонтальной оси – создание внешнего контура.
3. Построение дополнительных осевых линий на виде.
4. Построение линий внутренних контуров.
5. Построение окружностей и дуг для внутренних контуров.

Алгоритм построения вида слева

1. Построение левой половины внешнего контура.
2. Зеркальное отображение внешнего контура относительно вертикальной оси – создание внешнего контура.
3. Построение дополнительных осевых линий на виде.

4. Построение линий внутреннего контура для части вида.
5. Построение линий внутреннего контура для разреза.
6. Штриховка разреза.

3.2.1.2. ТЕХНОЛОГИЯ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМА ПОСТРОЕНИЯ ДЕТАЛИ «КОРПУС»

1. Подготовка рабочего поля чертежа с помощью команды Limits [Format→Drawings Limits] (0,0 – 420,297).
2. Настройка системы:
 - настройка линейных и угловых единиц измерения с помощью команды Units [Format→Drawings Units];
 - создание и настройка стилей размеров в соответствии с ГОСТ, а также односторонних размеров с помощью команды DimStyle [Format→Dimension Style];
 - настройка режимов слежения и точных геометрических построений с помощью команды Drafting SETTINGS [Tool→ Drafting SETTINGS] окна Snap (Привязка к сетке) and Grid (Сетка), Polar Tracking (Полярное отслеживание), Object Snap (Объектная привязка) and Object Snap Tracking (Отслеживание объектной привязки).
3. Создание и настройка необходимых слоев чертежа с помощью команды Layer [Format→Layer] (Слой) и окна Layer Properties Manager (Менеджер слоев), слои OSI, OSN, RAZM, TONK, VSPOM.
4. Построение осевых линий взаимосвязанных видов в слое OSI типом линии Center, линией Construction Line (Линия построения).
5. Построение каркасных (габаритных линий) видов линией Construction Line (Линия построения) через точки, соответствующие габаритным размерам детали.
6. Нанесение линейных размеров (горизонтальных и вертикальных) с помощью команды DimLinear.
7. Нанесение радиальных и диаметральных размеров с помощью команд DimRadius, DimDiameter.
8. Нанесение угловых размеров с помощью команды DimAngular.
9. Нанесение размеров от общей базы с помощью команды DimContinue.
10. Коррекция размеров (добавление знаков диаметра, метрической

резьбы, обозначение фаски) MTextEdit (Редактирование текста) – знаки диаметра, градуса расположены в окне Insert Symbol.

11. Нанесение размеров от общей базы с помощью команды Dim-Baseline.
12. Нанесение односторонних размеров производится с помощью специально созданного стиля размеров команда Dimension Style (Стиль размеров).
13. Создание знака шероховатости в виде блока и размещения его в необходимых местах. Блок создается с помощью команды Make Block (Создать блок), значение шероховатости устанавливаем в виде атрибута с помощью команды Define Attributes (Определение атрибута), блок вставляется с помощью команды Insert Block (Вставить блок).
14. Заполнение основной надписи чертежа выполняется с помощью команды MText (Многострочный текст).
15. Сохранение чертежа на жесткий диск выполняется с помощью команды Save As (Сохранение под именем).
16. Создание компоновки чертежа (Layout) с необходимыми настройками принтера или плоттера.
17. Вывод форматных рамок и основной надписи чертежа с помощью команды вставка блока Insert Block или вставка из шаблона Insert→Format→Insert Template.
18. Вывод чертежа на принтер (плоттер) выполняется с помощью команды Plot (Печатать).

Технология построения вида спереди

1. Построение левой половины внешнего контура выполняется с помощью команды Pline (Полилиния) начиная от осевой линии.
2. Зеркальное отображение внешнего контура относительно вертикальной оси – создание внешнего контура выполняется с помощью команды Mirror.
3. Построение линии обрыва для местного разреза выполняется с помощью команды Spline.
4. Построение линий внутреннего контура для части вида выполняется с помощью команды Pline.
5. Построение линий внутреннего контура для местного разреза выполняется с помощью команды Pline.
6. Штриховка местного разреза выполняется с помощью команды BHatch. Для металлов выбирается тип штриховки ANSI31.

Технология построения вида сверху

1. Построение верхней половины внешнего контура выполняется с помощью команды Pline.
2. Зеркальное отображение внешнего контура относительно горизонтальной оси – создание внешнего контура выполняется с помощью команды Mirror.
3. Построение дополнительных осевых линий на виде выполняется с помощью команды Line и типом линии Center.
4. Построение линий внутренних контуров выполняется с помощью команды Pline.
5. Построение окружностей и дуг для внутренних контуров выполняется с помощью команд Circle, Arc.

Технология построения вида слева

1. Построение левой половины внешнего контура выполняется с помощью команды Pline.
2. Зеркальное отображение внешнего контура относительно вертикальной оси – создание внешнего контура выполняется с помощью команды Mirror.
3. Построение дополнительных осевых линий на виде выполняется с помощью команды Line и типом линии Center.
4. Построение линий внутреннего контура для части вида выполняется с помощью команды Pline.
5. Построение линий внутреннего контура для разреза выполняется с помощью команды Pline.
6. Штриховка разреза выполняется с помощью команды BHatch. Для металлов выбирается тип штриховки ANSI31.

3.2.1.3. АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ СБОРОЧНОГО ЧЕРТЕЖА «КЛАПАН»

Для построения сборочного чертежа «Клапан М445.000 СБ» необходимо выполнить построение чертежей всех деталей входящих в сборку (рис.3.2). Алгоритм и технологию одной из деталей («Корпус 01М8.030.000») рассмотрено ранее.

Сборочный чертеж «Клапан М445.000 СБ» состоит из четырех изображений: вида спереди, вида сверху, вида слева и сечения. На виде спереди использован местный разрез. На виде слева и виде сверху для упрощения не показаны позиции 5,7. Алгоритм состоит из об-

щей части для всего чертежа и частей построения каждого вида.

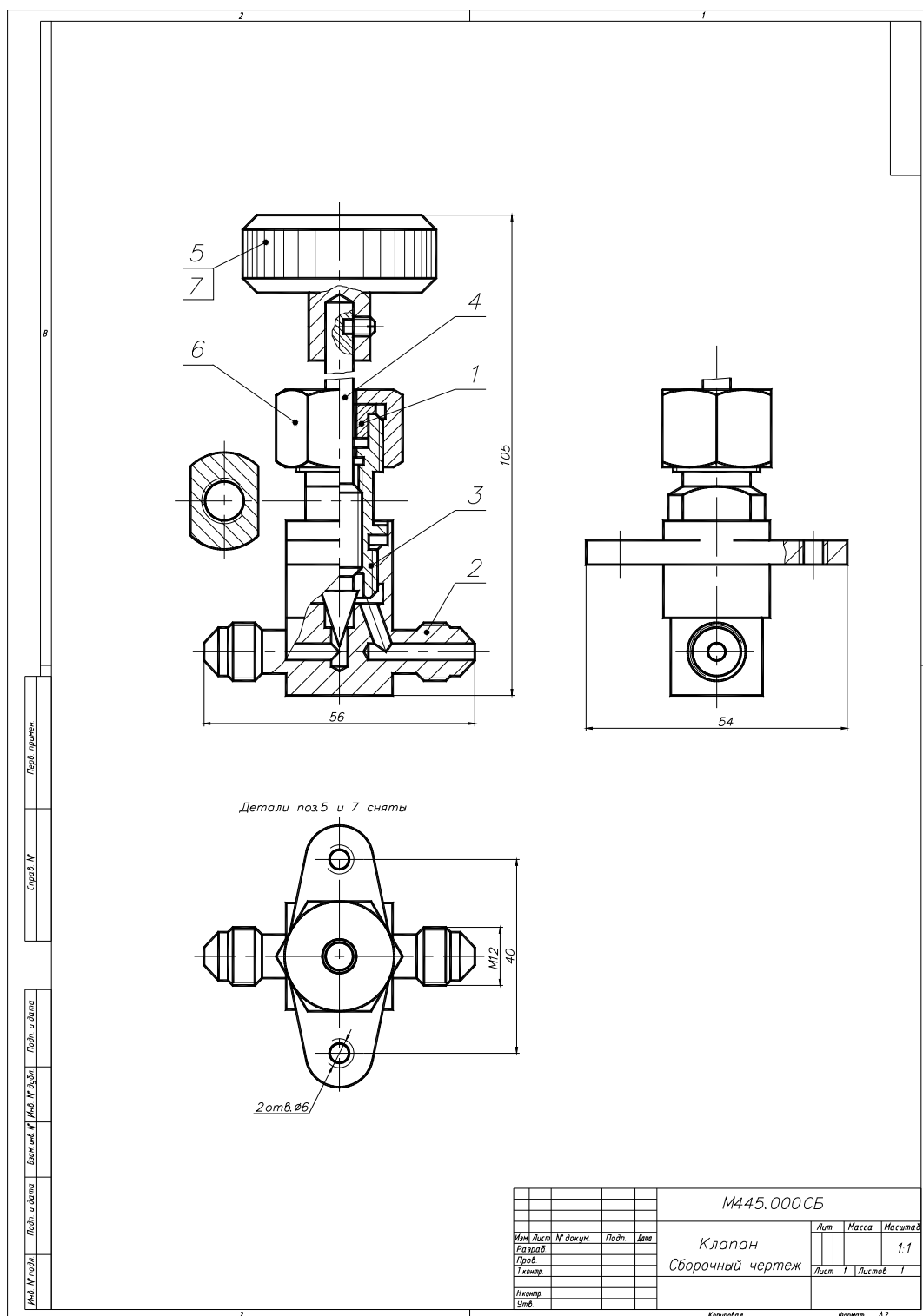


Рис. 3.2. Сборочный чертеж детали «Клапан M445.000 CB».

Общая часть алгоритма построения.

1. Подготовка рабочего поля чертежа и настройка системы.
2. Создание и настройка необходимых слоев чертежа.
3. Построение осевых линий взаимосвязанных видов.
4. Построение каркасных (габаритных линий) видов.

5. Нанесение линейных размеров (горизонтальных и вертикальных).
6. Коррекция размеров (добавление знака диаметра, обозначение метрической резьбы).
7. Обозначение позиций деталей сборочного чертежа.
8. Вывод форматных рамок и основной надписи чертежа.
9. Заполнение основной надписи чертежа.
10. Сохранение чертежа на жесткий диск.
11. Вывод чертежа на принтер (плоттер).

Алгоритм построения вида спереди

1. Размещение вида спереди детали корпус (2) на соответствующем месте сборочного чертежа из чертежа деталировки.
2. Размещение вида спереди детали втулки резьбовой (3) в деталь корпус (2) на соответствующем месте сборочного чертежа.
3. Размещение детали шток (4) в детали втулка резьбовая и корпус на соответствующем месте сборочного чертежа.
4. Размещение детали гайка (6) на виде спереди на соответствующем месте сборочного чертежа.
5. Размещение детали втулка сальниковая (1) на виде спереди на соответствующем месте сборочного чертежа.
6. Размещение детали ручка (5) на виде спереди на соответствующем месте сборочного чертежа.
7. Построение детали винт (7) на соответствующем месте сборочного чертежа.
8. Построение линий обрыва для местного разреза для крепления ручки (5) на штоке (4) с помощью винта (7) на соответствующем месте сборочного чертежа.
9. Удаление невидимых линий для деталей 1-6.
10. Выполнение необходимых штриховок.
11. Создание выносок для позиций деталей 1-7.
12. Нанесение номеров позиций деталей 1-7. Зеркальное отображение внешнего контура относительно вертикальной оси – создание внешнего контура.

Алгоритм построения вида сверху

1. Размещение вида сверху детали корпус (2) на соответствующем месте сборочного чертежа из чертежа деталировки.
2. Размещение детали гайка (6) на виде сверху на соответствующем месте сборочного чертежа.

3. Построение окружности, равную диаметру штока.
4. Удаление невидимых линий для деталей 2, 6.

Алгоритм построения вида слева

1. Размещение вида слева детали корпус (2) на соответствующем месте сборочного чертежа из чертежа детали.
2. Размещение вида слева детали втулки резьбовой (3) в деталь корпус (2) на соответствующем месте сборочного чертежа.
3. Размещение детали гайка (6) на виде слева на соответствующем месте сборочного чертежа.
4. Построение линии обрыва для местного разреза на детали корпус (2).
5. Удаление невидимых линий и элементов штриховок для деталей 2, 3, 6.
6. Выполнение штриховки местного разреза.
7. Построение части штока.

Алгоритм построения сечения

1. Построение осевых линий для сечения.
2. Построение внешнего контура.
3. Построение окружностей и дуг для внутренних контуров.
4. Выполнение штриховки сечения.

Технология реализация алгоритма построения сборочного чертежа «Клапан»

1. Подготовка рабочего поля чертежа с помощью команды Limits [Format→Drawings Limits] (0,0 –297,420).
2. Настройка системы:
 - настройка линейных и угловых единиц измерения с помощью команды Units [Format→Drawings Units];
 - создание и настройка стилей размеров в соответствии с ГОСТ, а также односторонних размеров с помощью команды DimStyle [Format→Dimension Style];
 - настройка режимов слежения и точных геометрических построений с помощью команды Drafting SETTINGS [Tool→ Drafting SETTINGS] окна Snap (Привязка к сетке) and Grid (Сетка), Polar Tracking (Полярное отслеживание), Object Snap (Объектная привязка) and Object Snap Tracking (Отслеживание объектной привязки).

3. Создание и настройка необходимых слоев чертежа с помощью команды Layer [Format→Layer] (Слой) и окна Layer Properties Manager (Менеджер слоев), слои OSI, OSN, RAZM, TONK, VSPOM.
4. Построение осевых линий взаимосвязанных видов в слое OSI типом линии Center, линией Construction Line (Линия построения).
5. Построение каркасных (габаритных линий) видов линией Construction Line (Линия построения) через точки, соответствующие габаритным размерам детали.
6. Нанесение линейных размеров (горизонтальных и вертикальных) с помощью команды DimLinear.
7. Коррекция размеров (добавление знаков диаметра, метрической резьбы) MTextEdit (Редактирование текста) – знак диаметра расположен в окне Insert Symbol.
8. Вывод форматных рамок и основной надписи чертежа с помощью команды вставка блока Insert Block или вставка из шаблона Insert→Format→Insert Template.
9. Заполнение основной надписи чертежа выполняется с помощью команды MText (Многострочный текст).
10. Сохранение чертежа на жесткий диск выполняется с помощью команды Save As (Сохранение под именем).
11. Вывод чертежа на принтер (плоттер) выполняется с помощью команды Plot (Печатать).

Технология построения вида спереди

1. Размещение вида спереди детали корпус (2) на соответствующем месте сборочного чертежа из чертежа детализировки для этого «выключается» слой с размерами и копируется вид спереди на детализировке в буфер обмена (Copy), а затем вставляется в сборочный чертеж (Paste). Если необходимо изменить масштаб изображения детали используется команда Scale.
2. Размещение вида спереди детали втулки резьбовой (3) в деталь корпус (2) на соответствующем месте сборочного чертежа для этого «выключается» слой с размерами и копируется вид спереди на детализировке в буфер обмена, а затем вставляется в сборочный чертеж. Если необходимо изменить масштаб изображения детали используется команда Scale.
3. Размещение детали шток (4) в деталях втулка резьбовая и корпус на соответствующем месте сборочного чертежа для этого «вы-

ключается» слой с размерами и копируется вид спереди на детализировке в буфер обмена, а затем вставляется в сборочный чертеж. Если необходимо изменить масштаб изображения детали используется команда Scale. Для размещения штока вертикально используется команда вращения Rotate.

4. Размещение детали гайка (6) на виде спереди на соответствующем месте сборочного чертежа для этого «выключается» слой с размерами и копируется вид спереди на детализировке в буфер обмена, а затем вставляется в сборочный чертеж. Если необходимо изменить масштаб изображения детали используется команда Scale.
5. Размещение детали втулка сальниковая (1) на виде спереди на соответствующем месте сборочного чертежа для этого «выключается» слой с размерами и копируется вид спереди на детализировке в буфер обмена, а затем вставляется в сборочный чертеж. Если необходимо изменить масштаб изображения детали используется команда Scale. Для размещения штока вертикально используется команда вращения Rotate.
6. Размещение детали ручка (5) на виде спереди на соответствующем месте сборочного чертежа для этого «выключается» слой с размерами и копируется вид спереди на детализировке в буфер обмена, а затем вставляется в сборочный чертеж. Если необходимо изменить масштаб изображения детали используется команда Scale. Для размещения штока вертикально используется команда вращения Rotate.
7. Построение детали винт (7) на соответствующем месте сборочного чертежа выполняется с помощью команды Pline.
8. Построение линий обрыва для местного разреза для крепления ручки (5) на штоке (4) с помощью винта (7) на соответствующем месте сборочного чертежа выполняется с помощью команды Spline.
9. Удаление невидимых линий для деталей 1-6 выполняется с помощью команд: Trim (Обрезать), Break (Разорвать) и Erase (Удалить).
10. Выполнение необходимых штриховок выполняется с помощью команды BHatch. Для металлов выбирается тип штриховки ANSI31.
11. Создание выносок для позиций деталей 1-7 выполняется с помощью команды Leader.

12. Нанесение номеров позиций деталей 1-7 выполняется с помощью команды MText.

Технология построения вида сверху

1. Размещение вида сверху детали корпус (2) на соответствующем месте сборочного чертежа из чертежа детализировки для этого «выключается» слой с размерами и копируется вид спереди на детализировке в буфер обмена (Copy), а затем вставляется в сборочный чертеж (Paste). Если необходимо изменить масштаб изображения детали используется команда Scale.
2. Размещение детали гайка (6) на виде сверху на соответствующем месте сборочного чертежа для этого «выключается» слой с размерами и копируется вид спереди на детализировке в буфер обмена (Copy), а затем вставляется в сборочный чертеж (Paste). Если необходимо изменить масштаб изображения детали используется команда Scale.
3. Построение окружности, которая равна диаметру штока выполняется с помощью команды Circle.
4. Удаление невидимых линий для деталей 2, 6 выполняется с помощью команд: Trim (Обрезать), Break (Разорвать) и Erase (Удалить).

Технология построения вида слева

1. Размещение вида слева детали корпус (2) на соответствующем месте сборочного чертежа из чертежа детализировки для этого «выключается» слой с размерами и копируется вид спереди на детализировке в буфер обмена (Copy), а затем вставляется в сборочный чертеж (Paste). Если необходимо изменить масштаб изображения детали используется команда Scale.
2. Размещение вида слева детали втулки резьбовой (3) в деталь корпус (2) на соответствующем месте сборочного чертежа для этого «выключается» слой с размерами и копируется вид спереди на детализировке в буфер обмена (Copy), а затем вставляется в сборочный чертеж (Paste). Если необходимо изменить масштаб изображения детали используется команда Scale.
3. Размещение детали гайка (6) на виде слева на соответствующем месте сборочного чертежа для этого «выключается» слой с размерами и копируется вид спереди на детализировке в буфер обмена (Copy), а затем вставляется в сборочный чертеж (Paste). Если

необходимо изменить масштаб изображения детали используется команда Scale.

4. Построение линии обрыва для местного разреза на детали корпус (2) выполняется с помощью команды Spline.
5. Удаление невидимых линий и элементов штриховок для деталей 2, 3, 6 выполняется с помощью команд: Trim (Обрезать), Break (Разорвать) и Erase (Удалить).
6. Выполнение штриховки местного разреза выполняется с помощью команды BHatch. Для металлов выбирается тип штриховки ANSI31.
7. Построение части штока – выполняется с помощью команды Pline.

Технология построения сечения

1. Построение осевых линий для сечения выполняется в слое OSI типом линии Center, линией Line (Отрезок).
2. Построение внешнего контура – выполняется с помощью команды Pline.
3. Построение окружностей и дуг для внутренних контуров выполняется с помощью команд Circle, Arc.
4. Выполнение штриховки сечения выполняется с помощью команды BHatch. Для металлов выбирается тип штриховки ANSI31.

3.2.2. ОБЩИЙ АЛГОРИТМ СОЗДАНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ЧЕРТЕЖЕЙ В СИСТЕМЕ T-FLEX CAD

T-FLEX CAD - полностью параметрическая система, основанная на принципиально новом подходе к созданию САПР и позволяет интуитивно понятно визуально создавать параметрические чертежи.

На первом этапе чертеж строится в тонких линиях (линиях построения). Затем задаются необходимые узлы построения. Выполняя построения с помощью линий построения, задаются отношения между ними (параллельность, перпендикулярность, касание и т.д.) и фиксируются параметры этих отношений (расстояние, радиус, угол и т.д.). Все параметры чертежа могут быть выражены с помощью обычных переменных, рассчитаны с помощью обычных формул или выбраны из баз данных. Выполняя обычные действия по созданию чертежа, в то же время создается параметрический чертеж.

На втором этапе чертеж обводится основными линиями (линия-

ми изображения). Используя основные линии и привязываясь к линиям построения и узлам построения формируется изображение чертежа. Все элементы оформления чертежа (размеры, штриховки, допуски, обозначения шероховатостей, тексты и т.п.) при нанесении автоматически привязываются к вспомогательным построениям.

В результате получается полностью параметрический чертеж. При перемещении линий построения или изменении их параметров (расстояний, радиусов и т.д.) линии изображения, размеры, штриховки и т.д. следуют за вспомогательными линиями, полностью изменяя облик чертежа. На основании созданного параметрического чертежа можно получить десятки готовых рабочих чертежей разных типоразмеров изделия.

Параметры любых элементов чертежа: толщина линий изображения, величина стрелок размеров, значения шероховатостей, содержимое текстов и так далее, также могут быть заданы с помощью переменных, значения которых впоследствии можно изменять. Вы можете создавать чертежи с переменным количеством элементов.

Возможно, создавать чертеж с взаимосвязанными видами, когда изменение параметров на одном виде приведет к соответствующим изменениям на других видах. Это часто исключает ошибки в проектировании.

Возможности по созданию и изменению параметрических чертежей в T-FLEX CAD многообразны.

Используя параметрические сборочные чертежи системы T-FLEX CAD, возможно быстро и эффективно получать требуемые модификации сборок. Можно спроектировать сборочный чертеж так, чтобы при различных условиях в него входили разные детали. Подобрать необходимые параметры сборки, можно мгновенно получить готовые рабочие чертежи отдельных деталей и спецификацию, оформленную в соответствии с ЕСКД. При изменении параметров сборки автоматически будет изменяться спецификация и все другие документы.

3.2.3. ОБЩИЕ ПОДХОДЫ И ВЫПОЛНЕНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ И СБОРОЧНЫХ УЗЛОВ В САПР INVENTOR

Начало работы. При установке Autodesk Inventor каждой рабочей среде соответствуют свои стандартные панели и инструментальные палитры, браузеры и инструменты. Пользователь сам выбирает рабочую среду при создании нового файла или открытии уже суще-

ствующего. Например, при выборе шаблона детали с именем Обычный.ipt на вкладке «По умолчанию» в диалоговом окне «Создание файла» на экране появляются следующие компоненты пользовательского интерфейса:

- Строка меню.
- Стандартная панель для деталей.
- Инструментальная палитра для 2М эскизов.
- Браузер модели.
- Окно эскиза детали.

Каждой среде соответствует определенный набор настроек. Настройку среды можно осуществить следующими способами:

- Задать стандартную панель инструментов.
- Задать стандартную инструментальную палитру.
- Выбрать дополнительные панели инструментов из меню «Вид».
- Задать дополнительные панели инструментов, загружаемые в палитру.
- Добавить, переименовать, скопировать или удалить панели инструментов.
- Добавить выбранные инструменты в панель инструментов и инструментальную палитру. Также можно удалить значки.
- Установить крупные значки.
- Отображать инструментальную палитру без текста.
- Отображать ключевые буквы во всплывающих подсказках.
- Добавить ключевые буквы или изменить существующие.

Перед началом работы необходимо настроить параметры программы.

Настройка графических параметров. Для настройки графических параметров вашего компьютера:

1. Щелкните правой кнопкой мыши на рабочем столе Windows и выберите «Свойства».
2. В диалоговом окне «Свойства: Экран » перейдите на вкладку Настройка .
3. Выберите True Color и нажмите ОК.

Настройка цвета графической области. В Autodesk Inventor можно выбрать различные цветовые схемы. Для первых шагов в Autodesk Inventor рекомендуется выбрать простейшую цветовую схему с белым фоном графической области:

1. Запустите Autodesk Inventor двойным щелчком на значке Autodesk Inventor 9 на Рабочем столе.

2. В Стартовой панели нажмите Отмена для закрытия окна.
3. Из меню Сервис выберите Настройка.
4. На вкладке Цвета выберите цветовую схему, например Презентация.
5. Нажмите Применить, а затем ОК.
6. Завершите сеанс работы Autodesk Inventor, выбрав Выход из меню Файл.

В среде моделирования деталей имеются все инструменты, необходимые для создания отдельных деталей. При создании новой детали в браузере отображаются имя детали, автоматически присваиваемое по умолчанию, папка «Начало» и первый эскиз. Программа автоматически переходит в режим создания эскизов, а в инструментальной палитре появляется набор инструментов для эскизирования.

После завершения построения эскиза он заменяется на набор инструментов для превращения плоских эскизов в объемные модели деталей.

В графической области для удобства построений отображается координатная сетка. Начало координат помещается в центр графической области. В инструментальной палитре появляется набор инструментов для эскизирования: Отрезок, Окружность, Дуга и др.

В Autodesk Inventor реализован принцип размерно управляемого моделирования, которое позволяет быстро набросать черновые варианты модели без задания ее точных размеров. Когда базовая геометрическая форма определилась, можно задать точные размеры.

Ввод третьего измерения. Преобразуем плоский эскиз в объемную модель, который представляет вид сверху. Однако объемные модели лучше рассматривать в изометрии, поэтому для повышения наглядности возможно сменить текущий вид на изометрический.

Изменение вида эскиза. Для изменения текущего вида на изометрический:

- Щелкните правой кнопкой мыши в графической области и выберите: Изометрия. При переходе в изометрию значения размеров остаются хорошо читаемыми вне зависимости от ориентации эскиза.

Для изменения области просмотра выбирается инструмент Зумировать или нажимается и удерживается клавиша F3, и, удерживая нажатой левую кнопку мыши, перемещается курсор вниз или вверх.

- Вращая колесико мыши назад или вперед выполняется зумиро-

вание.

- Выберите инструмент Панорамировать или нажмите и удерживайте клавишу F2, и, удерживая нажатой левую кнопку мыши, перемещайте курсор в нужную сторону.
- Нажмите и удерживайте колесико мыши и перемещайте курсор в нужную сторону. Выполняется панорамирование.

Принятие эскиза. Для выхода из среды построения эскиза:

- В графической области щелкните правой кнопкой мыши и выберите Принять эскиз.
- В графической области пропала координатная сетка, а в инструментальной палитре инструменты эскизирования заменились на инструменты работы с объемными моделями.
- После принятия эскиза выполняются команды создания трехмерной модели, например выдавливание, вращение, оболочка, отверстие, сдвиг и т.д. Выполнение каждой команды можно проконтролировать после ее выполнения или уже на готовой детали.
- Пример трехмерной модели детали Зажим с контролем команд вращения и выдавливание, которые выбираются в браузере, показаны на рис.3.3, рис.3.4. Браузер отображает в виде древовидной структуры сведения о геометрии, составляющей модель детали. Кнопка «Фильтр», расположенная вверху браузера, раскрывает меню с опциями, позволяющими переключать видимость некоторых групп элементов в браузере.

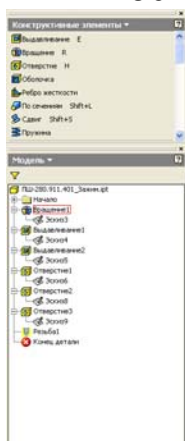


Рис. 3.3. Трехмерная модель детали «Зажим».

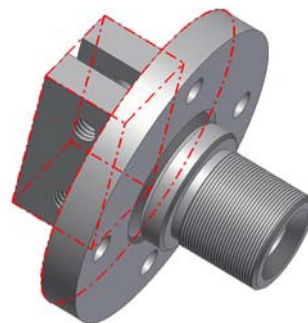
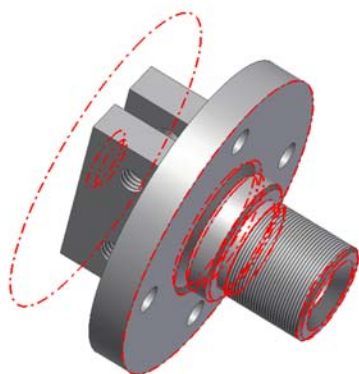


Рис. 3.4. Трехмерная модель детали «Зажим».

Первым элементом в иерархии браузера является папка «Начало». В ней содержатся значки координатных плоскостей и осей (определенных по умолчанию рабочих элементов), а также значок центра системы координат. При наведении курсора на элемент брау-

зера в графической области подсвечиваются соответствующие ему элементы геометрии. Если щелкнуть мышью на значке, то соответствующий элемент активизируется. Для отмены выбора элемента следует щелкнуть мышью в свободной графической области или выбрать другой элемент.

Если к детали присоединено примечание, то под значком папки «Начало» отображается значок папки «Примечания». Для просмотра списка примечаний следует раскрыть эту папку. Двойной щелчок на одном из значков примечаний вызывает Блокнот инженера.

Конструктивные элементы отображаются в браузере в порядке их создания. Если конструктивный элемент построен по эскизу или содержит примечание, то в папку конструктивного элемента вложены соответствующие значки. Если эскиз является общедоступным, то его значок располагается на верхнем уровне дерева модели, а в папке любого конструктивного элемента, использующего этот эскиз, содержится значок связи с эскизом.

По созданным трехмерным моделям выполняются рабочие чертежи деталей, которые можно перенести в другие программы и при необходимости редактировать, например в AutoCAD Mechanical.

Адаптивные конструктивные элементы способны изменять свои размеры и форму при наложении зависимостей, связывающих недостаточно определенную геометрию с конструктивными элементами в других компонентах изделия. Адаптивность конструктивных элементов задается при редактировании деталей.

Для задания адаптивности (как эскизам, так и конструктивным элементам) следует:

1. Выбрать конструктивный элемент в графической области или браузере.
2. Щелкнуть правой кнопкой мыши и выбрать «Адаптивность» из контекстного меню.

Для фиксирования текущих размеров и формы конструктивного элемента можно щелкнуть правой кнопкой мыши и снять флажок «Адаптивность» в контекстном меню.

Замечание: Для отдельного задания адаптивности конструктивного элемента и эскиза следует выбрать конструктивный элемент в браузере, щелкнуть правой кнопкой мыши и выбрать «Свойства» из контекстного меню, после чего включить в группе «Адаптивность» любые из опций «Эскиз» и «Параметры».

1. Адаптивные детали имеют недоопределенные конструктивные

элементы. Если в файле детали такие элементы объявлены адаптивными, при наложении сборочных зависимостей от фиксированных геометрических элементов изделия такие конструктивные элементы могут изменять свои размеры и форму.

2. Нажать кнопку «Вставить компонент», затем выбрать и вставить в текущее изделие требуемую деталь.
3. Выбрать деталь в графической области или в браузере, щелкнуть правой кнопкой мыши и установить флажок «Адаптивность» в контекстном меню.

Использование адаптивности. Статус адаптивности, как и другие характеристики компонента, можно задавать в диалоговом окне «Свойства». Для этого следует выбрать деталь, щелкнуть правой кнопкой мыши и выбрать «Свойства» из контекстного меню. Затем на вкладке «Вхождение» установить флажок «Адаптивность».

Для того чтобы зафиксировать текущие размеры и форму детали, следует щелкнуть правой кнопкой мыши на детали и в контекстном меню снять флажок «Адаптивность».

Адаптивная геометрия может изменять свои размеры и положение в зависимости от контекста, в котором эта геометрия используется. Адаптивной может быть недоопределенная геометрия, что позволяет заданным геометрическим элементам изменять свои размеры, в то время как размеры и позиционирование управляющих элементов остаются неизменными.

Для чего используется адаптивность? Деталь, размеры которой способны должным образом изменяться, может быть использована в нескольких изделиях. При создании конструктивного элемента в файле детали, эскизы или параметры некоторых элементов можно оставить недоопределенными, а сам конструктивный элемент можно сделать адаптивным. Например, можно создать выдавленный элемент, но оставить неопределенной глубину выдавливания.

После вставки в изделие деталь, имеющую недоопределенные конструктивные элементы, можно сделать адаптивной. При наложении зависимостей между этой деталью и другими геометрическими элементами, положение которых фиксировано, адаптивные элементы этой детали изменяют свои размеры и форму.

В изделии адаптивным можно сделать целый узел. Если в этом узле имеются адаптивные детали (и конструктивные элементы), эти элементы соответствующим образом изменяют свои размеры и форму при наложении зависимостей между узлом и внешней геометрией.

В контексте внешнего изделия размеры и форму недоопределенных компонентов также можно изменять перетаскиванием.

Адаптивными могут быть следующие недоопределенные геометрические элементы:

- недоопределенные эскизы;
- конструктивные элементы, созданные на основе недоопределенных эскизов;
- конструктивные элементы с недоопределенными углами или ограничениями;
- заимствованные рабочие элементы;
- эскизы, содержащие спроецированную геометрию;
- детали, в которых есть адаптивные эскизы или конструктивные элементы;
- узлы, в которых есть детали с адаптивными эскизами или конструктивными элементами.

На ранних стадиях проектирования изделия некоторые требования, предъявляемые к этому изделию, известны точно, а некоторые могут быть изменены. В этом случае полезно использовать адаптивные детали, которые автоматически подстраиваются в соответствии с внесенными в модель изменениями.

Как правило, адаптивные модели используются в следующих случаях:

- когда модель изделия задана не полностью, и для детали или узла известно только требуемое положение, а конечные размеры не известны;
- когда положение или размер конструктивного элемента зависит от размера или положения конструктивного элемента другой детали изделия.

Только одно вхождение детали задает ее адаптивность. Если в изделии используется несколько вхождений одной и той же детали, параметры (включая позиционирование) всех этих вхождений задаются адаптивным вхождением.

Для того чтобы деталь или узел можно было сделать адаптивными, необходимо, чтобы в этой детали или в этом узле имелись адаптивные конструктивные элементы. Задать адаптивность можно следующими способами:

- задать адаптивные параметры детали. Для этого в файле детали (или когда деталь является активной в файле узла) следует выбрать требуемый конструктивный элемент в браузере, щелкнуть

правой кнопкой мыши и выбрать «Свойства» из контекстного меню. В диалоговом окне «Свойства конструктивного элемента» задать адаптивность эскиза, параметров или ограничений;

- сделать все параметры конструктивного элемента адаптивными одновременно. Для этого в файле детали следует выбрать в браузере требуемый конструктивный элемент, щелкнуть правой кнопкой мыши и установить флажок «Адаптивность» в контекстном меню;
- сделать адаптивной деталь (узел). Для этого в файле изделия (в графической области или в браузере) выбрать деталь или узел, щелкнуть правой кнопкой мыши и установить флажок «Адаптивность» в контекстном меню. Если адаптивность детали или узла не задана, эта деталь или этот узел является твердым телом. Это означает, что размеры такой детали при наложении зависимостей между этой деталью и другими деталями или узлами изделия не изменяются, несмотря на то, что в детали имеются адаптивные конструктивные элементы.

Для того чтобы адаптивные элементы и детали обновлялись предсказуемо, необходимо:

- использовать только одну зависимость касательности для элемента вращения;
- избегать использования смещений при наложении зависимостей между двумя точками, двумя линиями или точкой и линией;
- избегать зависимостей совмещения между двумя точками, точкой и плоскостью, точкой и линией, линией и плоскостью;
- избегать зависимостей касательности между двумя шарами, шаром и плоскостью, шаром и конусом.

В изделиях с несколькими вхождениями адаптивной детали, ограничения на неадаптивность других ее вхождений могут для правильного выполнения потребовать сделать два обновления изделия.

В неадаптивном узле можно накладывать зависимости с использованием исходных рабочих элементов (плоскостей, осей и точки). Однако в адаптивном узле такие зависимости никак не сказываются на позиционировании компонентов. Детали, созданные в других САПР, сделать адаптивными нельзя, так как при импорте автоматически накладываются зависимости, делающие такую деталь полностью определенной.

Пример адаптированного сборочного узла на примере борштанги в каркасном и тонированном режиме визуализации показан на рис. 3.5, рис. 3.6. Адаптивные зависимости наложены между деталью борштанга и вставка, которые показаны на рис. 3.7, рис. 3.8.

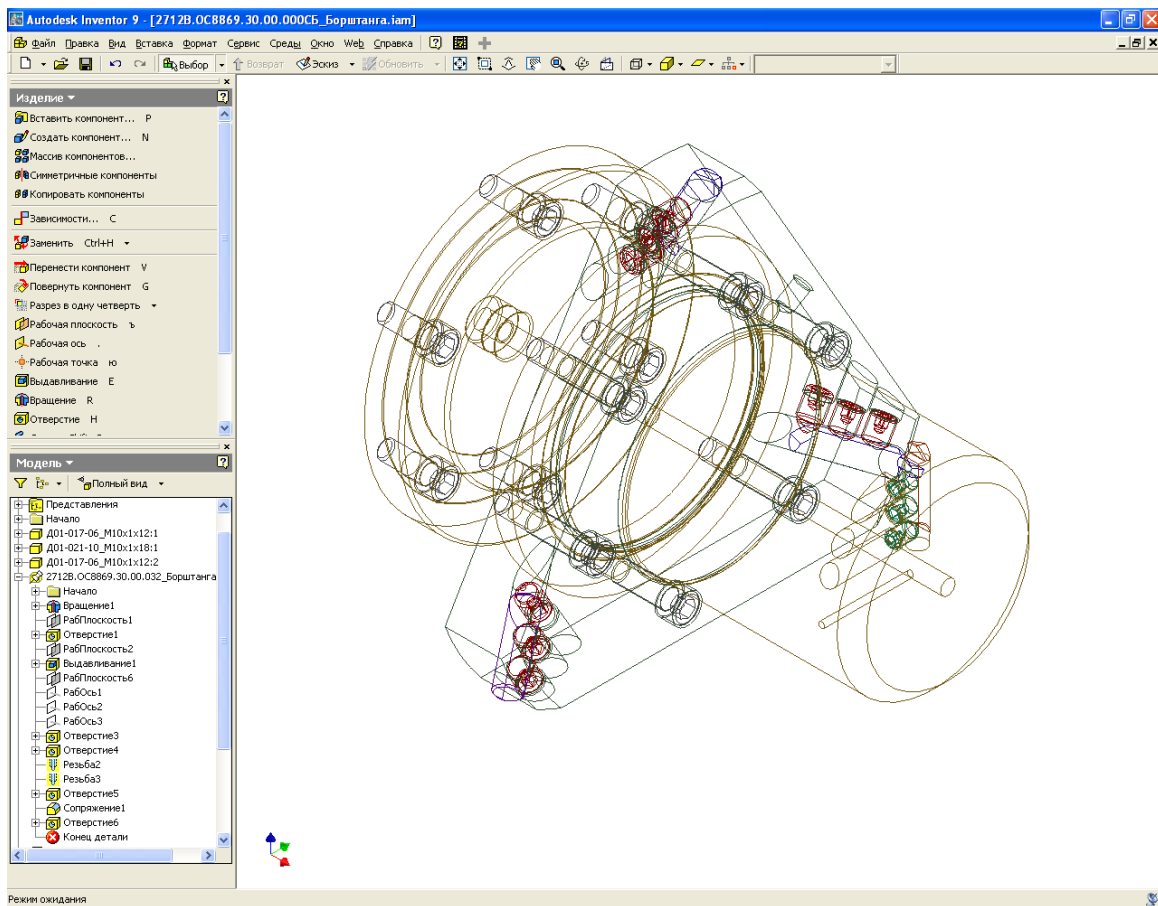


Рис. 3.5. Адаптированный сборочный узел в каркасном режиме.

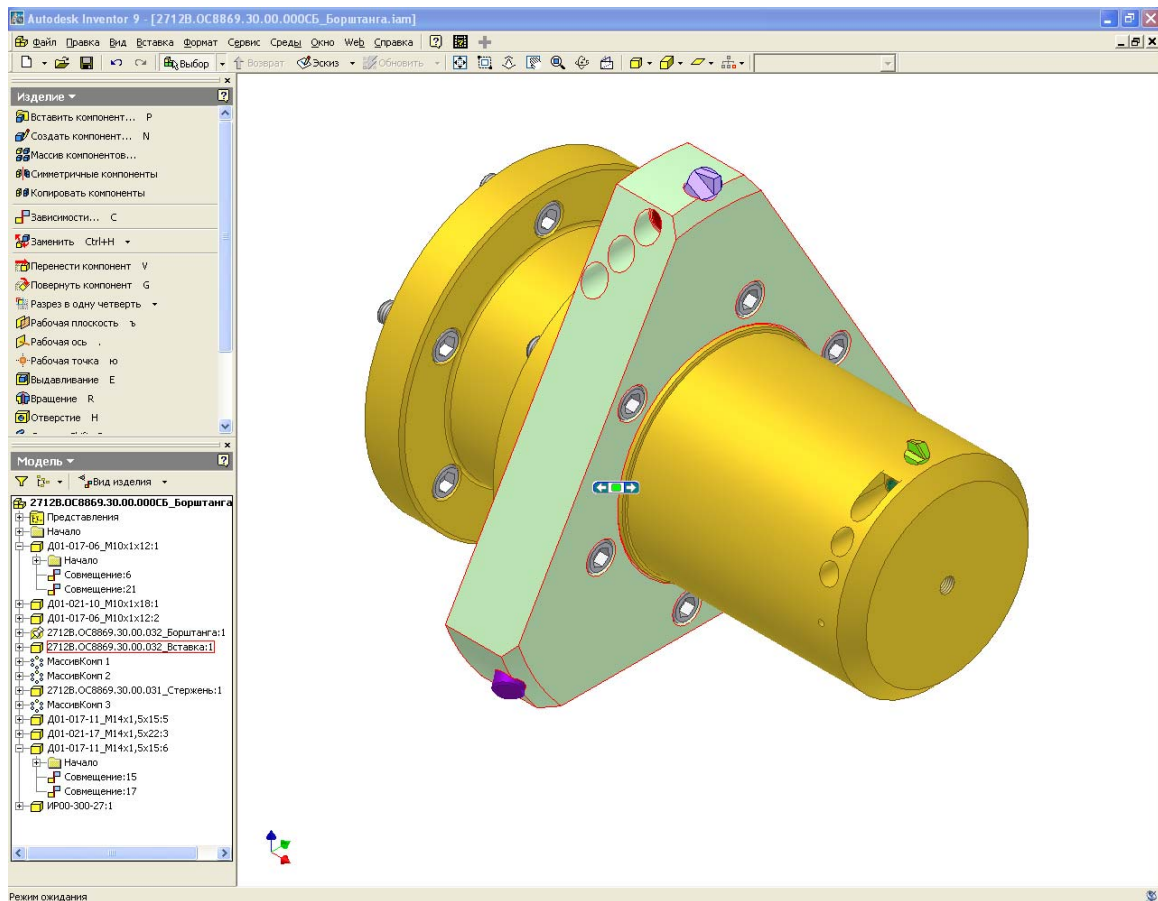


Рис. 3.6. Адаптированный сборочный узел в тонированном режиме.

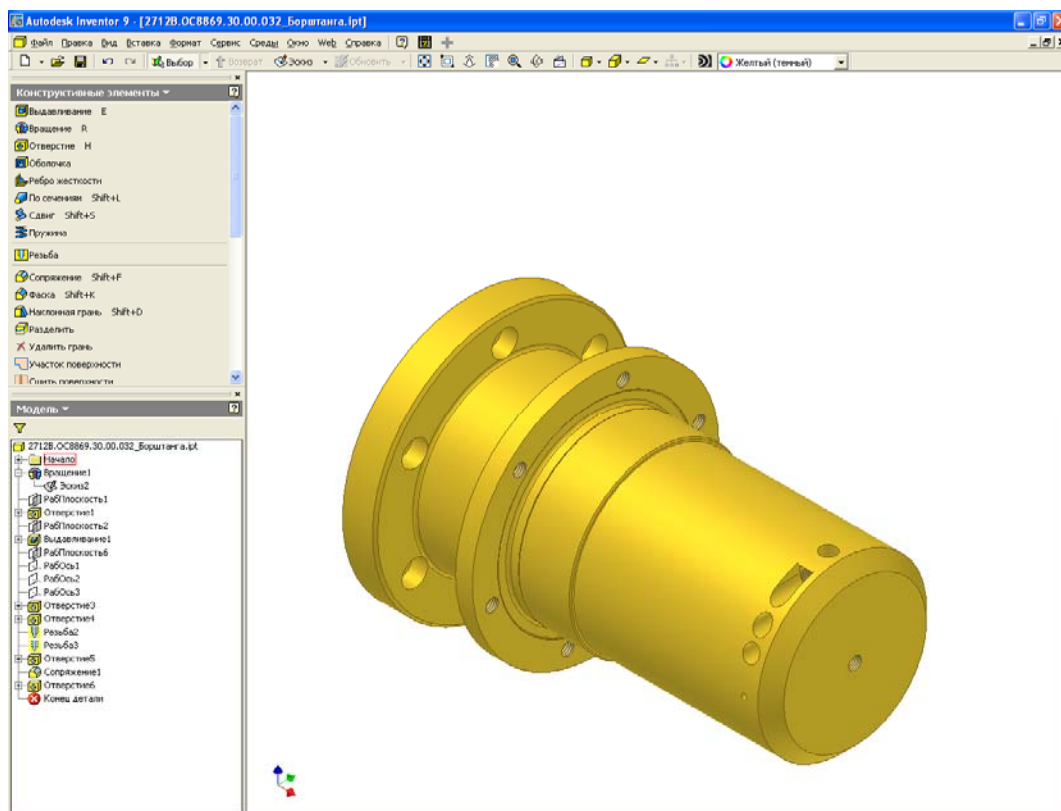


Рис. 3.7. Адаптивные зависимости.

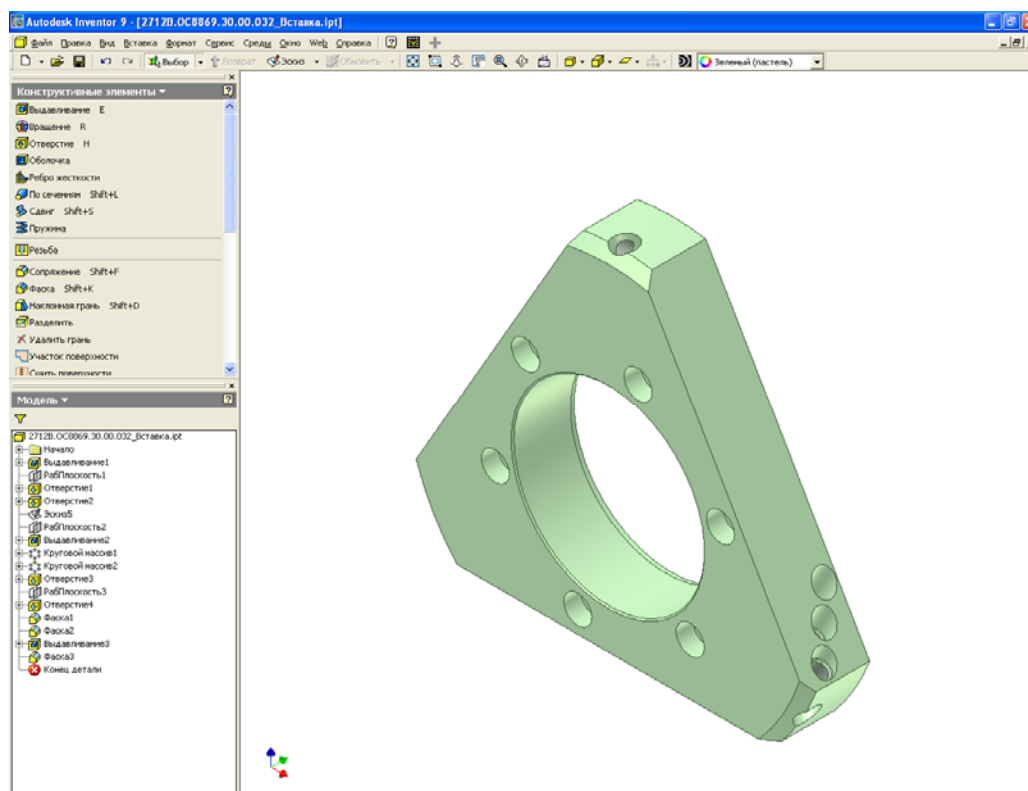


Рис. 3.8. Адаптивные зависимости.

Пользователь может контролировать влияние конструктивных элементов изделия на детали изделия. Деталь, на которую влияют конструктивные элементы, называются деталями-подосновами. В

браузере детали-подосновы следуют сразу же за связанным с ними конструктивным элементом.

Для просмотра списка деталей-подоснов нужно развернуть список конструктивных элементов. Для добавления и удаления деталей, входящих в конструктивные элементы изделия нужно воспользоваться режимом работы с деталями-подосновами.

Для добавления детали-подосновы. К созданной детали можно добавлять дополнительные компоненты. Например, имеется модель, имеющая две детали, смещенные относительно друг друга. В обеих деталях имеются отверстия. Если в промежуток между деталями, вставить новую деталь, на нее не будут влиять детали с отверстиями. Если эта деталь так же имеет отверстие ее можно вставить как деталь-подоснову.

Перед началом работы следует открыть изделие, содержащее конструктивные элементы.

1. В браузере изделия щелкнуть правой кнопкой мыши по выдавленному конструктивному элементу или по элементу с отверстием и выбрать «Добавить деталь-подоснову». Для фаски нельзя добавить деталь-подоснову.
2. В браузере изделия или в графической области выбрать вхожде-ние компонента.

Чтобы удостовериться, что компонент был добавлен развернуть список конструктивных элементов изделия и просмотреть список деталей-подоснов. При удалении детали подосновы его имя удаляется из списка в браузере и на него уже не влияют изменения, вносимые в изделия. Перед началом работы следует открыть изделие, содержащее конструктивные элементы.

1. В браузере изделия развернуть список конструктивных элементов изделия для просмотра деталей-подоснов.
2. Щелкнуть правой кнопкой мыши по детали-подоснове и нажать «Удалить деталь-подоснову».

Чтобы удостовериться, что компонент был удален, развернуть список конструктивных элементов изделия и просмотреть список деталей-подоснов.

В больших изделиях некоторые компоненты бывают нужны только для контекста, а некоторые компоненты могут быть загорожены другими компонентами. Поэтому в программе предусмотрена возможность управления видимостью компонентов и доступностью их для выбора. Кроме того, отключение видимости несущественных

компонентов позволяет значительно повысить скорость открытия файла изделия.

Как можно сохранить сделанные настройки видимости компонентов? Настройка видимости в больших изделиях может занимать много времени. Поэтому в программе предусмотрена возможность сохранения настроек видимости компонентов в именованных видовых изображениях. В последующих сеансах работы с изделием сохраненные именованные видовые изображения можно восстанавливать, что избавляет от необходимости заново настраивать видимость компонентов. Изменив настройки видимости компонентов, можно заново сохранить их в именованном виде для использования в дальнейшем.

Для контроля взаимного положения отдельных элементов сборочных узлов существует режим, когда включена прозрачность объектов. Пример сборочного узла борштанги в режиме прозрачности показан на рис. 3.9, а на рис. 3.10 показана отдельно модель детали борштанга в тонированном режиме без прозрачности.

Какие параметры определяют внешний вид компонентов? При вставке компонента или создании его в изделии по месту по умолчанию включены как видимость, так и доступность. Видимость и доступность компонентов можно изменять независимо друг от друга. Например, можно:

- делать видимыми, но недоступными для выбора компоненты, которые необходимы только для контекста;
- делать доступными либо недоступными для выбора невидимые компоненты;
- вновь делать доступными недоступные компоненты;
- отключать видимость компонентов, которые несущественны для текущей работы над изделием;
- включать и отключать видимость для всех компонентов изделия.

В деталях и изделиях содержатся предопределенные наборы рабочих элементов (координатные плоскости, координатные оси и точка центра модели), которые могут быть отображены или скрыты в графической области. При работе с деталями пользователь может создавать рабочие оси и рабочие точки. Создавать рабочие плоскости можно как для деталей, так и для изделий.

При включении детали в состав изделия видимость ее рабочих элементов сохраняется. При ухудшении восприятия модели следует отключить видимость рабочих элементов, всех или по отдельности.

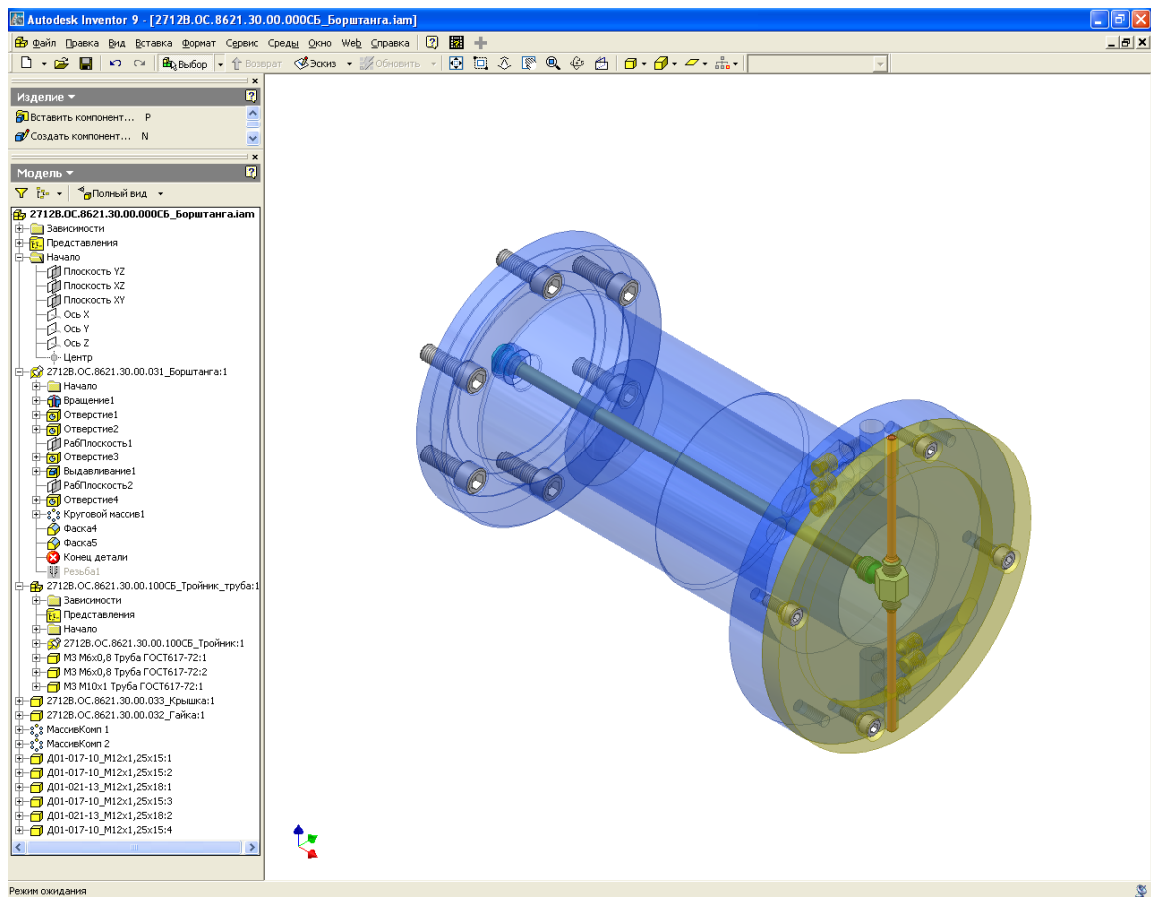


Рис. 3.9. Сборочный узел борштанги в режиме прозрачности.

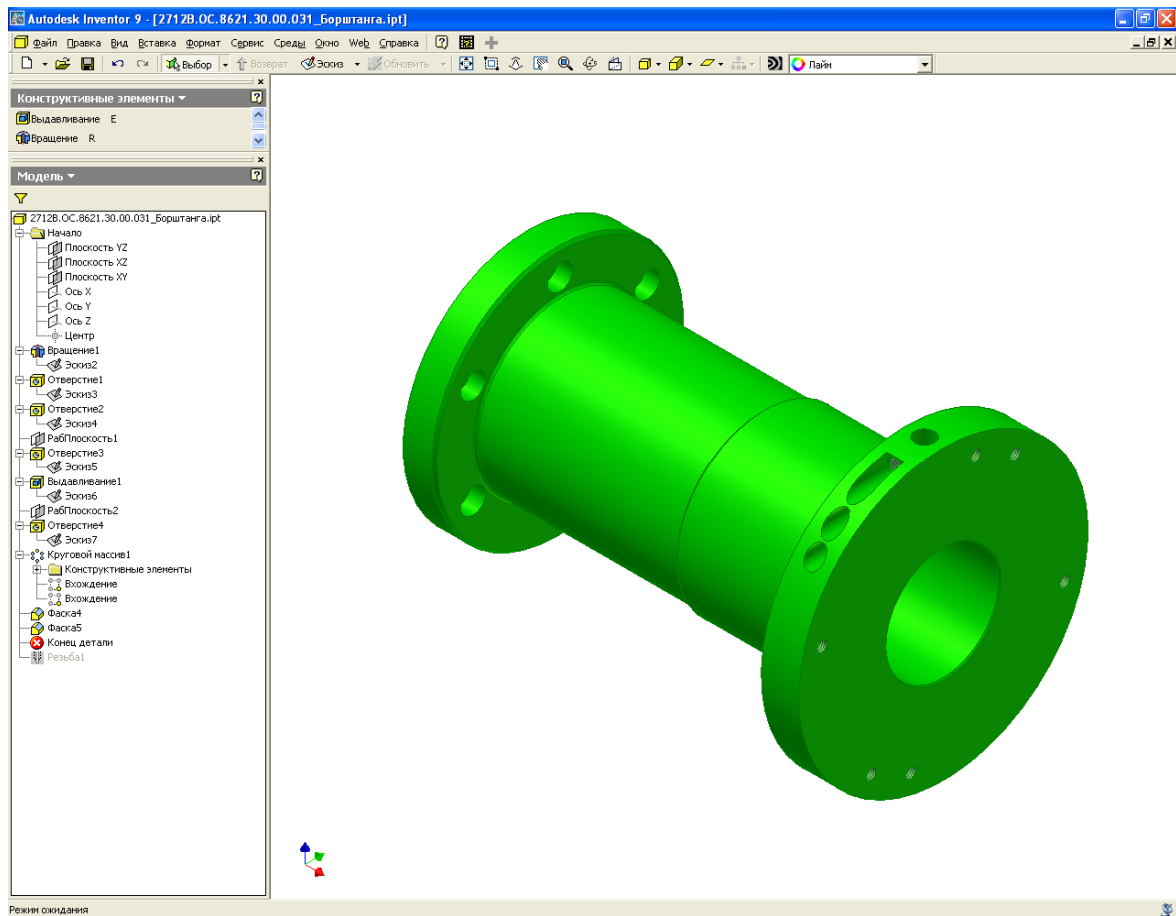


Рис. 3.10. Сборочный узел борштанги в тонированном режиме.

Переключение видимости выбранных рабочих элементов можно выполнять с помощью контекстного меню.

1. В браузере или графической области выбрать один или несколько рабочих элементов.
2. Для подавления видимости щелкнуть правой кнопкой мыши и сбросить флажок «Видимость» в контекстном меню.
3. Для восстановления видимости выбрать нужные рабочие элементы в браузере, щелкнуть правой кнопкой мыши и установить флажок «Видимость».

Для выбора нескольких рабочих элементов необходимо удерживать нажатой клавишу Ctrl в процессе выбора. Рабочие элементы могут быть скрыты в браузере, оставаясь видимыми в графической области.

1. Для подавления в браузере рабочих элементов следует нажать кнопку «Фильтр» и установить флажок «Скрыть рабочие элементы».
2. Для восстановления в браузере рабочих элементов нужно снова нажать кнопку «Фильтр» и снять этот флажок.

Видимость можно переключать для отдельных категорий рабочих элементов или для всех эскизов. По умолчанию эскизы и все рабочие элементы являются видимыми.

1. Для изменения видимости из меню «Вид» следует выбрать «Видимость объектов».
2. В меню сбросить соответствующие флажки для подавления отдельных категорий рабочих элементов или всех эскизов. Повторное установление флажков восстанавливает видимость соответствующих категорий рабочих элементов.

Значки элементов в браузере отражают состояние видимости каждого элемента.

3.3. ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМЫ ЗАГОТОВКИ ПРИ ТРЕХМЕРНОМ КОМПЬЮТЕРНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ДЕТАЛЕЙ

При проектировании деталей с использованием систем трехмерного моделирования актуальным является вопрос определения формы исходной заготовки. Это необходимо для оптимизации форм профиля исходной заготовки и детали. Решение задачи оптимизации исходного профиля заготовки позволит осуществить экономию материалов, что позволит снизить себестоимость конечного изделия.

Используя возможности современных САПР для трехмерного твердотельного моделирования объектов можно решать задачи по оптимизации формы заготовки при изготовлении конкретной детали. Предлагается один из возможных подходов к решению задачи оптимизации формы заготовки.

Для оптимизации профиля заготовки необходимо:

- создать трехмерную твердотельную модель детали;
- создать трехмерные твердотельные модели заготовок с различной формой профиля;
- используя созданные модели детали и заготовок, выполняем оптимизацию профиля заготовки.

В предложенной работе рассматривается вариант твердотельного моделирования детали (Резцедержатель) в системе Inventor и возможные варианты оптимизации профиля исходной заготовки. При моделировании требуемой формы заготовки выполняются различные команды формирования исходного профиля и твердотельной модели. Для создания твердотельной модели детали использовались булевы логические операции, которые позволили получить окончательную форму модели.

Рассмотрим подробно этапы оптимизации профиля заготовки. Первоначально выполняем твердотельное моделирование детали (резцедержатель) в системе Inventor. Модель создается по следующему алгоритму.

1. Создается эскиз профиля детали.
2. Создается тело вращения с использованием построенного эскиза профиля детали.
3. Создаются вспомогательные объекты для формирования внешней формы детали.
4. Создаются вспомогательные объекты для формирования внутренних отверстий детали.
5. Выполняются логические операции для создания твердотельной модели.
6. Создаются конструктивные элементы детали (фаски).

Технология создания твердотельной модели резце держателя следующая.

1. Создается эскиз профиля детали по необходимым размерам с использованием команд Line и Arc. Применяем команду Rotate на 360° и по эскизу профиля детали создаем тело вращения.
2. Создаем три профиля с использованием команды Line. Создаем с

использованием команды Extrude вспомогательные объекты. С помощью логической операции Subtract формируем внешнюю форму детали вычитанием из тела заготовки вспомогательных объектов. Создаем три профиля для крепежных отверстий с использованием команды Circle. Создаем с использованием команды Extrude вспомогательные объекты. С помощью логической операции Subtract формируем внутреннюю форму детали вычитанием из тела заготовки вспомогательных объектов. Окончательно формируем твердотельную модель резцедержателя, создавая конструктивные элементы с помощью команды Chamfer.

Трехмерная твердотельная модель резцедержателя в каркасном и тонированном режимах показаны на рис. 3.11, рис.3.12.

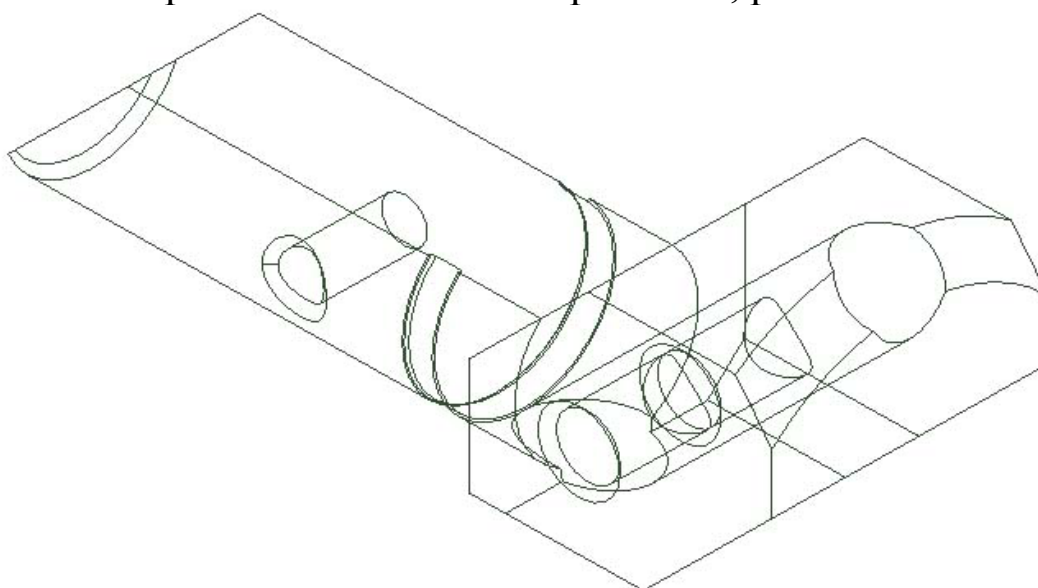


Рис. 3.11. Каркасная модель резцедержателя.

По результатам моделирования детали рассматриваются возможные варианты оптимизации профиля заготовки. Оптимизация осуществляется путем определения профиля заготовки по следующему алгоритму.

1. Рассматриваются различные варианты профиля заготовки.
2. На основании созданного профиля формируется твердотельная модель заготовки.
3. Для модели заготовки определяем ее массу.
4. Определяется масса модели детали.
5. Определяется величина материала, которая отделяется в стружку.
6. Определяется процент использования заготовки.
7. Анализируются результаты расчетов, определяется оптимальный профиль заготовки.

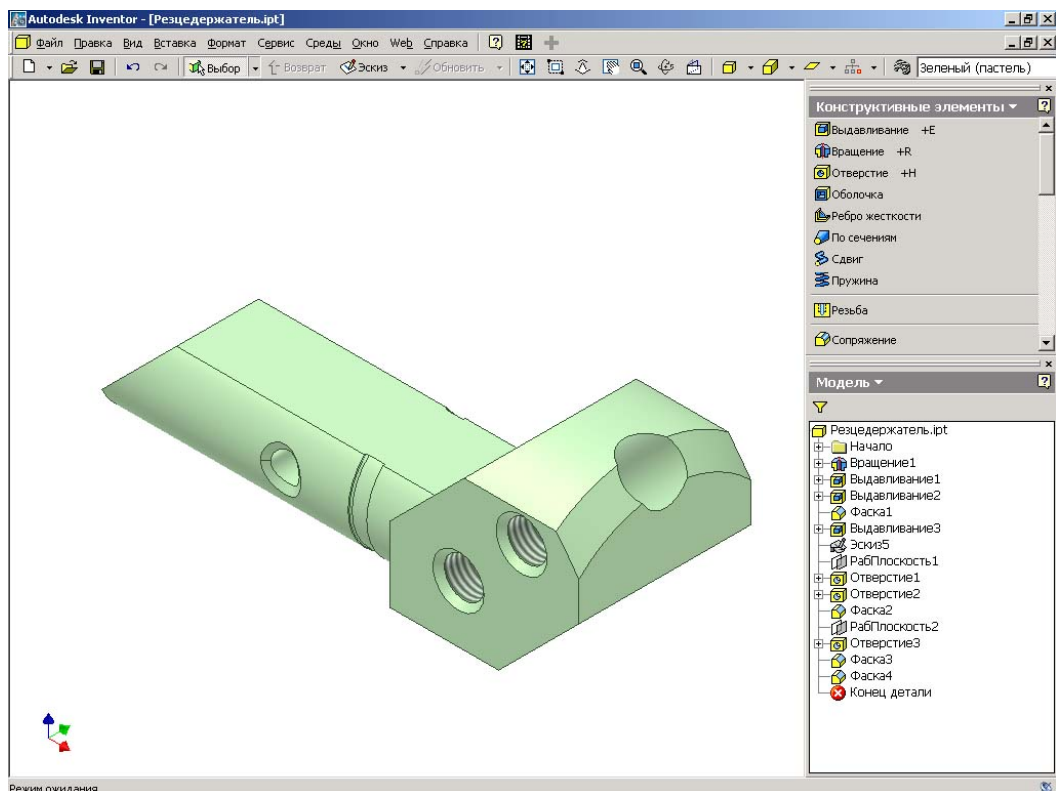


Рис. 3.12. Тонированная модель резцедержателя.

Определение профиля заготовки

Исходная модель заготовки до обработки представляла собой тело вращения, следовательно, имела цилиндрическую форму. Создаем цилиндрическую заготовку, по максимальному диаметру тела вращения, используя команды Circle и Extrude. После создания окончательной формы резцедержателя определяем его поперечное сечение. Сечение представляет прямоугольник с фрагментом дуги в качестве одной из сторон. Дугообразную сторону можно заменить линейной стороной, что не скажется на выполнении рабочих функций детали. Рассмотрим различные профили заготовок на основе прямых призм. Деталь изготавливается на токарном станке, следовательно, основаниями призм могут быть только правильные восьмиугольники, правильные шестиугольники, квадрат и прямоугольник. Расположение правильных фигур может иметь два варианта: размещение стороны параллельно верхней стороне сечения, размещение вершины фигуры над верхней стороной сечения. Центральные точки правильных многоугольников совмещаем с центром вращения тела вращения. Максимальный размер многоугольника определяется полным размещением сечения детали внутри фигуры. Для прямоугольника центр вращения совмещаем с пересечением диагоналей фигуры. Варианты профилей заготовок с наложенным на них сечением резцедержателя

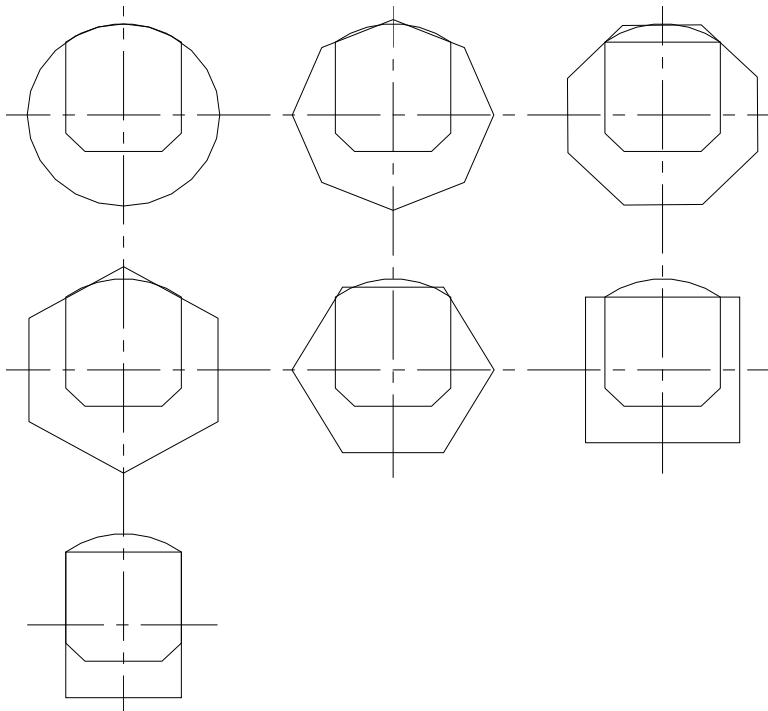


Рис. 3.13. Альтернативные профили заготовок с наложенным сечением резцедержателя.

использовании правильных многоугольников возможно два варианта построения, когда подбирается профиль по вершине или по середине стороны. Эта особенность позволяет получить оптимальный вариант профиля заготовки. Выявлена закономерность: при увеличении количества сторон расхождение массы заготовки для различных вариантов размещения профиля уменьшается, например, для восьмигранной призмы 776,1 грамма и 774,7 грамма, для шестигранной призмы 826,8 грамма и 743,8 грамма. Значения масс для остальных вариантов

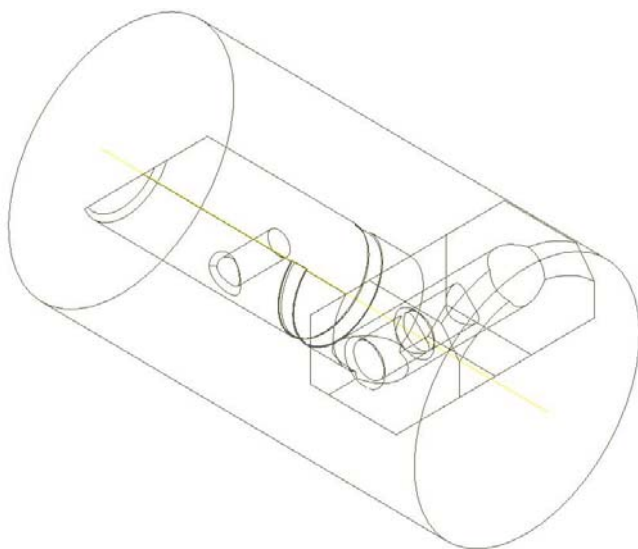


Рис. 3.14. Совмещение твердотельных моделей заготовки и резцедержателя.

показаны на рис. 3.13. Правильные многоугольники создаются с использованием команды Polygon. Прямоугольник строим с помощью команды Rectangle. На основе построенных профилей создаем прямые призмы с помощью команды Extrude.

По результатам построения была определена масса заготовок с различными профилями при использовании материала титан. При использовании правильных многоугольников возможно два варианта построения, когда подбирается профиль по вершине или по середине стороны. Эта особенность позволяет получить оптимальный вариант профиля заготовки. Выявлена закономерность: при увеличении количества сторон расхождение массы заготовки для различных вариантов размещения профиля уменьшается, например, для восьмигранной призмы 776,1 грамма и 774,7 грамма, для шестигранной призмы 826,8 грамма и 743,8 грамма. Значения масс для остальных вариантов заготовок были следующими: цилиндр 797 грамм, четырехгранная призма с основанием прямоугольник 596,5 грамма, четырехгранная призма с основанием квадрат 649,4 грамма. Масса готового изделия резцедержателя 152,7 грамма.

Определение величины материала уходящего в стружку и эффективность использования заготовки.

Для определения значения массы удаляемого материала с заготовки использовалась логическая команда вычитания Subtract между моделью заготовки и моделью резцедержателя. На рис. 3.14 показан пример размещения заготовки и резцедержателя до выполнения команды Subtract. Величины массы удаляемого материала с заготовки соответствует той части заготовки, которая уходит в стружку. Результаты вычислений использовались для определения процента использования заготовки. Величина массы удаляемого материала с заготовки составила диапазон от 674,1 грамма до 443,8 грамма, а процент использования заготовки был равен от 18,5% до 25,6%. В результате была определена оптимальная форма заготовки в виде призмы с основанием прямоугольник.

В результате проведенных исследований была определена оптимальная форма профиля заготовки в виде призмы с основанием прямоугольник. Заготовка оптимальной формы позволяет получать минимальную величину отходов удаляемых с заготовки. Предложенный алгоритм определения формы профиля заготовки можно использовать для различных систем автоматизированного проектирования отдельных деталей и сборочных узлов. Возможно создание специализированного приложения к системам Inventor и AutoCAD для оптимизации профиля заготовки детали на этапе проектирования деталей.

3.4. ПРИМЕРЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЕТАЛЕЙ, СБОРОЧНЫХ УЗЛОВ В РАЗЛИЧНЫХ САПР

3.4.1. ПРИМЕРЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЕТАЛЕЙ, СБОРОЧНЫХ УЗЛОВ И ЧЕРТЕЖЕЙ ПО ТРЕХМЕРНЫМ МОДЕЛЯМ В САПР INVENTOR

Рассмотрим примеры проектирования в САПР Inventor для деталей различного уровня сложности. САПР Inventor позволяет производить создание трехмерных моделей в последовательности аналогичной технологическим процессам по изготовлению реальной детали.

Начнем с простейших плоских деталей, которые получаются построением внешнего контура эскиза с добавлением необходимых отверстий. Такой вариант создания подобен технологии изготовлению исходной пластины, а затем сверлением необходимых отверстий. Пример пластины показан на рис.3.15 в тонированном и каркасном изображениях.

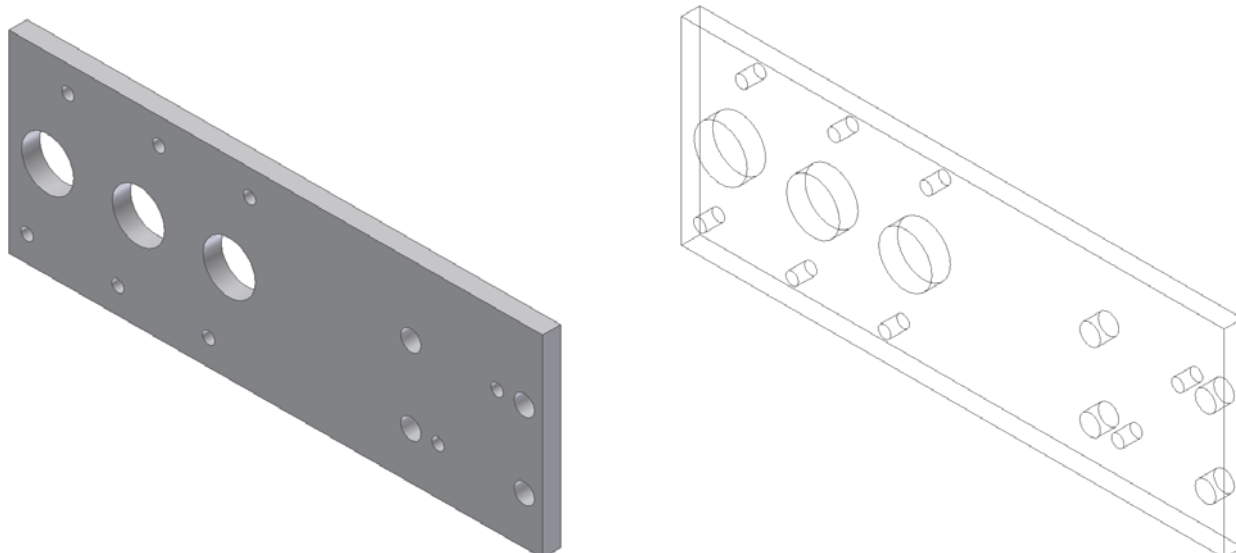


Рис. 3.15. Пластина в тонированном и каркасном изображениях.

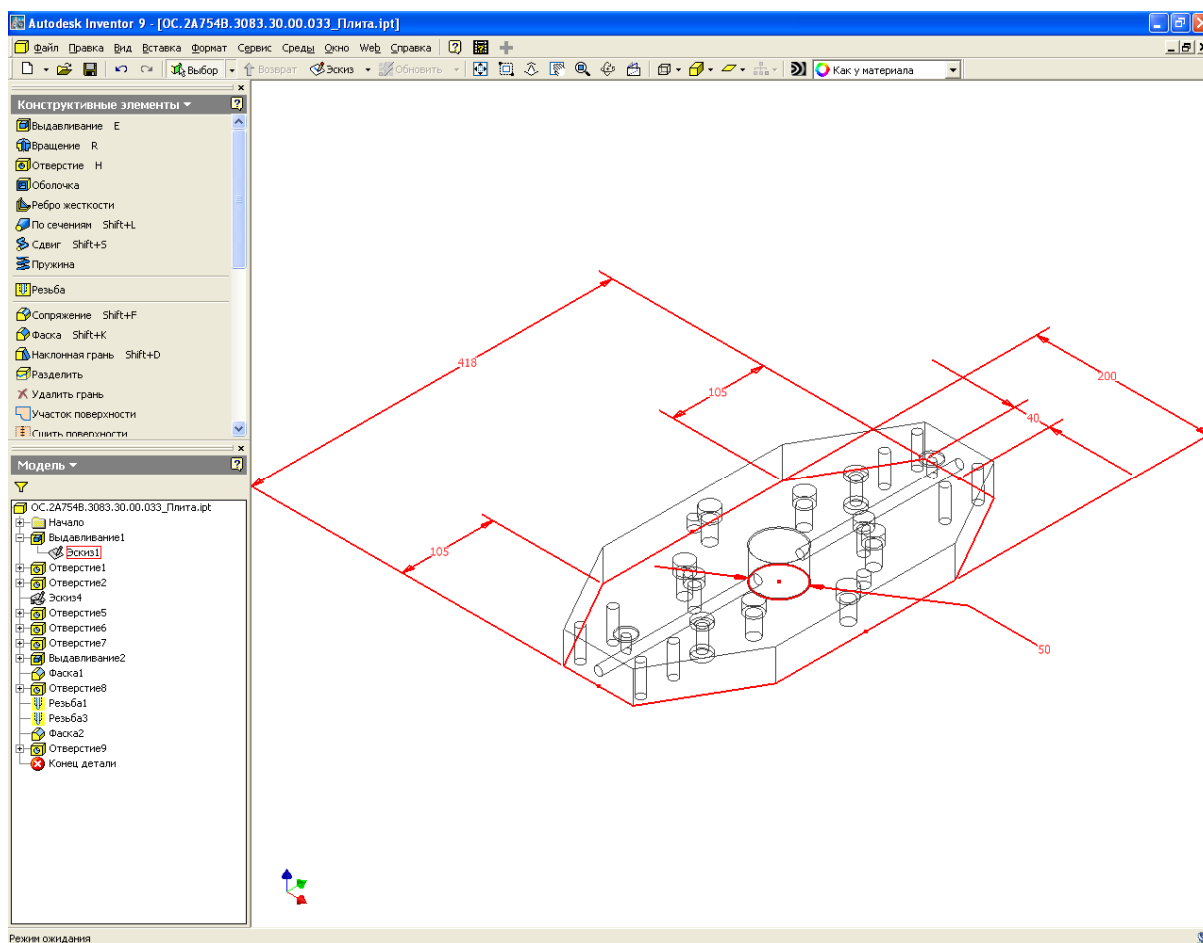


Рис. 3.16. Параметризованный контур.

Следующей деталью будет плита, входящая в состав борштанги. Плита выполняется с использованием параметризованного контура, выделение которого с размерами показано на рис.3.16. Заготовка

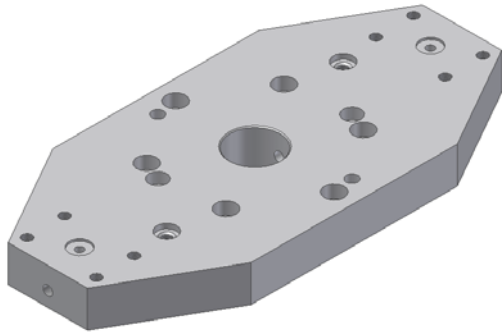


Рис. 3.17. Тонированное изображение готовой детали плиты.

формируется командой выдавливание. В созданной заготовке формируются необходимые отверстия. Отверстия создаются с помощью команды отверстие и булевых логических операций. Отдельно формируются отверстия с резьбой. Выполняется формирование фасок для необходимых отверстий. Построение выполняется в соответствии с технологией изготовления реальной детали. Тонированное изображение готовой детали плиты показано на рис. 3.17.

Построение выполняется в соответствии с технологией изготовления реальной детали. Тонированное изображение готовой детали плиты показано на рис. 3.17.

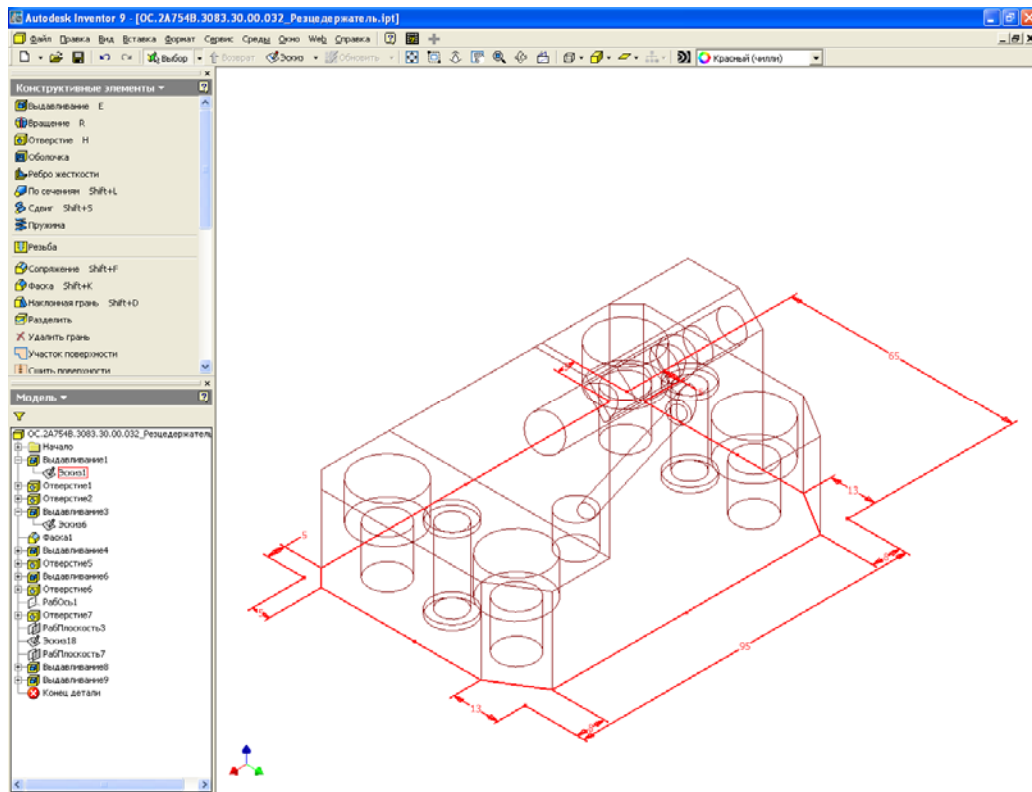


Рис. 3.18. Этапы создания параметрических контуров для формирования модели.

На плите расположены 2 резцедержателя. Этапы создания параметрических контуров для формирования модели показаны на рис. 3.18, рис.3.19. Готовая модель резцедержателя показана на рис. 3.20.

Для закрепления борштанги на станке используется деталь оправка, которая создана на основе тела вращения с необходимыми крепежными отверстиями. Плита закрепляется на оправке рис. 3.21. Борштанга в сборе с крепежными элементами и резцами показана на рис. 3.22. В качестве крепежных элементов для соединения отдель-

ных деталей борштанги и резцов используются типовые болты различных типоразмеров, которые выбираются из соответствующих библиотек трехмерных деталей.

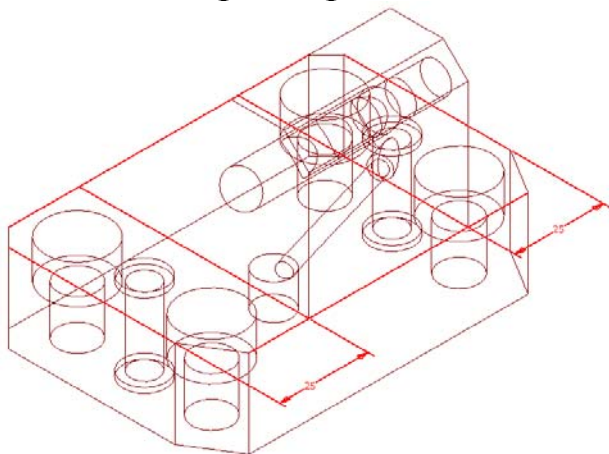


Рис. 3.19. Этапы создания параметрических контуров резцедержателя.

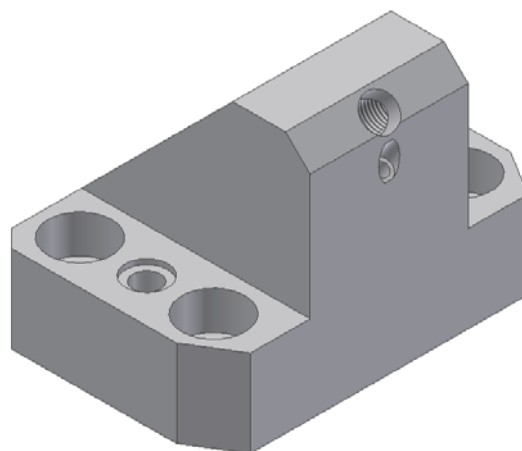


Рис. 3.20. Готовая модель резцедержателя.

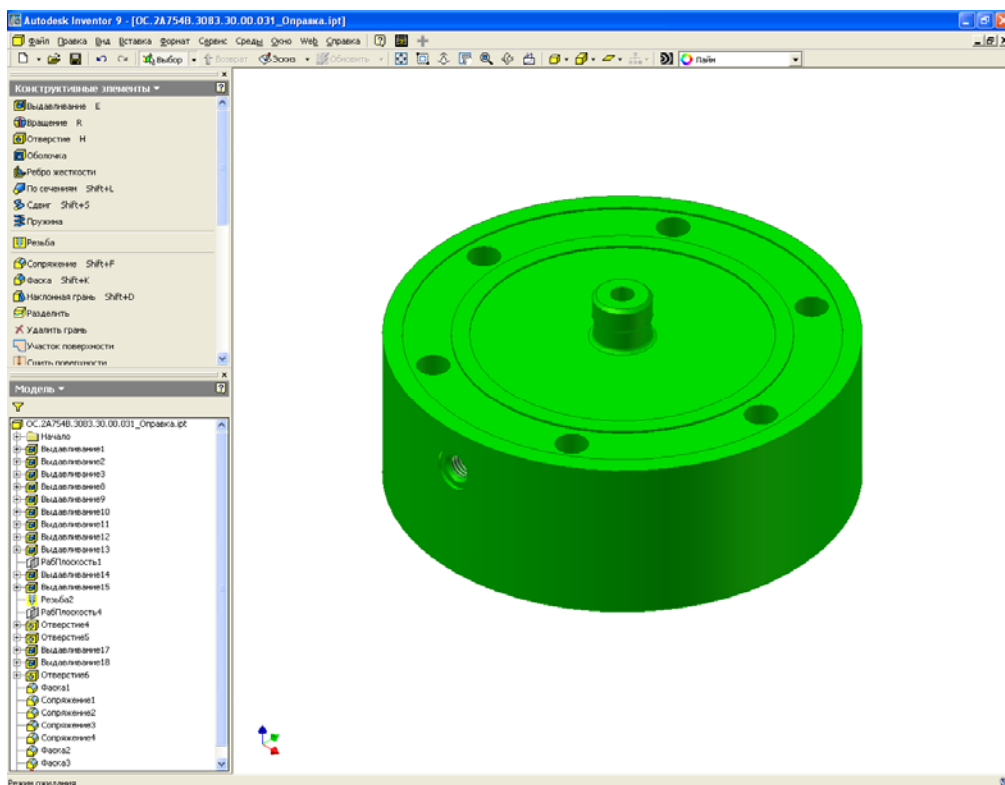


Рис. 3.21. Оправка.

Деталь борштанги другой конструкции показана на рис. 3.23. На основании трехмерной модели борштанги САПР Inventor позволяет автоматически получить необходимые чертежи. Чертеж детали борштанги показан на рис. 3.24. Борштанга в сборе с элементами крепления и резцом показана на рис. 3.25, рис. 3.26. Чертежи содержат все необходимые компоненты. Иерархическая структура чертежа включает

чертежные ресурсы, листы и виды. Рассмотрим подробно элементы чертежей создаваемые САПР Inventor.

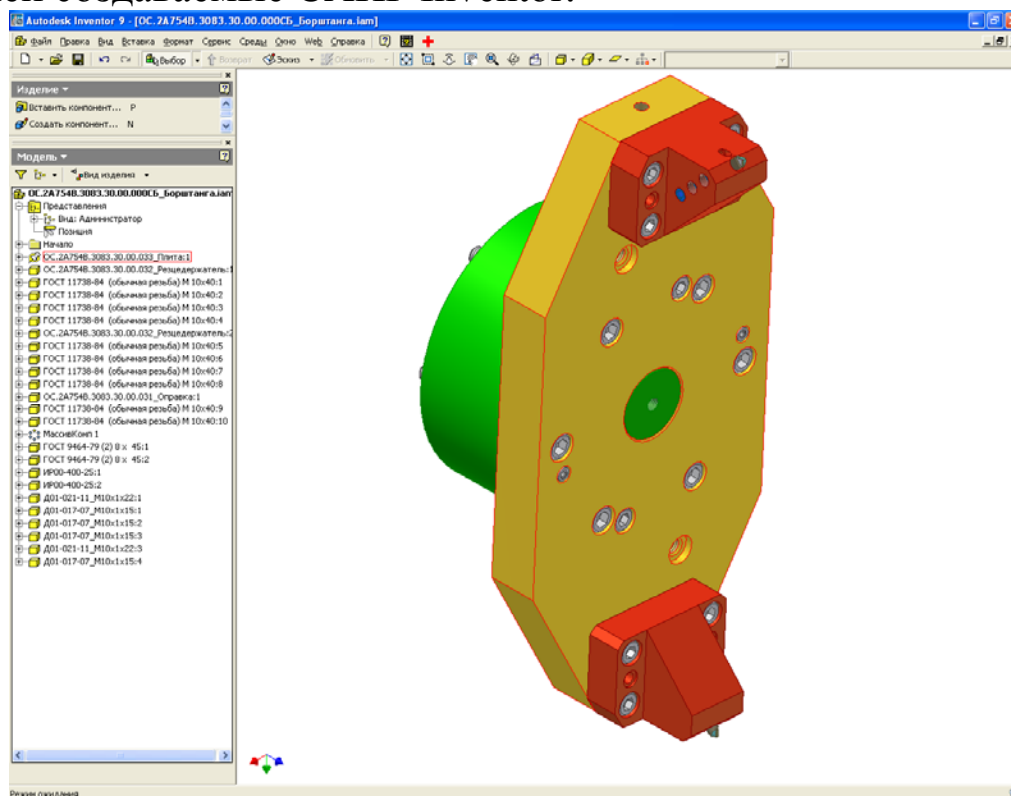


Рис. 3.22. Борштанга в сборе с крепежными элементами и резцами.

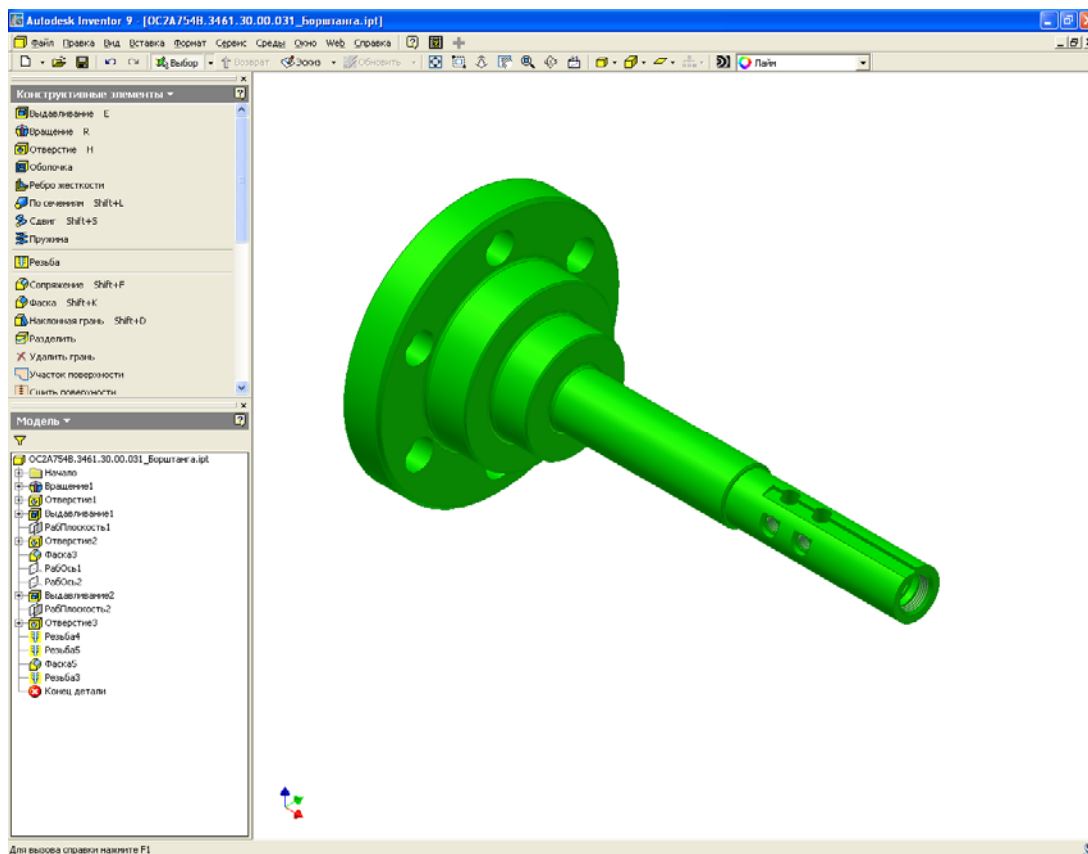


Рис. 3.23. Деталь борштанга.

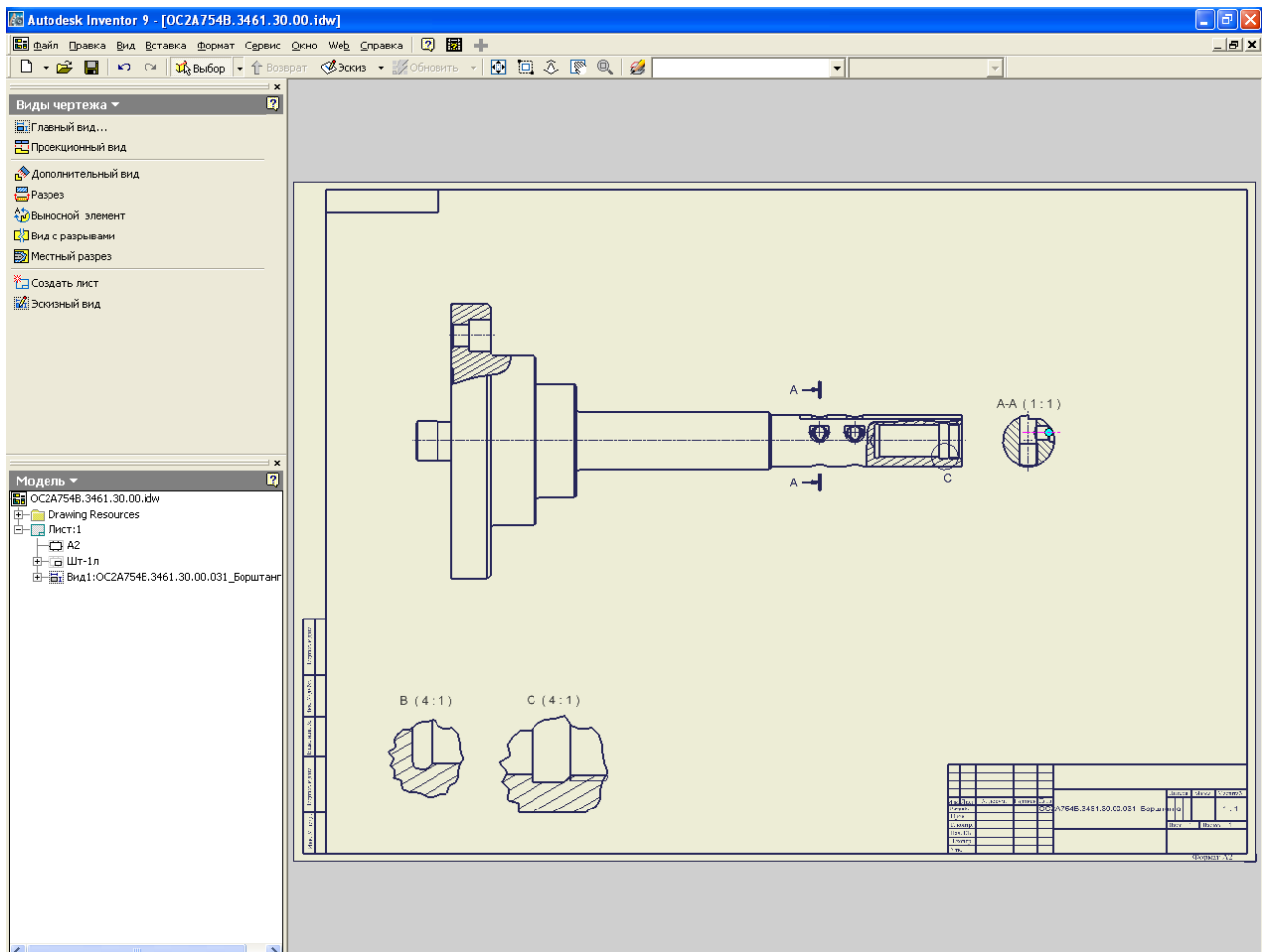


Рис. 3.24. Чертеж детали борштанги.

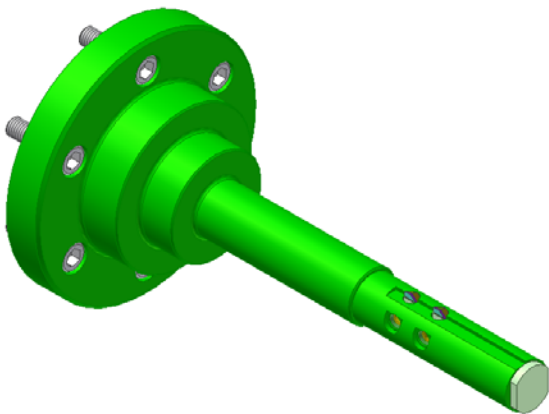


Рис. 3.25. Борштанга в сборе с элементами крепления и резцом в тонированном изображении.

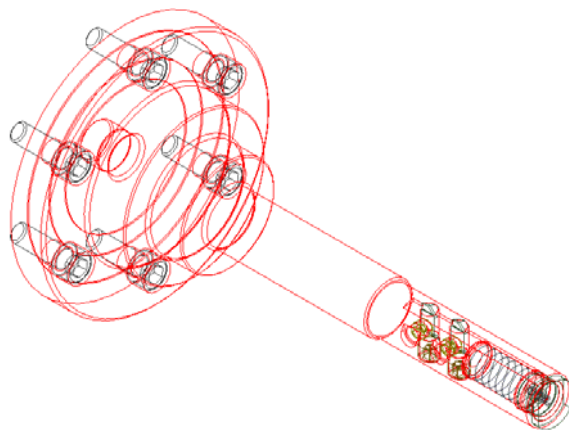


Рис. 3.26. Борштанга в сборе с элементами крепления и резцом в каркасном изображении.

Чертежные ресурсы

Отображение информации о форматах листов, рамках, основных надписях и эскизных обозначениях. Двойной щелчок на выбранном ресурсе вставляет его в чертеж.

Форматы листов: Отображение форматов листов, доступных для

создания чертежа. Форматы листов имеют стандартные размеры и содержат основные элементы оформления. На основе стандартного формата листа можно создавать новые форматы. Для этого необходимо внести требуемые изменения, затем щелкнуть правой кнопкой мыши на имени листа и выбрать «Создать формат листа».

Рамки. Отображение стандартной рамки и всех доступных пользовательских рамок чертежа.

1. Для вставки рамки чертежа нужно в папке браузера «Чертежные ресурсы» щелкнуть правой кнопкой мыши по имени рамки и из контекстного меню выбрать «Вставить рамку».
2. Для изменения свойств рамки по умолчанию нужно ее сначала удалить, а затем вставить новую рамку по умолчанию с требуемыми свойствами.
3. Для создания пользовательской рамки нужно из главного меню выбрать «Формат» > «Описать новую рамку». С помощью инструментов работы с эскизом, нарисовать новую рамку.
4. Для создания пользовательской границы зоны нужно из главного меню выбрать «Формат» > «Описать новую границу зоны». С помощью инструментов работы с эскизом, нарисовать новую границу зоны.
5. Для изменения количества зон и опций обозначения пользовательских границ зон нужно щелкнуть правой кнопкой мыши по имени рамки в браузере и выбрать «Изменить».

Основные надписи. Отображение основных надписей, которые можно вставить в чертеж.

1. Для изменения формата основной надписи нужно щелкнуть правой кнопкой мыши и выбрать команду «Редактировать». Редактирование осуществляется в режиме построения эскизов с помощью стандартных средств.
2. Для создания новой основной надписи нужно из главного меню выбрать «Формат» > «Описать новую основную надпись». Находясь в режиме построения эскизов, создать новую надпись.

Эскизные обозначения. Отображение эскизных обозначений, которые могут быть вставлены в чертеж. Эскизные элементы могут состоять из надписей и геометрических контуров.

1. Для создания эскизного обозначения нужно из главного меню выбрать «Формат» > «Описать новое обозначение». В режиме построения эскизов создать новое обозначение.
2. Для редактирования эскизного обозначения нужно щелкнуть пра-

вой кнопкой мыши и выбрать команду «Редактировать». Редактирование осуществляется в режиме построения эскизов с помощью стандартных средств.

Советы:

- Для копирования формата листа, рамки, основной надписи или эскизного обозначения из одного чертежа в другой нужно щелкнуть правой кнопкой по соответствующему чертежному ресурсу и выбрать «Копировать» из контекстного меню. После этого нужно открыть целевой чертеж, щелкнуть правой кнопкой мыши по соответствующему элементу браузера и выбрать «Вставить» из контекстного меню.
- Для переименования формата листа, рамки, основной надписи или эскизного обозначения нужно выбрать соответствующий элемент в браузере и после небольшой паузы снова щелкнуть по нему левой кнопкой мыши. После этого можно ввести новое имя.
- Для сортировки форматов листов, рамок, основных надписей или эскизных обозначений по имени нужно щелкнуть правой кнопкой мыши по соответствующей папке в браузере и из контекстного меню выбрать «Сортировка по имени».
- Для упорядочивания чертежных ресурсов нужно в браузере перетащить соответствующий элемент в нужное положение.

Отображение листов чертежа. Под именем листа в браузере приводится информация о рамке, основной надписи и видах листа. Открытый лист подсвечивается в браузере, все остальные листы затемняются.

1. Для работы с листом следует дважды щелкнуть мышью на его названии или щелкнуть правой кнопкой и выбрать команду «Активизировать».
2. Для создания нового формата листа на основе имеющегося нужно выбрать имя листа, щелкнуть правой кнопкой мыши и из контекстного меню выбрать «Создать формат листа».
3. Для изменения размера, ориентации и других параметров листа нужно выбрать его имя, щелкнуть правой кнопкой мыши и выбрать из контекстного меню «Редактировать лист».
4. Для переименования листа нужно выделить его имя и еще раз (после небольшой паузы) щелкнуть по нему левой кнопкой мыши.
5. Для удаления основной надписи нужно в браузере выбрать ее имя, щелкнуть правой кнопкой мыши и из контекстного меню

выбрать «Удалить».

6. Для редактирования текстовых полей основной надписи служит команда контекстного меню «Редактировать».

Перечень всех видов для каждого листа.

1. Для создания зависимого вида нужно щелкнуть правой кнопкой мыши по имени вида и выбрать «Создать вид». Выбрать из меню требуемый вид.
2. Для изменения названия, масштаба и других параметров вида нужно из контекстного меню вызвать команду «Редактировать вид».
3. Для выравнивания вида нужно из контекстного меню вида выбрать команду «Выравнивание» и далее один из трех вариантов.
4. Для отображения или скрытия размеров и пояснений к сварке нужно из контекстного меню вида вызвать команду «Видимость пояснений» и далее установить или снять нужный флажок. Select or remove the selection for the desired annotations.
5. Для переименования вида нужно выделить его имя и еще раз (после небольшой паузы) щелкнуть по нему левой кнопкой мыши.

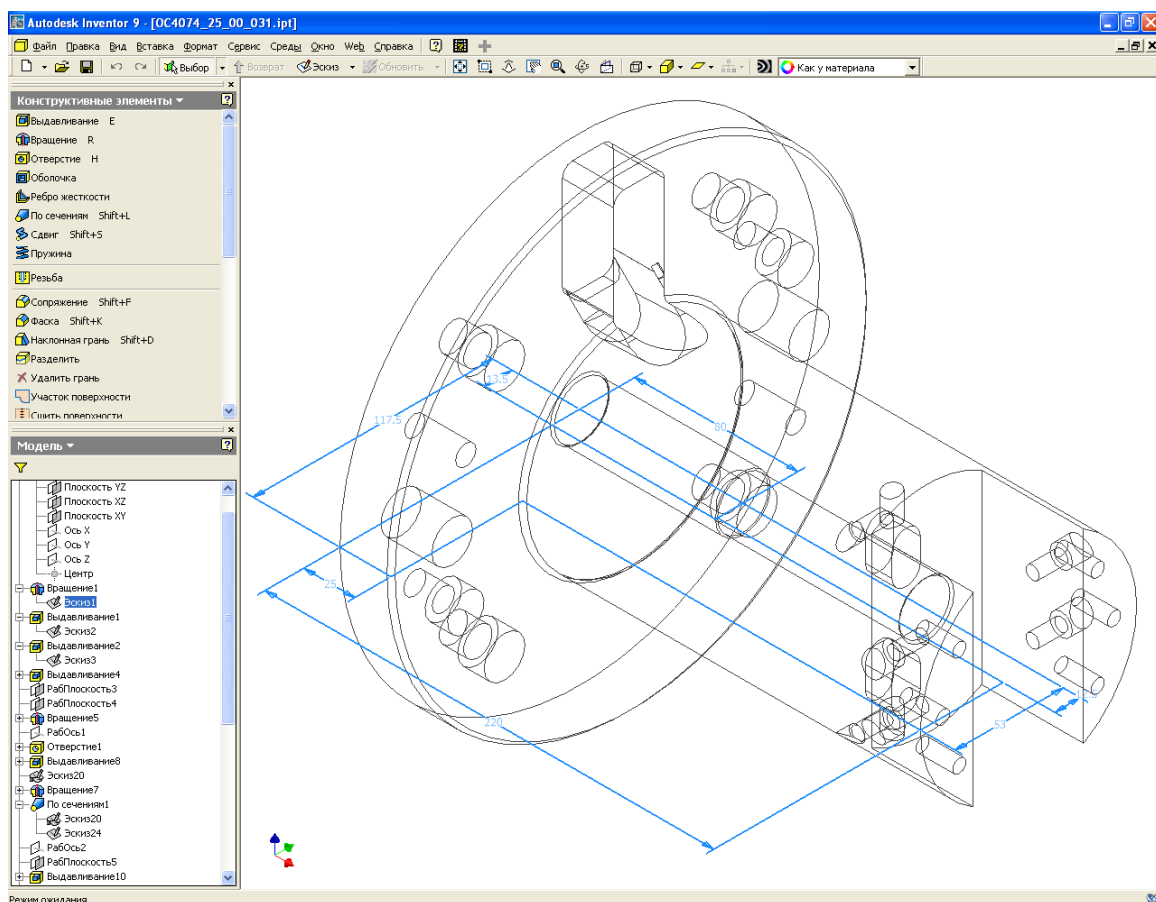


Рис. 3.27. Параметрический контур.

Рассмотрим последовательность создания изделия борштанга более сложной конфигурации. Вначале формируется модель типа тела вращения основной конструкции на основе параметрического контура, который показан на рис. 3.27. Затем создается параметрический контур, соответствующий прямоугольному пазу рис. 3.28. Последовательность создания модели показана в иерархической последовательности

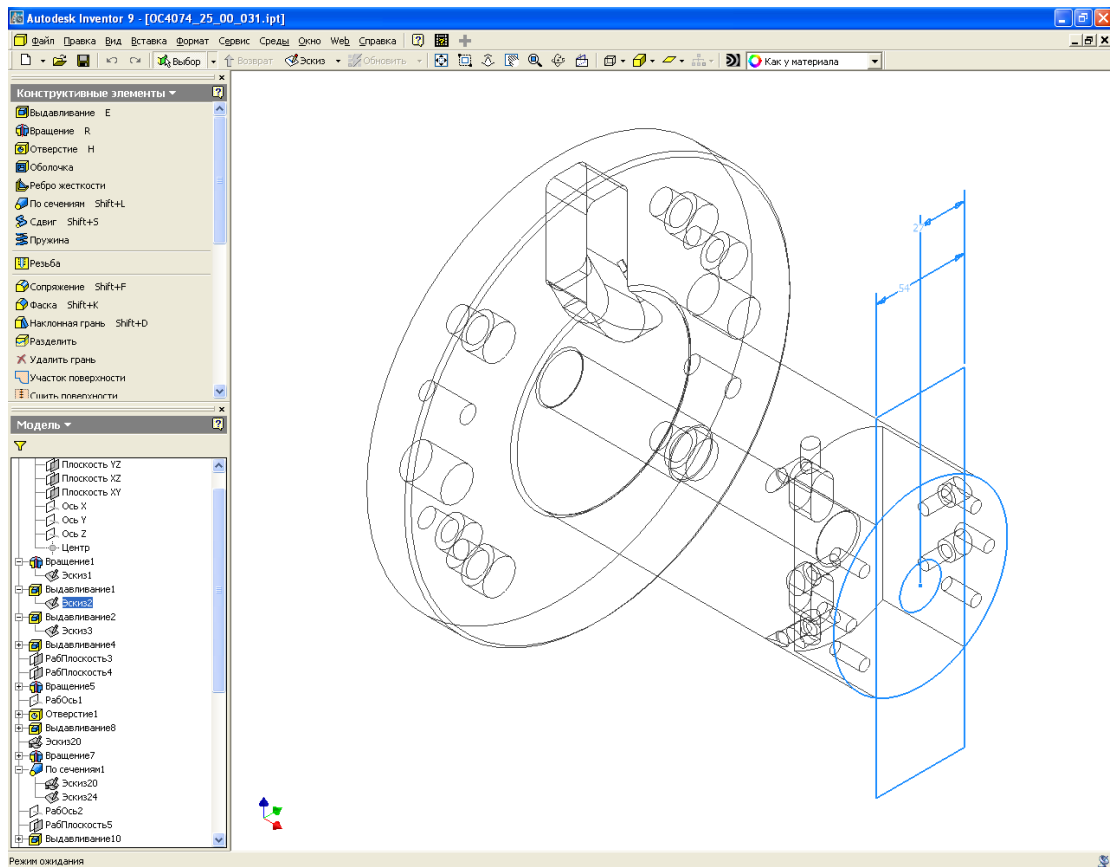


Рис. 3.28. Параметрический контур, соответствующий прямоугольному пазу.

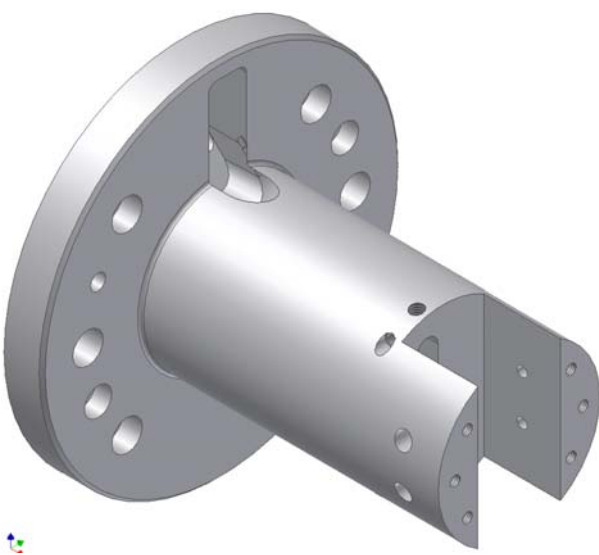


Рис. 3.29. Готовая деталь в тонированном изображении.

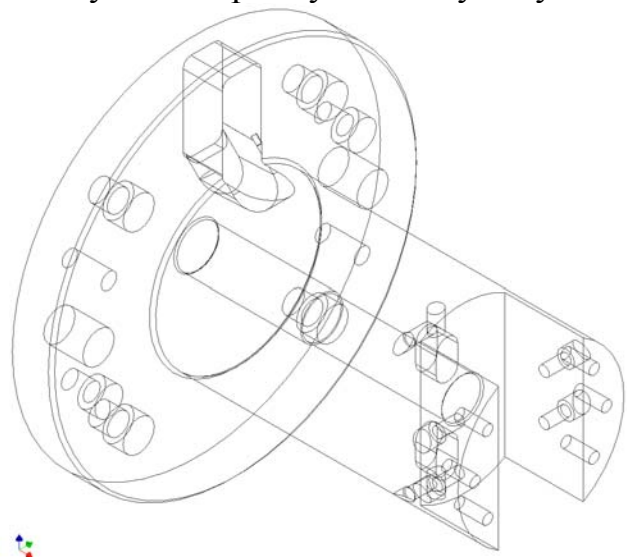


Рис. 3.30. Готовая деталь в каркасном изображении.

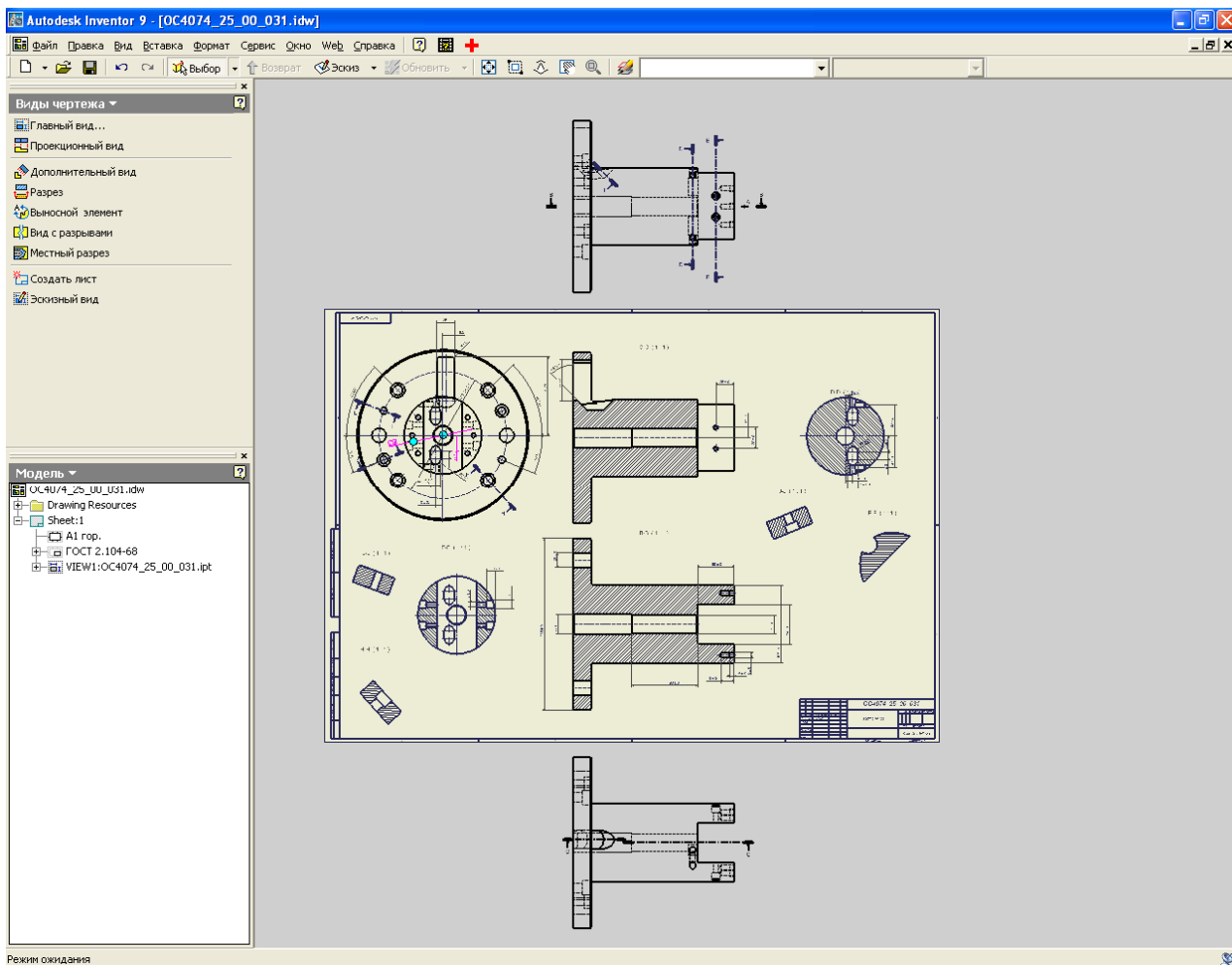
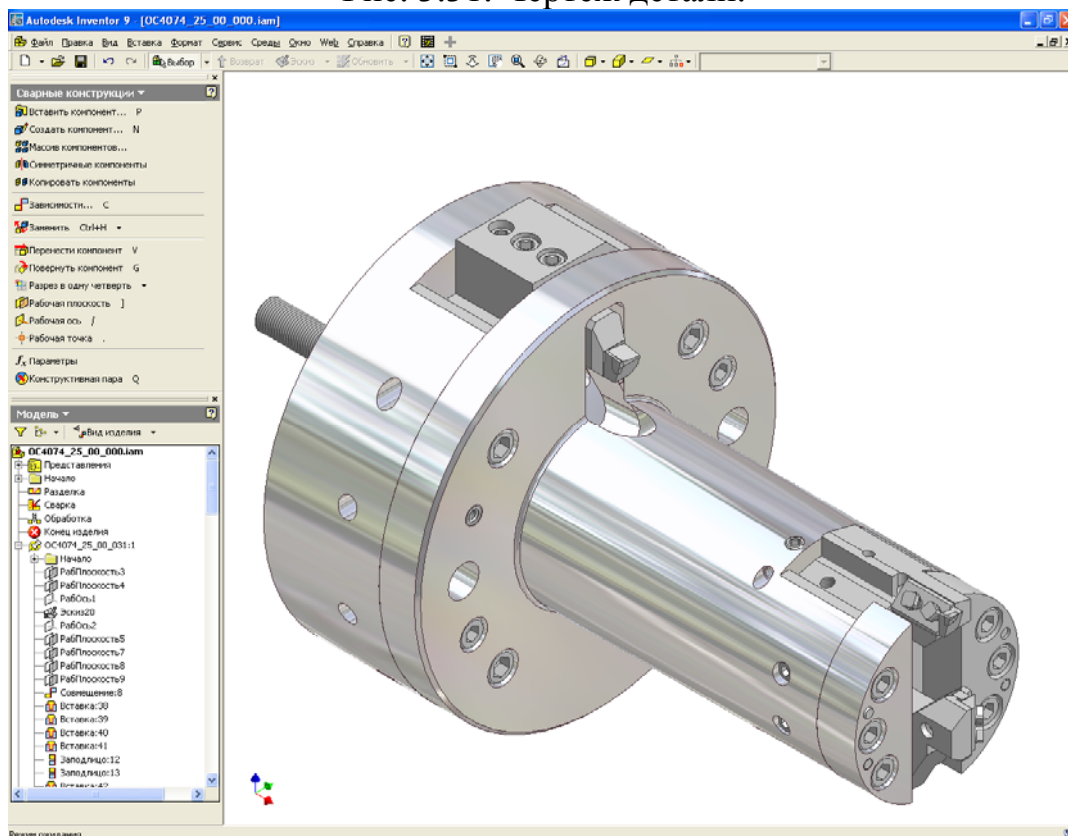


Рис. 3.31. Чертеж детали.



в соответствующем браузере, который расположен слева от области создания модели. На любом этапе создания трехмерной модели можно просмотреть и отредактировать необходимые параметры изделия, что снижает возможность выпуска детали не соответствующих размеров. Готовая деталь показана на рис. 3.29, рис. 3.30. На основании трехмерной детали разработан чертеж, содержащий 9 изображений, которые представляют собой виды, полные и местные разрезы. Чертеж подготовлен в отдельном файле документа рис. 3.31. Борштанга в сборе показана на рис. 3.32.

По сборочной модели можно составить таблицу составных деталей. Пример таблицы для изделия борштанга показан на рис. 3.33.

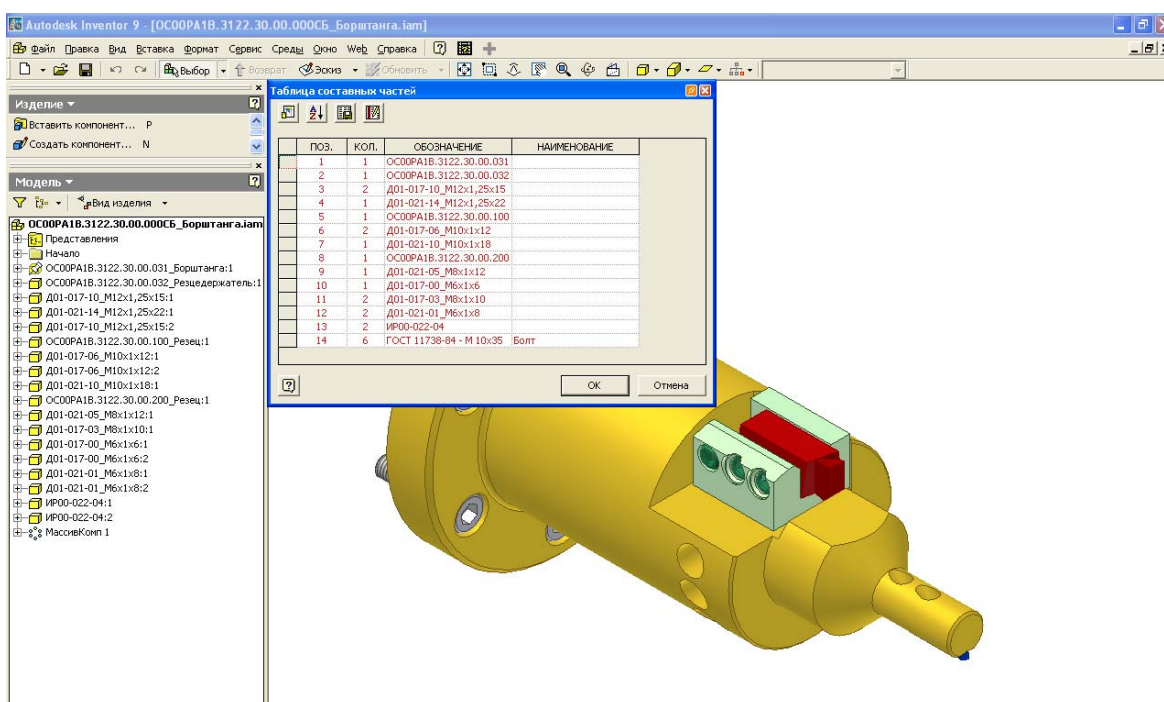


Рис. 3.33. Таблица для изделия борштанга.

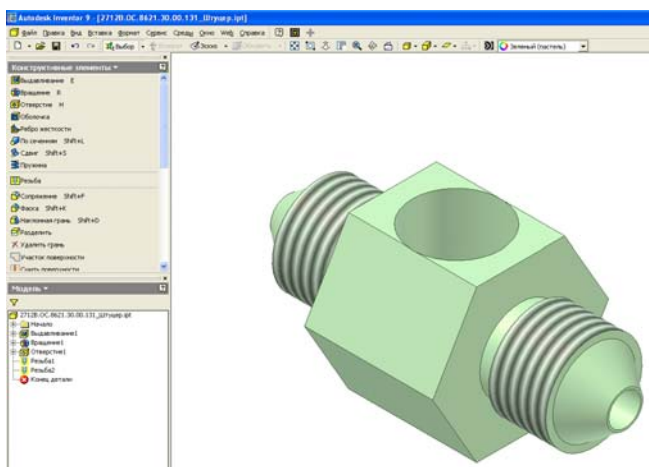


Рис. 3.34. Деталь штуцер.

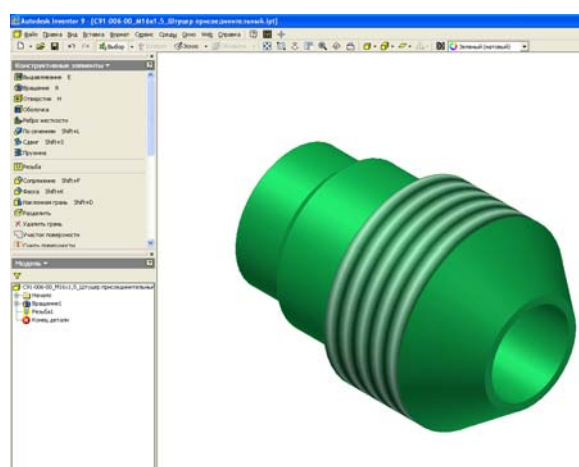


Рис. 3.35. Деталь штуцер присоединительный.

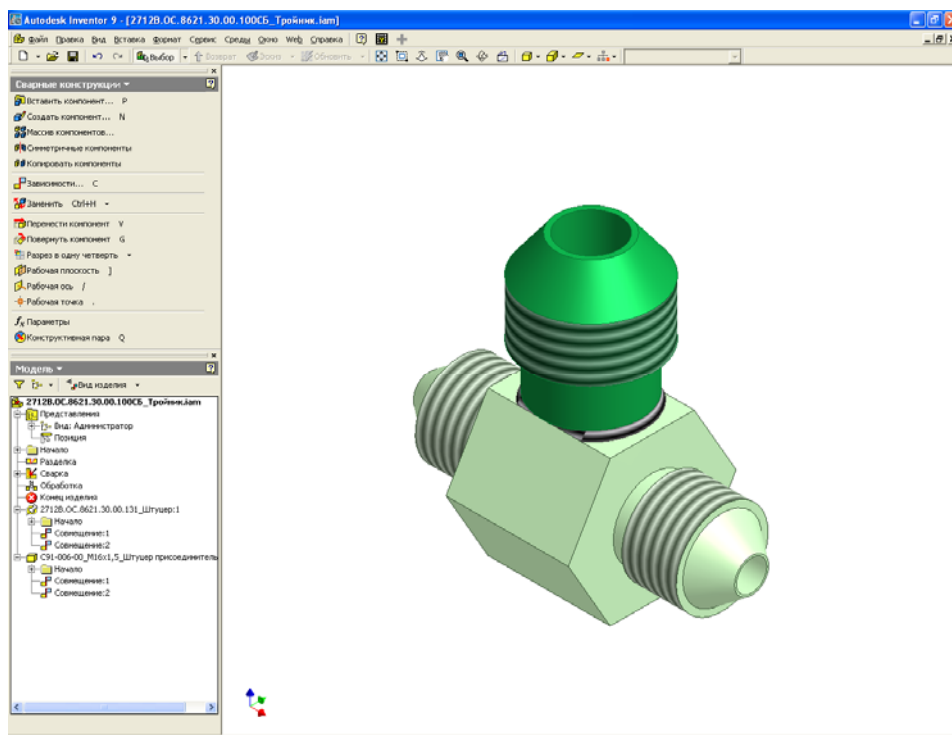


Рис. 3.36. Окончательный вид тройника.

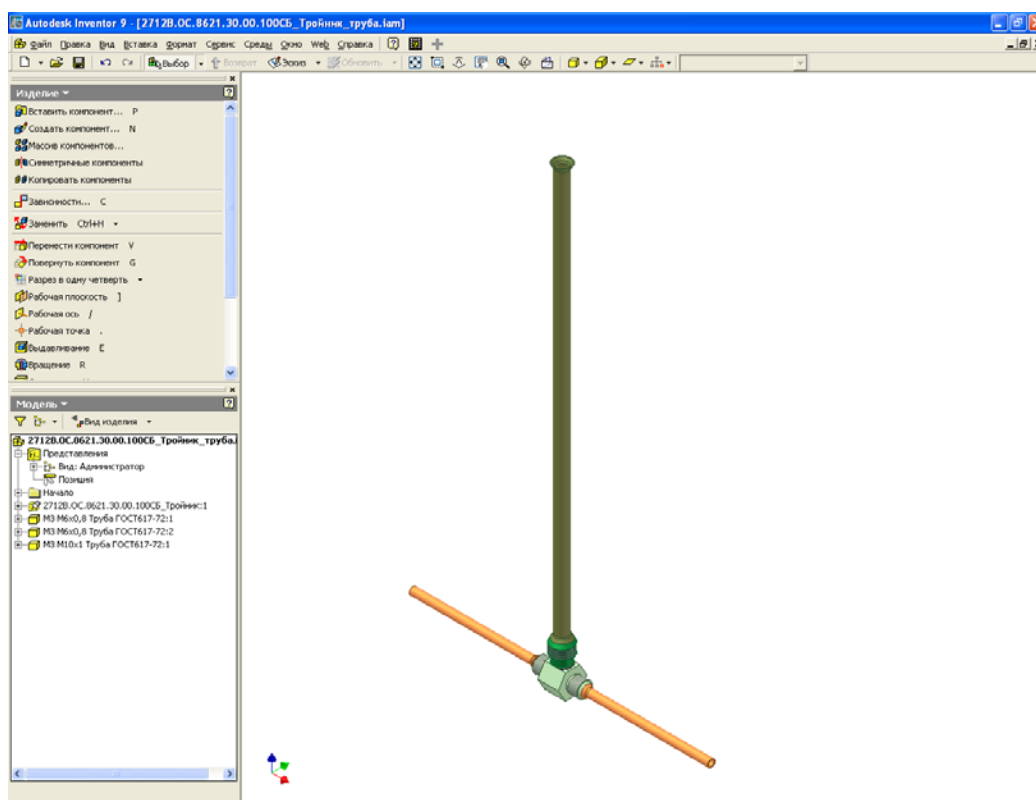


Рис. 3.37. Тройник в комплекте с соединительными трубками.

Рассмотренные модели деталей в основном были телами вращения. Примером многогранного объекта может быть штуцер рис. 3.34, который создается на основе выдавливания контура правильного шестиугольника. Последующим этапом выполняется формирование

резьбы и отверстий. Штуцер является одной из деталей сборочного узла тройник, в состав которого входит штуцер присоединительный рис. 3.35. Составные части тройника соединяются с помощью сварки. Окончательный вид тройника после сборки и выполнения сварки представлен на рис. 3.36. Тройник в комплекте с соединительными трубками показан на рис. 3.37. Тройник используется в борштанге, приведенной на рис. 3.9.

Примеры деталей на основе параметрических контуров с последующим выдавливанием, созданием различных полостей и отверстий представлены на рис. 3.38, рис.3.39.

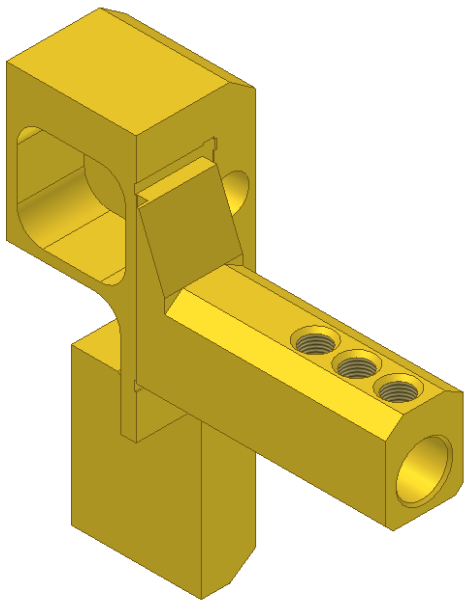


Рис. 3.38. Общий вид детали.

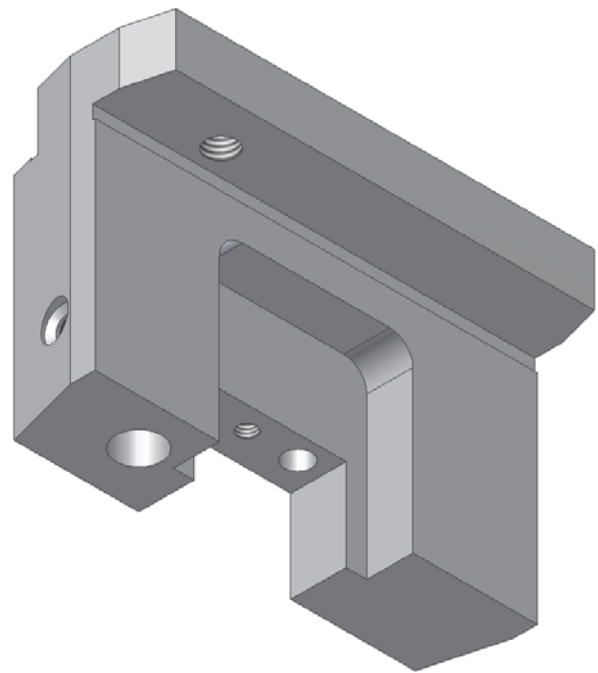


Рис. 3.39. Общий вид детали.

Расчет масс инерционных характеристик детали или узла позволяет выявить влияние применяемых материалов, допусков и других параметров на характеристики модели.

1. Выбрать компонент для анализа в браузере или в графической области.
2. Щелкнуть правой кнопкой мыши и выбрать «Свойства» из контекстного меню.
3. В диалоговом окне «Свойства» перейти на вкладку «Физические» и нажать «Обновить».

Анализ масс-инерционных характеристик помогает оценить, насколько разработанная модель соответствует реальному изделию. Для проверки модели можно рассчитывать масс-инерционные характеристики как отдельных деталей, так и целых узлов.

Для чего рассчитываются масс-инерционные характеристики?

Масс-инерционные характеристики компонентов полезны для расчета веса и объема изделия, местоположения центра масс (что особенно важно, например, при балансировке) и экспорта данных в другие приложения в целях дальнейшего анализа.

Можно назначать различным компонентам изделия различные материалы, задавать допуски и на этой основе рассчитывать следующие характеристики:

- центр масс;
- массу, объем и площадь поверхности;
- моменты инерции;
- главные моменты инерции;
- направления главных осей.

Большинство проектировщиков вставляют в изделие только одно вхождение мелкой детали (такой как заклепка или винт), зная, что в конечной модели потребуются тысячи вхождений этой детали. В спецификации можно заменить имеющееся в изделии количество вхождений требуемым числом, однако за преимущества быстрой загрузки и обновления изделия проектировщики расплачиваются точностью.

Необходимо помнить, что для того чтобы правильно рассчитать масс-инерционные характеристики, в изделие необходимо вставить все вхождения компонента (если не введены соответствующие переопределяющие значения).

Пользователь может переопределить массу и объем. Введением собственных значений можно уточнить массу и объем компонентов, которые нельзя смоделировать, таких как масло или смазка. Переопределенные значения также позволяют проводить более точное моделирование при работе с упрощенными изображениями, например, когда в изделиях, где несколько крепежных узлов изображены в виде перекрестий.

В сборочных узлах используются, различные литые детали, которые необходимо создавать при трехмерном моделировании. Пример литой детали с последующей обработкой показан на рис. 3.40. Данная деталь создана путем выдавливания с последующим редактированием с использованием команд сопряжение, фаска и отверстие.

САПР Inventor позволяет выполнять гнутые детали. На основании созданной детали можно получить развертки заготовки по заданным параметрам. Принцип работы и настройки с гнутыми деталями рассматривается далее.

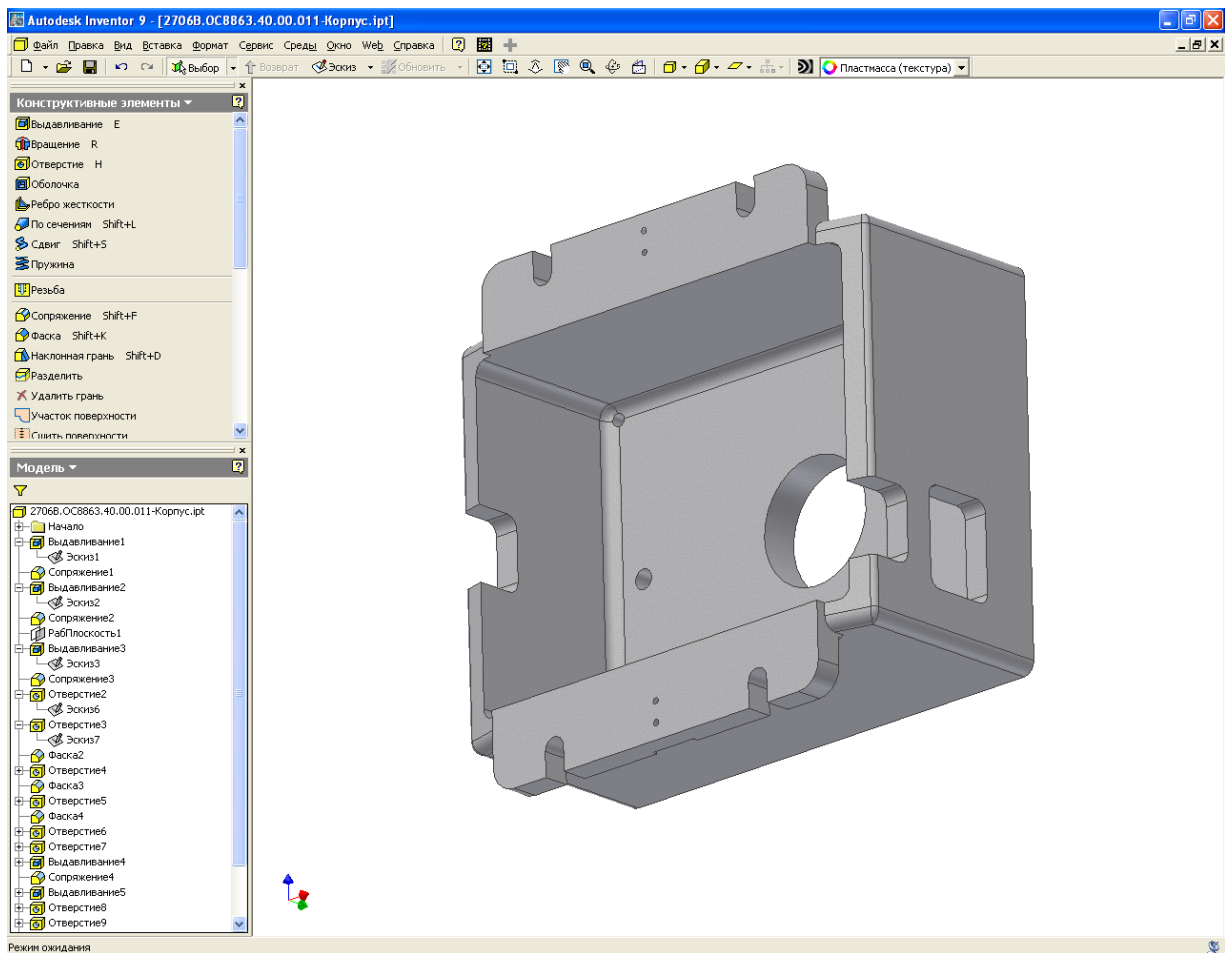


Рис. 3.40. Литая деталь.

Можно переопределить параметры по умолчанию, задающие метод получения развертки. Параметры для отдельных конструктивных элементов настраиваются на вкладке «Развертка». Параметры по умолчанию устанавливаются в диалоговом окне «Стили изделия из листового материала».

Вызов: Перейти на вкладку «Развертка» в любом из диалоговых окон работы с листовым материалом: «Сгиб», «Фланец с отгибом», «Грань», «Фланец», «Сгиб по линии» или «От бортовка».

Управление способом создания развертки. Выбрать способ в выпадающем списке.

По умолчанию: Использование установок текущего стиля.

Линейный: Использование линейного метода. Это значение можно задать в активном стиле или, если стиль подразумевает разные методы, выбрать из списка.

Табличный: Использование табличного метода. Это значение можно задать в активном стиле или, если стиль подразумевает разные методы, выбрать из списка.

Переходная область.

Управление типом переходной области для сторон сгиба.

При генерации развертки формируются два типа переходных областей. Для значений «Нет», «Пересечение», «Линейная» и «Дуговая» создается сплайновый переход. Для значения «Без высечки» переход не создается.

По умолчанию: Берутся параметры из текущего стиля.

Нет: Кромки соединены сплайном.

Пересечение: Кромки сходятся в зоне изгиба.

Линейная: Кромки соединены прямой линией.

Дуговая: Кромки соединены дугой.

Без высечки: Переходная область не создается.

Управление численными параметрами при формировании развертки. Выбрать одно из значений, заданных в активном стиле для указанного метода развертывания

Создание фланца с отгибом из разомкнутого эскиза в детали из листового материала. Можно также создать фланец с отгибом, который заканчивается на ребре уже существующей детали листового материала.

Вызов: Нажать кнопку «Фланец с отгибом» на инструментальной палитре «Листовой материал».

Форма фланца: Управление формой, изгибом и протяженностью фланца.

Форма: Определение формы, используемой для создания фланца с отгибом.

Эскиз: Задание разомкнутого эскиза, который будет использован для фланца с отгибом.

Кромка: Задание кромки существующей детали из листового материала, на которой будет заканчиваться фланец с отгибом.

Направление: Смена направления формирования фланца с отгибом.

Сгиб: Определение сгиба, применяемого к фланцу с отгибом.

Радиус: Здесь отображается радиус сгиба, установленный по умолчанию на основании текущих параметров листового материала. Если требуется, то ввести другое значение.

Стрелка рядом с полем позволяет воспользоваться средствами «Измерить», «Показать размеры» и «Список параметров». Можно сразу ввести числовое значение.

Удлинение и изгиб совмещенных граней: Добавление материала вдоль граней, соединяемых изгибом (а не по перпендикуляру к оси).

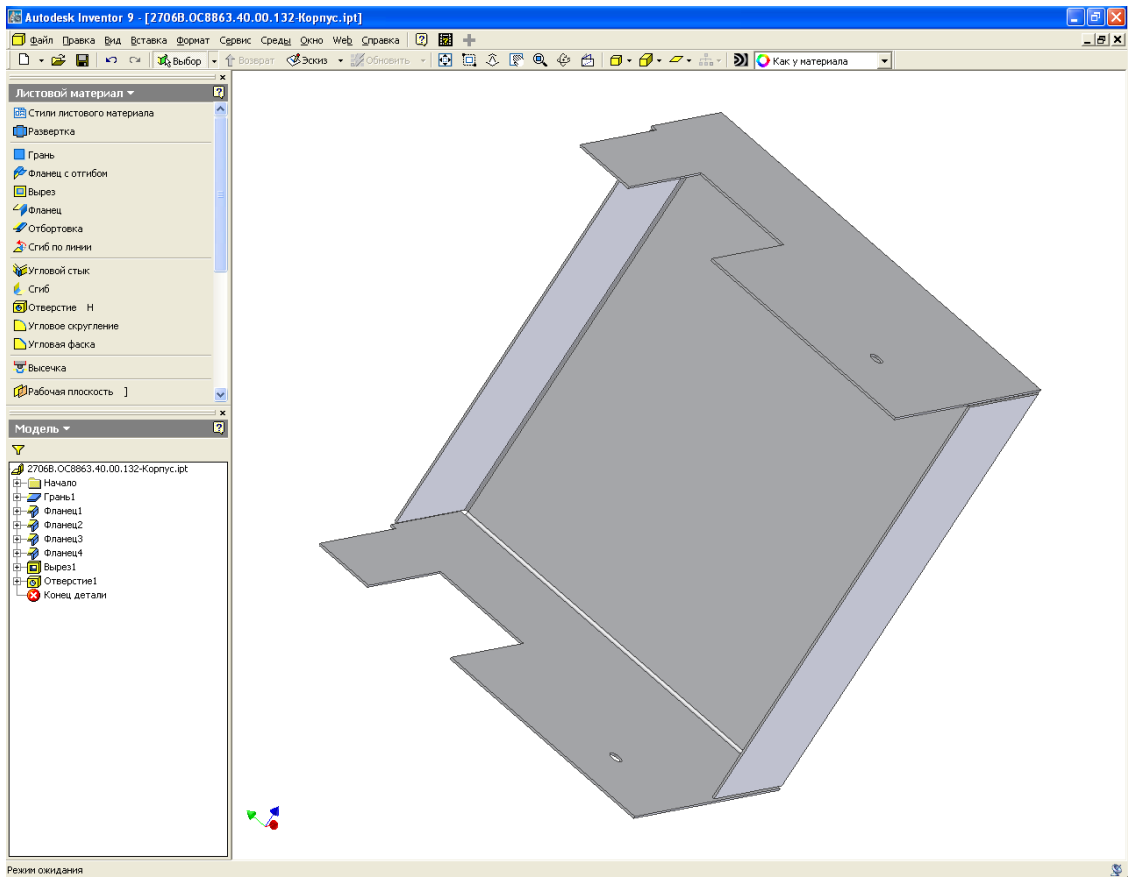


Рис. 3.41. Гнутая деталь «Корпус».

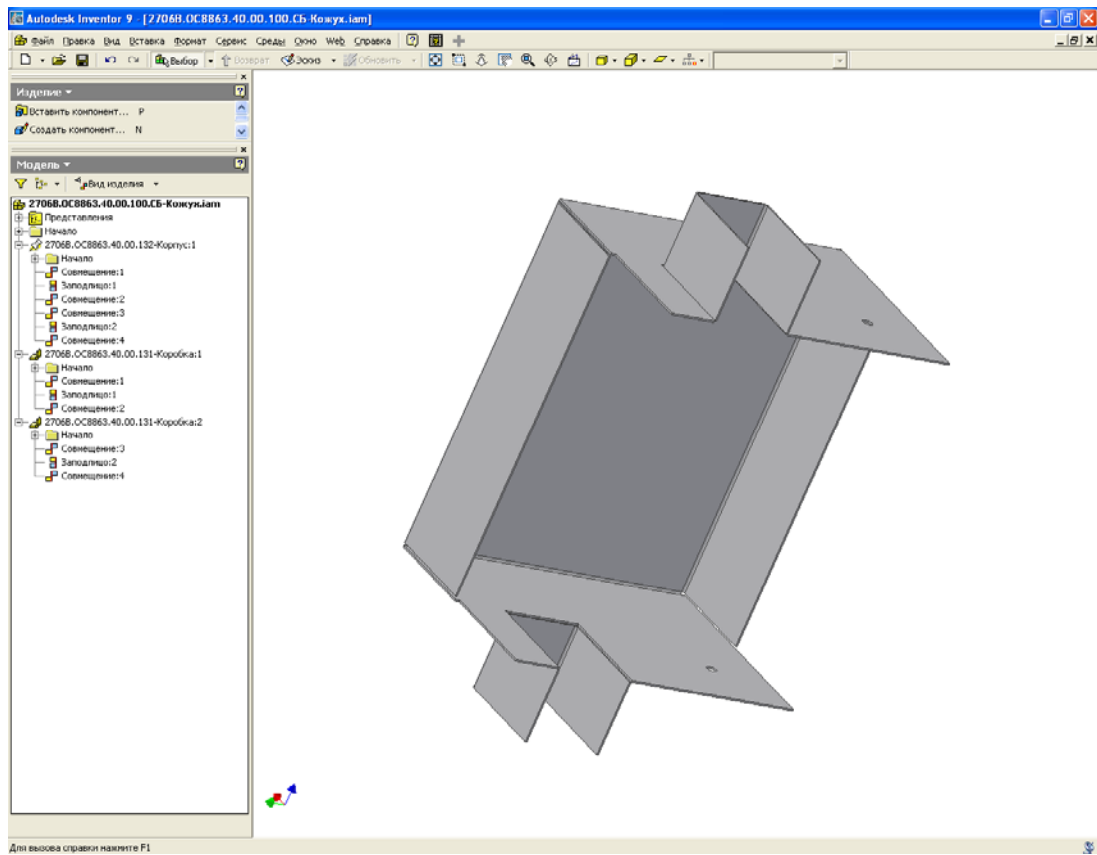


Рис.3.42. Объект «Кожух».

Определение протяженности фланца с отгибом при выбранном методе.

Кромка: Окончание фланца с отгибом на выбранной кромке.

Ширина: Задание смещения фланца с отгибом от начальной точки и его ширины.

Смещение: Задание смещений от начальной и конечной точки.

Длина: Задание длины и направления формирования фланца с отгибом.

Пример гнутой детали «Корпус» показан на рис. 3.41. Деталь «Корпус» входит в состав сборочной единицы «Кожух», в состав которого входят еще две гнутые детали «Коробка1» и «Коробка2». Отдельные элементы сборочного узла соединяются с помощью сварки. Объект «Кожух» в сборе показан на рис. 3.42.

Нами рассмотрены некоторые аспекты создания компьютерных трехмерных моделей отдельных деталей, их чертежей и создание сборочных узлов в САПР INVENTOR.

3.5. ПРИМЕРЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЕТАЛЕЙ, СБОРОЧНЫХ УЗЛОВ В САПР КОМПАС-3D И T-FLEX CAD

Создание трехмерных объектов в различных САПР подобны и отличаются в основном математическим ядром формирования трехмерной модели.

На рис. 3.43 приведен пример сборочного узла «Головки отделочно-расточной» выполненный в САПР T-Flex CAD. Все детали входящие в сборочный узел созданы этой же САПР, например деталь крышка рис. 3.44.

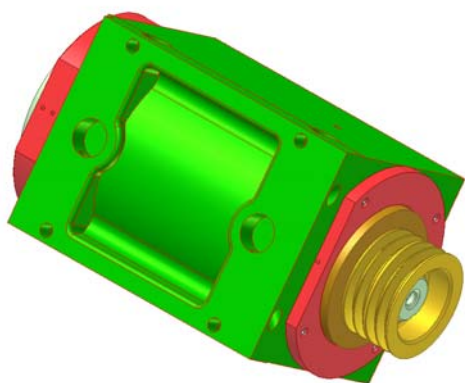


Рис. 3.43. Сборочный узел «Головка отделочно-расточная».



Рис. 3.44. Деталь крышка.

На рис. 3.45, рис. 3.46 приведен пример детали «Корпус», входящей в сборочный узел «Меритель» рис. 3.47, созданных в САПР КОМПАС-3D.

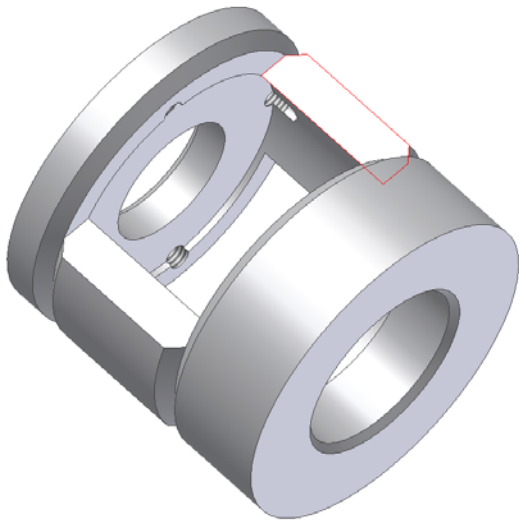


Рис. 3.45. Деталь «Корпус» в тонированном изображении.

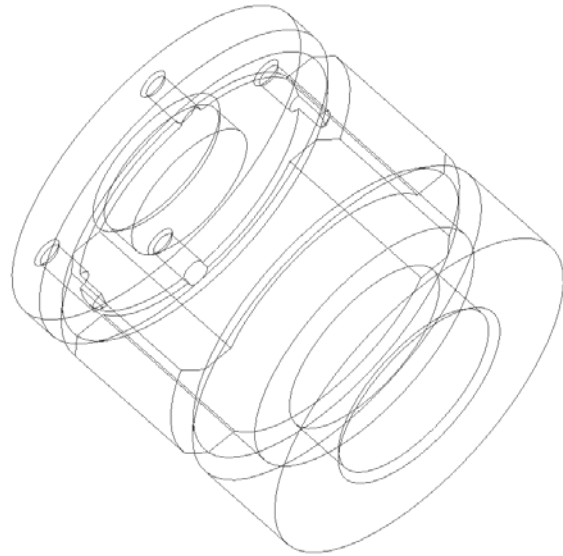


Рис. 3.46. Деталь «Корпус» в каркасном изображении.

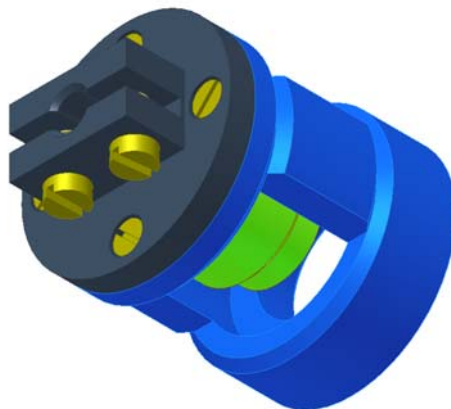


Рис. 3.47. Сборочный узел «Меритель».

На рис. 3.48, 3.49 приведен пример детали «Плита», входящей в сборочный узел «Привод» рис. 3.50. Обе модели созданы в САПР КОМПАС-3D.

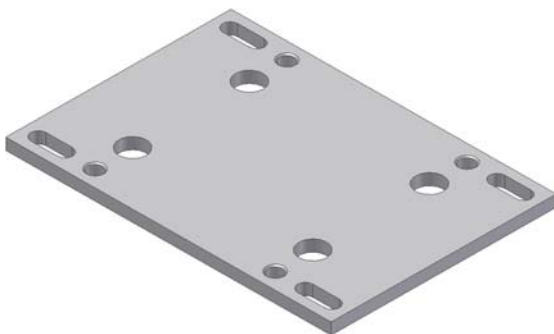


Рис. 3.48. Деталь «Плита» в тонированном изображении.

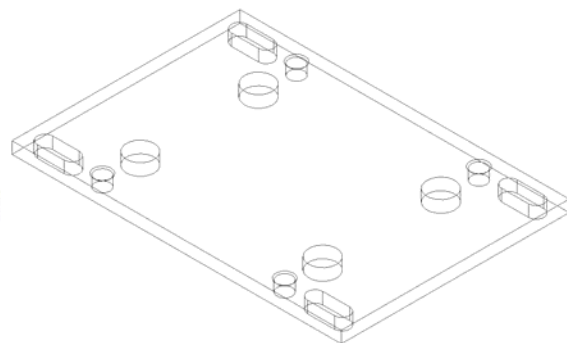


Рис. 3.49. Деталь «Плита» в каркасном изображении.

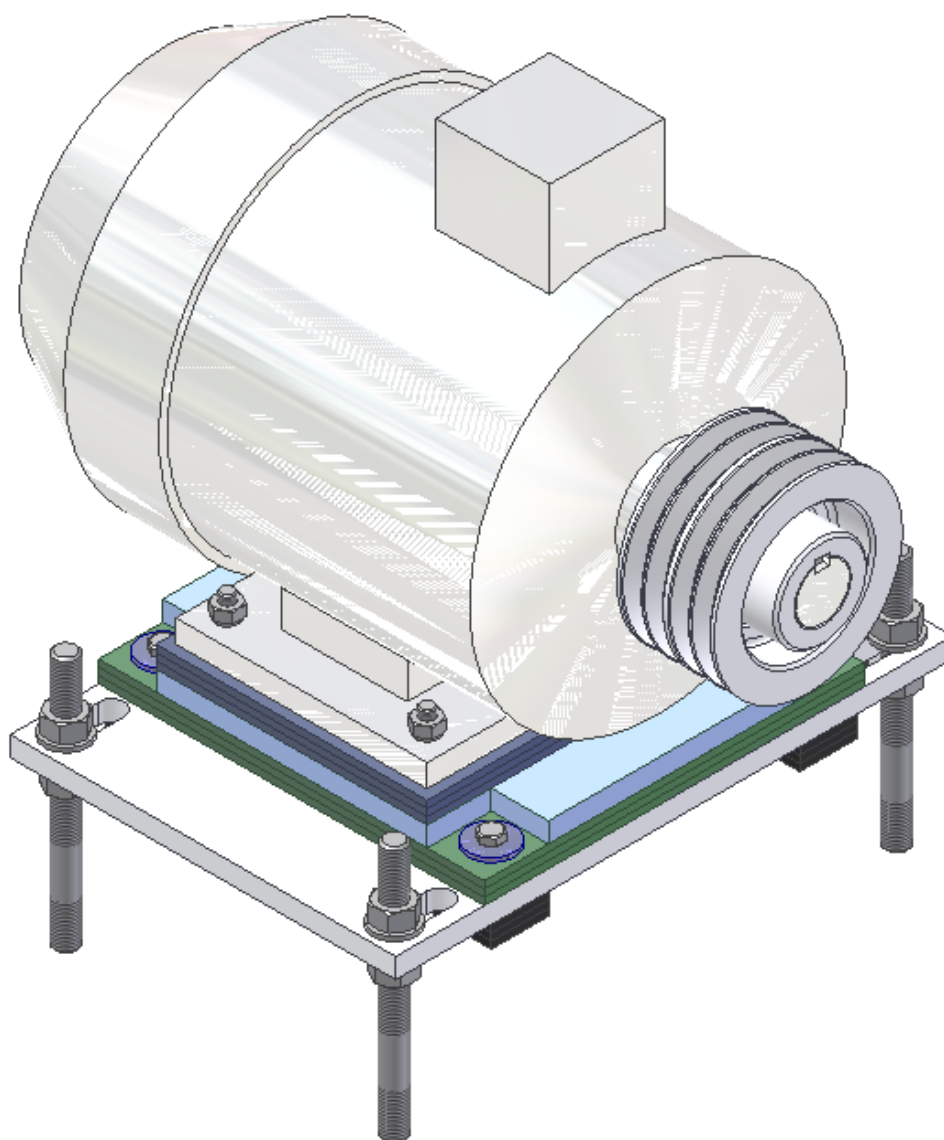


Рис. 3.50. Сборочный узел «Привод».

Таким образом в главе проведен обзор существующих направлений развития САПР в настоящее время. Рассмотрены их возможности и подходы к созданию трехмерных моделей и чертежей. Изложены общие подходы и алгоритмы при проектировании в различных системах автоматизированного проектирования, например AutoCAD, T-FLEX. САПР позволяет не только создавать компьютерные модели объектов и электронные чертежи, но и использоваться для решения различных инженерных задач. Приведен пример решения задачи оптимизации профиля заготовки с использованием САПР. Всесторонне на различных примерах рассмотрено выполнение элементов проектов с использованием САПР. Работа с САПР среднего уровня подобен для различных систем и отличается только математическим ядром, которое позволяет создавать компьютерные модели объектов. Исходя

из этого, подробно были рассмотрены примеры с использованием САПР INVENTOR фирмы Autodesk, которая является одной из наиболее популярных САПР среднего уровня. Кроме этого были рассмотрены примеры созданные в САПР КОМПАС-3D и T-FLEX. Рассмотренные примеры показывают возможности современных машиностроительных САПР при решении задач различного уровня сложности. Дальнейшее развитие современной промышленности невозможно без использования САПР. САПР позволяют производить различные расчеты, которые необходимы при конструировании. Появляется все большее количество различных библиотек готовых изделий, что позволяет ускорить процесс проектирования и повысить в нем значение творческой составляющей, переложив на компьютер рутинную и расчетную часть работы. Выбор системы САПР зависит от сложности решаемых задач и необходимости создания трехмерных моделей, только двухмерных чертежей или решение обеих задач с использованием различных расчетов. Надеемся, что предложенный раздел позволит облегчить выбор системы САПР для решения конкретных задач.

Автор главы благодарит Волкова А.А. за оказанную помощь при подготовке материала.

ЧАСТЬ 3

ЭТАПЫ СТАНОВЛЕНИЯ НАУЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ШКОЛ

ГЛАВА 1

ИТОГИ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

1.1. ИСТОРИЯ, ОСНОВОПОЛОЖНИКИ И ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ НАУКИ “ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ”

Технология машиностроения как наука призвана разработать теорию обеспечения качества изделий при наименьшей себестоимости их изготовления.

Технология машиностроения является прикладной наукой, вызванной к жизни потребностями промышленности. Она прошла в своём развитии через несколько этапов [352].

1. Предшествующий этап, накапливаемый человечеством тысячелетиями.
2. Подготовительный этап, начиная с появления первых токарных и сверлильных станков с ручным приводом в XII в. и кончая XVII столетием.
3. Накопительный этап (XVII - XIX вв.) характеризуется накоплением отечественного и зарубежного производственного опыта изготовления машин. В конце XVIII - начале XIX вв. в технических журналах и брошюрах публикуются описания процессов обработки различных деталей, применяемого оборудования и инструментов. Накопленный опыт впервые был описан в 1807 г. проф. Московского университета Двигубским И. В. в книге «Начальные основы технологии, или краткое описание работ на заводах и фабриках».
4. Первый научный этап (для России это 1880 - 1940 гг.) характеризуется обобщением и систематизацией производственного опыта и началом разработки общих научных принципов построения технологических процессов. Это труды профессоров Тиме И. И., Гавриленко А. П., Соколовского А. П., Каширина А. И., Кована В. М., Яхина А. И. Как итог этих работ в 1940 г. вышло поста-

новление Совета народных комиссаров СССР «О соблюдении технологической дисциплины на машиностроительных заводах». Это сыграло большую роль в повышении качества военной техники.

5. Второй научный этап (1941 - 1970 гг.) отличается разработкой новых технологических идей. Формируются теория точности обработки (профессора Соколовский А. П., Балакшин Б. С., Кован В. М., Колесов И. М., Корсаков В. С.), качества поверхности и ее влияния на эксплуатационные свойства деталей машин (профессора Дьяченко П. Е., Елизаветин М. А., Исаев А. И., Сулима А. М., Рыжов Э. В., Маталин А. М., Крагельский И. В., Проников А. С., Сатель Э. А.), теория технологической наследственности (профессора Дальский А. М., Ящерицын П. И.). Детально исследуются различные методы обработки: лезвийная (профессора Грановский Г. И., Зорев Н. Н., Коганов И. А., Кравченко Б. А., Лоладзе Т. И., Макаров А. Д., Подураев В. И., Исаев А. И., Резников Н. И., Родин П. Р., Силин С. С., Талантов Н. В. и др.), абразивная (профессора Якимов А. В., Худобин Д. В., Маслов Е. Н., Попов С. А., Семко М. Ф. и др.), отделочно-упрочняющая обработка ППД (профессора Алексеев П. Г., Коновалов Е. Г., Кудрявцев И. В., Папшев Д. Д., Проскуряков Ю. Г., Хворостухин А. А., Шнейдер Ю. Г., Юдин Д. Н.). Разрабатываются: групповая технология (профессор Митрофанов С. П.), адаптивное управление обработкой (профессора Балакшин Б. С., Соломенцев Ю. М., Базров Б. М.), научные основы сборки (профессора Новиков М. П., Корсаков В. С.). Первым результатом этих исследований и формирования технологии машиностроения как науки явилась книга Соколовского А. П. «Научные основы технологии машиностроения» (1955 г.).
6. Третий научный этап (1970 - 2000 гг.) характеризуется широким использованием достижений фундаментальных наук и вычислительной техники (профессора Аверченков В. И., Капустин Н. М., Митрофанов В. П., Павлов В. В., Соломенцев Ю. М., Тимирязев В. А., Цветков В. Д.) в технологии машиностроения. Существенно повышается теоретический уровень технологии машиностроения (профессора Бабичев Ю. П., Барзов Б. М., Барзов А. М., Безъязычный В. Ф., Белянин П. И., Бутенко В. И., Васильев А. С., Гик Л. А., Горленко О. А., Гусев А. А., Дальский А. М., Евсеев Д. Г., Зенкин А. С., Ильицкий В. Б., Карпов Л. И., Колобов А. А., Кор-

чак С. А., Косов М. Г., Кремень З. И., Латышев В. Н., Микитянский В. В., Михайлов А. Н., Новоселов Ю. К., Назаров Ю. Ф., Овсеенко А. Н., Оробинский В. М., Остафьев В. А., Попов М. Е., Рыжкин А. А., Султан-Заде И. Н., Смелянский В. М., Старков В. К., Степанов Ю. С., Суслов А. Г., Тамаркин М. А., Схиртладзе А. Г., Тернюк Н. Э., Тотай А. В., Улашкин А. П., Федоров В. П., Ямников А. С.). Разрабатываются и тщательно исследуются электрофизический, плазменный, ионный, лазерный и комбинированные методы обработки (профессора Барвинок В. А., Клименко С.А., Григорьев С. Н., ГригорьянцА. Г., Марков А. И., Мухин В. С., Коваленко В. Ф., Панфилов О. В., Смоленцев В. П., Харченков В. С. и др.).

Результаты этих работ частично нашли отражение в т. III-3 «Технология изготовления деталей машин» энциклопедии «Машиностроение», выпущенном в издательстве «Машиностроение» в 2000 г.

В настоящее время формируется четвертый научный этап развития технологии машиностроения, заключающийся в объединении технологий проектирования, изготовления и эксплуатации машин и в разработке научных основ по системному созданию новых технологических методов обработки, в том числе и механо-физико-химических, позволяющих обеспечить необходимые эксплуатационные свойства деталей машин, а также в разработке модульного принципа построения технологических процессов.

Становление промышленности привело к появлению науки о технологии машиностроения, которая стала ее движущей силой.

Анализ работ по технологии машиностроения, а также грантов и научно-технических публикаций по технологии машиностроения, научно-технических проектов по производственным технологиям показывает, что перспективными направлениями научно-технических исследований в технологии машиностроения являются [352]:

1. Новые наукоёмкие технологии в машиностроении.
2. Комбинированные методы обработки.
3. Технологическое обеспечение и повышение качества изделий машиностроения.
4. Технологическое повышение производительности и снижение себестоимости изделий машиностроения.
5. Совершенствование существующих и разработка новых энерго- и материалообеспечивающих технологических процессов изготовления изделий машиностроения.

6. Технологическое формирование поверхностных слоёв деталей машин различными методами: легирования, имплантации и нанесения покрытий.
7. Объединение проектирования, изготовления, эксплуатации и ремонта изделий машиностроения в единый технологический процесс.
8. Технологическое обеспечение закономерно-изменяющегося качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей машин.
9. Создание банка данных по технологическому обеспечению непосредственно эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений.
10. Технологическая наследственность от получения материалов до эксплуатации машин.
11. Новые типовые, групповые и модульные технологические процессы изделий машиностроения.
12. Создание адаптивных технологических систем.
13. Совершенствование и разработка новых САПР технологических процессов.
14. Технологические среды и самоорганизующиеся технологические системы.

При этом не исключается, а приветствуется открытие новых научных направлений, которые могут внести вклад в развитие технологии машиностроения как науки.

Жесткая конкурентная борьба машиностроительных предприятий в условиях открытой рыночной экономики, несомненно, приведет к востребованности технологической науки в нашей стране.

1.2. НАУЧНАЯ ШКОЛА ПРОФЕССОРА ЯКИМОВА АЛЕКСАНДРА ВАСИЛЬЕВИЧА

В предыдущем разделе были упомянуты основоположники тех или иных научных направлений в технологии машиностроения. Каждый из них, как правило, создал свою научную технологическую школу. Яркую и неповторимую научную технологическую школу создал профессор Якимов Александр Васильевич, под редакцией которого (совместно с профессором Новиковым Ф.В.) подготовлено настоящее 10-ти томное издание «Физико-математическая теория

процессов обработки материалов и технологии машиностроения».

Профессор Якимов А.В. – известный ученый и крупный специалист по технологии машиностроения, организатор научной школы и основоположник учения по финишным методам алмазно-абразивной об-



Якимов Александр Васильевич.

работки деталей машин, изготовленных из конструкционных машиноподелочных сталей, металлов и сплавов, в том числе из труднообрабатываемых материалов и материалов, склонных к образованию шлифовочных дефектов (прижогов и микротрещин). Стоявший у истоков созданных им научных направлений, он подготовил плеяду ученых и единомышленников, которые успешно работают, продолжая традиции его научной школы не только в Украине (Одесса, Харьков, Киев, Севастополь, Хмельницкий и др.), но также в России (Пермь, Ижевск, Москва, Луга, Волжский и др.) и других странах ближнего и дальнего зарубежья (в том числе США).

Александр Васильевич Якимов родился в г. Чермоз Пермской области в семье рабочего. Его отец работал прокатчиком на металлургическом заводе, мать была домохозяйкой. После окончания семи классов школы в 1939 году он поступил учиться в механический техникум. В 1943 году призван в ряды Советской Армии. Сначала в Челябинское авиационное училище штурманов (1943-1944 годы), а после окончания – в Высшую школу штурманов в г. Рязани (с 1944 по 1946 годы). В 1946 году демобилизовался и поступил работать конструктором на машиностроительный завод им. Я. М. Свердлова (1946-1952 годы) в г. Перми. Одновременно поступил учиться на заочное отделение моторного факультета Московского авиационного института (МАИ). После окончания МАИ (в декабре 1952 года) поступил в аспирантуру МАИ на кафедре “Производство авиадвигателей”. В 1956 году в МАИ защитил кандидатскую диссертацию по теме “Исследование жесткости металлорежущих станков типа МААГ”. После окончания аспирантуры в 1956 году был направлен на работу в Запорожский машиностроительный институт, где работал сначала

старшим преподавателем (с 1956 по 1958 годы) и по совместительству заместителем декана механико-технологического факультета (МТФ), а затем – доцентом кафедры “Станки и режущий инструмент”. В 1961 году по конкурсу перешел работать в Пермский политехнический институт (ППИ) сначала в должности доцента кафедры “Станки и режущий инструмент” (1961-1963 годы) и по совместительству деканом МТФ, а затем (с 1963 по 1974 годы) – заведующим кафедрой “Технология машиностроения”. Работая заведующим кафедрой, Якимов А.В. смог объединить научные интересы кафедр технологии машиностроения, физики, автоматики и телемеханики, металловедения и термической обработки, сопротивления материалов, металлорежущих станков и инструментов. Это творческое объединение позволило, с одной стороны, повысить научный и теоретический уровень работ, выполняемых для промышленности, с другой – создать условия для роста кадров. Так в 1963 году была защищена кандидатская диссертация по тепловым процессам при шлифовании заведующим кафедрой физики Сипайловым В. А., который в 1973 году успешно защитил докторскую диссертацию на тему “Основы теории тепловых процессов при шлифовании металлов”. Под руководством Якимова А. В. успешно выполняли научные работы многие другие сотрудники указанных кафедр и промышленных предприятий. Например, старший преподаватель кафедры физики Ханжин Н.Н. в 1968 году защитил кандидатскую диссертацию по тепловым процессам при резьбошлифовании. Старший научный сотрудник Головизин А.С. (завод им. Я. М. Свердлова) защитил диссертацию по шлифованию конических зубчатых колес с круговыми зубьями. Сотрудник кафедры автоматики и телемеханики ППИ Зуев В.Н. и аспиранты кафедры технологии машиностроения Бояршинов Ю.А., Перов Э.Н., Ушаев Л.В. по заказу Московского завода шлифовальных станков МСЗ разработали адаптивные системы управления качеством поверхностного слоя при зубошлифовании для станков типа МААГ (мод.5851) и Найльс (мод.5831). Аспиранты Потемкин В.И., Кудашкин В.Н., Вечер Р.И. обосновали область рационального применения прерывистых кругов при шлифовании инструментов, штампов и деталей турбобуров. Аспиранту Казимирчику Ю.А. впервые удалось произвести измерение температуры в области единичного зерна при шлифовании. Аспиранты Костин Н.В. и Грисенко Е.В. провели комплексное исследование процесса ленточного прерывистого шлифования жаропрочных и титановых сплавов, а также древесно-стружечных плит. Аспирант

Кигель И.Г. обосновал возможность и эффективность применения прерывистых алмазных кругов при шлифовании твердых сплавов. Сотрудник кафедры физики Ярмонов Н.А. провел теоретическое исследование процесса шлифования труднообрабатываемых материалов прерывистыми и композиционными кругами. Так под руководством Якимова А. В. начинает формироваться научная школа по тепловым явлениям при шлифовании и управлению качеством поверхностного слоя деталей машин.

Здесь следует отметить, что ученые десятилетиями бились над решением проблемы управления качеством поверхностного слоя деталей машин при шлифовании. До 35-40 % дорогостоящих деталей, имеющих высокую точность после шлифования, уходило в неисправимый брак. Причина – скрытые от глаза прижоги и микротрещины, возникающие при обработке металлов и сплавов абразивными инструментами под воздействием высоких температур в зоне резания. Многомиллионные убытки воспринимались как неизбежное зло. Даже подбор заниженных, так называемых «щадящих», режимов шлифования, в несколько раз снижающих производительность обработки, не позволял полностью устранить шлифовочные дефекты. Как следствие, долговечность подшипников снижалась в 3 раза, зубчатых колес – в 5-8 раз, стойкость штампов – в 30 раз. Системный подход к решению комплексной проблемы позволил уже в те годы осуществить прорыв в технологии шлифования ответственных деталей машин и сформулировать основные направления по автоматизации шлифовальных станков и технологии изготовления абразивного инструмента. Метод прерывистого шлифования, предложенный группой ученых под руководством заведующего кафедрой технологии машиностроения ППИ Якимова А. В., позволил решить проблему. Сущность метода можно понять при сравнении времени теплового насыщения (время, в течении которого температура шлифования достигает установившегося значения) с временем действия теплового источника в зоне контакта круга и заготовки. Поскольку указанные промежутки времени сопоставимы по величине, то появляется возможность управлять теплонапряженностью прерывистого шлифования за счет регулирования количества и размеров режущих выступов на абразивном или алмазном шлифовальном круге. Новаторская технологическая идея прерывистого шлифования легла в основу докторской диссертации Якимова А. В., которую он защищает в 1970 году в МАИ по теме “Технологические основы процесса шли-

фования кругами с прерывистой рабочей поверхностью”. В 1972 году ему присваивают ученое звание профессора.

С 1974 года научная и педагогическая деятельность профессора Якимова А. В. продолжается в Одесском политехническом институте (ныне Одесский национальный политехнический университет, далее ОНПУ), куда он приглашен по конкурсу на должность заведующего кафедрой технологии машиностроения и где продолжает успешно руководить созданной им научной школой. Вслед за своим учителем потянулись в Одессу из Перми сотрудники ППИ: Евсин Е.А., Мубаракшин Р.М., Гольдин Г.В., Чистяков М.В., Политов М.Ф., Маленьких С.М., Стефаненков П.Н., Бахвалов В.А., Ложкина Л.А. (кафедра технологии машиностроения), Паршаков А.Н. (кафедра физики), Донсков А.С. (кафедра динамики и прочности машин), Свирщев В.И. (кафедра теории механизмов и машин), Ларшин В.П. (кафедра автоматике и телемеханики). Кроме того, в аспирантуре Одесского политехнического у профессора Якимова А. В. обучились и стали кандидатами наук Бирюков П.К. (г. Лысьва), Коротков В.С. (г. Днепропетровск), Мокронос Л.А. (г. Свердловск), Сиротин В.П. (г. Волжский), Наумов А.К. и Шамлиев В.К. (г. Севастополь) и другие. Каждый из перечисленных аспирантов внес в совершенствование технологии шлифования и других финишных методов обработки свой научный вклад. Например, Евсин Е.А. разработал оригинальный способ управления теплонапряженностью процесса алмазного выглаживания, что позволило решить проблему увеличения производительности этого метода упрочняющей финишной обработки (после защиты диссертации Евсин Е.А. возглавил кафедру технологии машиностроения ППИ). Стефаненков П.Н. разработал новый способ нанесения регулярного рельефа на рабочую поверхность шлифовального круга, используя для этой цели автоколебания в системе. Бахвалов В.А. установил связь структуры материала с предрасположенностью его к трещинообразованию при шлифовании и предложил пути устранения влияния технологической наследственности. Паршаков А.Н. выполнил комплекс теоретических исследований тепловых явлений, установил связь свойств упругодемпфирующих элементов с качеством поверхностного слоя деталей при шлифовании. Политов М.Ф. разработал способ упрочняющего шлифования и обосновал метод управления физико-механическими свойствами упрочненного «белого» слоя путем применения адаптивной системы управления. В помощь аспирантам привлекались

инженеры-исследователи кафедры технологии машиностроения Одесского политехнического института (ОПИ), каждому из которых профессором Якимовым А. В. была определена область будущей диссертационной работы, подкрепленная запросами машиностроительных предприятий. Темы диссертационных работ получили и преподаватели этой кафедры. В последствии аспирантами стали сотрудники кафедры (Ница А.Н., Шарков В.А., Буюкли И.М., Новак Г.А., Усов А.В., Наддачин В.Б., Ковальчук Е.Н., Анельчик В.Д., Сазонов И.П., Соловьева Л.П., Соколов В.Ф.), а также работники предприятий: Ткаченко Б.О. (Одесский завод “Стройгидравлика”), Мещанинец А.А. (Генеральный директор производственного объединения “Термопластавтомат” в г. Хмельницкий) и иностранец Рахмани Абдул Кудус (Афганистан).

Развивая идеи своей докторской диссертации, профессор Якимов А. В. успешно руководит аспирантами и докторантами, которые всесторонне изучают различные аспекты технологии прерывистого шлифования, а также разрабатывают методы автоматического управления качеством поверхностного слоя ответственных деталей машин при их финишной обработке. По этим направлениям защищаются десятки кандидатских диссертаций, а также докторские работы. Широкое внедрение в 70-е и 80-е годы алмазных шлифовальных кругов (проектирование новых конструкций алмазных кругов проводилось в Институте сверхтвердых материалов АН УССР под руководством профессора Якимова А. В.) дало процессу прерывистого шлифования новый импульс для дальнейшего развития. Оказалось, что помимо снижения теплонапряженности и увеличения режущей способности прерывистых алмазных кругов, метод прерывистого алмазного шлифования позволяет существенно экономить дорогостоящее алмазное сырье – природные и искусственные алмазы. Например, при изготовлении прерывистых алмазных кругов одно и тоже количество алмазного сырья позволяет изготовить на его основе большее количество алмазных прерывистых кругов (по сравнению с аналогичными сплошными кругами). Успешное внедрение прерывистых алмазных кругов на многочисленных самолето-, моторо- и станкостроительных заводах послужило убедительным обоснованием для присвоения профессору Якимову А. В. почетных званий Заслуженного деятеля науки и техники Украины (1982 год) и Лауреата государственной премии Украины (1986 год). Лауреатами государственной премии Украины стали руководимые им исследователи из

Института сверхтвердых материалов (г. Киев), НИАТ (г. Москва), НИИ деревообработки (г. Киев) и УралВНИИАШ (г. Челябинск).

В Одесском политехническом окончательно сформировались два основных научных направления исследовательских работ по управлению процессами абразивно-алмазной обработки: внесение в технологическую систему новых конструктивно-технологических элементов (прерывистое шлифование, упругодемпфирующее крепление инструмента, новые технологии правки шлифовальных кругов, технологические смазочные составы и т.п.) и автоматическое (адаптивное, интеллектуальное, компьютерное) управление процессом алмазно-абразивной обработки на основе использования информации, возникающей при обработке. В первом случае управление является разомкнутым (без использования обратной связи по технологическим параметрам), во втором – замкнутым (корректировка процесса обработки производится при помощи цепи обратной связи). По обоим этим направлениям под руководством профессора Якимова А. В. выполняются кандидатские диссертации, а в 1995 году – обобщающая докторская работа Ларшина В.П., объединившая оба направления в единую интегрированную технологическую систему, в которой учитывается единый механизм производства и его подготовки. Было установлено, что за счет общей (в отличие от частичной) оптимизации эффективность интегрированных систем оказывается выше, чем эффективность обособленных систем проектирования и обработки. Новый подход к автоматизации проектирования и производства соответствовал перспективному направлению в технологии машиностроения – разработке интегрированных производственных систем (в зарубежной литературе такие системы получили название Computer-Integrated Manufacturing Systems) на основе всестороннего использования компьютерных технологий как на подготовительной, так и на исполнительной фазе производственного процесса. Практическому осуществлению этого похода способствовали быстрые темпы развития аппаратного и программного обеспечения компьютерных систем с открытой архитектурой. В настоящее время интегрированные производственные системы получили дальнейшее развитие в виде CALS технологий (Continuous Acquisition and Life cycle Support- непрерывная информационная поддержка жизненного цикла изделия).

В 1998 году профессор Якимов А. В. становится действительным членом Инженерной Академии Украины. К этому времени он – автор

многочисленных монографий, учебных пособий и учебников. Участие его в работе Инженерной Академии Украины приводит к возникновению еще одного направления научно-просветительской деятельности профессора Якимова А. В. – организация и проведение в Украине крупных Международных научно-технических конференций по тематике технологии машиностроения. Постоянными становятся Международные научно-технические конференции “Физические и компьютерные технологии”, проводимые под научным руководством профессоров Новикова Ф. В. и Якимова А. В. два раза в год в г. Харькове на базе Харьковской научно-производственной корпорации “ФЭД”. Эта была идея именно Якимова А. В. провести в таком большом индустриальном городе как Харьков серию научно-технических конференций с целью популяризации научных разработок и вовлечения в научную среду творческой молодежи. Ставилась задача акцентировать внимание на применение фундаментальных физико-математических подходов для решения технологических задач, чтобы как можно быстрее перевести технологические дисциплины в ранг точных наук, положить в основу системные решения, полученные с использованием методов высшей математики и математической физики.



Участники III-й Международной научно-технической конференции “Физические и компьютерные технологии” (г. Харьков, 26 апреля 2001г.).



Ларшин Василий Петрович, Якимов Александр Васильевич,
Новиков Федор Васильевич.

Основная задача проводимых конференций – способствовать скорейшему внедрению научных разработок в производство и учебный процесс. Поэтому не случайно конференции проводятся на заводе, в рабочей среде. Отсюда самый короткий путь к станку, к рабочему, инженеру, которые будут воплощать научные решения в металле, в новых самолетах, в отечественной конкурентно способной продукции. Не случайно и то, что конференции проводятся на Харьковском машиностроительном заводе “ФЭД”, который сегодня является флагманом машиностроения. С участием Александра Васильевича проведено 11 конференций, заслушано не одну тысячу докладов, получили “путевку в жизнь” очень многие идеи и решения. Большую полезную школу прошли аспиранты и докторанты, выступая с докладами на конференциях. Многие из них за это время успешно защитили кандидатские и докторские диссертации и продолжают работать над их внедрением в производство. По итогам конференций постоянно издаются научные труды, а также ВАКовские сборники: “Труды Одесского политехнического университета”, “Вісник Харківського національного технічного університету сільськогосподарства”, “Вісник інженерної академії України” и другие, в которых публикуются доклады и статьи участников конференции. Активное участие в конференциях принимают ученые и специалисты

Одесского национального политехнического университета, Харьковского национального экономического университета, Национального технического университета “ХПИ”, Харьковского национального университета сельского хозяйства, Института сверхтвердых материалов НАН Украины, Института проблем машиностроения НАН Украины, Института машин и систем НАН Украины, Национальной металлургической академии Украины, Севастопольского национального технического университета, Тульского государственного университета, Курского, Ульяновского и Пермского государственных технических университетов, ГП “Завод им. Малышева” (г. Харьков) и многих-многих других.

Основной особенностью проводимых конференций, пожалуй, является удачное соединение теории и практики Науки. Присутствие в зале большого количества заводских специалистов и научных работников ставит чрезвычайно высокие требования к уровню докладов. Необходимо не только теоретически обосновать свое научное решение, но и аргументировать его практическую полезность и возможность скорейшего внедрения в производство. Это обстоятельство заставляет каждого из выступавших с докладом и почувствовавших силу вопросов и замечаний, еще раз осмыслить величие своих научных открытий и по-новому посмотреть на казалось бы уже известные бесспорные решения.

Участие в работе конференции известных научных технологических школ стран СНГ представило возможность объединения творческих усилий, что нашло отражение в решении подготовить под редакцией профессоров Новикова Ф. В. и Якимова А. В. десятилетнего коллективного научного издания под общим названием “Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения”. В нем показаны последние достижения и сформулированы научные концепции развития процессов обработки материалов и технологии машиностроения.

Цель издания – новый физико-математический взгляд на проблемы механической, физико-технической обработки и технологии машиностроения; вооружение специалистов и ученых-технологов новыми фундаментальными знаниями для создания наукоемких технологий.

Основное содержание издания:

Том 1. Механика резания материалов.

Том 2. Теплофизика резания материалов.

- Том 3. Резание материалов лезвийными инструментами.
- Том 4. Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов.
- Том 5. Обработка металлов методами пластического деформирования.
- Том 6. Качество обработки деталей машин.
- Том 7. Точность обработки деталей машин.
- Том 8. Оптимизация технологических процессов в машиностроении.
- Том 9. Проектирование технологических процессов в машиностроении.
- Том 10. Концепции развития технологии машиностроения.

Профессор Якимов А.В. за свою многолетнюю и плодотворную научную деятельность подготовил 55 кандидатов и 6 докторов технических наук. За каждым из них стоит большой и кропотливый труд, высочайший профессионализм Учителя. Его ученики продолжают развивать идеи своего Учителя. Среди них известный ученый, автор более 250 научных трудов, доктор технических наук, профессор кафедры “Техника и технологии” Харьковского национального экономического университета Новиков Федор Васильевич. Еще будучи студентом кафедры “Динамика и прочность машин” Харьковского политехнического института, он с интересом занимался



теоретическими решениями задач по проблемам обработки металлов методами пластического деформирования, резания и шлифования. После окончания ХПИ работал на Харьковском инструментальном заводе, затем окончил очную аспирантуру по кафедре резания материалов ХПИ и в 1984 году успешно защитил в Институте сверхтвердых материалов НАН Украины кандидатскую диссертацию на тему “Механика круглого алмазного шлифования изделий с прерывистыми поверхностями и пути ее оптимального управления”. Научным консультантом докторской диссертации Новикова Ф.В. “Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного

Новиков Федор Васильевич.

шлифования” (защищенной в 1995 году в Одесском государственном политехническом университете) был профессор Якимов А. В. Работа отличается высоким уровнем математической формализации сложных по физической сущности процессов алмазного шлифования, что позволило выйти на создание новых кинематических схем шлифования, выявить, обосновать и реализовать новые условия существенного повышения производительности и качества обработки, разработать и внедрить в промышленность научные разработки. Результатом совместной работы Якимова А. В. и Новикова Ф. В. стали многочисленные публикации в научно-технической литературе, изданные учебные пособия и учебники по проблемам обработки материалов и технологии машиностроения: “Високопродуктивна обробка абразивно – алмазними інструментами”, навчальний посібник, Київ: Техніка, 1993, 152 с. (автори Якимов О.В., Новиков Ф.В., Якимов О.О.); “Високопродуктивне шліфування”, навчальний посібник, Київ: ІСДО, 1995, 180 с. (автори Якимов О.В., Новиков Ф.В., Новиков Г.В., Якимов О.О.); “Теория и прогрессивные технологии глубинного алмазного шлифования”, учебное пособие, Харьков, 1995, 102 с. (авторы Якимов А.В., Новиков Ф.В., Новиков Г.В., Якимов А.А.); “Алмазная обработка”, учебное пособие, Киев: ІСДО, 1996, 167 с. (авторы Якимов А.В., Новиков Ф.В., Новиков Г.В., Якимов А.А.); “Тепловые и механические процессы при резании металлов”, учебное пособие, Одесса: ОГПУ, 1997, 179 с. (авторы Новиков Ф.В., Якимов А.А., Зимин С.Г., Новиков Г.В., Вайсман В.А.); “Тепловые процессы при обычном и прерывистом шлифовании”, учебное пособие, Одесса: ОГПУ, 1998, 272 с. (авторы Якимов А.В., Ткаченко Б.О., Зимин С.Г., Якимов А.А., Новиков Ф.В., Новиков Г.В.); “Качество и производительность абразивно-алмазной обработки”, учебное пособие, Одесса: ОГПУ, 1999, 212 с. (авторы Якимов А.В., Новиков Ф.В., Якимов А.А., Новиков Г.В.); “Теоретические основы резания и шлифования материалов”, учебное пособие, Одесса: ОГПУ, 1999, 450 с. (авторы Якимов А.В., Новиков Ф.В., Якимов А.А., Новиков Г.В., Серов Б.С.); “Технологія автоматизованого машинобудування”, підручник, Одеса: ОДПУ, 1999, 435 с. (автори Якимов О.В., Гусарев В.С., Якимов О.О., Лінчевський П.А., Новіков Ф.В., Новіков Г.В., Ларшин В.П.); “Теоретические основы технологии машиностроения”, учебник, Одесса: ОНПУ, 2002, 491 с. (авторы Якимов А.В., Новиков Ф.В., Якимов А.А., Новиков Г.В., Решетнев Н.И.).

Новиков Ф.В., как и его учитель, профессор Якимов А.В., сто-

ронник широкого применения аналитических подходов и компьютерных технологий при решении технологических задач. В одной из своих работ он пишет: "... существенным недостатком применяемых в настоящее время математических методов при решении технических задач является то, что мы не научились в математических моделях учитывать лишь те связи и ограничения, которые необходимы для решения данной задачи. В результате решения оказываются или очень сложными, или чрезвычайно простыми. В первом случае мы затрачиваем большой труд и в конечном итоге из-за сложности не получаем ожидаемого результата. Во втором случае – отсутствуют многие важные внутренние связи исследуемого объекта и мы имеем дело лишь с частными решениями, которые мало эффективны и в принципе очевидны. Из сказанного следует, что мы еще очень далеки от применения результативных научных подходов. Надо еще многому учиться в данном направлении – умно применять математику, т.е. учиться искусству работы с математикой. Вне всяких сомнений, будущее – за математикой. Математика – вершина наших познаний. Для этого необходимо все технические решения, принимаемые при проектировании любого технического объекта подвергать серьезному математическому анализу. Тогда будут конкурентоспособными и комбайны, и самолеты, и стиральные машины...".

По праву считает Якимова А.В. своим учителем и выпускник Харьковского политехнического института Новиков Григорий Васильевич, начинавший свою инженерную деятельность на прославленном Харьковском заводе им. Малышева. Его кандидатская диссертация, подготовленная в Харьковском политехническом институте при непосредственном участии Якимова А. В. и защищенная в 1990 году в Одесском политехническом институте, открыла новые перспективы широкого использования высокопроизводительных комбинированных процессов алмазного шлифования с введением в зону резания дополнительной электрической энергии в форме электрических разрядов. Разработанные Новиковым Г. В. технологии алмазно-абразивной обработки при обработке изделий из высокопрочных металлических и неметаллических материалов (включая изделия из твердых сплавов, керамических материалов и твердых пород камня, изделия с износостойкими покрытиями и наплавками, изделия радиоэлектроники и стеклообработки, бриллиантовое производство и т.д.) внедрены более чем на 100 предприятиях Украины, России и Республики Беларусь. Новиков Г.В. является соавтором ука-

занных выше совместных работ с Якимовым А.В.

Учениками Якимова А. В. являются известные ученые и педагоги: Свирщев В.И. (заведующий кафедрой технологии машиностроения Пермского государственного технического университета, профессор), Новоселов Ю.К. (директор департамента Севастопольского приборостроительного института, профессор), Анельчик Д.Е. (профессор кафедры металлорежущих станков и систем ОНПУ), Усов А.В. (заведующий кафедрой математики ОНПУ, Лауреат государственной премии Украины, профессор), Ларшин В.П. (профессор кафедры технологии машиностроения ОНПУ), Калинин Е.П. (профессор Петербургского политехнического университета) и другие. Все они придерживаются единого научного направления – совершенствование технологии абразивно-алмазной обработки, имеют совместный интерес в развитии научных исследований, обучают и подготавливают молодых исследователей: магистров, аспирантов и докторантов. Многие ученики профессора Якимова А. В. занимают ответственные должности в промышленности. Например, Борисов В.А. – Генеральный директор Лужского научно-производственного объединения абразивов и шлифования (это предприятие выпускает 40 % от общего объема абразивной продукции России). Головизин А.С. – директор научно-производственного объединения в г. Симферополе. Вечер Р.И. – директор крупного НИИ машиностроения в г. Гомеле. Мокроносов Е.Д. – Генеральный директор объединения «Мотовилихинские заводы» в г. Перми и другие.

Творческая работа в научной школе профессора Якимова А. В. основана на преемственности принимаемых решений, заключающейся в том, что в новых решениях использованы предыдущие разработки, проверенные лабораторной и заводской практикой. Характерными чертами научной школы профессора Якимова А. В. являются доброжелательная обстановка в творческом коллективе и неразрывная связь научных исследований с промышленностью и учебным процессом в вузе. Это позволяет существенно улучшить качество подготовки молодых специалистов, устранить известное противоречие между разработкой новых прогрессивных технологий и производством, где эти технологии внедряются. Следует заметить, что вузовская кафедра – это не лаборатория НИИ. Ее первейшая забота – обучение студентов и подготовка инженерных кадров для машиностроительных заводов Украины. На эту сторону дела у Александра Васильевича Якимова есть своя выработанная годами точка

зрения. Он считает, что научно-технический прогресс и воспитание инженера неотделимы друг от друга. В период рыночных отношений студентов следует приобщать к новому, учить мыслить, прививать им навыки исследователя. А для этого нужно каждого студента с первого дня его пребывания в вузе погрузить в атмосферу творчества, непрерывного научного поиска. Важность студенческой научной работы трудно переоценить. Это ведь аксиома: чем увлеченней человек своим делом, тем большей отдачи можно от него ожидать, тем притягательней сила его примера. Доказательство тому долго искать не надо. Творческий путь каждого из учеников профессора Якимова А. В. начинался с занятий в студенческих научных обществах вузов. Причем, все они не только успешно осваивали программу обучения, но и создавали серьезный задел для своих будущих научных работ. Например, студенческие разработки автора этой статьи Ларшина В.П. в области адаптивных систем управления зубошлифовальными станками были использованы при создании автоматизированных зубошлифовальных станков. Увлеченность творческой работой под руководством профессора Якимова А. В. позволила Ларшину В.П. в 27 лет защитить кандидатскую диссертацию по технологии машиностроения, а затем, как отмечалось выше, и докторскую работу.

В настоящее время профессор Якимов А. В. работает на кафедре технологии машиностроения ОНПУ. Итоги долгих научных исследований и экспериментов он изложил в большом количестве научных и учебных работ. Этим работ более 300, среди них свыше 80 изобретений, более 15 учебных пособий и учебников. Среди крупных работ можно отметить, например, монографии: «Прерывистое шлифование», «Оптимизация процесса шлифования», «Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей», «Качество изготовления зубчатых колес» и другие. Кроме того, под его редакцией вышли, например, такие учебные пособия как: «Технология автоматизированного машиностроения», «Управление процессом шлифования», «Оптимизация технологических процессов в машиностроении», «Основы тепловых явлений при шлифовании деталей машин» и другие. Издательская деятельность профессора Якимова А. В. продолжается. Так, например, в книжных издательствах Украины (2001 год) и России (2002 год) вышли из печати учебники «Теоретические основы технологии машиностроения» и «Технология машиностроения» под редакцией профессора Якимова А.В. В 2005 году опубликован учебник «Технологія машино- та приладобудування».

Кафедра технологии машиностроения ОНПУ в последние годы проводит комплекс научно-исследовательских работ по анализу и синтезу технологических процессов изготовления зубчатых колес. Выполняются фундаментальные теоретические разработки по изучению термодинамических процессов, протекающих в зоне контакта шлифовального круга. Эта информация необходима для создания новых более прогрессивных способов шлифования зубчатых колес, позволяющих увеличить производительность обработки и стабилизировать режущую способность кругов и качество поверхностного слоя. Выполняются другие научно-исследовательские работы, например, разработка подсистемы САПР шлифовальных операций (на примере шлифования вырубных штампов с применением твердых технологических смазок), разработка технологического обеспечения компьютерной системы диагностики процесса резьбошлифования ходовых винтов. Кафедра выполняет хоздоговорные научно-исследовательские работы по заказу машиностроительных предприятий Украины и России.

1.3. НАУЧНАЯ ШКОЛА АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ИНСТИТУТА СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ ИМ. В.Н.БАКУЛЯ НАН УКРАИНЫ

Научно-техническое направление научной школы Института сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины по алмазно-абразивной обработке инструментальных и композиционных материалов связано с исследованием высокопроизводительных методов алмазно-абразивной обработки материалов с совмещением направленного механического и физико-химического воздействия, изучение процессов контактного взаимодействия шлифовального инструмента из СТМ с обрабатываемыми материалами, развитием научных основ создания инструментов из СТМ и технологий шлифования. Основное отличие данной научной школы – сочетание процессов обработки шлифовальным инструментом и учета условий разработки и создания такого инструмента для конкретных условий обработки.

Предыстория. В мировой практике существует несколько вещей, которые часто смущали человечество, ввергая его в своеобразные лихорадки. Такими являются алмазы, которые всегда в обзори-

мой истории человечества были в цене. Те территории, где добывались и добываются алмазы, всегда привлекали интерес и считались большим их достоянием. Вот и сейчас в Украине подумывают о месторождениях алмазов и их разработках. Такие разработки и станут когда-то в будущем реальными, но ведь в Украине есть и активно функционируют совершенно реальные и достаточно большие «месторождения» алмазов, только рукотворных, созданных трудом отечественных ученых. Эти «месторождения» есть в г. Киеве, где действует один из мировых центров – Институт сверхтвердых материалов и алмазный концерн «АЛКОН», а также в Полтаве и Львове, где действуют алмазные заводы. Но ведь искусственные алмазы возникли всего 50 лет назад, а до этого человечество знало только природные алмазы.

Создавая алмаз, природа щедро его наделила самыми ценными свойствами и самым главным – наивысшей твердостью. Основная масса алмазов, которые попадают на мировой рынок, добывается из россыпей. Коренные месторождения алмазов известны только в Южной Африке. Там они представлены трубчатыми телами округлой или овальной формы, известных под названием кимберлитовых. Не все трубчатые тела содержат в себе алмазные кристаллы. Так, например, в Южной Африке известно более 250 трубок кимберлита и только около 10% из них содержат алмаз. Кроме Африки небольшое количество алмазов добывают в Южной Америке (Бразилии, Венесуэле и Гвинее), Азии (Индии, острове Борнео, Якутии), Австралии. Укажем, что по своим физическим свойствам и величине минералов алмазы разделяют на ювелирные и технические. По мере разработки месторождений на рынок начинали поступать и технические природные алмазы, занимая свою нишу в обработке материалов.

Высокая стоимость алмазов не давала покоя ни алхимикам, ни шарлатанам, ни честным исследователям в попытках получить искусственные алмазы. В начале прошлого века появлялись самые разные сенсационные сообщения об алмазах, полученных искусственно. Однако, как правило, все это было результатом ошибок, допущенных при анализе, и зачастую полученное вещество было не алмазом, а карбидом какого-нибудь металла. Тем не менее, существовали и определенные загадки типа «алмазов Хэннея», полученных еще в 1879г. и не привлечших внимания современников. Кристаллики долгие годы лежали в Британском музее. В 1943 году в ученом мире вспомнили про алмазы Хэннея.

Исследователи Баннистер Ф. А. и Кэтлин Лонсдейл сняли рент-

генограммы с 12 кристалликов и 11 из них признали алмазами. Такой результат скорее озадачил, чем обрадовал ученых. Эта история – яркий и нередкий пример судьбы преждевременных исследований, когда состояние теории не дает возможности предвидеть и понять результат эксперимента.

По существующей теории, алмазы образуются в недрах земли при высоком давлении (около 200 тысяч и более атмосфер) и высоких температурах (2500 и более градусов). Однако теория реального получения искусственных алмазов была заложена в 1939 году советским ученым Лейпунским О.И., которым был выполнен термодинамический расчет зависимости равновесия графит – алмаз от давления. Согласно диаграмме состояния углерода при атмосферном давлении термодинамически устойчивой формой углерода является графит, который при повышении давления до значений, характерных для области термодинамической устойчивости алмаза не переходит немедленно в алмаз. Для такого перехода требуется давление, существенно превышающее равновесное.

Со временем стало ясно, что при давлениях 80 000... 85 000 атмосфер и температурах 1500...2500 °С из графита в присутствии металла-катализатора образуется алмаз.

15 февраля 1953 года в лаборатории Всеобщей шведской электрической акционерной компании были синтезированы первые в мире искусственные алмазы. Шведы не обнародовали полученных результатов и продолжили работы в атмосфере секретности, перепроверяя свои результаты. Но 16 декабря 1954 года в лаборатории американской компании «Дженерал электрик» добились такого же результата. Американцы успеха не скрывали: в феврале 1955 года «Дженерал электрик» опубликовала сообщение о первом в мире синтезе алмазов, а вскоре появилось сообщение шведов, отстаивавших свой приоритет.

В Советском Союзе синтез алмазов из графита был осуществлен в 1960 году группой ученых Института физики высоких давлений АН СССР под руководством академика Верещагина Л.Ф. В 1961 году в г. Киеве. С целью организации промышленного производства синтетических алмазов, был создан Украинский научно-исследовательский конструкторско-технологический институт синтетических сверхтвердых материалов и инструмента (ныне Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины).

В конце 1961 и начале 1962 года ученые и инженеры института под руководством директора доктора технических наук Бакуля В. Н.

разработали технологию промышленного производства искусственных алмазов и выпустили их первую промышленную партию.

Обычные кристаллы искусственных алмазов окрашены в желтый цвет, размер их находится в широком диапазоне от микропорошков в 1 мкм до шлифпорошков размером в 1 мм. Встречаются кристаллы как хорошо ограненные (кубического, кубооктаэдрического, октаэдрического габитусов), так и неправильной формы. При этом, одно из главных отличий искусственных алмазов от природных – наличие включений металлов-растворителей.

Алмазы в системах металл-углерод получают в специальных аппаратах при давлениях свыше 4 ГПа и температурах более 1400 Кельвина. В качестве источника углерода используют графит. Растворители выбираются из ряда переходных металлов, в который входят железо, кобальт, никель, рутений, родий, палладий, осмий, иридий, платина, хром, тантал, марганец и др. Применение перечисленных металлов позволяет резко снизить параметры процесса синтеза. Металл при этом должен образовывать твердый раствор с углеродом и растворять углерод в условиях высоких давлений и температур. В целом, применение при синтезе металлических расплавов переходных металлов, способных хорошо смачивать графит, положительно влияет на степень превращения графита в алмаз.

Понятно, что чем больше выход алмазов в переходах графит-алмаз, тем более экономична технология и тем больше она будет востребована в промышленности. Стоимость карата первых искусственных алмазов, выпущенных 40 лет назад в Институте сверхтвёрдых материалов, составляла более 135 рублей. В то время карат природных технических алмазов для алмазно-абразивного инструмента стоил 3 рубля. При такой существенной разнице конкурентоспособность синтетических алмазов была крайне призрачной. Однако, благодаря напряженному труду коллектива института уже во второй половине 1962 года они были уже по 2,50 руб., то есть дешевле природных. За счет улучшения технологии и автоматизации процесса во второй половине 60-х годов стоимость алмазов удалось снизить до 45-75 копеек за карат. Это позволило уже думать о развитии алмазной отрасли. Сотрудники института оказывали самую непосредственную помощь в становлении алмазных заводов в Украине: Львовского и Полтавского, а также в Армении: Ереванского алмазного завода. Как результат, в конце 70-х годов стоимость карата искусственных алмазов для алмазно-абразивного инструмента составляла 10 – 12 копеек. Искус-

ственные алмазы в инструменте стали широко использоваться в промышленности при шлифовании и затачивании твердосплавного металлорежущего инструмента, обработке наплавов и напылений, хонинговании, обработке неметаллических материалов (стекла, камня, керамики, пластмасс, кожи, резины и т.п.). Данный процесс настоятельно требовал упорядочения научных разработок и именно поэтому, впервые в СССР, эти разработки были выделены в отдельное направление.

В Институте сверхтвердых материалов при Госплане УССР была организована в 1961 г. **лаборатория режущего инструмента** для исследования вопросов механической обработки металлов, древесины, и пластмасс. Начальником лаборатории и, в итоге, основателем научной школы алмазно-абразивной обработки ИСМ стал кандидат технических наук **Захаренко Иван Павлович**, прибывший в ЦКТБ твердосплавного и алмазного инструмента (предтеча ИСМ) из г. Томска, где работал на Томском инструментальном заводе им. В. В. Вахрушева главным инженером. При организации Института сверхтвердых материалов в 1962 г. был избран по конкурсу на должность начальника лаборатории режущего инструмента.

Основными направлениями работы лаборатории было:

- разработка, исследование и внедрение конструкций высокопроизводительного твердосплавного металлорежущего инструмента на базе использования синтетических алмазов при их изготовлении и эксплуатации;
- разработка, исследование и внедрение высокопроизводительного твердосплавного инструмента для обработки древесных материалов, слоистых пластиков и пластмасс;
- разработка, исследование и внедрение твердосплавного инструмента для обработки резин, кож и их заменителей;
- исследование и внедрение процессов заточки и доводки кругами из синтетических алмазов, боразона и других абразивных материалов режущего инструмента для обработки металлов, древесных материалов, пластиков, пластмасс, резины и кожи;
- разработка новых методов и технологий заточки инструмента.

Актуальность создания такой лаборатории предопределялась тем, что после успешного освоения синтеза алмазов в 1961 г. стал осваиваться выпуск алмазного инструмента. Создание лаборатории стимулировало выпуск алмазно-абразивного инструмента в стране.

Так, в 1962 году выпуск алмазных инструментов на Опытном

заводе ИСМ по сравнению с 1960 годом возрос в 3,3 раза, а уже в 1963 году такой рост составил 20 раз, в 1964 году - в 48 раз, а в 1965 г. - 71 раз по сравнению с 1960 годом. Следствием такой динамики стало естественное выделение специализированной лаборатории заточки инструмента, что произошло в 1970 г. и реально стало началом активного функционирования научной школы Института сверхтвердых материалов по алмазно-абразивной обработке инструментальных и композиционных материалов инструментами из СТМ. Возглавил лабораторию заточки инструмента и научную школу - кандидат технических наук Захаренко Иван Павлович.

Иван Павлович Захаренко родился 1 января 1921 года. Окончил Томский политехнический институт в 1945 году и получил специальность инженера-механика. Работал инженером, а затем главным инженером Томского инструментального завода. Без отрыва от производства закончил аспирантуру и пройдя исследовательскую школу профессора Розенберга А.М. защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Его диссертационная работа до сих пор является для молодых ученых образцом научного подхода в выполнении работ по резанию.

В ИСМ Захаренко И. П. проработал 30 лет (с 1960 по 1990 г.г.) в должностях заведующих лабораториями режущего инструмента и заточки инструмента, а после выхода на пенсию - ведущим научным сотрудником. Захаренко И. П. являлся руководителем созданного им в Институте научного направления «Синтетические сверхтвердые материалы в инструментальном производстве».



Захаренко Иван Павлович.

При его непосредственном научном руководстве выполнено 50 тем планов НИОКР, создано 40 важнейших научно-технических разработок, реализованных в промышленности страны с эффективностью в несколько десятков млрд. рублей. Захаренко И.П. – автор более 420 научных трудов, в том числе 18 монографий и книг, около 100 брошюр и методических пособий, 30-ти изобретений. Научную и трудовую школу Захаренко И. П. прошли многие молодые специалисты и аспиранты Института 60 - 80-х годов, а также студенты вузов. Им

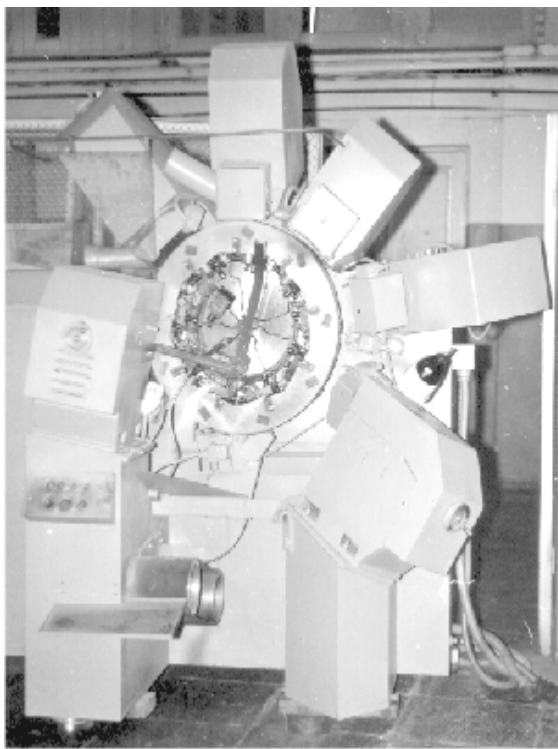
подготовлено 11 кандидатов наук, многие из которых в настоящее время работают в Институте. Среди учеников Захаренко И. П. кандидаты технических наук: Алиханян Э.С., Ахундов Э., Гаджиев А., Гордашник К.З., Дегтяренко С.М., Лавриненко В.И., Мовла-Заде В., Савченко Ю. Я., Солод В.Ю., Шепелев А.А., Эпштейн В.М. Иван Павлович Захаренко был значительным организатором и пропагандистом научного подхода в применении СТМ в промышленности, активным лектором общества «Знание», участником многих международных, всесоюзных, республиканских и отраслевых конференций, симпозиумов, школ-семинаров. Пионер промышленного внедрения отечественных синтетических алмазов и кубонита в инструментальном производстве страны.

Созданная Захаренко И. П. лаборатория заточки инструмента, в которой работали кроме упомянутых выше, такие известные специалисты кандидат технических наук Кункин Я.А., кандидат технических наук Линенко-Мельников Ю.П., кандидат технических наук Красник В.Г., Ижик В.И., Черных В.П., Винников Н.П., Синчило А.Н., Пирожников А.В., Рохман А.Д., Захарченко В.П. и многие другие, направила свою научно-техническую деятельность на разработку и внедрение новых инструментов из сверхтвердых материалов для съема больших припусков.



Коллектив сотрудников лаборатории заточки инструмента в 1975 году.

Это было связано с тем, что вначале сверхтвердые абразивные материалы (синтетические алмазы, кубонит) применялись в основном для чистового шлифования и заточки (доводки) режущей части инструмента после предварительной обработки кругами из электрокорунда или карбида кремния зеленого. Такая технология помогла значительно повысить точность и качество обработки, снизить брак, сократить расход инструмента, а также повысить техническую культуру производства, расширить области применения твердых сплавов для изготовления сложнопрофильного инструмента. Однако, такая технология не обеспечивала полного устранения дефектов поверхностного слоя режущей части, которые возникают при обработке обычными абразивами, и требуют в дальнейшем съем значительных припусков, что, в свою очередь, приводит к сокращению срока службы инструмента, снижению возможного количества переточек, повышению трудоемкости обработки и затрат на шлифовальные круги. Для того, чтобы достичь лучшего качества, повысить работоспособность и снизить стоимость обработки инструмента, необходимо было исключить или ограничить использование обычных абразивов, которые и порождают дефекты в поверхностном слое. Для этого лабораторией была разработана технология полной алмазной заточки инструмента.



Станок-автомат мод. МЗ-54 для полной алмазной заточки твердосплавных резцов.

Впервые в мировой практике был разработан станок-автомат мод. МЗ-54 для полной алмазной заточки твердосплавных резцов (авторы Шепелев А. А., Евдокименко В. В.).

Стала возможной комплексная механизация и автоматизация производственных процессов обработки инструмента. Исследованиями сотрудников лаборатории было показано, что шлифовальные инструменты из СТМ имеют в сотни и тысячи раз большую износостойкость, чем инструменты из обычных абразивов. При этом, обеспечивается высокая стабильность формы и размеров обрабатываемого инструмента, резко сокращается время на замену изношенного инструмента и правку шлифовальных кругов.

Промышленное внедрение алмазной обработки инструмента проводилось на 22 ведущих машиностроительных и приборостроительных заводах СССР, в т.ч.: ГАЗ (г. Горький), «Серп и молот» (г. Харьков), Завод станков-автоматов им. Горького (г. Киев), Завод тяжелого машиностроения (г. Жданов) и др.

Впервые сотрудники лаборатории предложили и исследовали обработку металлорежущего, дереворежущего и горного инструмента кругами из СТМ без предварительной обработки его кругами из обычных абразивов, а также доказали на практике ее высокую технико-экономическую и социальную эффективность в сотрудничестве с производственниками Никопольского краностроительного и Сестрорецкого инструментального заводов в 1967 году. Алмазная и алмазно-электрохимическая заточка твердосплавного инструмента и заточка быстрорежущего инструмента кругами из КНБ была внедрена на Минском автозаводе, Винницком ГПЗ-18, Нижнеднепровском трубопрокатном заводе, на Ловозерском горно-обогатительном комбинате, Киевской мебельной фабрике, Тырныаузком горнометаллургическом комбинате, практически на всех сахарных предприятиях Украины.

Для изготовления горного инструмента использовалось до трети твердых сплавов, выпускаемых для оснащения инструментов. Поэтому проблема повышения его работоспособности имеет народнохозяйственное значение. НИОКР, выполненные в ИСМ в содружестве с Тырныаузким горно-металлургическим и Ловозерским горно-обогатительным комбинатами, показали, что алмазная и алмазно-электроэрозионная заточка однолезвийных и многолезвийных (крестовых) твердосплавных коронок по сравнению с кругами из карбида кремния зеленого дает возможность создать полуавтоматическое заточное оборудование и, благодаря этому, заменить тяжелый ручной труд механизированным, полностью исключить обычные абразивы, вдвое - втрое повысить производительность, улучшить качество и сократить в 1,5...1,6 раза затраты коронок, в полтора - ускорить бурение. Было разработано несколько специализированных станков для заточки горного инструмента, в т.ч. зубков врубовых машин и комбайнов.

За 20 лет лабораторией был создан банк данных по назначению рациональных режимов шлифования при различных способах обработки кругами из СТМ.

Исследования показали наличие больших резервов повышения производительности и точности обработки новыми и комбинирован-

ными способами шлифования - глубинным и скоростным, с наложением дополнительных видов энергии (физико-химических процессов, высоко- и низкочастотных колебаний и др.).

Эффективной оказалась разработанная технология алмазной заточки и шлифования твердосплавных резцов со стружколомающими элементами при совмещении нескольких операций глубинного метода обработки. Такая технология внедрена на многих заводах: Нижнеднепровском трубопрокатном, Крюковском вагоностроительном, Киевском станкостроительном производственном объединении и др. Аналогичные результаты дало глубинное внутреннее и внешнее шлифование многолезвийного инструмента, например, при алмазном шлифовании геологоразведующих коронок на Сарапульском машиностроительном заводе и Подольском экспериментальном заводе геологоразведывательного оборудования.

Благодаря синтетическим алмазам были созданы большие возможности высокопроизводительного использования твердых сплавов для изготовления различных видов инструмента и оснастки. Появилась реальная база для изготовления новых конструкций твердосплавного инструмента в машиностроении и металлообработке (дисковые, пальцевые, модульные и червячные фрезы, зуборежущие головки, долбяки, шеверы и зубострогальные резцы, метчики и ролики, гребенки, резьбонарезные и резьбонакатные плашки и ролики, резьбовые калибры, протяжки и прошивки, фасонные резцы, штампы и пресс-формы, инструмент для холодной высадки); в металлургии и электротехнической промышленности (гильотинные, дисковые и кромкокрошительные ножи, оправки для прошивания труб, пресс-формы для изготовления изоляторов и др.); в стеклотарном производстве (чистовые формы); в электронике (перфорирующие приспособления); в обувной промышленности (фрезы для обработки кожи, резины и других материалов); в мебельной, деревообрабатывающей, судостроительной областях промышленности и других. Было показано, что реальный путь экономии дефицитного вольфрама - это усовершенствование технологии абразивной обработки и расширения новых методов упрочнения инструмента; применение режущих сменных многогранных пластин, в том числе с износостойкими покрытиями; замена вольфрамосодержащих сплавов безвольфрамовыми, режущей керамикой, поликристаллическими сверхтвердыми материалами, стального инструмента - твердосплавным; использование двухслойных композиционных материалов; применение централизо-

ванной заточки и переточки вместе с рациональной эксплуатацией инструмента.

В начале 80-х годов Захаренко И. П. была сформулирована задача поиска высокопроизводительных технологических процессов обработки инструментальных материалов кругами из СТМ, как важное научное направление на ближайшее десятилетие. Без этого невозможно было решить вопросы эффективного шлифования безвольфрамовых твердых сплавов, режущей керамики, композиционных инструментальных материалов. Для снижения теплонапряженности процесса шлифования и повышения работоспособности кругов из СТМ наметились несколько путей, которые нужно было развить в будущем: введение в рабочий слой химически активных наполнителей; обеспечение постоянной площади контакта круга с изделием; упорядоченное (ориентированное) размещение зерен СТМ по заданной программе. Создание прерывистых кругов с постоянной и квазипостоянной площадью контакта с обрабатываемым изделием давало возможность резко снизить температурную и динамическую напряженность процесса шлифования и тем самым повысить производительность и износостойкость как шлифовального, так и обрабатываемого инструмента. На решение этих задач была направлена научно-техническая деятельность вновь созданной в 1983 году лаборатории «Технологии шлифования инструментальных и композиционных материалов», которую по преемственности возглавил его ученик – кандидат технических наук Шепелев Анатолий Александрович.

Иван Павлович Захаренко в этот период на должности ведущего научного сотрудника основное внимание уделил чтению лекций в КПИ, получил ученое звание - доцента, а главное - подготовке и изданию монографий: «Эффективность обработки инструмента сверхтвердыми материалами» (М.: Машиностроение, 1982), «Сверхтвердые абразивные материалы в инструментальном производстве» (Киев: Вища школа, 1985) и в соавторстве - «Глубинное шлифование кругами из сверхтвердых материалов» (М.: Машиностроение, 1988), «Прогрессивные методы абразивной обработки металлов» (Киев: Техніка, 1990). Научным признанием деятельности Ивана Павловича Захаренко за этот период стало издание трехтомника трудов ИСМ «Синтетические сверхтвердые материалы», посвященного 25-летию Института. Только благодаря неумолимой энергии заместителя редактора Захаренко И. П. такой труд был издан в 1986 году и до сих пор является настольной книгой сотрудников Института и не только его.

С 1990 года Иван Павлович находился на пенсии после 45 лет трудовой деятельности и 30 лет научной работы в Институте. В 1997 году после продолжительной болезни его жизнь оборвалась, к сожалению сотрудников Института. Тем не менее, разработки, мысли, научные труды Захаренко И. П. актуальны и реализуются в деятельности лаборатории шлифования инструментальных и композиционных материалов кругами из синтетических алмазов и кубического нитрида бора.

Научно-техническая деятельность Лаборатории технологии шлифования инструментальных и композиционных материалов за период 1983 - 2005 г.г.

Укажем, что к началу 80-х годов прошлого столетия сложилась новая обстановка на алмазном рынке. Объемы мирового производства и потребления сверхтвердых материалов достигли 750 млн. карат, а в Украине около 100 млн. карат, т.е. до 13 % мирового производства. Инструменты из сверхтвердых материалов, применяемые в машиностроении, бурении, стройиндустрии являлись источником валютных поступлений. Широкое применение искусственных алмазов в промышленности и устойчивый спрос на них на мировом рынке стимулировали развитие Института. В 70-х годах Институт сверхтвердых материалов стал академическим и стал известен не только в Украине или странах СНГ, но и далеко за их пределами и стал крупным мировым научным центром по синтезу и применению синтетических сверхтвердых материалов. Задачи научной школы в этот период существенно изменились, так как академический статус усилил научную сторону разработок.



Шепелев Анатолий Александрович.

Для решения новых задач лаборатория заточки инструмента в 1983 году была преобразована в лабораторию «Технологии шлифования композиционных и инструментальных материалов», которая вначале была в отделе технологического управления качеством обработки поверхности, а затем была выделена в структурное подразделение Института. Заведующим лабораторией, как сказано выше, стал кандидат технических наук Шепелев Анатолий Александрович, заместитель ди-

ректора Института по научной работе.

Анатолий Александрович Шепелев родился 24 июня 1939 года. Окончил Харьковский политехнический институт в 1964 году и получил специальность инженера-механика. С 1964 г. работает в Институте сверхтвердых материалов. Прошел исследовательскую школу Захаренко И. П. и в 1974 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Анатолий Александрович работает в Институте уже более 40 лет и за это время содействовал эффективной реализации сверхтвердых материалов в промышленности Украины и предприятий СССР. Шепелев А. А. дважды Лауреат Государственных премий УССР (1986 г.) и Украины (1996 г.). Почти два десятилетия работал заместителем директора Института по научной работе, а сейчас является заместителем генерального директора по науке и производству концерна “Алкон”. Автор более 350 печатных работ, в т.ч. 5-ти монографий. В 2002 г. защитил в НТУ “ХПИ” диссертацию на соискание научной степени доктора технических наук.

Им было сформулировано научно-техническое направление исследований лаборатории: разработка, исследование и внедрение технологических методов и промышленных технологий шлифования инструментальных и композиционных материалов, конструкционных металлов и сплавов инструментом из сверхтвердых абразивных материалов.

Результаты выполненных НИОКР подтвердили, что применение сверхтвердых абразивных материалов - прогрессивное направление увеличения производительности труда, повышения надежности и долговечности режущих инструментов и деталей машин, сокращение расхода инструментальных, композиционных и абразивных материалов. Так, обработка режущих инструментов обеспечивает увеличение производительности обработки в 2...3 раза, повышение стойкости инструмента в 1,2...1,5 раза и более, снижение расхода кругов из СТМ в 1,5...2,0 раза. Обработка вольфрамовых и безвольфрамовых сплавов и минералокерамики повышает производительность шлифования в 1,3 раза, сокращает расход СТМ в 2...3 раза, исключает брак обработки инструмента.

Шлифование деталей с износостойкими покрытиями повышает производительность обработки в 3...5 раз, повышает стойкость деталей на 25...30%, способствует ресурсосбережению.

Шлифование деталей из титановых и железистых сталей повышает качество рабочих поверхностей деталей и увеличивает

производительность обработки в 2...4 раза.

Разработки лаборатории показали, что конкурентоспособность инструментов из СТМ является тем краеугольным камнем, на котором должно базироваться создание высокопроизводительных технологических процессов обработки.

В целом уровень выполняемых НИОКР определяется экспериментально-теоретическими исследованиями процессов алмазно-абразивной обработки, основанных на использовании механического резания и электрофизико-химического, вибрационного и других методов направленного воздействия сверхтвердыми абразивными материалами.

В методическом плане были разработаны и созданы экспериментальные стенды для исследований: процессов глубинного, врезного и вибрационного шлифования инструментальных материалов; шлифования безвольфрамовых твердых сплавов и минералокерамики; процессов электроэрозионного и электрохимического шлифования инструментальных и композиционных материалов.

Разработаны средства компьютеризации работ: программа расчета точности измерительных устройств; алгоритмы и программы статистической обработки результатов экспериментов и построение уравнений регрессии; программа расчета тепловых полей в изделиях при торцовом шлифовании с учетом применения СОЖ; программа расчета площади контакта круга с изделием при торцовом шлифовании.

Лабораторией разработано более 30-ти видов шлифовального инструмента, конкурентноспособных с зарубежными фирмами: крупногабаритные шлифовальные круги диаметрами до 900 мм для обработки деталей с износостойкими покрытиями; шлифовальные круги для обработки зубчатых колес модулем от 3 до 10 мм; шлифовальные круги для прецизионного зубошлифования модулем от 0,4 до 1 мм и резьбошлифования резьб шагом до 0,3 мм; шлифовальные круги из ПСТМ на адгезионно-активных связках для высокопроизводительного шлифования конструкционных металлов и сплавов; новое поколение шлифовальных кругов для высокопроизводительной и качественной обработки инструментальных материалов, в т.ч. без применения технологических сред; шлифовальные эластичные инструменты для финишной обработки конструкционных металлов и сплавов.

Решен ряд научных задач, имеющих фундаментальное значение.

Разработана математическая модель для расчета кинематических и динамических параметров процесса шлифования, обусловлен-

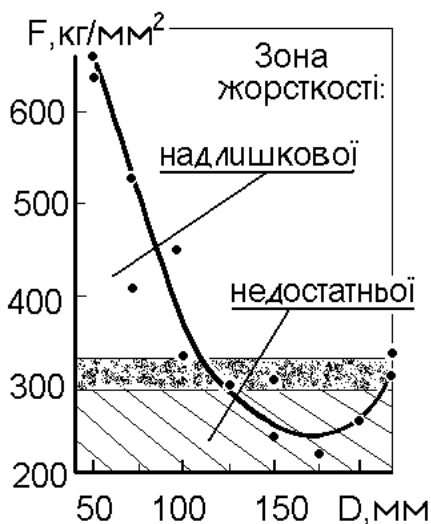
ных прецессирующим движением шлифовального круга и гироскопическим эффектом (д.т.н. Шепелев А.А.).

Разработана концептуальная модель интенсификации процессов шлифования инструментальных материалов на основе выделения основного фактора влияния – динамического абразивного воздействия СТМ на обрабатываемый материал, который базируется на явлении прецессии шлифовальной системы и использования при этом эффектов вибрации и либрации в зоне обработки.

Это позволило за счет учета интегрального взаимодействия функциональных элементов технологической системы обеспечить производительность абразивного резания в пределах 5000...15000 мм³/мин не только без введения дополнительной энергии в зону обработки, а и со снижением эффективной мощности шлифования, что позволяет значительно снизить энергоемкость процесса обработки (д.т.н. Шепелев А.А.).

На основе массивов экспериментальных данных (до 5000 точек) уточнен вид закона распределения показателя прочности зерен СТМ из диапазона, наиболее применяемого для процессов шлифования, и установлено, что он подчиняется не нормальному, как это принято, а логарифмически-нормальному закону распределения (д.т.н. Лавриненко В.И.).

На основании положений теории упруго-изогнутых тел и решения осесимметричной задачи теории упругости изотропного тела



Графическая интерпретация зависимости критерия достаточности F от наружного диаметра круга – D .

применительно к конструкциям шлифовальных кругов разработано методико-программное обеспечение определения осевой жесткости кругов и предложены новые показатели информационной структуры кругов: показатели удельной и относительной осевой жесткости, критерий ее достаточности F , что позволяет определить возможность использования более дешевых и менее дефицитных материалов в корпусах шлифовальных кругов без потери, в отличие от известных решений, необходимой работоспособности таких кругов (д.т.н. Шепелев А.А., д.т.н. Лавриненко В.И.).

Установлены теоретические и экспериментальные зависимости характеристик поверхностного слоя деталей и инструментов от методов и режимов алмазно-абразивной и комбинированной обработки сверхтвердыми и другими инструментальными материалами (д.т.н. Шепелев А.А., д.т.н. Лавриненко В.И., к.т.н. Сороченко В.Г., к.ф.-м.н. Гонтарь А.Г., к.ф.-м.н. Ткач В.М.).

Разработана методология оптимизации технологических процессов шлифования с использованием систем компьютерного проектирования (д.т.н. Шепелев А.А., д.т.н. Лавриненко В.И.).

Разработаны научные положения по достижению условий повышения показателей качества и производительности прецизионной обработки деталей типа «шар» за счет управляемого изменения положения собственной оси вращения шаров. Исходя из условия покрытия поверхности шаров в процессе обработки равномерной сеткой следов инструмента выдвинуто положение о том, что для конкретного участка V-образной канавки с определенным радиусом кривизны, длина контакта шара с внешней направляющей канавки вдоль его окружного движения должна быть такой, чтобы гарантированно обеспечивать дополнительный оборот шара на половину длины окружности, которая описывается на поверхности шара за 1 его оборот при движении в канавке и пролегает через точки контакта шара с верхним доводочным инструментом и с внешней стороной V-образной канавки. Для реализации выдвинутого выше положения разработаны конструкции доводочных инструментов с равномерным или неравномерным, задающимся по определенному закону, чередованием участков одинакового радиуса кривизны в пределах этого



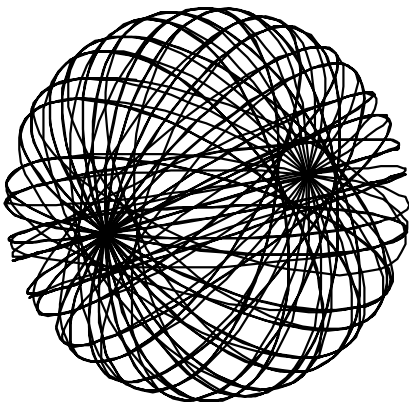
Прецизионные пары «седло-шар» для клапанов нефтяных насосов.

участка, но различной их длиной и кривизной. При обработке с такими дисками, у которых, для каждого участка канавок выполняется условие равномерности, поверхность шаров покрывается равномерной сеткой следов обработки. Разработанная технология реализована на базе известных шарико-доводочных станков ВШ-ДЗ, что позволило достичь максимальной

скорости съема керамических шаров при доводке до 60 мкм/ч с точностью сферы порядка 0,2...0,3 мкм. С использованием новых керамических материалов и предложенных высокопроизводительных и прецизионных методов алмазной обработки в ИСМ впервые разработаны клапаны скважинных штанговых насосов высокого давления (10...60 МПа), применяемые для добычи нефти, обладающие гарантированной стойкостью равнозначной ресурсу работы непосредственно насоса. Ведутся НИОКР по разработке керамических и алмазных подшипников (к.т.н. Шепелев А.А., Пасичный О.О., Гаманюк М.П., Зубанев Е.Н.).

По прикладным результатам научных разработок лаборатории следует указать на следующие разработки.

Разработана технология высокопроизводительного шлифования инструментальных материалов, основанная на использовании вибрационных и электрофизических методов обработки и шлифовальных кругов из СА и КНБ, которая обеспечила повышение производительности шлифования в 2...3 раза и снижение расхода инструментальных и сверхтвердых материалов на 25...50 % и более. Технология реализована в условиях промышленного производства режущих инструментов – плоских ножей, крупногабаритных штампов и протяжек, мелкогабаритных сверл и фрез, сложнопрофильных разверток, фрез и сверл, режущих сменных многогранных пластин, которые ранее кругами из СТМ не обрабатывались или обрабатывались с недостаточной эффективностью, а также в конъюнктурных технологиях, закупаемых у зарубежных фирм (д.т.н. Шепелев А.А., д.т.н. Лавриненко В.И., к.т.н. Савченко Ю. Я., Черных В.П., Лещук И.В.)



Сетка следов обработки на шаре при соблюдении условия равномерности.

На основании положения о критической производительности для шлифования пластин из БВТС, твердых сплавов и керамик, разработано более 10 конструкций кругов форм 6А2 и 12А2 с повышенной шириной рабочего слоя диаметрами от 150 до 500 мм) (д.т.н. Лавриненко В.И.).

Разработаны шлифовальные круги из СТМ с новым конструкторско-технологическим рабочим слоем, характеристики которого адекватны параметрам используемых методов шлифования: круги форм 12А2 и 6А2 с двух- и трехслойным прерывистым рабочим сло-



Конструкции кругов форм 6А2 и 12А2 диаметрами от 150 до 500 мм для шлифования пластин из БВТС, твердых сплавов и керамик.

Зубанев Е.Н., к.т.н. Пасичный О.О.).

По важнейшим показателям разработанные технологии и шлифовальные круги из СТМ соответствуют мировому уровню и являются конкурентоспособными с разработками фирм «Вендт», «Винтер», «Геккель», «Реформ» (Германия), «Агатон» (Швейцария), «Тошиба» (Япония), «Крупп-Видиа» (Голландия). Созданные технологии освоены в условиях инструментального производства ведущих предприятий Украины, России и других стран СНГ.

За период с 1983 по 2005 годы лабораторий получено около 60 авторских свидетельств и патентов, опубликовано порядка 500 печатных работ, в том числе 7 монографий. Подготовлен и выпущен «Каталог специальных кругов из СТМ». Две разработки в составе авторских коллективов удостоены Государственных премий Украины в области науки и техники (1986 и 1996 г.г.).

Лабораторией подготовлены три кандидата технических наук – Дегтяренко С.М. (1986 г.), Солод В.Ю. (1989 г.), Пасичный О.О. (2002 г.) и два доктора технических наук – Лавриненко В.И. (2000 г.) и Шепелев А.А. (2002 г.).

Лавриненко Валерий Иванович – родился 2 августа 1952 г. в г. Александрия, Украина. Инженер-механик, специалист по вопросам обработки инструментальных и композиционных материалов кругами из алмазов и кубического нитрида бора, в том числе с введением дополнительной энергии в зону обработки. В 1974 году закончил Кировоградский институт сельскохозяйственного машиностроения (ныне Кировоградский национальный технический университет).

ем, круги крупногабаритные форм 1А1 и 14А1 диаметром 500 – 700 мм, круги форм 4А9, 1А1, 12А2 и др. на новых металлических (МХ3, МХ4), полимерных (В2-01-1, В2-01-2) и керамических (КМ1-01, КМ1-02) связках (д.т.н. Шепелев А.А., Черных В.П., Федоренко В.Т., Муровский В.А., Рубан Ф.Г.).

Разработана технология прецизионной алмазной обработки деталей типа «шар» из износо- и коррозионно-стойкой гетерофазной керамики (д.т.н. Шепелев А.А., Гаманюк М.П.,

Научные степени – кандидат технических наук (1983 г.), доктор технических наук (2000 г.). Ученое звание – старший научный сотрудник (1991 г.). С 1974 г. работает в Институте сверхтвердых материалов



Лавриненко Валерий Иванович.

НАН Украины – конструктор 3 кат. (1974 г.), конструктор 2 кат. (1975 г.), старший инженер (1977 г.), младший научный сотрудник (1980 г.), научный сотрудник (1984 г.), старший научный сотрудник (1986 г.), ведущий научный сотрудник (2000 г.). Основная деятельность направлена на разработку эффективных технологий высокопроизводительного шлифования твердых сплавов, инструментальных сталей, режущей керамики, обработку монокристаллов. Основные направления научных исследований – поиск путей использования внутренних резервов инструментальных композитов для направленного изменения их эксплуатационных свойств, поиск

позитивных эффектов, характерных для введения дополнительной энергии в зону обработки, и осуществление их уже без введения такой энергии, т.е. поиск энергоэкономных методов обработки. Автор более 300 печатных работ и 30 изобретений. Основные опубликованные труды: Лавриненко В.И. Электрошлифование инструментальных материалов.– К.: Наук. думка, 1993. – 155 с.; Лавриненко В.И. с соавт. Прогрессивные методы абразивной обработки металлов. – К.: Техніка, 1990. – 152 с.; Лавриненко В.И. с соавт. Глубинное шлифование кругами из СТМ. – М.: Машиностроение, 1988. – 56 с.; Лавриненко В.И. Использование ЭПФ в рабочих процессах высоких технологий // Резание и инструмент. – 1993. – Вып. 48. – С. 3 – 5.; Лавріненко В.І. Дослідження можливостей використання інструментальних керамік у вигляді абразивного матеріалу // Резание и инструмент в технологических системах. – 2000. – Вып. 57. – С. 157 - 159.; Лавриненко В.И. Угол действия касательных напряжений – ключ к инструменту из СТМ // Сверхтвердые материалы. – 2002. – № 2. – 71 – 76.

В целях рекламы и популяризации разработок института публиковался и в информационно-популярных журналах «Інформатизація

та нові технології», «Інструментальний світ», «Мир інструмента», «Проблеми науки», Металл Держзовнишинформа.

В своей диссертационной работе д.т.н. Лавриненко В.И. показал, что инструментальные материалы усовершенствуются и для повышения их твердости, прочности, теплостойкости в их состав вводятся карбиды металлов IVb-Vb подгруппы. Это характерно всех групп материалов:

- быстрорежущих сталей - введение карбидов ванадия и ниобия;
- твердых сплавов - введение карбидов титана, тантала, ниобия, даже с выделением отдельной группы - безвольфрамовых твердых сплавов на основе карбида титана;
- инструментальных керамик – введение карбидов титана.

Чтобы выделить эти материалы, им в научной литературе дано название по этим карбидам - ванадиевые, титано-танталовые, оксидно-карбидные. Характерным для них является плохая обрабатываемость.

Карбиды переходных металлов IV – VI групп составляют основу практически всех инструментальных материалов. Но, при этом, между ними имеется существенная разница и фактически инструментальные материалы разделяются на два блока:

- материалы с основой в виде карбидов металлов VIb подгруппы;
- материалы с основой в виде карбидов металлов IVb-Vb подгрупп.

Такое разделение, известное из литературы, вызвано тем, что последние, в отличие от первых:

- имеют более высокие механические показатели, например твердость;
- имеют более низкую стойкость против окисления, обуславливающуюся выделением металла и неметалла (С) при этом, что существенно влияет на механические характеристики поверхностного слоя (для нас это имеет большое значение, вследствие образования при электрошлифовании анодных оксидных пленок);
- характеризуются наличием области гомогенности.

Шлифование таких материалов, характеризуется быстрой потерей режущей способности круга, повышением силовых и температурных факторов процесса шлифования, а это тянет за собой снижение механических характеристик их поверхностного слоя, возникновение трещин и сколов. В связи с этим, максимальная производи-

тельность шлифования таких материалов составляет всего от 900 до 1200 мм³/мин.

Поскольку Лавриненко В.И. в диссертационной работе была рассмотрена не одна, а все группы инструментальных материалов, то они были им объединены и имеют один формальный признак - наличие в их составе карбидов металлов IVb-Vb подгруппы. Фактически это признак причастности данных инструментальных материалов к группе труднообрабатываемых.

Поэтому, целью его работы являлось решение вопроса повышения эффективности обработки инструментальных материалов, имеющих в структуре карбиды металлов IVb- Vb подгруппы, доля которых в общем объеме выпуска инструментальных материалов составляет около 27 %.

Для процессов электрошлифования кругами из СТМ типичны два варианта:

1. Электрохимическое шлифование - когда на съем материала направлено влияние, как механических процессов (резания зернами), так и электрохимических (анодное растворение), а также, в определенной степени - электроразрядов, возникающих в межэлектродном зазоре (МЭЗ).
2. Электроэрозионное шлифование - когда на съем материала направлено влияние как механических процессов, так и электрофизических (электроэрозия - при прямом разряде между электродами).

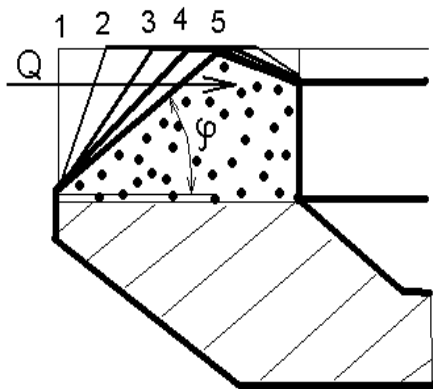
Из литературы известны некоторые исследования, а нами они подтверждены, что при обработке инструментальных материалов нет необходимости стремиться к повышению показателей анодного растворения, поскольку реально этого мы не получим, а только увеличим энергоемкость процесса. А на материалах с наличием карбидов IVb – Vb подгруппы анодное растворение только ухудшит показатели их поверхностного слоя.

В свою очередь, электроразряды, попадающие на поверхность материалов (в меньшей мере при электрохимическом, в значительно большей - при электроэрозионном) приведут к ее растрескиванию.

Таким образом, оба эти традиционные процессы практически невозможно использовать для обработки указанных материалов. Как быть?

Второй вариант отбросить, как неприемлемый. Концепцию первого - переработать и оставить только положительные эффекты. Электроэрозионные процессы направить на поддержание стабильной

режущей способности круга, а их влияние на обрабатываемую поверхность исключить полностью. Для этого, электрохимические процессы растворения свести к минимуму, а только использовать эффекты формирования анодных и катодных пленок, изменяющих условия электрофизического контакта. Первые не дадут возможность разрушать разрядами обрабатываемую поверхность, а за счет вторых регулируется интенсивность электрофизического воздействия на поверхность круга. В связи с этим Лавриненко В.И. и сформулировано следующее научное положение:

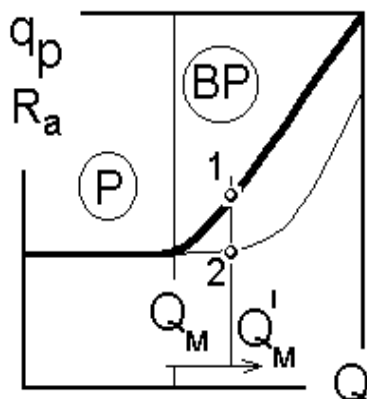


В основу повышения эффективности процессов электрошлифования инструментальных материалов, содержащих карбиды металлов IVb - Vb подгрупп, положена концепция разделения при электрошлифовании направленности механических, электрофизических и электрохимических процессов, причем последние, которые и позволяют управлять такой направленностью при этом,

необходимо рассматривать не с точки зрения получения высоких показателей анодного растворения, а как процессы электродной поляризации, изменяющие характеристики контактных поверхностей таким образом, чтобы электроэрозионные были направлены исключительно на поддержание высокой режущей способности круга, а механические (резание зернами) - на сьем обрабатываемого материала.

В процессе шлифования режущая поверхность круга подвергается формоизменению, что связано со стремлением круга ввести в работу большую площадь рабочей поверхности для съема припуска. С возрастанием производительности это наблюдается по уменьшению угла наклона (φ) главного режущего конуса.

При этом, износ круга остается стабильным и не повышается. Но со временем, при дальнейшем повышении производительности,



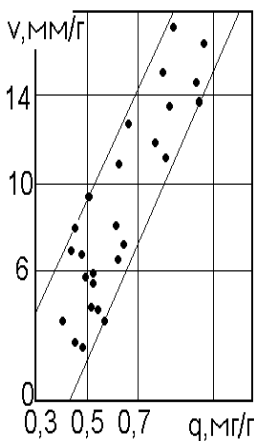
круг уже не может ввести новые резервные поверхности в работу и его износ при этом начинает возрастать. Таким образом, на кривой «производительность-износ» мы можем наблюдать две зоны: стабильного износа (P), когда круг еще имеет резервы площади режущей поверхности (формы 1 - 4), и повышенного износа (BP), где от-



существует резерв площади режущей поверхности (форма 5), разделенные перегибом кривой $Q - q_p$.

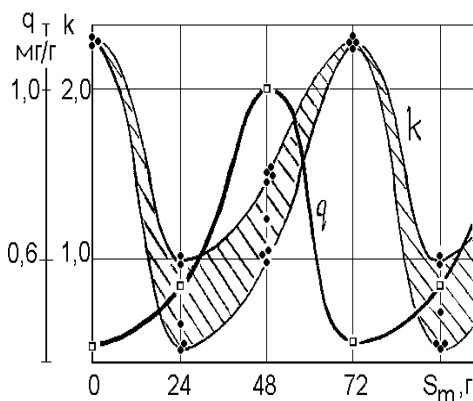
На такие изменения режущей поверхности круга практически не обращается внимание, поэтому, в большинстве случаев, исследователи для экспериментов берут круг не с формой 1, а с любой другой. Работают, как правило игнорируя формоизменения, в широкой области производительностей (в том числе и в зоне ВР) и, как результат, износ круга у них возрастает с повышением производительности. Вести поиск путей снижения износа кругов для одной и той же производительности при таком подходе невозможно, так как выход только один - снижение производительности.

Лавриненко В.И. предложен другой подход, на основе учета приведенных выше формоизменений, сформулированный в научном положении:



Характерный перегиб кривой «производительность шлифования - износ круга» является границей между зоной работы круга с резервом площади режущей поверхности и зоной отсутствия такого резерва, а производительность, соответствующая этому перегибу, принята нами, как критическая производительность шлифования.

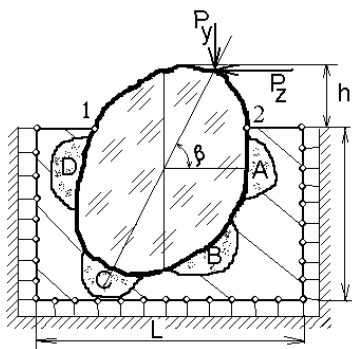
Это положение дает возможность вести поиск путей снижения износа круга в направлении повышения величины значения критической производительности, а это, в свою очередь, позволит перевести износ круга из т.1 в т.2. Реальную возможность это сделать дает анализ полученной, на основе этого положения и теории абразивного износа зерен Крагельского, формулы для расчета граничной производительности.



Кроме формоизменений в радиальном направлении, не менее важные изменения на поверхности круга происходят и в окружном направлении. Исследователи преимущественно пренебрегают такими формоизменениями и считают, что вся режущая поверхность круга ответственна за съем припуска. Такое пре-

небрежение приводит к довольно существенной ошибке, так как реально в съеме принимает участие не все 100%, а только $\approx 50\%$ поверхности. А связано это с тем, что форма профиля режущей поверхности круга в окружном направлении приобретает форму волны и реально за съем припуска отвечает только фронт волны. Укажем, что наличие волны зафиксировано некоторыми исследователями как на кругах из СТМ, так и на абразивных кругах. При этом, только на абразивных кругах зафиксировано движение волны. Приведенное явление связывалось исследователями только с нежесткостью технологической системы, а движение волны как случайное явление, вызванное случайным касанием разных участков поверхности круга с изделием при шлифовании.

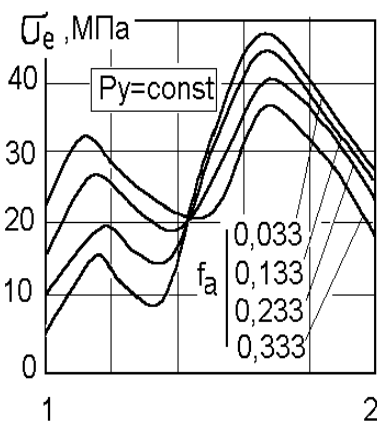
Лавриненко В.И. впервые сформулирован другой подход к указанному явлению, как к закономерному формоизменению режущей поверхности круга, а наличие волны – необходимая составляющая механизма съема припуска. На основе такого



подхода показано, что волна двигается в окружном направлении и, как впервые выявлено, двигается неравномерно. Кроме того, впервые установлена корреляционная связь между скоростью движения волны и износом круга. Это позволило сформулировать научное положение:

На основе установленных закономерностей формоизменения режущей поверхности кругов из СТМ при шлифовании в виде волновых процессов выдвинуто положение про то, что для повышения износостойкости кругов необходимо ограничивать скорость движения волны в окружном направлении.

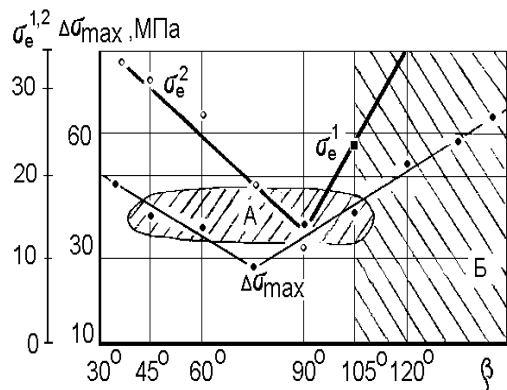
Для этого, сформулированы принципы, которых необходимо



придерживаться: во-первых, внести хаотичность в процесс движения волны, чтобы уменьшить ее скорость; во-вторых, разделить волну, как минимум на две, чтобы сбалансировать срывы ее гребня. Для их реализации предложена новая конструкция круга с чередующимися слоями в окружном направлении (А.С. 1437169), что снизило износ круга.

Как правило, принимается, что зерна СТМ размещены в связке вертикально, однако на самом деле это не так. Зерна располагаются под углом, равным $\approx 45^\circ$ в обе

стороны относительно оси ординат. Укажем, что с точки зрения напряженного состояния это ухудшает ситуацию, поскольку зерна находятся в крайне неблагоприятной зоне напряжений Б, особенно для угла наклона в 135° . Для улучшения этого состояния, необходимо снижать нагрузку на связку. При высоких производительностях шлифования сделать это нереально. А вот изменить структуру этой нагрузки вполне возможно и сделать это возможно путем изменения отношения основных составляющих силы резания: составляющих P_z и P_y , или коэффициента абразивного резания $f_a = P_z/P_y$. Проведенными исследованиями НДС системы «зерно-связка» установлено, что необходимо стремиться



в процессе шлифования к повышению величины f_a . При этом, желательно уменьшать составляющую P_y , или сдерживать ее возрастание. А вот составляющую P_z необходимо повышать. Установлено, например, что при увеличении P_z даже в 8 раз, при том же значении P_y , напряженное состояние не только не ухудшилось, но и улучшилось. На основе этого сформулировано научное положение: с помощью положений теории упругости и решения задачи определения напряженно-деформированного состояния системы «зерно-связка» выдвинуто положение о том, что для улучшения этого состояния и, соответственно, снижения износа круга в процессе шлифования, необходимо стремиться к повышению значения величины коэффициента абразивного резания, и, при этом, уменьшать составляющую силы резания P_y или сдерживать ее от возрастания.

Реально это возможно сделать путем максимального уменьшения контакта связки с обрабатываемым материалом (за счет электроэрозийных процессов, см. первое положение), а также, как установлено, при прочих равных условиях, увеличением зернистости и концентрации СТМ, уменьшением глубины шлифования и скорости вращения круга.

Укажем, для подтверждения указанного выше положения, что с возрастанием f_a износ круга уменьшается. Так, например, для твердых сплавов эта зависимость имеет вид: $q = 149,58 - 467,16 \cdot f_a$. Из анализа формулы критической производительности шлифования

Укажем, для подтверждения указанного выше положения, что с возрастанием f_a износ круга уменьшается. Так, например, для твердых сплавов эта зависимость имеет вид: $q = 149,58 - 467,16 \cdot f_a$. Из анализа формулы критической производительности шлифования

$$Q = k_F k_H k_{nep} \frac{S_n (D - \frac{2S_n}{\operatorname{tg} \varphi}) \arcsin(\frac{h}{D - 2S_n / \operatorname{tg} \varphi})}{0,5625 k_{CT} D \sin \varphi} \cdot \frac{H_P \cdot v_K}{Z \cdot H_M},$$

полученной с помощью положения о критической производительности обработки, следует, что для повышения значения величины этой производительности необходимо стремиться к повышению прочности зерен (H_p). Но, прямое повышение прочности зерен входит в противоречие с удержанием этих зерен. А поэтому, необходимо повышать твердость связки, которая в значительной степени определяет удержание зерен СТМ. Так, показано, что для металлических связок с возрастанием твердости напряжение абразивоудержания повышается:

$$\sigma_A = 0,273 H_3 + 19,8.$$

Вместе с этим, с твердостью связаны и другие свойства. Так, с возрастанием твердости металлополимерных связок снижается коэффициент трения: $f_{МП} = 5,96 \cdot 10^{-2} - 6,96 \cdot 10^{-4} H_3$. Это также свидетельствует о том, что необходимо повышать твердость рабочего слоя композитов. Однако, теперь уже прямое повышение твердости связок входит в противоречие с режущей способностью круга, так как с повышением твердости режущая способность круга ухудшается. Но, в нашем случае, это противоречие отсутствует, поскольку режущая способность кругов обеспечивается электроэрозией в зоне обработки.

Укажем, что реально достичь такого повышения традиционными методами сложно. Поэтому, Лавриненко В.И. предложен другой подход, связанный с использованием внутреннего пористого пространства режущего слоя кругов. Много исследователей это пространство считают несущественным и не стоящим внимания. Однако, оно имеет место и именно его возможно использовать для повышения твердости, за счет заполнения его веществом. Именно это и позволило: для условий высокопроизводительного электрошлифования инструментальных материалов, на уровне или выше критической производительности, выдвинуть положение о необходимости повышения твердости рабочего слоя кругов за счет заполнения веществом его внутреннего пористого пространства.

Лавриненко В.И. показал, что реально этого возможно достичь следующим: при непосредственном изготовлении круга - за счет введения легкоплавкого стекла в связку (твердость повышается с 90...93 до 100..105 HRB); при термообработке режущего слоя - за счет эффекта изменения градиента подвижной фазы (твердость растет с 92...93 до 102...114 HRB; применением эффекта водопоглощения режущим слоем (эффект позволяет повысить твердость кругов на металлических связках на 6...17, а на полимерных на 9...15 ед. HRB).

При электрохимическом шлифовании обычным является возник-

новение электроэрозионных разрядов в зоне обработки. Особенно это характерно для повышенных режимов шлифования. Исторически так сложилось, что исследователи эти процессы пытались «задавить», для улучшения электрохимических процессов. Но практика подсказала, что это сделать невозможно, а лучше забыть о электрохимических процессах и дать волю электроэрозионным. Так появилось электроэрозионное шлифование. А электрохимическое - осталось со своими нерешенными проблемами. Поскольку, электроэрозионное шлифование для условий обработки инструментальных материалов, содержащих карбиды металлов IVb-Vb подгрупп, применено быть не может, то предложено недостатки электрохимического шлифования обернуть в его преимущества.

Для этого, как нами сформулировано в первом положении, электрохимическое воздействие оставлено исключительно в виде процесса, формирующего на поверхности электродов электродные пленки. А электроэрозионный процесс предложено рассматривать не с позиций возникновения пробоя МЭЗ электроразрядами, а с позиций электроконтактного взаимодействия между стружкой и поверхностью связки круга. На основе такого подхода и сформулировано следующее научное положение: закономерности электроконтактного взаимодействия при электрошлифовании кругами из СТМ необходимо рассматривать не с точки зрения прямого пробоя межэлектродного промежутка, а с позиций триботехники скользящих электрических контактов.

Это положение базируется на впервые установленном для условий электрошлифования эффекте «смазывания электрическим током», наличие которого и является характерным для триботехники скользящих электрических контактов. Именно такой подход и позволил нам впервые получить формулы для расчета электроэрозионного износа связки и плотности электроэрозионной составляющей общего тока при электрошлифовании, отсутствующие в литературе. А это, в свою очередь, позволило определить пути уменьшения избыточности электроэрозионных процессов при электрошлифовании и достичь, в определенной мере, решения той проблемы, которую не могли решить ранее исследователи электро-химического шлифования - значительного снижения электроэрозии. Например, для классического метода электрохимического шлифования стали Р6М5Ф3 при производительности $1200 \text{ мм}^3/\text{мин}$ ток составляет 220 А при $U=6 \text{ В}$, а при использовании такого подхода он составляет уже 50А при тех же производительности и U , но при износе круга в 2,6 раза меньше.

Таким образом, это положение позволяет снизить энергоемкость более чем в 4 раза и при этом уменьшить износ круга более чем в 2 раза.

А одним из механизмов получения позитивных эффектов, приведенных выше, является один из электродных процессов - катодный. Применительно к условиям электрохимического шлифования кругами из СТМ катодная поляризация практически не изучалась, что не позволяло использовать ее, как эффективный элемент управления процессом. А поскольку, изменена концепция электрохимических процессов на чисто электродные, а электроэрозионных на электроконтактные, то катодные процессы из вспомогательных переходят в главные, так как именно они изменяют условия контактирования стружки с поверхностью круга.

Именно поэтому, впервые для условий электрошлифования изучена кинетика катодных процессов, наличие и функционирование катодных пленок, их элементный состав и характеристики, что позволило: на основе изучения кинетики катодных процессов и исследования особенностей фрикционного взаимодействия при наличии катодных пленок выдвинуть положение о приоритетности катодных процессов при электрошлифовании, поскольку, для них характерным является наличие тройного эффекта: создание гидроксидного блока в МЭЗ, а также формирования катодных пленок, которые являются не только покрытием, изменяющим условия электрофизического контакта, а также являются и своеобразным защитным покрытием, повышающим способность режущей поверхности круга сопротивляться абразивному действию шлама в процессе обработки.

Для реализации таких эффектов: 1) разработана методика определения величины добавок в состав электролита солей, имеющих амфотерные гидроксиды, которые позволяют блокировать весь объем МЭЗ и резко снижать величину тока и износ круга; 2) определены условия изменения интенсивности электрофизического контакта за счет введения в состав электролита солей, изменяющих перенапряжение катодного процесса; 3) определены условия формирования катодных процессов и пленок за счет средств неявной поляризации, которые характеризуются использованием эффекта электрохимической гетерогенности поверхности связки (одним из средств обеспечения которого является эффект водопоглощения) и поляризованными технологическими жидкостями. Например, использование воды, активированной гидратионами, снижает износ кругов до 2 раз в сравнении с обычной, не активированной водой (А. С. 1712393).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прочитав последний том настоящего издания, еще раз убеждаешься, насколько сложны и многогранны проблемы обработки материалов и технологии машиностроения. Становится понятным, почему этим проблемам уделяется так много внимания, а к их решению подключен огромный научный потенциал. Становится ясным и понятным, что в ближайшие годы разработать в полном объеме физико-математическую теорию процессов обработки материалов и технологии машиностроения еще не удастся, в связи с необыкновенно сложной физикой процессов обработки и недостаточным ее пониманием.

В последнее время наметились тенденции широкого применения компьютерных технологий для решения технологических задач. Появились новые решения на основе трехмерного моделирования с помощью 3D систем. В этой связи хочу отметить, что прежде чем заниматься объемным (трехмерным) моделированием, надо научиться работать с простыми одномерными моделями (буквально на уровне школьного курса физики). Что дают трехмерные модели? Они, по сути, позволяют лишь уточнить первичные упрощенные решения. Поэтому трехмерным решениям обязательно должны предшествовать упрощенные решения, полученные в виде очень простых инженерных формул, из которых (если они правильно получены) должны вытекать основные физические закономерности процессов обработки и технологии машиностроения. И только с пониманием этих упрощенных решений можно переходить к работе в двух- и трехмерном пространстве. Но не наоборот! В противном случае огромный труд по созданию трехмерных моделей может оказаться невостребованным (в лучшем случае) или привести к неверным ошибочным решениям (в худшем случае). Надо помнить, что путь к истине – это движение от простого к сложному.

Исходя из сказанного, настоящее 10-ти томное издание следует рассматривать не как завершение работ над решением сложных технологических проблем, а как новую точку отсчета для дальнейших научных работ, которые позволят приблизить нас к пониманию истины и открыть новые горизонты создания Технологий и Машин Будущего.

С уважением доктор технических наук Новиков Ф.В.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абразивно-алмазная обработка материалов: Справочник / Под ред. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 390 с.
2. Абрамов В.В. Остаточные напряжения и деформации в металлах (расчеты методом расчленения тела). – М.: Машгиз, 1963. – 355 с.
3. Аваков А.А. Физические основы теории стойкости режущих инструментов. – М.: Машгиз, 1960. – 306 с.
4. Аврутин Ю.Д. Рельеф шлифовального круга и его связь с шероховатостью шлифовальной поверхности. – Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Л.: ЛПИ, 1977. – 23 с.
5. Агагабов С.Г. Влияние шероховатости поверхности твердого тела на его радиационные свойства и методы их экспериментального определения. – Теплофизика высоких температур. – М.: Наука, т. 6, вып.1, 1968. – С. 78-87.
6. Агагабов С.Г. Влияние фактора шероховатости на радиационные свойства тел (экспериментальная проверка). – Теплофизика высоких температур. – М.: Наука, т.8, №4, 1970. – С. 770-774.
7. Адам Н.К. Физика и химия поверхностей. – М.: Гостехиздат, 1947. – 420 с.
8. Адаптивное управление технологическими процессами (на металлорежущих станках) / Ю.М. Соломенцев, В.Г. Митрофанов, С.П. Протопопов и др. – М.: Машиностроение, 1980. – 536 с.
9. Адлер Ю.П., Маркова В.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
10. Акоф Р., Сасиени М. Основы исследования операций. – М.: Мир, 1971.
11. Активный контроль в машиностроении: Справочник / Педь Е.И., Высоцкий А.В., Машинистов В.М. и др. / Под ред. Е.И. Педь. – М.: Машиностроение, 1978. – 352 с.
12. Ансеров М.А., Бутковский Б.Д. Приспособления для фрезерных станков. Элементы, приводы, конструкции. – М.: Гос.научн.-техн.изд-во машиностроит. и судостр. литературы, 1953. – 296 с.
13. Ансеров М.А. Приспособления для металлорежущих станков. Расчёты и конструкции. Изд. 2-ое перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1964. – 652 с.
14. Антонюк В.Е., Королёв В.А., Башев С.М. Справочник конструктора по расчёту и проектированию станочных приспособлений. – Минск, Беларусь, 1969.
15. Армарего И. Дж. А., Браун Р.Х. Обработка металлов резанием. Пер. с англ. В.А. Пастунова. – М.: Машиностроение, 1977. – 325 с.
16. Арсенин В.Я. Математическая физика. Основные уравнения и специальные функции. – М.: Наука, 1966. – 346 с.
17. Артемьев Б.Г., Голубев С.М. Справочное пособие для работников метрологических служб. – Изд. 2-е, перераб. и доп. в двух книгах. – Кн. 1. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 352 с.

18. Аршанский М.М., Щербаков В.П. Вибродиагностика и управление точностью обработки на металлорежущих станках. – М.: Машиностроение, 1984. – 224 с.
19. Аршинов В.А., Алексеев Г.А. Резание металлов. – М.: Машгиз, 1959. – 490 с.
20. А.С. 618261 СССР МКИ В24В 1/00. Способ шлифования / М.С. Наерман, А.К. Шишов. – Опубл. 05.08.78. Бюл. № 29.
21. А.С. 747706 СССР МКИ В24В 49/00. Устройство для ограничения перемещений шлифовального круга / А.В. Якимов, В.П. Ларшин, А.А. Якимов. – Опубл. 15.07.80. Бюл. № 26. – 3 с.
22. А.С. 764942 СССР МКИ В24В 1/00. Способ абразивной обработки / Ю.М. Ермаков. – Опубл. 23.09.80. Бюл. № 35. – 3 с.
23. А.С. 1155421 СССР МКИ В23Q 11/04, 49/00. Способ защиты инструмента от перегрузок и устройство для его реализации / Е.Т. Шаров, В.А. Тараненко. – Опубл. 15.05.85. Бюл. № 18. – 3 с.
24. А.С. 1199594 СССР МКИ В24В 1/00. Способ глубинного шлифования цилиндрической детали / В.А. Аксенов, Ю.С. Чесов, С.Г. Патрушев, В.Н. Бороздин. – Опубл. 23.12.85. Бюл. № 47.
25. А.С. 1202745 СССР МКИ В23В 49/00. Устройство для контроля состояния инструмента / В.А. Остафьев, В.В. Кокаровцев, К.Г. Махмудов, А.И. Александров. – Опубл. 03.01.86. Бюл. № 1. – 2 с.
26. А.С. 1288039 А1 СССР МКИ В24В 51/00. Способ управления шлифованием / А.В. Якимов, В.П. Ларшин, В.Ф. Соколов, А.М. Скляр, Д.А. Севрюгин. – Опубл. 07.02.87. Бюл. №5. – 4 с.
27. А.С. 1399097 А1 СССР МКИ В24В 49/00. Способ определения глубины резания при шлифовании / В.П. Ларшин, А.М. Скляр, А.В. Якимов. – Опубл. 30.05.88. Бюл. № 20.- 4 с.
28. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения. – М.: Изд-во физ.-мат. лит., 1963. – 470 с.
29. Бабаков И.М. Теория колебаний. – М.: Наук, 1968. – 560 с.
30. Байкалов А.К. Введение в теорию шлифования материалов. – К.: Наук. думка, 1978. – 207 с.
31. Байкалов А.К., Сукенник И.Л. Алмазный правящий инструмент на гальванической связке. – К.: Наук. думка, 1976. – 203 с.
32. Бакуль В.Н., Захаренко И.П., Кункин Я.А., Мильштейн М.З. Справочник по алмазной обработке металлорежущего инструмента. – К.: Техника, 1971. – 208 с.
33. Балакин В.А. Трение и износ при высоких скоростях скольжения. – М.: Машиностроение, 1980.
34. Балакшин Б.С. Основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 1969. – 359 с.
35. Бахвалов В.Л. Исследование влияния параметров процесса зубошлифования конусным кругом и исходного состояния материала на качество поверхностного слоя. – Дис. ... канд. техн. наук. – Одесса: ОПИ, 1977. – 340 с.

36. Беззубенко Н.К. К вопросу выбора режима работы режущих зерен при алмазно-искровом шлифовании. – Резание и инструмент, 1979. – Вып. 22. – С. 3–6.
37. Беззубенко Н.К., Тананко И.А., Бобух Ж.С., Михайлуца Э.Б. Формирование режущей поверхности алмазного инструмента на металлической связке при электроэрозионной правке. – Синтетические алмазы, 1975, № 1. – С. 18–20.
38. Бекишев Г.А., Кратко М.И. Элементарное введение в геометрическое программирование. – М.: Наука, 1980. – 144 с.
39. Беллман Р., Калаба Р. Динамическое программирование и современная теория управления. – М.: Наука, 1969. – 118 с.
40. Беллман Р., Кук К. Дифференциально-разностные уравнения. – М.: Мир, 1967. – 548 с.
41. Белоусов А.П. Проектирование станочных приспособлений. Изд. 2-ое, перераб. и доп. Учеб. пособие для техникумов. – М.: Высшая школа, 1974. – 264 с.
42. Беляев Н.М., Рядно А.А. Методы теории теплопроводности. – М.: Высш. шк., 1982. – 304 с.
43. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.
44. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. – М.: Наука, 1983. – 416 с.
45. Болотин Х.Л., Костромин Ф.П. Станочные приспособления. Конструирование и расчёт. Изд.4-ое перераб. – М.: Гос.научн.-техн. изд-во машиностроит. литературы, 1956. – 315 с.
46. Болотин Х.Л., Костромин Ф.П. Станочные приспособления. Конструирование и расчёт. Изд.5-ое перераб. и доп. – М.: Гос.научн.-техн.изд-во машиностроит. литературы, 1956. – 315 с.
47. Бондарь А.Г., Статюка Г.А. Планирование эксперимента в химической технологии. – К.: Вища школа, 1976. – 184 с.
48. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУзов. – 13-е изд. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 544 с.
49. Бугров Я.С., Никольский С.М. Высшая математика. Дифференциальные уравнения. Кратные интегралы. Ряды. Функции комплексного переменного. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1981. – 448 с.
50. Быков А.В. и др. ADEM CAD/CAM/TDM/Черчение, моделирование, механообработка / Быков А.В., Силин В.В., Семенников В.В., Феоктистов В.Ю. – СПб.: БХВ – Петербург, 2003. – 320 с.
51. Вальков В.М. Контроль в ГАП. - Л.: Машиностроение, 1986. - 232 с.
52. Ватсон Г.Н. Теория Бесселевых функций. - Т. 1. – М.: Изд-во ин. лит. – 1949.
53. Вентцель Е.С. Исследование операций. – М.: Советское радио, 1972.
54. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
55. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостой-

- кими покрытиями. – М.: Машиностроение, 1993. – 336 с.
56. Витенберг Ю.Р. Применение корреляционной теории для оценки шероховатости шлифованной поверхности. – Вестник машиностроения, 1969, вып. 1.
 57. Витенберг Ю.Р. Шероховатость поверхности и методы ее оценки. – Л.: Судостроение, 1971. – 108 с.
 58. Внуков Ю.Н. Исследование процесса высокопроизводительного шлифования быстрорежущих сталей кругами из дробленых сверхтвердых поликристаллов. – Автореф. ... канд. техн. наук. – Тбилиси, 1977. – 21с.
 59. Волосов С.С., Гейлер З.Ш. Управление качеством продукции средствами активного контроля. – М.: Изд. стандартов, 1989. – 263 с.
 60. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике: 4-е изд. – М.: Гос. изд. физ.-мат. лит., 1959. – 783 с.
 61. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. – М.: Наука, 1988. – 552 с.
 62. Гельфанд А.О. Исчисление конечных разностей. – М.: ФМГ, 1967. – 320 с.
 63. Гельфгат Ю.И. Сборник задач и упражнений по технологии машиностроения: Учебн. пособие для машиностр. спец. техникумов. — 2-е издание перераб. — М.: Высш. шк., 1986. — 271 с.
 64. Генкин М.Д., Рыжов М.А., Рыжов Н.М. Повышение надежности тяжело нагруженных зубчатых колес. – М.: Машиностроение, 1981. – 232 с.
 65. Гжиров Р.И. Краткий справочник конструктора: Справочник. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1984. — 464 с.
 66. Гнусин И.П., Коварский Н.Я. Шероховатость электроосажденных поверхностей. – Новосибирск: Наука, 1970.
 67. Горбачевич А.Ф., Шкред В.А. Курсовое проектирование по технологии машиностроения: Учеб. пособие для машиностроит. спец. вузов.– 4-е изд., перераб. и доп. – Минск: Высшая школа, 1983. –256 с.
 68. Горошкин А.К. Приспособления для металлорежущих станков: Справочник. 7-ое изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1979. – 303 с.
 69. Грабченко А.И. Расширение технологических возможностей алмазного шлифования. – Харьков: Вища шк., 1985. – 184 с.
 70. Грабченко А.И. Физические и технологические закономерности алмазного шлифования сверхтвердых материалов. – Матер. 5-й междунар. конф. по режущим инструментам. ВНР, Мишкольц, 1982 (24-27 августа). - С. 11.18/1-11.18/6.
 71. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. – М.: Физматгиз, 1961.- 1020 с.
 72. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов. – М.: Высш. шк., 1985. – 304 с.
 73. Грановский В.А., Сирая Т.Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1990. – 288 с.
 74. Гродзинский Э.Я., Голубев И.В., Маковицкая А.Т. Станки и оснастка для шлифования с электрической активацией рабочей поверхности круга. – Станки и инструмент, 1981, №4. – С. 10–12.

75. Грувер М., Зиммерс Э. САПР и автоматизация производства. Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 528 с.
76. Даниелян А.М. Теплота и износ инструментов в процессе резания металлов. – М.: Машгиз, 1954. – 276 с.
77. Даниелян А.М., Бобрик П.И. Особенности тепловых явлений при резании жаропрочных сплавов. - Станки и инструмент, 1961, № 12. – С. 25-27.
78. Данилевский В.В. Справочник молодого машиностроителя. Справочник для молодых рабочих машиностроительных заводов и учащихся проф.-техн. училищ. – Изд.3-е, доп. и перераб. — М.: Высш. школа, 1973. — 456 с.
79. Данилевский В.В. Технология машиностроения: Учебник для техникумов. – 5-е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1989. – 416 с.
80. Данилевский В.В., Гельфгат Ю.И. Лабораторные работы и практические занятия по технологии машиностроения: Учеб. пособие для машиностр. спец. техникумов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1988. — 222 с.
81. Даффин Р., Питерсон Э., Зенер К. Геометрическое программирование. Перевод с англ. Д.А. Бабаева. – М.: Мир, 1972 . – 312 с.
82. Девин Л.Н. Прогнозирование работоспособности металлорежущего инструмента. – К.: Техніка, 1992. – 132 с.
83. Демкин Н.Б. Контактное шлифование шероховатых поверхностей. – М.: Наука, 1970. – 227 с.
84. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных. – М.: Мир, 1980. – 610 с.
85. Джугурян Т.Г. Технологічні основи керування точністю та якістю обробки при прецизійному розточуванні. – Дис... докт. техн. наук. – Одеса: ОДПУ, 2001. – 467 с.
86. Диагностика технического состояния автомобилей / Н.Я. Говорущенко. – М.: Транспорт, 1970 . – 256 с.
87. Диткин В.А., Прудников А.П. Справочник по операционному исчислению. - М.: Высш. шк., 1965. – 465 с.
88. Добрыднев И.С. Курсовое проектирование по предмету „Технология машиностроения”: Учебн. пособие для техникумов по специальности „Обработка металлов резанием”. — М.: Машиностроение, 1985. — 184 с.
89. Допуски и посадки: Справочник / Ю.Е. Кирилук. — К.: Вища школа. Головное изд-во, 1987. — 120 с.
90. Дудко П.Д. Исследование процесса доводки стальных цилиндрических деталей свободным абразивом с осциллирующим движением притира. – Дис. ... канд. техн. наук. – Харьков: ХПИ, 1970. – 300 с.
91. Дунин-Барковский И.В. и др. К вопросу о нормировании и контроле неровностей декоративных поверхностей. – Сб. “Метрология и свойства обработанных поверхностей”. – Труды НИИ метрологии, 1977. – Вып. 15. – С. 124-127.
92. Дунин-Барковский И.В., Карташова А.Н. Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности. – М.: Машиностроение,

1978. – 223 с.
93. Душинский В.В., Пуховский Е.С., Радченко С.Г. Оптимизация технологических процессов в машиностроении / Под общ. ред. Г.Э. Таурита. – К.: Техніка, 1977. – 176 с.
 94. Евдокимов Ю.А., Колеников В.И., Тетерин А.И. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа. – М.: Наука, 1980. – 228 с.
 95. Евсеев Д.Г. Формирование свойств поверхности при абразивной обработке. – Саратов: СГУ, 1975. – 127 с.
 96. Евсеев Д.Г., Сальников А.И. Физические основы процесса шлифования. – Саратов: СГУ, 1978. – 128 с.
 97. Епифанов Г.И., Ребиндер П.Л. Об энергетическом балансе процесса резания металлов. – Доклады АН СССР, 1949, т. 69, № 4.
 98. Ермаков С.М., Жиглявский А.А. Математическая теория оптимального эксперимента: Учеб. пособие. – М.: Наука, 1987. – 320 с.
 99. Зангвилл У.И. Нелинейное программирование. – М.: Советское радио, 1973.
 100. Захаренко И.П. Алмазные инструменты и процессы обработки. – К.: Техніка, 1980. – 212 с.
 101. Захаренко И.П. Основы алмазной обработки твердосплавного инструмента. – К.: Наук. думка, 1981. – 300 с.
 102. Захаренко И.П. Рациональное использование сверхтвердых абразивных материалов в инструментальном производстве. – К.: Наук. думка, 1979. – 156 с.
 103. Захаренко И.П. Сверхтвердые абразивные материалы в инструментальном производстве. – К.: Вища школа, 1985. – 152 с.
 104. Захаренко И.П. Эффективные методы шлифования алмазным инструментом. - Обзор/ сер. С-2 инструм. и абразив. алм. пром-сть, НИИ информ. по машиностроению. – М.: НИИмаш, 1978. – 45 с.
 105. Захаренко И.П. Эффективность обработки инструмента сверхтвердыми материалами. – М.: Машиностроение, 1982. – 224 с.
 106. Захаренко И.П., Савченко Ю.Я. Алмазно-электролитическая обработка инструмента. – К.: Наук. думка, 1978. – 224 с.
 107. Захаренко И.П., Шепелев А.А. Алмазная заточка твердосплавного инструмента совместно со стальной державкой. – К.: Наук. думка, 1976. – 219 с.
 108. Зенер К. Геометрическое программирование и техническое проектирование. Пер. с англ. Д.А. Бабаева. – М.: Мир, 1973. – 112 с.
 109. Зорин Е.П. Исследование свойств инструмента и технологических параметров при прецизионном резании высокопрочных и нержавеющей сталей. – Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Воронеж, 1974. – 23 с.
 110. Зуховицкий С.И., Авдеева Л.И. Линейное и выпуклое программирование. – М.: Наука, 1965.
 111. Иванов В.В. Методы вычислений на ЭВМ. – К.: Наук. думка, 1986.

112. Игумнов Б.Н. Расчет оптимальных режимов обработки для станков и автоматических линий. – М.: Машиностроение, 1974. – 200 с.
113. Израйлович М.Я. Оптимизация процессов механической обработки алмазным и твердосплавным инструментом. – М.: ВНИИТЭМР, 1985. – 44 с.
114. Ипполитов Г.М. Абразивно-алмазная обработка. – М.: Машиностроение, 1969. – 336 с.
115. Исаченко В.В., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
116. Кабановский Л.Н., Артюхов В.П., Панич А.Н. Исследование плоского алмазного шлифования твердого сплава со сталью. – Синтетические алмазы, 1977, вып. 1. – С. 42-44.
117. Калинин Е.П. Исследование процесса зубошлифования на станках с червячным абразивным кругом в связи с нахождением путей устранения прижогов. – Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Пермь: ППИ, 1966. – 34 с.
118. Капустин Н.М. Автоматизация машиностроения: Учебник для вузов / Н.М. Капустин и др. - М.: Высшая школа, 2003. – 223 с.
119. Капустин Н.М. Разработка технологических процессов обработки деталей на станках с помощью ЭВМ. - М.: Машиностроение, 1976. — 288 с.
120. Каракулова М.Л. К вопросу о глубине внедрения абразивного зерна в металл при глубинном шлифовании. – Соверш. процесса обраб. матер. резанием, Ижевск, 1976, вып. 1. - С. 43-46.
121. Карлов Р.Ф. Адаптивная система управления обработкой глубоких отверстий. - Станки и инструмент, 1974, № 8. - С. 23-24.
122. Карманов В.Г. Математическое программирование. – М.: Наука, 1975. – 272 с.
123. Карслоу Х.С., Егер Д.К. Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1984. – 487 с.
124. Качество и производительность абразивно-алмазной обработки: Учеб. пособие / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, А.А. Якимов. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 212 с.
125. Качество машин: Справочник. В 2 т. Т.1 / А.Г. Суслов, Э.Д. Браун, Н.А. Виткевич и др. – М.: Машиностроение, 1995. – 256 с.
126. Качество машин: Справочник: В 2-х т. Т.1 / А.Г.Суслов, Ю.В. Гуляев, А.М. Дальский и др. — М.: Машиностроение, 1995. — 430 с.
127. Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке / Э.В. Рыжов, А.А. Сагарда, В.Б. Ильицкий, И.Х. Чеповецкий. – К.: Наук. думка, 1979. – 244 с.
128. Качество продукции автоматизированного машиностроительного производства / А.С. Зенкин, И.В. Петко, И.П. Стародуб, И.В. Мельниченко. – К.: Техніка, 1988. – 175 с.
129. Кащук В.А., Мелехин А.Д., Бармин Б.П. Справочник заточника. – М.: Машиностроение, 1982. – 232 с.
130. Каяшев Л.И., Митрофанов В.Г., Схиртладзе А.Г. Методы адаптации при управлении автоматизированными станочными системами. – М.: Машиностроение, 1995. - 240 с.

131. Кедров С.М. Средства повышения производительности доводки металлов. – Станки и инструмент, 1987, №6.
132. Кирсанов С.В, Гречишников В.А., Схиртладзе А.Г., Кокарев В.И. Инструменты для обработки точных отверстий. – М.: Машиностроение, 2003. – 330 с.
133. Кларк Ф. Оптимизация и негладкий анализ. – М.: Наука, 1988. – 280 с.
134. Ковальгонов В.Н. Повышение эффективности совмещенного шлифования с применением СОЖ путем термостабилизации зоны обработки. – Дис. ... канд. техн. наук. – Ульяновск: УлГТУ, 2000. – 244 с.
135. Кожевников С.Н. Теория механизмов и машин. – М.: Машиностроение, 1973. – 592 с.
136. Колев К.С., Горчаков Л.М. Точность обработки и режимы резания. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1976. –145 с.
137. Колесов И.М. Основы технологии машиностроения: Учеб. для машиностроит. спец. вузов.— 2-е изд., испр.— М.: Высш. шк., 1999.— 559 с.
138. Колкер Я.Д. Математический анализ точности механической обработки деталей. - К.: Техніка, 1976.—200 с.
139. Коллатц Л., Карбс В. Теория приближений. – М.: Наука, 1978. – 272 с.
140. Колуэлл А. Влияние высокочастотных вибраций на процесс шлифования. – Т., 1955. – 87. – № 2243.
141. Константинов О.Я. Магнитная технологическая оснастка. – М.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1974. – 384 с.
142. Контроль качества продукции в машиностроении /Артес А.Э., Агапов Ю.Н., Гончаров Э.Н. и др. / Под ред. А.Э. Артеса. – М.: Изд-во стандартов, 1974. - 448 с.
143. Королев А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1984. – 106 с.
144. Королев А.В., Белов Г.И. Механизм самозатачивания абразивного инструмента. – Саратов: Саратов. политехн. ин-т, 1981. – 15 с. (рукопись деп. в ВНИИ ТИ 21 дек. 1981 г., № 5753-81).
145. Королев А.В., Капульник С.И., Евсеев Д.Г. Комбинированный способ шлифования – доводки качающимся кругом. – Изд-во Саратов. ун-та, 1983. – 96 с.
146. Королев А.В., Новоселов Ю.К. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. Часть 1. Состояние рабочей поверхности абразивного инструмента. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1987. – 160 с.
147. Королев А.В., Новоселов Ю.К. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. Часть 2. Взаимодействие инструмента и заготовки при абразивной обработке. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1989. – 160 с.
148. Королев А.В., Пармонов А.Н., Чехолин С.Н. Исследование количества абразивных зерен на поверхности шлифовальных кругов. – Науч. тр. Саратов. политехн. ин-та, 1971, вып. 51.
149. Корсаков В.С. Основы конструирования приспособлений в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1971. – 288 с.

150. Корсаков В.С. Основы технологии машиностроения. Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1974. – 335 с.
151. Корсаков В.С. Основы конструирования приспособлений. Учебник для вузов. 2-ое изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1983. – 277 с.
152. Корчак С.Н. Прогрессивная технология и автоматизация круглого шлифования. – М.: Машиностроение, 1968. – 108 с.
153. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.
154. Корчак С.Н. Теоретические основы влияния технологических факторов на повышение производительности шлифования стальных деталей. – Автореф. дис. ... докт. техн. наук. – Челябинск: ЧПИ, 1973. – 45 с.
155. Корчак С.Н., Переверзев П.П. Оптимизация режимов резания для операций круглого врезного шлифования на станках с автоматическим циклом управления. – Резание и инструменты, 1985, вып. 34. – С. 86-89.
156. Корчак С.Н., Переверзев П.П. Формирование автоматических циклов шлифования с учетом важнейших технологических ограничений на основе аналитических моделей управления. – Совершенствование процессов абразивно-алмазной и упрочняющей технологии в машиностроении. – Пермь: ППИ, 1983. – С. 7–13.
157. Косов Н.П., Исаев А.Н., Схиртладзе А.Г. Технологическая оснастка: вопросы и ответы: Учеб. пособ. для вузов. – М.: Машиностроение, 2005. – 303 с.
158. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах. – К.: Техніка, 1970. – 396 с.
159. Костецкий Б.И. Шлифование закаленных сталей. – К.: Техника, 1947. – 84 с.
160. Кохтев А.А. Основы стандартизации в машиностроении. – Изд. 3-е перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1967. – 492 с.
161. Кошин А.А. Исследование функциональных связей между предельными режимами и тепловыми критериями процессов алмазно-абразивной обработки. – Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Челябинск, 1974. – 23 с.
162. Кошляков Н.С., Глинсер Э.Б., Смирнов М.М. Уравнения в частных производных математической физики. – М.: Высш. шк., 1985. – 712 с.
163. Кравченко Б.А., Светличнов Б.П. Остаточные напряжения при обработке жаропрочных материалов точением. – В кн.: Обрабатываемость жаропрочных и титановых сплавов. – Куйбышевское обл. книжное издательство, 1962. – С. 385-397.
164. Краснощек Ю.С. Исследование особенностей процесса алмазного шлифования безвольфрамовых твердых сплавов. – Дис. ... кан. техн. наук. – Харьков: ХПИ, 1981. – 213 с.
165. Кривоухов В.А. Ускоренный метод нахождения стойкости и силовых зависимостей для составления нормативов по режимам резания. – Станки и инструмент, 1960, № 6. – С. 26-28.
166. Круг Г.К. Планирование эксперимента в задачах идентификации и экстраполяции. – М: Наука, 1977. – 208 с.

167. Кудрявцев Е.М. КОМПАС-3D V7. Наиболее полное руководство. – СПб.: БХВ–Петербург, 2005. – 527 с.
168. Кузнецов А.П. Методы оценки тепловых деформаций металлорежущих станков и пути их снижения: Обзор. – М.: НИИМаш, 1983.- 68 с.
169. Кулаков Ю.М. и др. Предотвращение дефектов при шлифовании. – М.: Машиностроение, 1975. – 144 с.
170. Лавріненко В.І. Наукові основи шліфування інструментальних матеріалів із спрямованою зміною характеристик контактних поверхонь. - Автореф. дис. ... докт. техн. наук. – К.: ІНМ НАН України, 2000. – 35 с.
171. Лакирев С.Г. Обработка отверстий: Справочник. – Л.: Машиностроение, 1984. - 208 с.
172. Ларшин В.П. Диагностика операций многониточного шлифования резьбы шариковых винтов. - Диагностика технологических процессов в машиностроении: материалы семинара. – М.: Изд. МДНТП, 1990. – С. 82-88.
173. Ларшин В.П. Интегрированные производственные системы в машиностроении // Сучасне машинобудування.– 2000.– № 1-2(3-4).–С.141-147.
174. Ларшин В.П. Интегрированная технологическая система шлифования сложнопрофильных деталей (на примере резьбошлифования). - Автореф. дис. ... докт. техн. наук. – Одесса: ОГПУ, 1995. – 34 с.
175. Ларшин В.П. Интегрированные технологические системы в машиностроении. – Тр. Одес. политехн. ун-та. – Одесса, 1999, вып. 3(9). – С. 55-58.
176. Ларшин В.П. Новая технология автоматизированного шлифования сложнопрофильных деталей. – Научно-технические технологии в машиностроении и приборостроении: Тез. докл. российской научн. – техн. конф. – Рыбинск: РАТИ, 1994. – С. 102-103.
177. Ларшин В.П. Оптимизация рабочего цикла съёма припуска при шлифовании / Резание и инструмент в технологических системах. — Междунар. научн.-техн. сборник. — Харьков: НТУ «ХПИ», 2004. — С. 202-205.
178. Ларшин В.П. Оптимизация режимов зубошлифования на станках типа “МАОГ”. - Механическая обработка деталей машин и приборов: Тез. докл. республ. научн. конф. – К.:РДЭНТП,1976. – С.16.
179. Ларшин В.П. Повышение производительности плоского шлифования на основе анализа трудоёмкости процесса. – Тр. Одес. политехн. ун-та.— Одесса, 2002, вып.1(17).— С .60-64.
180. Ларшин В.П. Структура припуска на шлифование с учётом метода обеспечения точности обработки / Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы: Сборник статей междунар. научно-техн. конф. — Волжский: ОАО „Альянс” Югполиграфиздат, 2004. – С. 159-162.
181. Ларшин В.П. Структура припуска с учётом метода обеспечения точности обработки / Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении: Сборник материалов конф. — К.: АТМ Украины, 2004. – С. 104–107.
182. Ларшин В.П. Управление температурной погрешностью шага резьбы ходовых винтов при резьбошлифовании. – Сб. “Процессы абразивной

- обработки, абразивные инструменты и материалы”. – Волжский, 1999. – С. 132-135.
183. Ларшин В.П., Андрусенко А.М. Проектирование, изготовление и эксплуатация технологических систем на основе общей теории управления. – Тр. 5-й Междунар. научн.-техн. конф.: Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве. – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2002. – С. 19-23.
 184. Ларшин В.П., Гречиха А.А. Повышение эффективности шлифования вырубных штампов при использовании твердых технологических смазок. - Тр. Одес. политехн. ун-та. – Одесса, 2000, вып. 3(12). – С. 45-48.
 185. Ларшин В.П., Лищенко Н.В. Компьютерная диагностика технологического процесса механообработки по критерию стабильности. – Вісник інженерної академії України, 2001, № 3. – С. 43-47.
 186. Ларшин В.П., Лищенко Н.В. Разработка математического обеспечения для системы компьютерной диагностики процесса резьбошлифования. – Збірник наукових праць Кіровогр. держ. техн. ун-ту. – Кіровоград, 2003, вип. 12. – С. 113-119.
 187. Ларшин В.П., Лищенко Н.В., Мочуляк А.В. Автоматизация наладки металлорежущих станков с ЧПУ типа «обрабатывающий центр». - Вісник інженерної академії України, 2000, спец. вип.– С.23–24.
 188. Ларшин В.П., Ткаченко Б.О. Диагностика технологической операции финишного резьбошлифования на основе микроЭВМ. – Вестник машиностроения, 1992, №3. – С. 58–61.
 189. Ларшин В.П., Челиканов Г.М. Интегрирование машиностроительного производства на основе групповой технологии // Научно-технические проблемы станкостроения, производства технологической оснастки и инструмента: Мат. междунар. конф. – К.: АТМ Украины, 2002. – С. 70–72.
 190. Ларшин В.П., Якимов А.А., Акимова М.Н. Интегрированная технологическая система зубошлифования. – Научно-технические проблемы станкостроения, производство технологической оснастки и инструмента: Материалы междунар. конф. – К.: АТМ Украины, 2002. – С. 70-72.
 191. Ларшин В.П., Якимов В.А., Ковальчук Е.Н., Якимов А.В. Выбор геометрических параметров многониточных резьбошлифовальных кругов. – Вестник машиностроения, 1986, №3. – С. 44–47.
 192. Лашнев С.И., Юликов М.И. Расчет и конструирование металлорежущих инструментов с применением ЭВМ. – М.: Машиностроение, 1975. – 391 с.
 193. Лашнев С.И., Юликов М.И. Проектирование режущей части инструмента с применением ЭВМ. – М.: Машиностроение, 1980. – 208 с.
 194. Лашнев С.И., Борисов А.Н., Емельянов С.Г. Геометрическая теория формирования поверхностей режущими инструментами: Монография / Курск: Курск. гос. техн. ун-т., 1997. – 391 с.
 195. Лезвийный инструмент из сверхтвердых материалов: Справочник / Винников Н.П., Грабченко А.И., Гриценко Э.И. и др. / Под общ. ред. Н.В. Новикова. – К.: Техніка, 1988. – 118 с.
 196. Лепихов В.Г. Самоустанавливающиеся инструменты. – М.: Машино-

- строение, 1974. - 77 с.
197. Линенко-Мельников Ю.П. Анализ схем заточки крестовых коронок. – Синтетические алмазы, 1979, вып. 1. – С. 47-50.
 198. Липцер Р.Ш., Ширяев А.Н. Статистика случайных процессов. – М.: Наука, 1974. – 696 с.
 199. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1982. – 320 с.
 200. Лоладзе Т.Н., Бокучаева Г.И. Износ алмазов и алмазных кругов. – М.: Машиностроение, 1967. – 110 с.
 201. Лурье Г.Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования. – Изд. 2-е, перераб. доп. – Л.: Машиностроение, Ленинград. отд-ние, 1984. – 103 с.
 202. Лурье Г.Б. Шлифование металлов. – М.: Машиностроение, 1969. – 172 с.
 203. Лыков А.В. Теплообмен: Справочник. – М.: Энергия, 1972. – 500 с.
 204. Лыков А.В. Теория теплопроводности. — М.: Высшая школа, 1967. — 600 с.
 205. Лысак Л.И., Николин Б.И. Физические основы термической обработки стали. – К.: Техніка, 1975. – 223 с.
 206. Лысанов В.С., Букин В.А. и др. Эльбор в машиностроении. Л: Машиностроение, 1978. – 280 с.
 207. Лысов Б.Н. Исследование электрических явлений, сопровождающих процесс шлифования и пути их использования. – Дис. ... канд. техн. наук. – Челябинск: ЧПИ, 1972. – 180 с.
 208. Макаров А.Д. Износ и стойкость режущих инструментов. – М.: Машиностроение, 1966. – 263 с.
 209. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. – М.: Машиностроение, 1976. – 178 с.
 210. Малыхин В.В. Повышение эффективности шлифования вольфрамосодержащих твердых сплавов совместно со сталью алмазными кругами. – Дис. ... канд. техн. наук. – Харьков: ХПИ, 1985. – 266 с.
 211. Маслов Е.Н. Механизм работы абразивного зерна при шлифовании. – В кн.: Основные вопросы высокопроизводительного шлифования. – М.: Машгиз, 1960. – 196 с.
 212. Маслов Е.Н. Основы теории шлифования металлов. – М.: машиностроение, 1980. – 310 с.
 213. Маслов Е.Н. Теория шлифования металлов.– М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.
 214. Маслов Е.Н., Попов С.А. Абразивная обработка металлов. – В кн.: Развитие науки о резании металлов. – М.: Машиностроение, 1967. – С. 335-378.
 215. Маталин А.А. Качество поверхности и эксплуатационные свойства машин. – М.: Машгиз, 1956. – 256 с.
 216. Маталин А.А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин. – К.: Техніка, 1971. – 144 с.
 217. Маталин А.А. Технология машиностроения: Учебник для машинострои-

- тельных вузов по специальности “технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты”. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 496 с.
218. Маталин А.А. Шероховатость поверхности деталей машин в приборостроении. – М.- Л.: Машгиз, 1949. – 192 с.
219. Матвеев Д.Д. Автоматизированное управление процессом обработки резанием. – М.: Машиностроение, 1980. - 143 с.
220. Математика и кибернетика в экономике: Словарь–справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Экономика, 1975. – 700 с.
221. Математическое моделирование технических систем / А.В. Усов, Л.И. Плотникова, В.А. Вайсман, В.Д. Дмитришин, Г.А. Оборский. – К.: Техніка, 1995. – 328 с.
222. Методическое пособие для дипломного проектирования по технологии машиностроения для студентов дневного, вечернего и заочного обучения. Специальность „Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты”. Под общ. ред. И.А. Коганова и Д.С. Каплана. — Тула: Изд-во ТПИ, 1970. – 113 с.
223. Михайленко В.Є., Найдиш В.М., Підкоритов А.М., Скідан І.А. Інженерна та комп'ютерна графіка. / За ред. Михайленко В.Є. – 2-ге вид., перероб. – К.: Вища шк., 2001. – 350 с.
224. Михайлов О.П., Цейтлин Л.Н. Измерительные устройства в системах адаптивного управления станками. – М.: Машиностроение, 1978. – 152 с.
225. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1973. – 320 с.
226. Михелькевич В.Н. Автоматическое управление шлифованием. – М.: Машиностроение, 1975. – 304 с.
227. Мишнаевский Л.Л. Износ шлифовальных кругов. – К.: Наук. думка, 1982. – 192 с.
228. Моделювання й оптимізація в машинобудуванні: Навч. посібник / В.В. Душинський, С.Г. Кравченко. – К.: НМК ВО, 1992. – 304 с.
229. Морозенко В.Н., Ясев А.Г., Радзиховская Т.Ю., Молоткин Н.А. Оптимизация параметров притира для доводки глубоких прецизионных отверстий. – Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 1989, №3. – С. 142–146.
230. Мубаракшин Р.М. Исследование процесса и разработка методов повышения качества и производительности профильного шлифования: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Одесса: ОПИ, 1978. – 16 с.
231. Мухортов В.Н. Повышение точности профиля и производительности шлифования резьбы ходовых винтов ШВП. – Дис. ... канд. техн. наук. – Одесса: ОПИ, 1986. – 140 с.
232. Невельсон М.С. Автоматическое управление точностью обработки на металлорежущих станках. – Л.: Машиностроение, 1982. – 184 с.
233. Новиков Г.В. Задачи точности и производительности обработки в технологии машиностроения. – Авиационно-космическая техника и технология. Труды Государственного аэрокосмического университета им. Н.Е.

- Жуковского “ХАИ”. Выпуск 14. – Харьков: Государственный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, 2000. – С. 31-35.
234. Новиков Г.В. Математическая модель процесса шлифования с учетом упругих перемещений в технологической системе. – Труды Одесского политехнического университета. - Одесса, 2001. – Вып. 5. – С. 38-42.
235. Новиков Г.В. Повышение эффективности алмазно-искрового шлифования деталей с высокопрочными покрытиями. – Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Одесса: ОПИ, 1990. – 16 с.
236. Новиков Г.В. Расчет и анализ температуры резания при шлифовании. – Вестник Харьковского госуд. политехн. ун-та. Серия “Новые решения в современных технологиях”. Сборник научных трудов. Выпуск 75. – Харьков: ХГПУ, 1999. – С. 38-43.
237. Новиков Г.В. Энергетический баланс процессов резания материалов. – Фізичні аспекти сучасних технологій: Вісник Харківського державного політехнічного університету. Збірка наукових праць. Випуск 103. – Харків: ХДПУ, 2000. – С. 71-80.
238. Новиков Ф.В. Кинетика образования режущего рельефа круга в процессе шлифования. – Контактные процессы при больших пластических деформациях. – Харьков: ХАИ, 1982. – С. 40–46.
239. Новиков Ф.В. Режущий рельеф алмазного круга и его роль в формировании технологических показателей шлифования. – Резание и инструмент, 1984, вып. 32. – С. 64-70.
240. Новиков Ф.В. Теоретический анализ износа и стабилизации рельефа алмазного круга. – Резание и инструмент, 1986, вып. 36. – С. 19–24.
241. Новиков Ф.В. Закономерности износа алмазного круга в процессе шлифования. – Прогрессивные технологические процессы, оборудование и инструменты, ХАИ, 1987. – С. 119–126.
242. Новиков Ф.В. Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования. – Автореф. дис. ... докт. техн. наук. – Одесса: ОГПУ, 1995. – 36 с.
243. Новиков Ф.В. Структурная и параметрическая оптимизация цикла круглого наружного шлифования. – Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. – “Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні”. – 2005. – Вип. 33. – С. 27-33.
244. Новиков Ф.В., Гасанов М.И. Физические закономерности процесса резания при алмазном шлифовании. – Вісник Харківського держ. техн. ун-ту сільск. господ., 2004, вип. 26. – С. 31–40.
245. Новиков Ф.В., Ткаченко В.П. Энергетический поход к оценке шероховатости поверхности при алмазно-абразивной обработке. – Вісник національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. Збірка наукових праць. – Харків, 2002, №19. – С. 142-145.
246. Новиков Ф.В., Фадеев В.А. Упрощенный расчет и анализ параметров точности механической обработки. – Резание и инструмент в технологических системах: Межд. научн.-техн. сборник. – Харьков: НТУ “ХПИ”,

2004. – Вып. 67. – С. 9-18.
247. Новиков Ф.В., Фадеев В.А. Физическая сущность формирования шероховатости и точности поверхности при алмазно-абразивной обработке. – Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. – “Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні”. – 2004. – Вип. 26. – С. 16-21.
248. Новиков Ф.В., Шкурупий В.Г. Исследование шероховатости поверхности при алмазно-абразивной обработке методами теории вероятности. – Вісник НТУ “ХПІ”. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2004. - № 44. – С. 140-149.
249. Новиков Ф.В., Шкурупий В.Г. Установление функциональных связей между параметрами шероховатости и оптическими характеристиками обработанной поверхности. – Резание и инструмент в технологических системах: Межд. научн.-техн. сборник. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2005. – Вып. 68. – С. 312-318.
250. Новиков Ф.В., Якимов А.В., Новиков Г.В., Якимов А.А. Перспективы развития процессов резания лезвийными и абразивными инструментами. – Вісник Харківського держ. техн. ун-ту сільск. господ., 2002, вип. 10. – С. 24–29.
251. Новиков Ф.В., Яценко С.М. Новый упрощенный подход к расчету температуры поверхностного слоя детали при ее механической обработке. – Физические и компьютерные технологии. Труды 11-й Межд. научн.-техн. конф., 2-3 июня 2005 г. – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2005. – С.137-146.
252. Новоселов Ю.К. Анализ и моделирование пространственно-временного взаимодействия инструмента и обрабатываемой поверхности при шлифовании с целью повышения эффективности чистовых и отделочных операций. – Дис. ... докт. техн. наук. – Барнаул: БПИ, 1979. – 402 с.
253. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. – Изд-во Саратов. ун-та, 1979. – 232 с.
254. Новоселов Ю.К., Братан С.М., Крылов И.В. Адаптивное регулирование процессом шлифования валов. – Резание и инструмент в технологических системах. – Межд. научн.-техн. сборник. – Харьков: ХГПУ, 1999, вып. 55. – С. 173–182.
255. Новоселов Ю.К., Красный А.М. Вычисление относительной опорной длины профиля шлифованной поверхности. – Технология и автом. произв. машиностр., 1977, вып. 19. – С. 34–37.
256. Новоселов Ю.К., Красный А.М. Вычисление некоторых параметров шероховатости шлифованной поверхности. – Технология и автом. произв. машиностр., 1977, вып. 20. – С. 62–66.
257. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования: Учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Батмана, 2002. – 336 с.
258. Обработка металлов резанием. Справочник технолога / А.А. Панов, В.В. Аникин, Н.Г. Бойм и др. Под общ. ред. А.А. Панова. — М.: Маши-

- ностроение, 1988. — 736 с.
259. Общемашиностроительные нормативы режимов резания для технического нормирования работ на металлорежущих станках. 2-е изд. Ч.1. — М.: Машиностроение, 1974.
260. Общемашиностроительные нормативы режимов резания и времени для технического нормирования работ на фрезерных станках. — М.: Машиностроение, 1959.
261. Одинцов Л.Г. Финишная обработка деталей алмазным выглаживанием и вибровыглаживанием. — М.: Машиностроение, 1981. — 160 с.
262. Оптимизация технологии глубинного шлифования / С.С. Силин, Б.Н. Леонов, В.А. Хрульков и др. — М.: Машиностроение, 1989. — 120 с.
263. Оптимизация технологических процессов в гальванотехнике / А.М. Гинберг, Ю.В. Грановский, Н.Я. Федотов, В.С. Калмуцкий. — М.: Машиностроение, 1972. — 128 с.
264. Оптимизация технологических процессов в машиностроении для студентов специальности 1201, 1202: Учеб. пособие / А.В. Якимов, В.П. Ларшин, А.А. Якимов, Б.О. Ткаченко, Н.И. Решетнев. — Одесса: ОГПУ, 1995. — 105 с.
265. Основы автоматизации машиностроительного производства: Учебник для машиностроительных специальностей вузов / Е.Р. Ковальчук и др. — М.: Высшая школа, 2001. — 312 с.
266. Основы алмазного шлифования / М.Ф. Семко, А.И. Грабченко, А.Ф. Раб, М.Д. Узунян, М.С. Пивоваров. — К.: Техніка, 1978. — 190 с.
267. Основы кибернетики. Математические основы кибернетики: Учеб. пособие для втузов. / Под ред. К.А. Пупкова. — М.: Высшая школа, 1974.— 416 с.
268. Основы конструирования приспособлений: Учеб. пособие для машиностр. вузов / Т.Ф. Терликова, А.С. Мельников, В.И. Баталов.— М.: Машиностроение, 1980. — 119 с.
269. Основы прикладной теории колебаний и удара / Я.Г. Пановко. — 4-е изд. — Л.: Политехника, 1990. — 272 с.
270. Основы технологии машиностроения. / Под ред. В.С. Корсакова. Изд. 3-е доп. и пераб. Учебник для вузов. — М.: Машиностроение, 1977. — 416 с.
271. Остафьев В.А., Пономаренко А.И. Обработка точных отверстий в приборостроении. — К.: Техніка, 1972. — 137 с.
272. Остафьев В.А., Антонюк В.С., Тымчик Г.С. Диагностика процесса металлообработки. — К.: Техніка, 1991. — 151 с.
273. Отделочные операции в машиностроении: Справочник / П.А. Руденко, М.Н. Шуба, В.А. Огнivec и др. / Под общ. ред. П.А. Руденко. — К.: Техніка, 1990. — 150 с.
274. Островский В.И Оптимизация условий эксплуатации абразивного инструмента: Обзор — М.: НИИмаш, 1984. — 56 с., ил. — 7 (сер. С-2. Инструментальная и абразивно-алмазная промышленность).

275. Островский В.И. Основы теории и оптимизации процесса шлифования импрегнированным абразивным инструментом. – Автореф. дис. ... докт. техн. наук. – Л.: ЛПИ, 1981. – 33 с.
276. Островский В.И. Теоретические основы процесса шлифования. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. – 139 с.
277. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 1978. – 152 с.
278. Паршаков А.Н., Свирцев В.И. К вопросу управления автоколебанием при шлифовании. – Сб. тр. ППИ: Повышение эффективности технологических процессов в машиностроении. – Пермь, 1980. – С. 69-76.
279. Паршаков А.Н., Якимов А.В. Колебания при шлифовании, производительность и качество обработки. – Вестник машиностроения, 1979, №8. – С. 44-47.
280. Пахалин Ю.А. Алмазное контактно-эрозионное шлифование. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 178 с.
281. Писаренко Г.С., Лебедев А.А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. – М.: Машиностроение, 1974. – 186 с.
282. Пичугин Е. Д. Методы оптимизации: Учеб. пособ. для вузов. – Одесса: ОГПУ, 1998. – 196 с.
283. Пляскин И.И. Оптимизация технических решений в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1982. – 176 с.
284. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А.М. Сулима, В.А. Шулов, Ю.Д. Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
285. Подзей А.В. Технологические остаточные напряжения. – М.: Машиностроение, 1973. – 216 с.
286. Подкорытов А.Н., Якимов А.А., Вайсман В.А. Технологическое обеспечение точности и качества изготовления зубчатых колес: Учеб. пособие. – Одесса: ОГПУ, 1996. – 276 с.
287. Подстригач Я.С., Коляко Ю.М. Обобщенная термомеханика. – К.: Наук. думка, 1976. – 310 с.
288. Подураев В.Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания. – М.: Машиностроение, 1977. – 304 с.
289. Подураев В.Н., Барзов А.А., Горелов В.А. Технологическая диагностика резания методом акустической эмиссии. – М.: Машиностроение, 1988. – 56 с.
290. Попов С.А., Малевский Н.П., Терещенко Л.М. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов. – М.: Машиностроение, 1977. – 263 с.
291. Потемкин А.Е. Твердотельное моделирование в системе КОМПАС-3D. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 512 с.
292. Проволоцкий А.Е., Ясев А.Г. Комбинированная оптимизация технологических параметров струйно-абразивной обработки деталей машин. –

- Новые технологии и материалы в металлургии и машиностроении, 2004.
293. Проволоцкий А.Е., Ясев А.Г., Гришин В.С., Маринченко И.А. Имитационное моделирование процесса обработки потоком абразивных частиц. – Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 1987, №4. – С. 112–117.
 294. Прогрессивные методы шлифования пропитанным абразивным инструментом. – М.: НИИмаш, 1981. – 42 с.
 295. Проектирование технологических процессов в машиностроении: Учеб. пособ. для вузов / И.П. Филонов, Г.Я. Беляев, Л.М. Кожуро и др.; Под общ. ред. И.П. Филонова. – Мн.: УП «Технопроект», 2003. – 910 с.
 296. Прохоренко В.П. Solid Works. Практическое руководство. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2004. – 448 с.
 297. Развитие науки о резании металлов / В.Ф. Бобров, Г.И. Грановский, Н.Н. Зорев и др. – М.: Машиностроение, 1967. – 415 с.
 298. Размерная настройка элементов технологических систем в машиностроении / А.М. Дальский, М.И. Лещенко, Г.Д. Василюк, В.Е. Лоев. – К.: Техніка, 1991. – 175 с.
 299. Расчет глубины дефектного слоя при шлифовании / Якимов А.В., Ларшин В.П., Скляр А.М., Ковальчук Е.Н. – Станки и инструмент, 1986, № 9. – С. 26-27.
 300. Резание металлов и инструмент / Под ред. А.М. Розенберга. – М.: Машиностроение, 1964. – 226 с.
 301. Резников А.Н. Теплообмен при резании и охлаждении инструментов. – М.: Машгиз, 1963. – 199 с.
 302. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
 303. Резников А.Н., Резников Л.А. Основы расчета шлифовальных процессов в технологических расчетах: Учебное пособие. – Куйбышев: КуАИ, 1986. – 153 с.
 304. Резников А.Н., Федосеев О. Б. Выбор режимов шлифования синтетическими сверхтвердыми материалами при заданной шероховатости поверхности изделия. – Вестник машиностроения, 1976, № 6. – С. 69-70.
 305. Резников А.Н., Федосеев О. Б., Щипанов В.В. Вопросы теории процесса резания при шлифовании сверхтвердыми материалами. – В кн.: Синтетические алмазы – ключ к техническому прогрессу, ч. 1. – К.: Наук. думка, 1977.
 306. Резников А.Н., Федосеев Ю.Б., Щипанов В.В. Теоретико-вероятностное описание режущего аппарата шлифовальных инструментов, толщины среза и усилия резания. – Физ. и хим. обр. материалов, 1976, №4. – С. 93–102.
 307. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике: в 2-х кн. Кн. 1. – М.: Мир, 1986. – 349 с.
 308. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике: в 2-х кн. Кн. 2. – М.: Мир, 1986. – 320 с.
 309. Робочі процеси високих технологій в машинобудуванні: Навч. посібник

- / За редакцією А.І. Грабченка. – Харків: ХДПУ, 1990. – 436 с.
310. Розенберг А.М., Розенберг О.А. Механика пластического деформирования в процессе резания и деформирующего протягивания. – К.: Наук. думка, 1990. – 319 с.
 311. Рыбицкий В.А. Алмазное шлифование твердых сплавов. – К.: Наук. думка, 1980. – 223 с.
 312. Рыбицкий В.А., Черепанов К.А., Комская И.М., Зубанев Е.Н. Высокопроизводительное алмазное шлифование износостойкого наплавочного материала типа 450X22Б7МВ2Ф. – Совершенствование процессов абразивно-алмазной и упрочняющей обработки в машиностроении. – Пермь: ППИ, 1987. – С. 98–102.
 313. Рыжов Э.В. Контактная жесткость деталей машин. – М.: Машиностроение, 1966. – 193 с.
 314. Рыжов Э.В., Линенко-Мельников Ю.П., Красник В.Г. Прогрессивные методы абразивной обработки твердосплавного бурового инструмента. – М.: Машиностроение, 1986. – 48 с.
 315. Рыжов Э.В., Сагарда А.А., Ильицкий В.Б., Чеповецкий И.Х. Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке. – К.: Наук. думка, 1979. – 224 с.
 316. Савчук Ю.С., Шепелев А.А. О некоторых закономерностях работы и износа алмазных кругов при глубинной заточке твердых сплавов. – Резание и инструмент, 1979, вып.22. – С. 33–38.
 317. Сазонов И.П. Обеспечение качества поверхностного слоя при шлифовании деталей с диффузионным покрытием. – Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Одесса: ОПИ, 1987. – 35 с.
 318. Сагарда А.А. Закономерности микрорезания единичным алмазным зерном. – Синтетические алмазы, 1969, №2. – С.9-14.
 319. Сагарда А.А., Чеповецкий И.Х., Мишнаевский П.П. Алмазно-абразивная обработка деталей машин. – К.: Техніка, 1974. – 179 с.
 320. Сагарда А.А. Научные основы высокопроизводительного шлифования деталей машин. – Харьков: Вища школа, 1975. – 179 с.
 321. Самарский А.А. Теория размерных схем: Учеб. пособие. – М.: Наука, 1983. – 616 с.
 322. Самоподнастраивающиеся станки / Под ред. Б.С. Балакшина. – М.: Машиностроение, 1967. – 399 с.
 323. CALS (Continuous Acquisition and Life cycle Support — непрерывная информационная поддержка жизненного цикла продукции) в авиастроении / Научн. ред. А.Г. Братухин. — М.: Изд-во МАИ, 2002. – 676 с.
 324. Сальников А.Н. Системный анализ процессов абразивной обработки (на примере шлифования). – Дис. ... докт. техн. наук. – Саратов: СПИ, 1982. – 378 с.
 325. Сборник практических работ по технологии машиностроения: Учеб. пособие / А.И. Медведев, В.А. Шкред, В.В. Бабук и др.; Под ред. И.П. Филонова. – Минск.: БНТУ, 2003. – 486 с.
 326. Свирщев В.И. Исследование геометрических показателей качества про-

- цесса плоского прерывистого шлифования с учетом его динамических особенностей. – Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Одесса: ОПИ, 1977. – 19 с.
327. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. – М.: Наука, 1977. – 440 с.
328. Семко М.Ф., Грабченко А.И., Зубкова М.Я., Раб А.Ф., Воронков В.И. Эльборовое шлифование быстрорежущих сталей. – Харьков: Вища школа, 1974. – 136 с.
329. Семко М.Ф., Грабченко А.И., Левченко Н.В., Раб А.Ф. Электроалмазное шлифование инструментальных материалов. – К.: Вища школа, 1974. – 120 с.
330. Семко М.Ф., Узунян М.Д., Краснощек Ю.С. Алмазно-искровое шлифование безвольфрамовых твердых сплавов. – Сверхтвердые материалы, 1980, №1. – С. 42-47.
331. Семко М.Ф., Узунян М.Д., Сизый Ю.А. Взаимосвязь условного напряжения резания и прочности микрокромки алмазных зерен с их работоспособностью. – Синтетические алмазы, 1975, вып. 2. – С. 16–19.
332. Семко М.Ф., Узунян М.Д., Сизый Ю.А., Пивоваров М.С. Работоспособность алмазных кругов. – К.: Техніка, 1983. – 95 с.
333. Семко М.Ф., Узунян М.Д., Юфа Э.Ф. Экономическое обоснование выбора алмазного круга. – Харьков: Прапор, 1971. – 99 с.
334. Сизый Ю.А. Исследование работоспособности алмазных шлифовальных кругов. – Дис. ... канд. техн. наук. – Харьков: ХПИ, 1975. – 237 с.
335. Силин С.С., Хрульков В.А., Ласанов А.В., Рыкунов Н.С. Глубинное шлифование деталей из труднообрабатываемых материалов. – М.: Машиностроение, 1984. – 64 с.
336. Синтетические алмазы в машиностроении / Под ред. В.Н. Бакуля. – К.: Наук. думка, 1976. – 352 с.
337. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. – М.: Машиностроение, 1978. – 167 с.
338. Системы автоматизированного проектирования технологических процессов, приспособлений и режущих инструментов / С.Н. Корчак, А.А. Кошин, А.Г. Ракович, Б.И. Сеницын. Под общ. Ред. С.Н. Корчака. – М.: Машиностроение, 1988. – 352 с.
339. Смирнов В.И. Курс высшей математики. Т.1 и Т. 2. – М.: Наука, 1974. – 450 с. и 656 с.
340. Сошников С.А. Повышение работоспособности алмазных кругов при шлифовании твердосплавных изделий с прерывистыми поверхностями. – Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Тула: ТПИ, 1984. – 23 с.
341. Справочник инструментальщика / И.А. Ординарцев, Г.В. Филиппов, А.Н. Шевченко и др.; под общей ред. И.А. Ординарцева. – Л.: Машиностроение, 1987. – 846 с.
342. Справочник по САПР / А.П. Будя, А.Е. Кононюк, Г.П. Куценко и др., под ред. В.И. Скурихина. – К.: Техніка, 1988. – 375 с.
343. Справочник технолога – машиностроителя. В 2-х т. Т. 1 / Под ред.

- А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – 4-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 656 с.
344. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.2. /Под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. - 496 с.
345. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т.1 / Под ред. А.Н. Малова. – 3-е изд. – М.: Машиностроение, 1972. – 695 с.
346. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т.2 / Под ред. А.Н. Малова. – 3-е изд. – М.: Машиностроение, 1972. – 568 с.
347. Справочник технолога по автоматическим линиям / А.Г. Косилова, А.Г. Лыков, О.М. Деев и др. / Под ред. А.Г. Косиловой. – М.: Машиностроение, 1972. – 216 с.
348. Старков В.К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве. – М.: Машиностроение, 1989. – 296 с.
349. Станочные приспособления: Справочник. В 2-х т. / Ред. совет: Б.Н. Вардашкин (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1984. – Т.1 /Под ред. Б.Н. Вардашкина, А.А. Шатилова, 1984. – 592 с.
350. Станочные приспособления: Справочник. В 2-х т. / Ред. совет: Б.Н. Вардашкин (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1984. – Т.2 /Под ред. Б.Н. Вардашкина, А.А. Шатилова, 1984. – 655 с.
351. Сулима А.М., Евстигнеев М.И. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов. – М.: Машиностроение, 1974. – 256 с.
352. Суслов А.Г., Дальский А.М. Научные основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.
353. Сю Д., Мейер А. Современная теория автоматического управления и ее применение. – М.: Машиностроение, 1972. – 544 с.
354. Тверской М.М. Автоматическое управление режимами обработки деталей на станках. – М.: Машиностроение, 1982. – 208 с.
355. Теоретические основы резания и шлифования материалов: Учеб. пособие / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, Б.С. Серов, А.А. Якимов. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с.
356. Теоретические основы технологии машиностроения: Учебник / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, А.А. Якимов, Г.В. Новиков, Н.И. Решетнев. – Одесса: ОНПУ, 2002. – 491 с.
357. Тепловые и механические процессы при резании металлов: Учеб. пособие / Ф.В. Новиков, А.А. Якимов, Г.В. Новиков, С.Г. Зимин, В.А. Вайсман. – Одесса: ОГПУ, 1997. – 179 с.
358. Теплообмен и тепловой режим космических аппаратов / Под ред. Дж. Лукаса. – М.: Изд-во «Мир», 1974. – С. 17–38.
359. Теплофизика механической обработки: Учеб. пособие / А.В. Якимов, П.Т. Слободяник, А.В. Усов. – К.– Одесса: Лыбидь, 1991. – 240 с.
360. Терган В.С. Плоское шлифование: Учебник для профессионально-технических училищ. – 3-е изд., перераб. и доп.. – М.: Высш. школа, 1980. – 168 с.

361. Техническая механика. Теоретическая механика. Сопротивление материалов: Учеб. для машиностр. спец. техникумов / А.А. Эрдеди, Ю.А. Медведев, Н.А. Эрдеди. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1991. – 304 с.
362. Технология машиностроения: В 2 т. Т.2. Производство машин: Учебник для вузов / В.М. Бурцев, А.С. Васильев, О.М. Деев и др. Под ред. Г.Н. Мельникова. – 2-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. — 640 с.
363. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин / Э.В. Рыжов. – К.: Наук. думка, 1984. – 272 с.
364. Технологическое обеспечение качества продукции в машиностроении. Активный контроль / Г.Д. Бурдун, С.С. Волосов, Н.Н. Марков и др. / Под ред. Г.Д. Бурдуна и С.С. Волосова. – М.: Машиностроение, 1975. – 279 с.
365. Технологія автоматизованого машинобудування: Підручник /О.В. Якимов, В.С. Гусарев, О.О. Якимов та інші. – Одеса: ОДПУ, 1999. – 402 с.
366. Технология машиностроения: В 2 т. Т.1. Основы технологии машиностроения: Учебник для вузов / В.М. Бурцев, А.С. Васильев, А.М. Дальский и др. Под ред. А.М. Дальского. – 2-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 564 с.
367. Технология машиностроения: В 2 т. Т.2. Производство машин: Учебник для вузов / В.М. Бурцев, А.С. Васильев, О.М. Деев и др. Под ред. Г.Н. Мельникова. – 2-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 640 с.
368. Технология машиностроения: Учебник / А.В. Якимов, В.Н. Царюк, А.А. Якимов, Г.А. Оборский, В.П. Ларшин, А.В. Самойленко. – Одесса: Астропринт, 2001. – 608 с.
369. Тику Ш. Эффективная работа. Solid Works 2004. – СПб.: Питер, 2005. – 788 с.
370. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1972.
371. Ткаченко Б.О. Повышение стабильности высокопроизводительного резьбошлифования прецизионных ходовых винтов. – Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Одесса: ОГПУ, 1994.
372. Торбило В. М. Алмазное выглаживание. – М.: Машиностроение, 1972. – 105 с.
373. Трент Е.М. Резание металлов / Пер. с англ. Г.И. Айзенштока. – М.: Машиностроение, 1980. – 263 с.
374. Тульпа С.М. Резьбошлифовальные работы. – М.: Машиностроение, 1973. – С. 135–142.
375. Узунян М.Д., Крючков В.Я. Оптимальные условия алмазно-искровой обработки безвольфрамового сплава ТН-20. – Сверхтвердые материалы, 1981, № 1. – С. 42-44.
376. Управление процессом шлифования / А.В. Якимов, А.Н. Паршаков, В.И. Свирцев, В.П. Ларшин. – К.: Техніка, 1983. – 184 с.

377. Усов А.В. Повышение эффективности процесса бездефектного шлифования материалов и сплавов, предрасположенных к трещинообразованию. – Дис. ... докт. техн. наук. – Одесса: ОПИ, 1991. – 350 с.
378. Уткин Н.Ф. Приспособления для механической обработки. – 2-ое изд., перераб. и доп. – Л.: Лениздат, 1983. – 175 с.
379. Федосеев О.Б. Теоретическое и экспериментальное исследование процесса шлифования синтетическими сверхтвердыми материалами. – Дис. ... канд. техн. наук. – Тольятти: ТПИ, 1975. – 149 с.
380. Федосеев О.Б. Шлифование синтетическими сверхтвердыми материалами. – Изв-я высш. учебн. заведений / Машиностроение, 1977, №5. – С. 104–106.
381. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т.1. “Механика резания материалов”. – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с.
382. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т.2. “Теплофизика резания материалов”. – Одесса: ОНПУ, 2003. – 625 с.
383. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т.4. “Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов”. – Одесса: ОНПУ, 2002. – 802 с.
384. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. — Т.6. „Качество обработки деталей машин”. — Одесса: ОНПУ, 2003. — 716 с.
385. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т.7. „Точность обработки деталей машин”. – Одесса: ОНПУ, 2004. – 546 с.
386. Филимонов Л.Н. Эффективный режущий профиль шлифовальных кругов и его роль при формообразовании поверхностью слоя обрабатываемых деталей. – Абразивы, 1971, вып.2. – С. 7–11.
387. Филимонов Л.Н. Стойкость шлифовальных кругов. – М.: Машиностроение, 1973. – 134 с.
388. Филимонов Л.Н. Высокоскоростное шлифование. – Л.: Машиностроение, 1979. – 245 с.
389. Филимонов Л.Н. Плоское шлифование / Под ред. В.И. Муцянка. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 109 с.
390. Филоненко С.Н. Резание металлов. – К.: Техніка, 1975. – 231 с.
391. Фираго В.П. Основы проектирования технологических процессов и приспособлений. Методы обработки поверхностей. – М.: Машиностроение, 1973. – 468 с.

392. Фролов С.А. Кибернетика и инженерная графика. – М.: Машиностроение, 1974.
393. Худобин Л.В., Хусаинов А.Ш. Плоское шлифование тонкостенных заготовок. – СТИН, 1997, № 9. – С. 20–22.
394. Хусу А.П., Витенберг Ю.Р., Пальмов В.А. Шероховатость поверхностей. Теоретико-вероятностный подход. – М.: Наука, 1975. – 344 с.
395. Чурин А. AutoCAD 2005. Platinum Edition. – М.: «ДиаСофтЮП», 2005. – 1200 с.
396. Шальнов В.А. Шлифование и полирование высокопрочных материалов. – М.: Машиностроение, 1972. – 272 с.
397. Шарков В.А. Повышение производительности и качества заточки режущего инструмента. – Дис. ... канд. техн. наук. – Одесса: ОПИ, 1984. – 21 с.
398. Шегал М.Я. Доводка измерительных инструментов. – М.: Машиностроение, 1987.
399. Шероховатость поверхности. ГОСТ 2789-73, ГОСТ 2309-73. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 24 с.
400. Шторм Р. Теория вероятностей, математическая статистика, статистический контроль качества (пер. с нем.). – М.: Мир, 1976.
401. Щеголев В.А., Уланова М.Е. Эластичные абразивные и алмазные инструменты. – М.: Машиностроение, 1977. – 184 с.
402. Эльянов В.Д. Эксплуатационные возможности шлифовальных кругов. – М.: НИИМаш, 1976. – 55 с.
403. Юдин Д.Б., Гольштейн Е.Г. Линейное программирование. – М.: Наука, 1969.
404. Якимов А.А. Основы теории и стабилизации качества поверхностного слоя при прерывистом шлифовании зубчатых колес. – Харьков, 1997. – 209 с.
405. Якимов А.А. Основы теории обеспечения и стабилизации качества поверхностного слоя при прерывистом шлифовании зубчатых колес. – Одесса: ОГПУ, 1997. – 212 с.
406. Якимов А.А. Повышение эффективности прерывистого шлифования деталей, закаленных до высокой твердости. – Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Одесса: ОПИ, 1991. – 16 с.
407. Якимов А.А. Технологические основы обеспечения и стабилизации качества поверхностного слоя при шлифовании зубчатых колес. – Одесса: Астропринт, 2003. – 453 с.
408. Якимов А.А., Новиков Ф.В. Повышение эффективности прерывистого шлифования. – Вестник машиностроения, 1988, №7. – С. 45-47.
409. Якимов А.В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.
410. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования. – М.: Машиностроение, 1975. – 176 с.
411. Якимов А.В. Прерывистое шлифование. – К.: Вища школа, 1986. – 175 с.
412. Якимов А.В. и др. Тепловые процессы при обычном и прерывистом шлифовании. – Одесса: ОГПУ, 1998. – 272 с.
413. Якимов А.В., Ларшин В.П., Ковальчук Е.Н., Скляр А.М. Повышение

- точности шага резьбы ходовых винтов при многониточном резьбошлифовании. – Вестник машиностроения, 1989, №8. – С. 35–38.
414. Якимов А.В., Ларшин В.П., Русавский Ю.П., Якимов В.А. Регулирование режущей способности шлифовальных кругов. – Сверхтвердые материалы, 1980, № 6. – С. 34–38.
415. Якимов А.В., Ларшин В.П., Скляр А.М., Ковальчук Е.Н. Расчет глубины дефектного слоя при шлифовании. – Станки и инструмент, 1986, №9. – С. 26–27.
416. Якимов А.В., Ларшин В.П., Скляр А.М. Влияние формы поверхности обрабатываемой детали на температуру при шлифовании. – Сверхтвердые материалы, 1986, №4. – С. 38-43.
417. Якимов А.В., Ларшин В.П., Скляр А.М. Обеспечение качества поверхности путем выбора глубины шлифования. – Вестник машиностроения, 1988, № 2. – С. 48 -50.
418. Якимов А.В., Ларшин В.П., Ткаченко Б.О. Повышение точности финишного шлифования резьбы ходовых винтов качения // Совершенствование процессов абразивно-алмазной обработки в машиностроении. – Пермь: Изд-во Пермского политехн. ин-та, 1990. – С. 3–13.
419. Якимов А.В., Линчевский П.А., Якимов А.А. Обоснование маршрута обработки и размерный анализ технологических процессов: Учеб. пособие. – К.: НМК ВО, 1993. – 128 с.
420. Якимов А.В., Новиков Ф.В., Якимов А.А. Высокопроизводительная обработка абразивно-алмазными инструментами. – К.: Техніка, 1993. – 152 с.
421. Якимов А.В., Новиков Ф.В., Новиков Г.В., Якимов А.А. Алмазная обработка: Учеб. пособие. – К.: ІЗМН, 1996. – 168 с.
422. Якімов О.В., Новиков Ф.В., Новиков Г.В., Якімов О.О. Високопродуктивне шліфування: Навч. посібник. – К.: ІСДО, 1995. – 180 с.
423. Якімов О.В., Марчук В.І., Лінчевський П.А., Якімов О.О., Ларшин В.П. Технологія машино- та приладобудування: Підручник. – Луцьк: Редакційно-видавничий відділ ЛДТУ, 2005. – 712 с.
424. Якимов А.В., Русавский Ю.П., Ларшин В.П. Влияние погрешности резьбы на качество ее поверхностного слоя при шлифовании. – Прогрессивные методы повышения качества, долговечности и надежности деталей машин при алмазно-абразивной обработке: Тез. докл. конф. – Волжский, 1981. – С. 99-100.
425. Якимов А.В., Смирнов Л.П., Бояршинов Ю.А. и др. Качество изготовления зубчатых колес. – М.: Машиностроение, 1979. – 191 с.
426. Якимов О.В., Усов А.В., Слободяник П.Т., Юргачов Д.В. Теплофізика механічної обробки. – Одеса: Астропринт, 2000. – 256 с.
427. Ящерицин П.И., Жальнерович Е.А. Шлифование металлов. – Минск: Изд-во Беларусь, 1970. – 249 с.
428. Ящерицын П.И., Дорофеев В.Д., Пахалин Ю.А. Электроэрозионная правка алмазно-абразивных инструментов. – Минск: Наука и техника, 1981. – 232 с.
429. CALS (Continuous Acquisition and Life cycle Support – непрерывная ин-

- формационная поддержка жизненного цикла продукции) в авиастроении / Научн. ред. А.Г. Братухин. – М.: Изд-во МАИ, 2002. – 676 с.
430. Dorsch H. Schwingquarz-Temperatur sensoren // *Sensor Rept.*, 1987, 2, № 5. – S. 9–10.
431. Kato S., Yamaguchi K, Watanabe Y., Hiraiwa Y. Measurement of Temperature Distribution Within Tool Using Powders of Constant Melting Point. // *trans. ASME*. 1976.vol. 10, №2. – P.239–245.
432. Nawara L., Ryniewicz A. Zastosowanie termowizji do badan cieplnych w urzadzeniach technologicznych // *Mechanik*. 1987. 60, №3. – 113–115 s.
433. Ueda T., Hosokawa A., Yamamoto A. Measurement of grinding temperature using infrared radiation pyrometer with optical fiber // *Trans. ASME: I. Eng. ing*. 1986. 108, №4. – P. 247–251.
434. Vieregge G. Zerspanung der Eisenwerkstoffe. Bd. 16. der Stahleisen – Bucher, 2 Aufl. Verlag Stahleisen. – Dusseldorf, 1970. – 363 s.
435. Jacobus K., Devor R.E., Kapoor S.G. Machining – Induced residual stress: Experimentation and modeling // *Transaction of the ASME: Journal of manufacturing science and engineering*. 2000. Vol. 122, 1. P. 20 – 31.
436. Park I.W., Dornfeld D.A. A study of burr formation processes using the finite element method. // *Transaction of the ASME: Journal of Engineering materials and technology*. 2000. Vol.122, 2. Part 1: P. 221 – 228, Part 2: P. 229 – 237.
437. Boothroyd G., 1975, *Fundamentals of Metal Cutting and Machine Tools*, Hemisphere, Washington, Chapter 3.
438. Koch U., 1970, “Experimental and Theoretical Analysis of Lathe Tool Temperature in Oblique Cutting”, *Proc. 11th MTDR Conference*, pp. 533–540.
439. Stoiber F., Duke T. SPC for quality plastic parts. – *Machine Design*. – 1989 Volume 61. – №2. – P.43–47.
440. Baier J., Milnickel R., Müller P. Konzept einer digitalen AC - Grenzregeiung für Tiefbohrmaschinen // *Ind. – Anz.* – 1985. – 107. - № 40. – S. 39–40.
441. Feinbearbeitung mit System Mapal Dr. Kress KG und WWS. *Перспективы и каталоги*. – 1980 – 1996 г.г.
442. Pfluegar F. The aspect of stability in designing deep hole drilling and boring tools // *Proc. 2 nd Ind. Conf. “Deep Hole Drill. and Boring”*. – Brunel Univ., 1977. – s. i., s. a., 21 p.
443. Schneider H.P. Werkzeuge automatisch überwachen // *Ind. – Anz.* – 1986. – 108. – № 10. – S. 44–46.
444. Takata S., Nakajima T., Ahn J.H., Sata T. Tool breakade monitoring by means of fluctuations in spindle rotational speed // *Annals of the CIRP*. – 1987. – 36. – № 1. – P.49–52.
445. Tuffentsammer Karl. Präzisionsschneidwerkzeuge Die Herstellung und Bearbeitung Zylindrischer Innenflächen// *Techn. Zbl. prakt. für Metallbearb.* – 1981. – 36. – № 3. – S. 35–37, 39–42.
446. Katsundo Hitomi. Strategic integrated manufacturing systems: the concept and structures // *International Journal of Production Economics*. – Volume 25 – NOS. 1–3, December 1991. – P. 5 –12.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ИСХОДНАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ КОМПЬЮТЕРИЗАЦИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Выполнение представленных ниже лабораторных работ позволяет учащимся получить практические навыки при самостоятельном освоении основных теоретических разделов курса технологии машиностроения. Большую помощь при компьютерной подготовке материалов данного раздела оказала инж. Лищенко Н.В. Список используемой литературы приведен в каждой из перечисленных ниже лабораторных работ.

Приложение 1

Исследование влияния точности металлорежущих станков на точность обрабатываемых деталей

1. **Цель работы:** установить влияние геометрической точности токарно-винторезного станка мод. 1К62 на характер и величину погрешностей обрабатываемых деталей.

Работа рассчитана на два академических часа.

2. **Методические указания.**

2.1. В работе исследуется влияние смещения задней бабки токарно-винторезного станка в горизонтальной плоскости. Для этого на ненастроенном станке проводится обработка детали. В результате такой обработки на детали получается погрешность формы типа "конусность". Суть работы заключается в количественной оценке этой погрешности (первый этап работы) и принятия соответствующего решения по налаживанию станка для устранения выявленной погрешности (второй этап работы). После того как решение принято (установлены направление и величина смещения задней бабки), осуществляется соответствующая поднастройка станка с целью устранения выявленной систематической погрешности (третий этап работы). После окончания поднастройки заготовка снова обрабатывается и контролируется по размеру (четвертый этап работы). Внесения корректировок в положение задней бабки по результатам обработки осуществляется до тех пор, пока величина погрешности не примет заданное допустимое значение (задается преподавателем).

2.2. Расчет смещения Δh задней бабки в зависимости от диаметров правого (d_n) и левого (d_l) концов обрабатываемой заготовки выполняется на основании схемы обработки (рис.1.1), причем [1]

$$\Delta h = \frac{d_n - d_l}{2} \cdot \frac{L}{l}, \quad (1.1)$$

где L - полная длина заготовки (отстань между торцами заготовки); l - длина рабочей части заготовки.

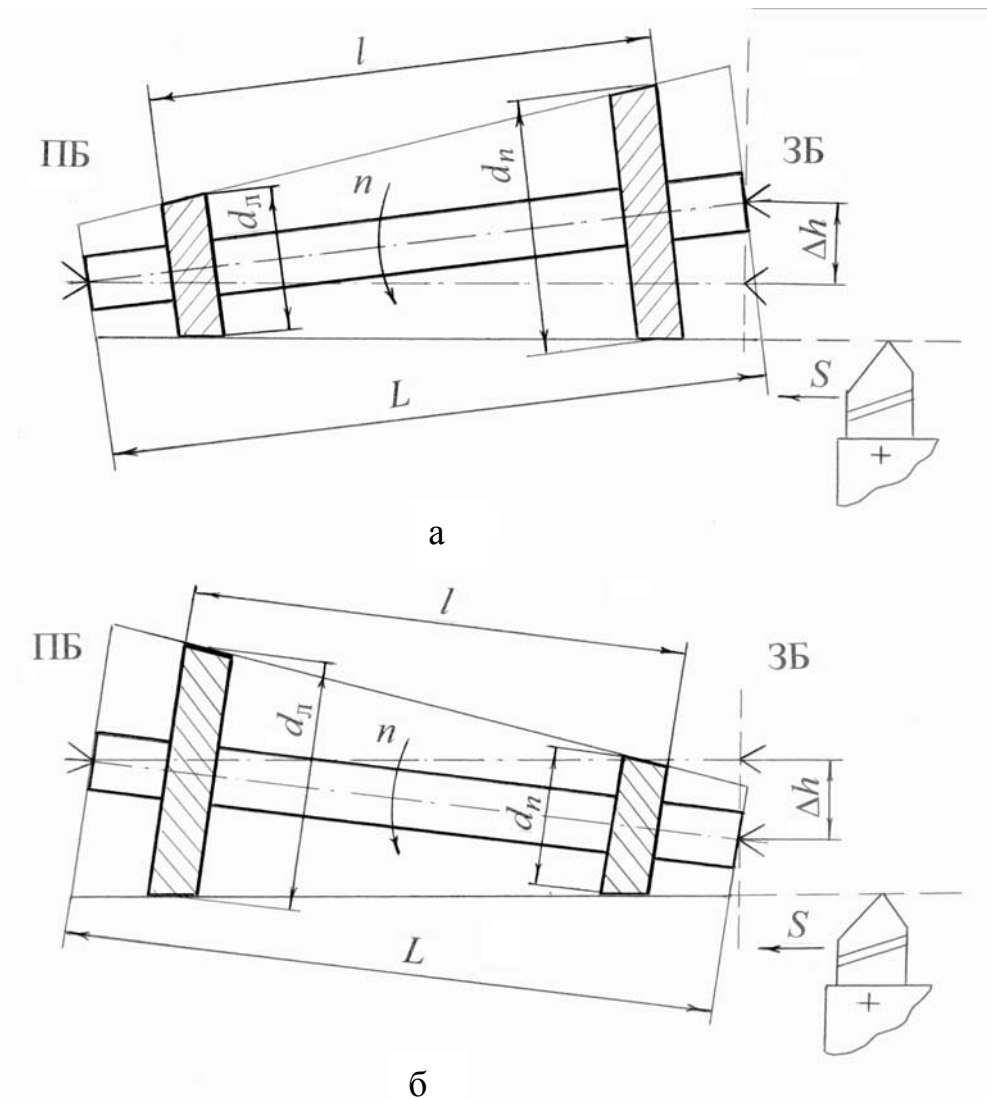


Рис.1.1. Схема обработки заготовки на токарно-винторезном станке (вид сверху) при смещении задней бабки от (а) и на (б) рабочего: ПБ, ЗБ - передняя и задняя бабки станка (обрабатываемые участки заготовки заштрихованы).

3. Порядок выполнения работы.

3.1. Обработать на станке заготовку типа цилиндрического валика.

3.2. Сделать измерение диаметра заготовки около задней и передней бабок, результаты измерений занести в таблицу по прилагаемой ниже форме.

Таблица 1.1

, мм	Номер опыта			$d_{сеп}$
	1	2	3 d	
$d_л$	После первой обработки			
d_n				
$d_л$	После второй обработки			
d_n				

Примечание: 1. $d_{сеп}$ - среднее значение диаметра, мм; 2. $n = \underline{\hspace{1cm}}$ об/мин, $S = \underline{\hspace{1cm}}$ мм/об, $t = \underline{\hspace{1cm}}$ мм, $L = \underline{\hspace{1cm}}$ мм, $l = \underline{\hspace{1cm}}$ мм.

- 3.3. По формуле (1.1) определить величину погрешности типа "конусность".
 - 3.4. Определить направление и величину коррекции, которую необходимо ввести в положение задней бабки станка.
 - 3.5. Осуществить поднастройку положения задней бабки станка в нужном направлении и на нужную величину.
 - 3.6. Повторно проточить заготовку (на тех же режимах резания) и повторить пункты 3.2 и 3.3. Если разность диаметров d_n и d_n не превышает допуска на обработку (задаётся преподавателем), то налаживания считать законченной.
 - 3.7. Сформулировать выводы по работе.
4. **Содержание отчета.**
- 4.1. Название и цель работы.
 - 4.2. Характеристика оснащения и технологической оснастки для выполнения работы.
 - 4.3. Схема лабораторной установки.
 - 4.4. Таблица экспериментальных данных.
 - 4.5. Расчеты смещения задней бабки.
 - 4.6. Анализ результатов и выводы по работе.

Литература:

1. Блюмберг В.А., Зазерский Э.И. Справочник токаря.- Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-е, 1981.- 406 с.

Приложение 2

Исследование жесткости технологической системы токарного станка статическим методом

1. Цель работы.

1.1. Изучить статический метод определения жесткости элементов технологической системы металлорежущего станка.

1.2. Приобрести навыки и умение определять жесткость указанных элементов статическим методом.

Работа рассчитана на два академических часа.

2. Порядок выполнения работы.

2.1. Выполнить экспериментальное определение статической жесткости j передней и задней бабок токарного станка на основании формулы [1, 2]

$$j = \frac{F_y}{y}, \quad (2.1)$$

где F_y - радиальное усилие, Н; y - упругое перемещение, мм.

2.2. Собрать лабораторную установку (рис. 2.1).

2.3. Осуществить статическое нагружение детали.

2.4. Измерить величину доложенной силы и соответствующие упругие перемещения передней и задней бабок. Данные занести в табл. 2.1

Результаты измерений и вычислений

		Нагружение						Разгружение				
F_y	кг	0	15	30	45	60	75	60	45	30	15	0
	Н											
$y_{нб}$	дел.											
	мм											
$j_{нб}$	Н/мм											
$y_{зб}$	дел.											
	мм											
$j_{зб}$	Н/мм											

Примечание: 1. Цена деления часовых индикаторов 2 и 3 (рис.2.1) составляет, соответственно, _____ мм и _____ мм. 2. При определении жесткости передней ($j_{нб}$) и задней ($j_{зб}$) бабок величину силы брать в два раза меньше соответствующих отсчётов по динамометру 4 (рис. 2.1).

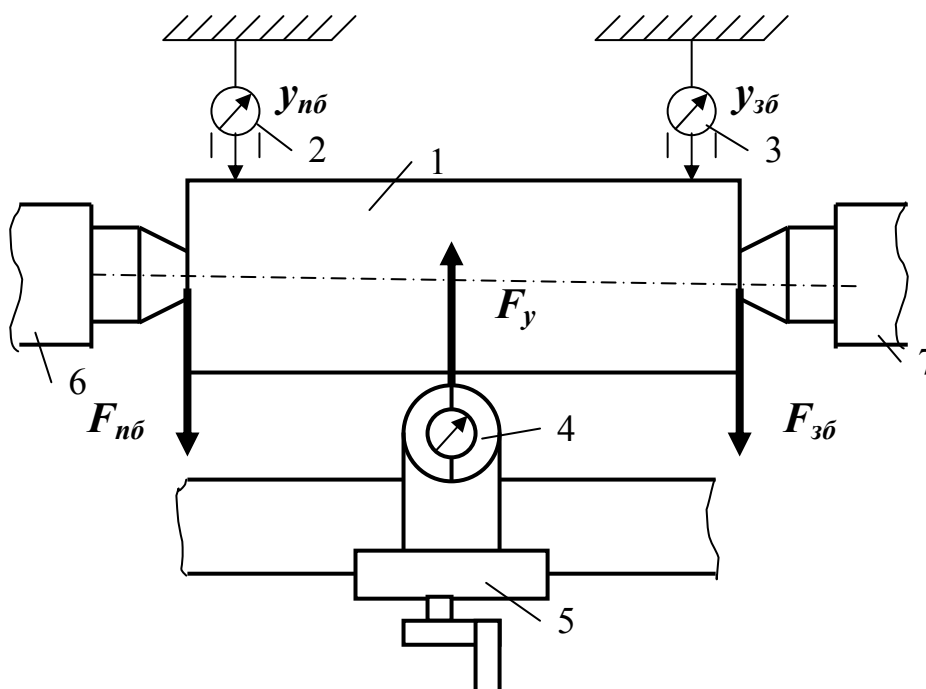


Рис. 2.1. Схема лабораторной установки: 1- обрабатываемая деталь; 2, 3 - индикаторы часового типа; 4- динамометр; 5- суппорт; 6, 7- передняя и задняя бабки станка; $F'_{нб}$ и $F'_{зб}$ – реакции опор на силу F_y .

2.5. На основании данных табл. 2.1 построить графики зависимости величины отжатия концов вала от величины приложенной силы (рис. 2.2), то есть

$$y_{нб} = y_{нб} \cdot \frac{F_y}{2} \quad \text{и} \quad y_{зб} = y_{зб} \cdot \frac{F_y}{2}.$$

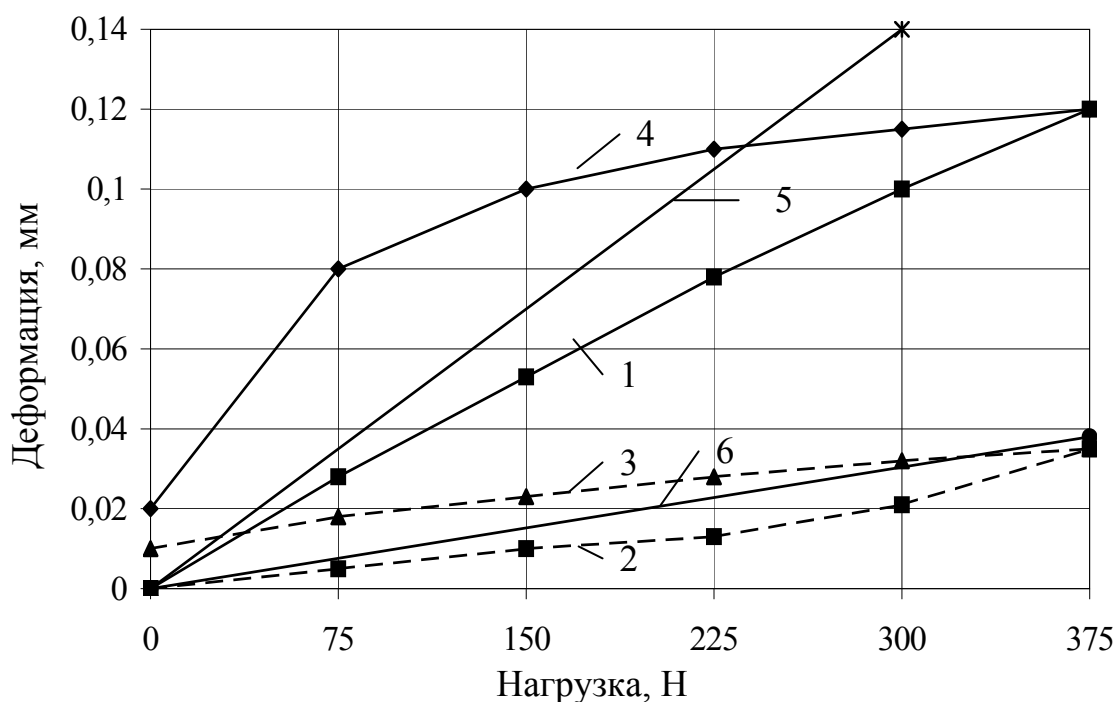


Рис. 2.2. Зависимость деформации $y_{зб}$ и $y_{нб}$ от нагрузки $(F_y/2)$ (линии 1 и 2 - $y_{зб}$ и $y_{нб}$ при нагрузке; линии 3 и 4 - $y_{зб}$ и $y_{нб}$ при разгрузке).

Несовпадение на графике (рис. 2.2) веток нагрузки и разгрузки вызвано гистерезисом упругой системы.

Для расчетов и анализа точности обработки (с учетом жесткости) принимается среднее значение жесткости элементов технологической системы. Для этого на рис. 2.2 проводят прямую линию, равноотстоящую от экспериментальных точек цикла нагружения и разгрузки, и которая выходит из начала системы координат (линии 5 и 6 на рис. 2.2, соответственно, для задней и передней бабок).

2.6. Сформулировать выводы по работе и рекомендации по экспериментальному определению жесткости станков на этапах их производства и ремонта.

3. Содержание отчета.

- 3.1. Наименования и цель работы.
- 3.2. Содержание задачи (ход работы).
- 3.3. Схема лабораторной установки (рис. 2.1).
- 3.4. Таблица результатов измерений (табл. 2.1).
- 3.5. Технологический эскиз операции и схемы движения инструмента.
- 3.6. Графики $y_{нб} = y_{нб} \cdot \frac{F_y}{2}$ и $y_{зб} = y_{зб} \cdot \frac{F_y}{2}$.
- 3.7. Анализ результатов, выводы и рекомендации.

Литература:

1. Технология машиностроения: Учебник / Якимов А.В., Царюк В.Н., Якимов А.А., Оборский Г.А., Ларшин В.П., Самойленко А.В.. - Одесса: Астропринт, 2001. - 608 с.

2. Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Технология машиностроения» (Обеспечение точности механической обработки) /Составили Колкер Я.Д., Руднев О.Н., Зелинский С.А. Под ред. Якимова А.В. – Одесса: ОПИ, 1986. – 59 с.

Приложение 3

Исследования жёсткости технологической системы производственным методом

1. Цель работы.

1.1. Изучить производственный метод определения жёсткости технологических систем.

1.2. Приобрести навыки и умение определять жесткость станков производственным методом.

Работа рассчитана на два академических часа.

2. Методические указания к работе.

Точность обработки на металлорежущих станках в значительной мере зависит от жёсткости упругой технологической системы, которая, как показывает опыт, определяется податливостью её основных звеньев: станка, приспособления, обрабатываемой детали и режущего инструмента. Жёсткость системы характеризуется отношением составляющей усилия резания F_y , направленной по нормали к обрабатываемой поверхности, к смещению y режущего лезвия инструмента относительно детали в том же направлении, то есть

$$K = \frac{F_y}{y}. \quad (3.1)$$

Жесткость металлорежущих станков определяют двумя основными методами: статическим и производственным [1-3].

Сущность производственного метода состоит в обтачивании ступенчатой заготовки с разной глубиной резания и измерении диаметров заготовки до (d_1 и d_2) и после (d'_1 и d'_2) удаления с заготовки переменного припуска (рис.3.1).

Жесткость системы у передней и задней бабки определяют по формуле

$$K = \frac{\Delta F_y}{\Delta y} = \frac{10C_{F_y} S^{y_{F_y}} V^{n_{F_y}} \left(t_{max.\phi}^{n_{F_y}} - t_{min.\phi}^{x_{F_y}} \right)}{\Delta y}, \quad (3.2)$$

где ΔF_y - прирост радиальной составляющей усилия резания, Н; Δy - приращение упругих отжатий, какие вызваны величиной ΔF_y , мм; $C_{F_y}, x_{F_y}, y_{F_y}, n_{F_y}$ - коэффициенты, которые определяются с учетом вида обрабатываемого материала и материала режущей части инструмента (для материала Ст. 45 $C_{F_y} = 125, x_{F_y} = 0,9; y_{F_y} = 0,75; n_{F_y} = 0,1$ [2]); S - продольная пода-

ча, мм/об; V - скорость резания ($V = \frac{\pi D n}{1000}$), м/мин; t_{max}, t_{min} - максимальная и минимальная глубины резания (рис.3.1).

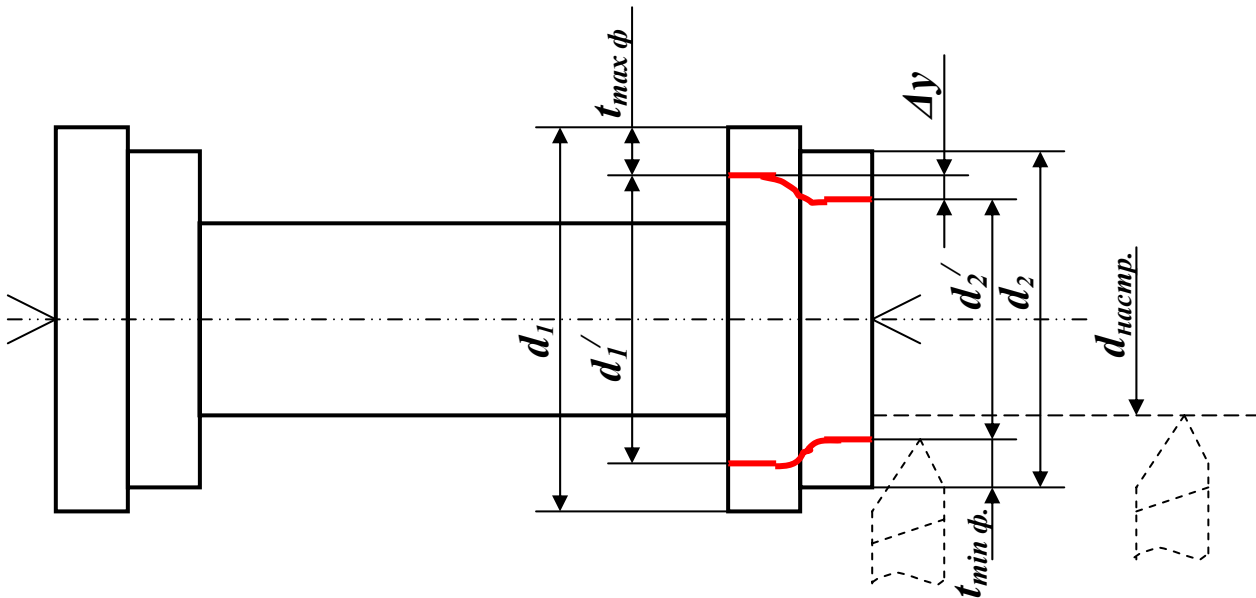


Рис.3.1. Схема обтачивания ступенчатой заготовки: ПБ, ЗБ - передняя и задняя бабки, соответственно (размеры заготовки около ПБ на рисунке не показаны).

При определении скорости резания необходимо задать диаметр d обрабатываемой заготовки и частоту n её вращения.

В формуле (3.2) используются следующие параметры:

$$\Delta y = \frac{1}{2}(d'_1 - d'_2), \quad (3.3)$$

$$t_{max.\phi} = \frac{1}{2}(d_1 - d'_1), \quad (3.4)$$

$$t_{min.\phi} = \frac{1}{2}(d_2 - d'_2). \quad (3.5)$$

Результаты проведенных экспериментов систематизируем в табл.3.1. Выражение (3.3) можно записать, используя параметр уточнения ξ , то есть

$$\xi = \frac{\Delta_{исх.заг}}{\Delta_{обр.заг}}, \quad (3.6)$$

где $\Delta_{исх.заг}$ - погрешность исходной заготовки, мм; $\Delta_{обр.заг}$ - погрешность обработанной заготовки, мм.

Так как (рис.3.1)

$$\xi = \frac{d_1 - d_2}{d'_1 - d'_2}, \quad (3.7)$$

то

$$\Delta y = \frac{d_1 - d_2}{2\xi}. \quad (3.8)$$

Таблица 3.1

Результаты измерений и вычислений.

Место приложения силы	Результаты измерений				Результаты вычислений					
	До обработки		После обработки		$t_{max .\phi}$, мм	$t_{min .\phi}$, мм	ΔF_y , Н	Δy , мм	K , Н/мм	ξ
	d_1 , мм	d_2 , мм	d'_1 , мм	d'_2 , мм						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Передняя бабка										
Задняя бабка										

3. Порядок выполнения работы.

3.1. Определение жесткости станка при обтачивании жёсткой ступенчатой заготовки.

3.1.1. Перед снятием припуска, соответственно схеме обработки (рисунок), выполнить измерение диаметров заготовки d_1 и d_2 (данные занести в табл.3.1).

3.1.2. Обработать ступенчатую заготовку около передней и задней бабок.

3.1.3. Выполнить измерение диаметров d'_1 и d'_2 .

3.1.4. Жесткость станка определить по формуле (3.1) для передней и задней бабок.

Литература:

1. Технология машиностроения: Учебник / Якимов А.В., Царюк В.Н., Якимов А.А., Оборский Г.А., Ларшин В.П., Самойленко А.В.. - Одесса: Астропринт, 2001. - 608 с.
2. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.2/ Под ред. Косиловой А.Г. и Мещерякова Р.К.- 4-е изд. перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1986. - 496 с.
3. Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Технология машиностроения» (Обеспечение точности механической обработки) / Составили Колкер Я.Д., Руднев О.Н., Зелинский С.А. Под ред. Якимова А.В. – Одесса: ОПИ, 1986. – 59 с.

Статистический анализ точности операции механической обработки

Данная лабораторная работа подготовлена на основании материалов работы [1].

1. Цель работы.

1.1. Определить показатели точности технологической операции по исследуемому параметру.

1.2. Освоить на практике методику статистического анализа точности операции механической обработки.

Работа рассчитана на два академических часа.

2. Методические указания к работе.

Статистический анализ точности технологической операции производят путем измерения деталей из одноразовой выборки, обработанных на налаживаемом станке. Для уменьшения трудоемкости выполнения лабораторной работы допускается использовать готовые комплекты деталей, обработанных заранее. Рекомендуется использовать комплекты по 50 или 100 деталей. Номинальные размеры параметров и допуски на них устанавливаются преподавателем в процессе выполнения лабораторной работы. Измерение размеров деталей производят универсальным измерительным прибором, точность которого выбирается исходя из соотношения

$$\Delta_{изм} = \left(\frac{1}{6} \dots \frac{1}{10} \right) \cdot T, \quad (4.1)$$

где T - допуск на размер, мм.

Результаты измерения деталей заносят в табл. 4.1 для комплекта 50 деталей. При проведении анализа данные табл. 4.1 используются для составления расчетной таблицы (табл. 4.2).

Таблица 4.1.

Номер измерения	Размер x_j	Номер измерения	Размер x_j	Номер измерения	Размер x_j	Номер измерения	Размер x_j	Номер измерения	Размер x_j
1		11		21		31		41	
2		12		22		32		42	
3		13		23		33		43	
4		14		24		34		44	
5		15		25		35		45	
6		16		26		36		46	
7		17		27		37		47	
8		18		28		38		48	
9		19		29		39		49	
10		20		30		40		50	

Таблица 4.2

Номер интервала	Интервал		x_i	m_i	N_{m_i}	$\frac{m_i}{n}$	$\frac{x_i m_i}{n}$	$x_i - \bar{X}$	$(x_i - \bar{X})^2$
	от	до							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1									
2									
3									
...									
f									

Таблица 4.3

Номер интервала	$\frac{(x_i - \bar{X})^2 m_i}{n}$	$t = \frac{x_i - \bar{X}}{S}$	Z_i	m'_i	$N_{m'_i}$	$ N_{m_i} - N_{m'_i} $
1	2	3	4	5	6	7
1						
2						
3						
...						
f						

Примечание: 1. x_i - середина интервала; m_i - частота; N_{m_i} - накопленная частота; m_i/n - частость, n - объём выборки;

$$2. \bar{X} = \sum_{i=1}^f \frac{x_i m_i}{n}; \quad 3. S = \sqrt{\sum_{i=1}^f \frac{(x_i - \bar{X})^2 m_i}{n}}.$$

Для заполнения столбиков 2, 3, 4, 5 табл. 4.3 необходимо выбрать число интервалов f . Рекомендуется для объема выборки $n = 50$, принимать $f = 7 \dots 8$; для $n = 100$ принимать $f = 8 \dots 10$ [2].

Рассчитывают цену интервала

$$\alpha = \frac{W}{f}, \quad (4.2)$$

где W - размах выборки, причём

$$W = x_{max} - x_{min}, \quad (4.3)$$

где x_{max}, x_{min} - соответственно максимальное и минимальное значение текущего размера детали (столбик 2, табл. 4.1).

Значение α округляется к ближайшему числу из ряда чисел с точностью, которая не превышает точность измерений. Учитывая округление значения α , уточняют число интервалов

$$f = \frac{W}{\alpha}. \quad (4.4)$$

Значения f округляют до ближайшего большего целого числа. Первый

интервал размеров начинается с x_{min} и заканчивается величиной $(x_{min} + \alpha)$, следующий интервал размеров начинается с $(x_{min} + \alpha)$ и заканчивается $(x_{min} + 2\alpha)$ и т.д. Середина интервала (столбик 4, табл.4.2) равняется полу-сумме крайних значений интервала. Частота m_i - количество деталей выборки, размеры которых попали в данный интервал размеров, подсчитывается вручную по табл. 4.1 (или с помощью калькулятора) и вносится в столбик 5 табл. 4.2. Частость определяется как отношения частоты m_i к объему всей выборки n . Естественно, сумма значений по столбику 5 должна равняться объему выборки, а сумма значений по столбику 7- единице (табл. 4.2).

При анализе технологической операции, кроме представления ряда распределения в виде табл. 4.2, удобно представлять его в виде графиков распределения (рис.4.1). При построении этих графиков следует придерживаться правила "золотого сечения", в соответствии с которым все чертежи должны быть расположены внутри прямоугольника, высота h которого должна приблизительно равняться $5/8$ его основания. Если на каждой ширине интервала, как на основе, построить прямоугольник, у которого высота равняется частоте (или частости), что соответствует данному интервалу, то совокупность таких прямоугольников составит гистограмму (то есть столбчатую диаграмму) распределения (рис.4.1,а).

Другой график получится, если в серединах интервалов x_i (столбик 4, табл. 4.2) на оси абсцисс восстановить перпендикуляры, высота которых равняется соответствующей частоте или частости, и соединить между собою их вершины. В результате выйдет эмпирическая кривая распределения или полигон (то есть многоугольник) распределения (рис. 4.1,б).

Определяют характеристики выборки: среднее арифметическое значение \bar{X} и среднее квадратичное отклонение S (см. также примечания к табл. 4.2):

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j, \quad (4.5)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (x_j - \bar{X})^2}{n}}. \quad (4.6)$$

С технологической точки зрения среднее арифметическое значение представляет собой фактический наладочный размер инструмента или фактическое положение упора станка.

Среднее квадратичное отклонение σ всей генеральной совокупности вычисляют по формуле

$$\sigma = \gamma \cdot S, \quad (4.7)$$

где S - среднее квадратичное отклонение выборки по формуле (4.6); γ - коэффициент, который учитывает погрешность определения среднего квадратичного отклонения при малых объемах выборки (при $n = 50$ и $n = 100$ $\gamma = 1,3$ и $\gamma = 1,2$, соответственно [1]).

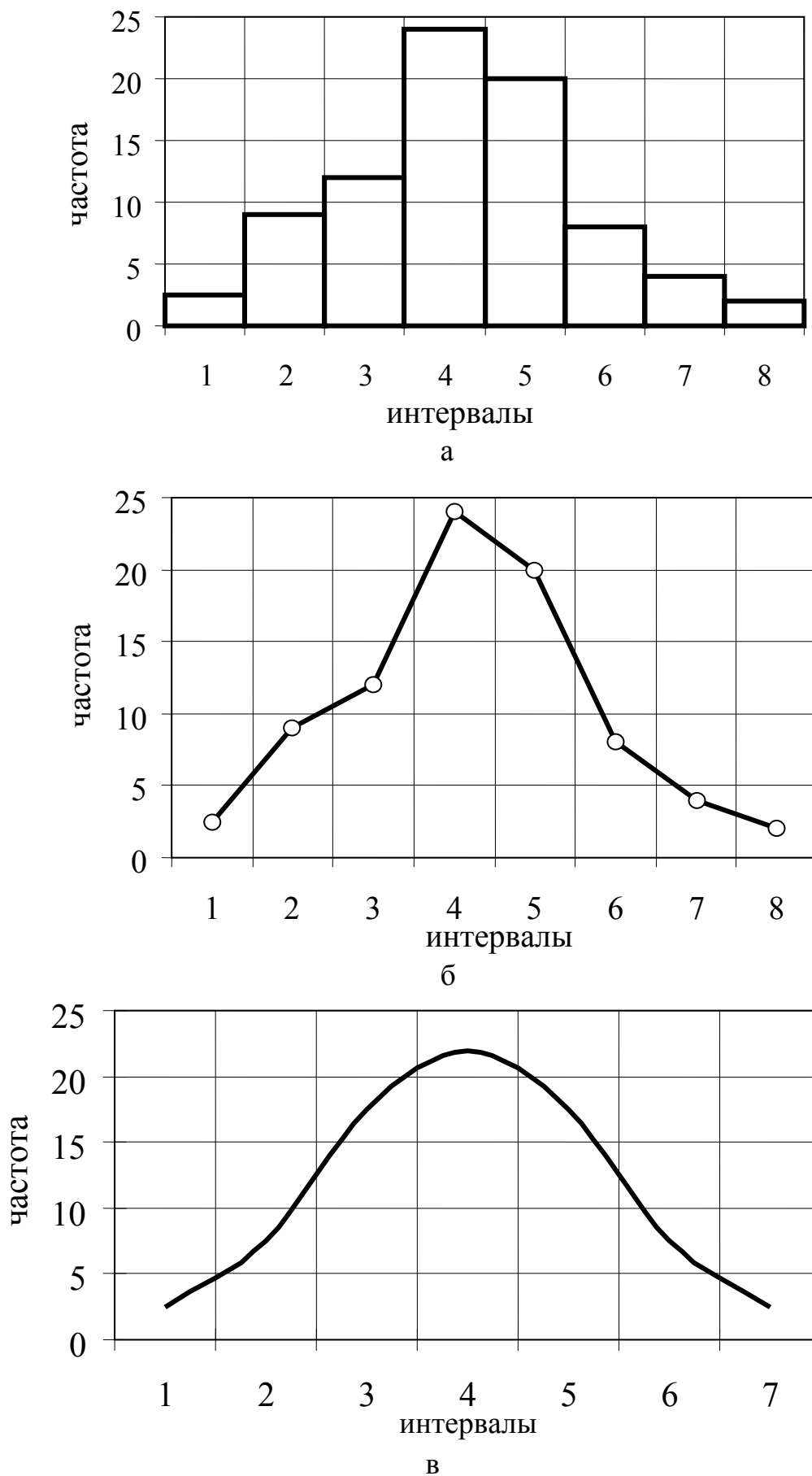


Рис. 4.1. Гистограмма (а), полигон (б) и теоретическая кривая (в) распределения размеров.

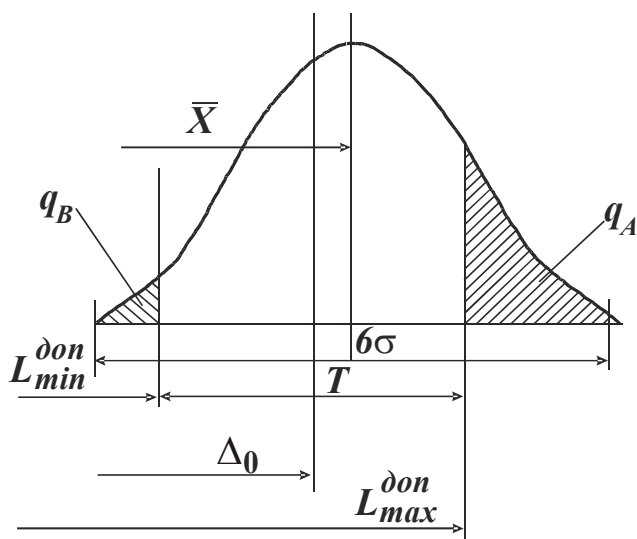


Рис. 4.2. Расчетная схема для определения процента брака.

Среднее квадратичное отклонение σ с технологической точки зрения представляет собой меру точности данного станка по обеспечению данного параметра. Далее необходимо сопоставить эмпирическое распределение, приблизительно принятое как нормальное, с теоретическим распределением. Для этого в одних и тех же координатах с полигоном строится кривая нормального распределения (рис. 4.1, в). Для построения этой кривой подсчитывают теоретические частоты нормального распределения

$$m'_i = \frac{n\alpha}{S} Z_t, \quad (4.8)$$

где Z_t - нормированная кривая нормального распределения размеров.

Здесь

$$Z_t = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}}, \quad (4.9)$$

где t - аргумент функции Лапласа, определяемый как

$$t = \frac{x_i - \bar{X}}{S}. \quad (4.10)$$

Данные расчета m'_i заносятся в столбик 5 табл.4.3. В столбики 6 табл. 4.2 и табл. 4.3 вносят, соответственно, накопленную эмпирическую частоту N_{m_i} (столбик 6 табл. 4.2) и накопленную теоретическую частоту $N_{m'_i}$ (столбик 6 табл. 4.3). Накопленные частоты определяются методом последовательного суммирования частот и записываются для каждого интервала нарастающим итогом. В столбик 7 табл. 4.3 вносится абсолютное различие накопленных эмпирической и теоретической частот по каждому интервалу.

Определяют критерий λ Колмогорова :

$$\lambda = \frac{|N_{m_i} - N_{m'_i}|_{max}}{\sqrt{n}}, \quad (4.11)$$

где $|N_{m_i} - N_{m'_i}|_{max}$ - максимальное различие накопленных частот.

По табл. 4.4 определяют значения вероятности $P(\lambda)$ в зависимости от расчетной величины критерия λ . Если в результате расчета окажется, что зна-

чения вероятности $P(\lambda) > 0,05$, то есть серьезные основания считать, что опытное распределение подчиняется закону нормального распределения. Если $P(\lambda) \leq 0,05$, то гипотеза нормальности распределения откидывается.

Таблица 4.4

Значения вероятности $P(\lambda)$ в зависимости от λ

λ	$P(\lambda)$	λ	$P(\lambda)$	λ	$P(\lambda)$
0,30	1,000	0,80	0,5441	1,60	0,0122
0,35	0,9997	0,85	0,4653	1,70	0,0062
0,40	0,9972	0,90	0,3927	1,80	0,0032
0,45	0,9874	0,95	0,3275	1,90	0,0015
0,50	0,9639	1,00	0,2700	2,00	0,0007
0,55	0,9228	1,10	0,1770	2,10	0,0003
0,60	0,8643	1,20	0,1122	2,20	0,0001
0,65	0,7920	1,30	0,0681	2,30	0,0001
0,70	0,7112	1,40	0,0397	2,40	0,0000
0,75	0,6272	1,50	0,0222	2,50	0,0000

Убедившись в нормальности распределения, проверяют необходимое и достаточное условия работы без брака по формулам:

$$T_n = \frac{T}{6\sigma} = \frac{T}{6\gamma S} > 1, \quad (4.12)$$

$$e_{\text{факт}} \leq e_{\text{дон}}, \quad (4.13)$$

где T_n - коэффициент точности процесса; T - поле допуска на исследуемый параметр по чертежу; $e_{\text{факт}}$ - фактический коэффициент точности настройки станка; $e_{\text{дон}}$ - допустимый коэффициент точности настройки.

Указанные коэффициенты точности настройки определяют следующим способом [2]

$$e_{\text{факт}} = \frac{|\bar{X} - \Delta_0|}{T}, \quad (4.14)$$

где Δ_0 - координата середины поля допуска по чертежу.

Причем

$$\Delta_0 = \frac{L_{\text{max}}^{\text{дон}} + L_{\text{min}}^{\text{дон}}}{2}, \quad (4.15)$$

где $L_{\text{max}}^{\text{дон}}$, $L_{\text{min}}^{\text{дон}}$ - предельные размеры детали по чертежу.

В свою очередь

$$e_{\text{дон}} = \frac{T - 6\sigma}{2T}. \quad (4.16)$$

Нарушение хотя бы одного из условий (4.12) или (4.13) ведет к неминуемому браку.

Таблица 4.5

Значения функции Лапласа $\Phi \left(t = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt \right)$

t	$\Phi(t)$	t	$\Phi(t)$	t	$\Phi(t)$
0	0,0000	1,0	0,3413	2,0	0,4772
0,1	0,0398	1,1	0,3643	2,1	0,4821
0,2	0,0793	1,2	0,3849	2,2	0,4861
0,3	0,1179	1,3	0,4032	2,3	0,4893
0,4	0,1554	1,4	0,4192	2,4	0,4918
0,5	0,1915	1,5	0,4332	2,5	0,4938
0,6	0,2257	1,6	0,4452	2,6	0,4953
0,7	0,2580	1,7	0,4554	2,8	0,4974
0,8	0,2881	1,8	0,4641	3,0	0,49865
0,9	0,3159	1,9	0,4713	4,0	0,499968

Вероятное количество бракованных деталей определяют по формулам

$$q_A = \left[0,5 - \Phi \left(\frac{L_{max}^{\text{don}} - \bar{X}}{\sigma} \right) \right] \cdot 100\%, \quad (4.17)$$

$$q_B = \left[0,5 - \Phi \left(\frac{\bar{X} - L_{min}^{\text{don}}}{\sigma} \right) \right] \cdot 100\%, \quad (4.18)$$

где Φ - функция Лапласа (табл.4.5); q_A - вероятный процент исправимого брака деталей для охватываемых поверхностей и неисправимого - для охватывающих поверхностей; q_B - вероятный процент исправимого брака деталей для охватывающих поверхностей и неисправимого брака – для охватываемых поверхностей (рис.4.2).

Для уменьшения затрат на брак соотношение между q_A и q_B необходимо установить по методике работ [3, 4].

3. Порядок выполнения работы.

3.1. Выполнить измерение деталей по заданному параметру. Результаты измерений занести в табл. 4.1.

3.2. Разделить опытные данные табл.4.1 на интервалы (табл. 4.2 и табл. 4.3). Определить эмпирические характеристики распределения данного параметра.

3.3. Построить графики распределения: гистограмму, полигон и теоретическую кривую распределения.

3.4. Проверить гипотезу нормальности распределения с помощью критерия λ Колмогорова.

3.5. Проверить условия работы без брака.

- 3.6. Определить вероятное количество годных и бракованных деталей.
- 3.7. Проанализировать полученные результаты. Сделать выводы.
4. **Содержание отчета.**
 - 4.1. Название и цель работы.
 - 4.2. Задание и необходимое оснащение работы.
 - 4.3. Эскиз детали с указанием измеряемого размера.
 - 4.4. Протокол измерений (табл.4.1).
 - 4.5. Выбор и уточнения числа f интервалов. Расчет цены интервала.

Определения частоты и частоты.

- 4.6. Расчетная таблица (табл.4.2 и табл. 4.3).
- 4.7. Гистограмма, полигон и теоретическая кривая распределения (рис. 4.1).
- 4.8. Расчет статистических характеристик распределения.
- 4.9. Проверка гипотезы нормальности распределения.
- 4.10. Проверка условия работы без брака.
- 4.11. Расчет вероятного количества годных и бракованных деталей.
- 4.12. Выводы.

Литература:

1. Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Технология машиностроения» (Обеспечение точности механической обработки) /Составили Колкер Я.Д., Руднев О.Н., Зелинский С.А. Под ред. Якимова А.В. – Одесса: ОПИ, 1986.–59 с.
2. Колкер Я.Д. Математический анализ точности механической обработки деталей. – Киев: Техника, 1976. – 200 с.
3. Технология машиностроения: Учебник / Якимов А.В., Царюк В.Н., Якимов А.А., Оборский Г.А., Ларшин В.П., Самойленко А.В.. - Одесса: Астропринт, 2001. - 608 с.
4. Оптимизация технологических процессов в машиностроении для студентов специальностей 1201, 1202: Учеб. пособие // Якимов А.В., Ларшин В.П., Якимов А.А., Ткаченко Б.О., Решетнев Н.И..- Одесса: ОГПУ 1995. - 105с.

Приложение 5

Исследования методов настройки металлорежущего оборудования на заданный уровень

1. **Цель работы.**
 - 1.1. Изучить методику определения наладочных размеров и допусков на них.
 - 1.2. Получить практические навыки по настройке металлорежущих станков.
 - 1.3. Ознакомиться с методикой контроля правильности настройки.

Работа рассчитана на два академических часа.
2. **Методические указания к работе.**

Рабочий наладочный размер A_p - это прогнозируемый результат, к кото-

рому необходимо стремиться при настройке, поднастройке и перенастройке станка на размер. А поскольку прогноз делается до получения фактического результата, то имеем ошибку прогнозирования, которая не должна превышать допуска на настройку T_n , то есть

$$A_p = x_0 \pm \frac{T_n}{2}, \quad (5.1)$$

где x_0 - номинальное значение рабочего настроечного размера, мм; T_n - допуск на настройку, мм.

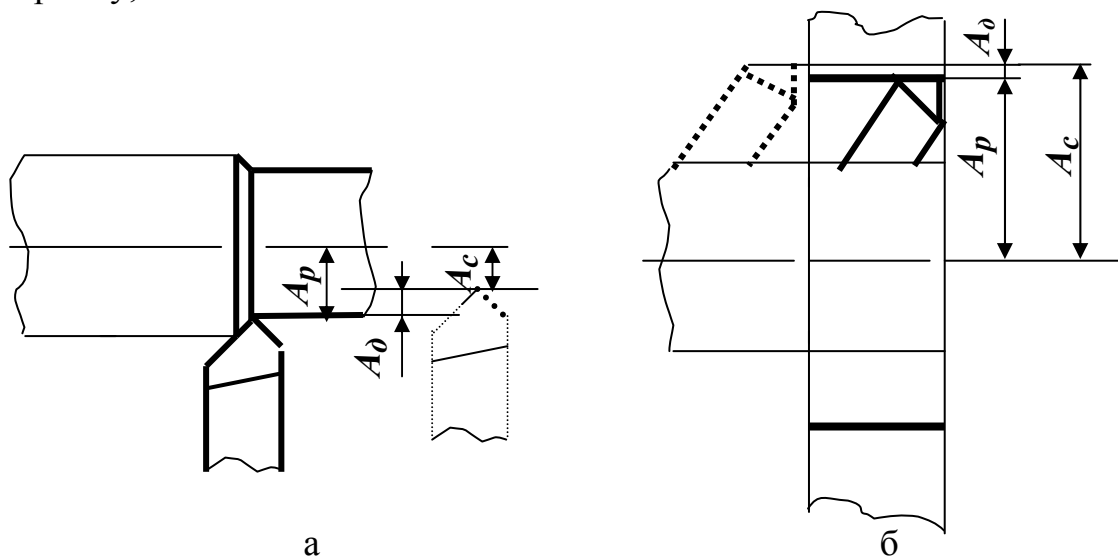


Рис. 5.1. Определения размера статического налаживания A_c , которое обеспечит необходимый рабочий наладочный размер A_p при обработке охватываемой (а) охватывающей (б) обрабатываемых деталей.

Для того чтобы обеспечить необходимую величину A_p , необходимо внести исправление в размер A_c статической настройки станка, который для охватываемой (вал) и охватывающей (отверстие) деталей выражается, соответственно, следующими формулами (рис. 5.1)

$$A_c = A_p - A_d, \quad (5.2)$$

$$A_c = A_p + A_d, \quad (5.3)$$

где A_d - размер динамической настройки (дополнительный сдвиг вершины лезвия под действием силы резания), мм.

Прогнозируемое значение размера A_d можно найти из уравнения

$$A_d = \frac{F_y}{j}, \quad (5.4)$$

где F_y - радиальная составляющая силы резания, Н; j - жесткость технологической системы, Н/мм.

При настройке станка на обработку одной детали для наилучшего использования поля допуска T в качестве x_0 принимают среднее значение допустимых предельных размеров (рис. 5.2, а).

$$x_0 = \frac{L_{max}^{don} + L_{min}^{don}}{2}. \quad (5.5)$$

В этом случае рабочий настроечный размер определяется формулой (5.1), так как возможные погрешности динамической настройки равновероятно располагаются с двух сторон от x_0 [1]. Контроль правильности настройки осуществляется методом пробных проходов и промеров при обработке небольшого участка детали.

Случаю обработки одной детали отвечает рис. 5.2, а, в котором отсутствует составляющая 3σ . При настройке для обработки партии деталей (рис.5.2, б, в) необходимо так расположить будущее поле рассеяния, чтобы оставить "резерв" для систематических погрешностей обработки $\Delta_c(n)$. Эти погрешности могут быть вызваны, например, размерным износом инструмента. Критерием оптимизации настройки в этом случае является максимальное количество деталей, которые могут быть обработаны до первой поднастройки технологической системы.

Контроль правильности настройки делают по среднему значению размера для группы m обработанных деталей

$$L_{сеп}^{zp} = \sum_{i=1}^m \frac{L_i}{m}. \quad (5.6)$$

Ограниченное количество деталей в группе ($m = 4...8$) приводит к необходимости учета составляющей $\Delta_{гн}$ (поле рассеяния групповых размеров).

При сдвиге в процессе обработки уровня настройки к верхнему предельному размеру L_{max}^{don} при обработке охватываемых (валов) поверхностей (рис. 5.2, б) предельные значения группового настроечного размера [1]

$$x_{0min}^{zp} \geq L_{min}^{don} + \Delta_{изм} + 3\sigma \left(1 + \frac{1}{\sqrt{m}}\right), \quad (5.7)$$

$$x_{0max}^{zp} \leq L_{max}^{don} + \Delta_c(n) - 3\sigma \left(1 + \frac{1}{\sqrt{m}}\right). \quad (5.8)$$

Отсюда получаем номинальное значение группового наладочного размера

$$x_0^{zp} = L_{max}^{don} - \Delta_c(n) - 3\sigma - \frac{T_n}{2}. \quad (5.9)$$

При сдвиге в процессе обработки уровня настройки к нижнему предельному размеру L_{min}^{don} при обработке охватывающих (рис. 5.2, в) поверхностей (отверстий) предельные значения группового настроечного размера

$$x_{0min}^{zp} \geq L_{min}^{don} + \Delta_c(n) + 3\sigma \left(1 + \frac{1}{\sqrt{m}}\right), \quad (5.10)$$

$$x_{0max}^{zp} \leq L_{max}^{don} - \Delta_{изм} - 3\sigma \left(1 + \frac{1}{\sqrt{m}}\right). \quad (5.11)$$

Отсюда получаем номинальное значение группового наладочного размера

$$x_0^{zp} = L_{min}^{don} + \Delta_c(n) + 3\sigma - \frac{T_n}{2}. \quad (5.12)$$

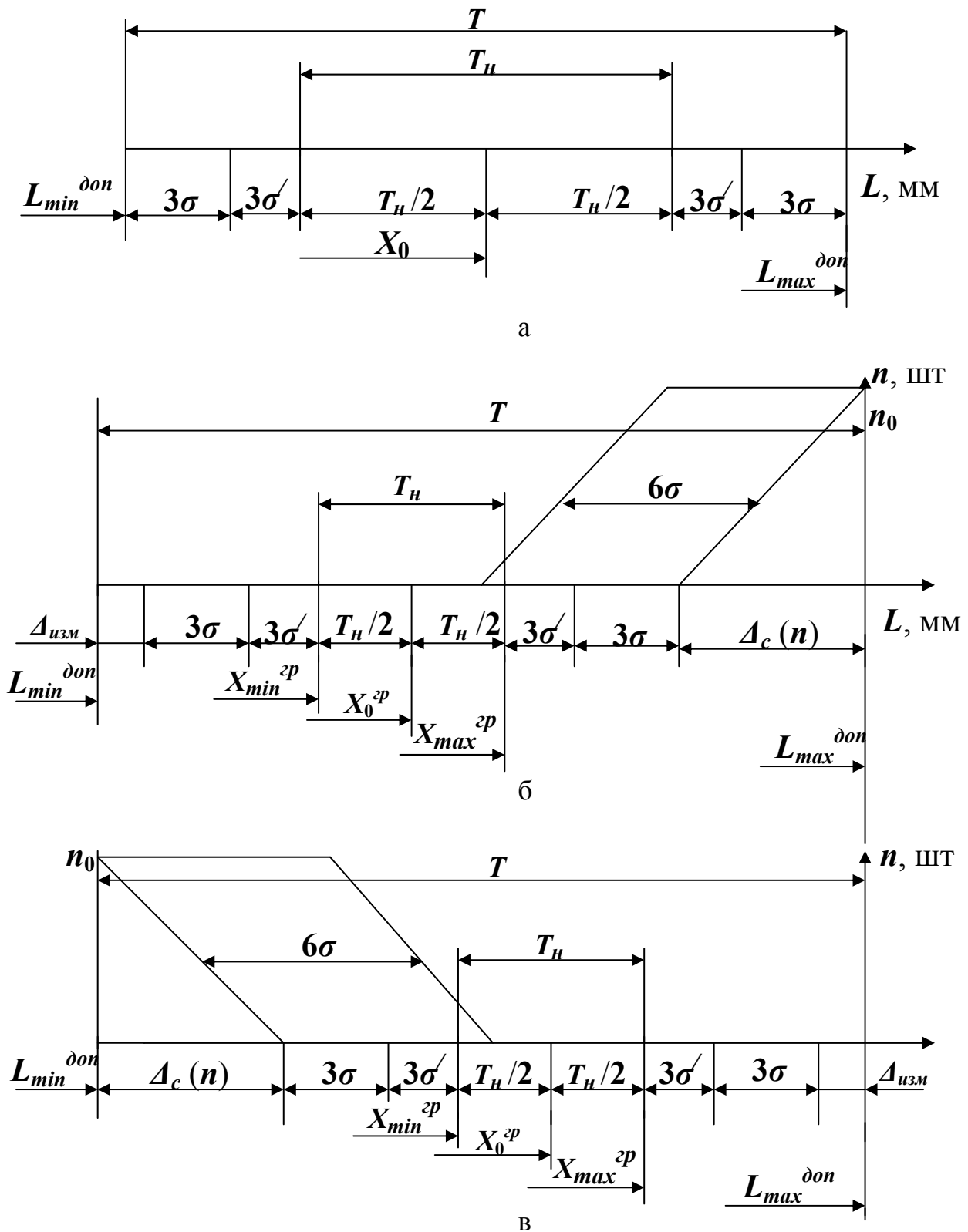


Рис. 5.2. Схема настройки станка для обработки партии деталей без учета износа инструмента (а), и обработка партии охватываемых (б) и охватывающих (в) деталей с учётом износа инструмента.

В формулах (5.9) и (5.12) учтено, что контроль правильности настройки осуществляется по групповым средним размерам. Из этих формул, а также из схем на рис. 5.2, б, в видно, что допуск на настройку (при контроле по группо-

вым средним) составляет

$$T_n = T - 6\sigma \left(1 + \frac{1}{\sqrt{m}} \right) - \Delta_c(n) - \Delta_{изм}. \quad (5.13)$$

Алгебраическое суммирование погрешностей, которые входят в формулу (5.13), приводит к существенному занижению расчетной величины T_n . Это занижение гарантирует отсутствие брака, однако резко увеличивает трудоемкость настройки и себестоимость обработки. Более приемлемым (по трудоёмкости и себестоимости) является подход, в соответствии с которым допускают определённый процент риска получить бракованную деталь и связанные с этим дополнительные затраты. Такой подход разрешает увеличить допуск T_n , снизить трудоемкость настройки и себестоимость обработки с учётом предварительно запланированной доли брака. Например, допуская риск получить брак 0,27 % (3 бракованные детали на каждую тысячу обработанных деталей), расчёт допуска делают по формуле [2]:

$$T_n = \sqrt{T^2 - (6\sigma)^2 - \left(\frac{6\sigma}{\sqrt{m}} \right)^2 - 3\Delta_c^2(n) - \frac{\Delta_{изм}^2}{m}}. \quad (5.14)$$

Например, при $T = 0,4$ мм, $\sigma = 0,02$ мм, $m = 4$, $\Delta_c(n) = 0,05$ мм по формулам (5.13) и (5.14) соответственно, получаем

$$\begin{aligned} T_n &= T - 6\sigma \left(1 + \frac{1}{\sqrt{m}} \right) - \Delta_c(n) - \Delta_{изм} = 0,4 - 6 \cdot 0,02 \left(1 + \frac{1}{\sqrt{4}} \right) - 0,02 - 0,05 = \\ &= 0,4 - 0,18 - 0,02 - 0,05 = 0,15 \text{ мм} \end{aligned}$$

и

$$\begin{aligned} T_n &= \sqrt{T^2 - (6\sigma)^2 - \left(\frac{6\sigma}{\sqrt{m}} \right)^2 - 3\Delta_c^2(n) - \frac{\Delta_{изм}^2}{m}} = \\ &= \sqrt{0,4^2 - (6 \cdot 0,02)^2 - \left(\frac{6 \cdot 0,02}{\sqrt{4}} \right)^2 - 3 \cdot 0,02^2 - \frac{0,05^2}{4}} = \sqrt{0,16 - 0,0144 - 0,0036 - 3 \cdot 0,0004 - 0,000625} = \\ &= \sqrt{0,140175} = 0,374 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Таким образом, квадратичное суммирование погрешностей (с допущением брака 0,27 %), в отличие от алгебраического суммирования, разрешает увеличить допуск на налаживание станка от $T_i = 0,150$ мм до $T_i = 0,374$ мм, то есть в 2,5 раза. Степень увеличения допуска на настройку в зависимости от уровня надежности (процент риска, который допускается) может быть выбрана с учетом конкретных условий предприятия. Соответствующие методики определения допуска T_i можно найти в литературе [2-4].

3. Порядок выполнения работы.

3.1. Определить уровень налаживания x_0^{2p} расчетным методом по формулам (5.9) и (5.12), соответственно, для охватываемой и охватывающей поверхностей.

3.2. Установить заготовку на станок в соответствии с заданным (преподавателем) эскизом обработки.

3.3. Настроить станок на заданный уровень размера методом пробных проходов и промеров. При достижении настроечного размера закрепить рукоятку (с лимбом) станка.

3.4. Обработать на заданных режимах и достигнутом уровне настройки заданное число m пробных деталей.

3.5. Измерить избранным измерительным инструментом размеры обработанных деталей в группе из m деталей.

3.6. Определить средний групповой размер.

3.7. Определить допуск на настройку по формулам (5.13) и (5.14) (при алгебраическом и квадратичном суммировании погрешностей).

3.8. Проверить соответствие среднего группового размера величине рабочего настроечного размера, определяемого по формуле (5.1).

3.9. Составить протокол по лабораторной работе.

4. Содержание протокола.

4.1. Название и цель работы.

4.2. Индивидуальное задание, эскиз детали, перечень необходимого оснащения (приспособления, измерительный и режущий инструмент).

4.3. Схема установки детали на станке (схема настройки).

4.4. Режимы резания.

4.5. Расчетные данные, необходимые для определения уровня настройки.

4.6. Результаты измерения пробных деталей.

4.7. Результаты контроля правильности настройки для двух случаев определения допуска на настройку (алгебраическое и квадратичное суммирование погрешностей).

4.8. Выводы о точности настройки.

Литература

1. Ларшин В.П., Лищенко Н.В. Анализ методов настройки металлорежущих станков на размер // Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве: Труды 5-й междунар. научн.-техн. конф. - Харьков: ХНПК "ФЭД", 2002. - с. 19-23.
2. Колкер Я.Д. Математический анализ точности механической обработки деталей. - К.: Техника, 1976. - 200 с.
3. Журцев В.Г., Кубарев А.И., Усан Н.В. Статистические методы контроля качества на часовом производстве. - Г.: Изд-во стандартов, 1972. - 220с.
4. Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Технология машиностроения» (Обеспечение точности механической обработки) /Составили Колкер Я.Д., Руднев О.Н., Зелинский С.А. Под ред. Якимова А.В. – Одесса: ОПИ, 1986. – 59 с.

Планирование эксперимента для определения зависимости мощности шлифования от режимов обработки

1. Цель работы.

1.1. Установить влияние режимов шлифования на мощность, затрачиваемую на резание, методом полного факторного эксперимента.

1.2. Освоить на примере методику планирования эксперимента.

1.3. После выполнения работы студент должен: а) знать основные принципы полного факторного эксперимента; б) уметь выбрать интервалы изменения варьируемых факторов; в) приобрести навыки экспериментального исследования.

Работа рассчитана на два академических часа.

2. Методические указания к работе.

Известно, что при расчете и оптимизации режимов резания мощность, затрачиваемую на резание, определяют по эмпирической зависимости. Например, при плоском шлифовании на станках с прямоугольным столом и крестовым суппортом эта зависимость может быть представлена в виде [1]

$$P = C_1 \cdot t^x \cdot V^y \cdot S^z, \tag{6.1}$$

где t - глубина шлифования, мм; V - скорость продольного перемещения стола станка, м/мин; S - поперечная подача, мм/ход; C_1, x, y, z - коэффициенты.

При постоянной величине поперечной подачи, например, при $S = 1,2$ мм/ход, зависимость (6.1) может быть представлен в виде

$$P = C \cdot t^x \cdot V^y, \tag{6.2}$$

где $C = C_1 \cdot 1,2^z$.

После логарифмирования выражения (6.2) получаем

$$\ln P = \ln C + x \ln t + y \ln V \tag{6.3}$$

или

$$Y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2, \tag{6.4}$$

где x_1, x_2 – факторы, которые варьируются; a_0, a_1, a_2 – постоянные коэффициенты; Y – функция отклика.

При 2-х факторном планировании эксперимента минимальное количество опытов составляет $N = 2^n = 2^2 = 4$, где n - количество факторов, которые варьируются.

Матрицу планирования и результаты экспериментов сводим в таблицу.

Таблица 6.1

$x_1(t)$	$x_2(V)$	$y_1, \text{Вт}$	$y_2, \text{Вт}$	Y_1	Y_2	\bar{Y}	$(Y - \bar{Y})^2$
+	-					\bar{Y}_1	
+	-					\bar{Y}_2	
-	+					\bar{Y}_3	
+	+					\bar{Y}_4	

Примечание: 1. $Y_1 = \ln y_1$; $Y_2 = \ln y_2$; $Y = \frac{Y_1 + Y_2}{2}$; 2. Знаки "+" и "-" отвечают максимальному и минимальному значениям факторов, которые варьируются.

Указанные преподавателем численные значения верхнего и нижнего уровней для варьируемых факторов, представить в табл.6.2.

Таблица 6.2

x_1	x_2
t , мин	V , м/мин
$x_j \min$	
$\ln x_j \min$	
$x_j \max$	
$\ln x_j \max$	

Коэффициенты a_0, a_1, a_2 в уравнении регрессии (6.4) определяют по формулам

$$a_0 = \frac{\bar{Y}_1 + \bar{Y}_2 + \bar{Y}_3 + \bar{Y}_4}{4}, \quad (6.5)$$

$$a_1 = \frac{-\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2 + \bar{Y}_3 + \bar{Y}_4}{4}, \quad (6.6)$$

$$a_2 = \frac{-\bar{Y}_1 + \bar{Y}_2 - \bar{Y}_3 + \bar{Y}_4}{4}. \quad (6.7)$$

Формула преобразования натуральных единиц в безразмерные выглядит так [2]

$$x_j = \frac{2(\ln \tilde{x}_j - \ln \tilde{x}_j \max)}{\ln \tilde{x}_j \max - \ln \tilde{x}_j \min} + 1, \quad (6.8)$$

где x_j, \tilde{x}_j – параметры x в безразмерной и размерной формах соответственно.

С учетом выражения (6.8) зависимость (6.4) принимает следующий вид

$$Y = a_0 + a_1 \left[\frac{2(\ln \tilde{x}_1 - \ln \tilde{x}_1 \max)}{\ln \tilde{x}_1 \max - \ln \tilde{x}_1 \min} + 1 \right] + a_2 \left[\frac{2(\ln \tilde{x}_2 - \ln \tilde{x}_2 \max)}{(\ln \tilde{x}_2 \max - \ln \tilde{x}_2 \min)} + 1 \right]. \quad (6.9)$$

После потенцирования уравнения (6.9) приходим к искомой зависимости (6.2). Например, если уравнение (6.9) имеет вид

$$Y = 6,61 + 0,96 \ln \tilde{x}_1 + 0,84 \ln \tilde{x}_2,$$

то получим

$$P = e^{6,61} t^{0,96} V^{0,84}.$$

3. Статистический анализ полученной модели.

Анализ делают для проверки однородности дисперсий (критерий Кохрана), проверки значимости коэффициентов (критерий Стьюдента) и проверки адекватности модели (критерий Фишера).

3.1. Проверка однородности дисперсий по критерию Кохрана. Критерий Кохрана (G – критерий)

$$G = \frac{S_{i_{max}}^2}{\sum_1^4 S_i^2} < G_{табл}. \quad (6.10)$$

Здесь $S_i^2 = 2(Y - \bar{Y})^2$.

Если условие (6.10) выполняется, то гипотеза об однородности дисперсий принимается. Численные значения $G_{табл}$ для разных условий полного факторного эксперимента приведены в работе [2]. Для рассмотренного случая [2]

$$G_{табл} = 0,907.$$

3.2. Проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии по t – критерию Стьюдента

$$t = \frac{|a_i|}{S(a_i)} > t_{табл}, \quad (6.11)$$

$$S(a_i) = \frac{S_{ош}}{\sqrt{Nn_i}}, \quad (6.12)$$

$$S_{ош} = \frac{\sum_{i=1}^4 S_i^2}{N}, \quad (6.13)$$

где $a_i = a_0, a_1, a_2$; N – число опытов ($N = 4$); n – количество уровней варьирования ($n_i = 2$).

Если условие (6.11) выполняется, то соответствующий коэффициент a_i считается значимым. Численные значения $t_{табл}$ для разных условий полного факторного эксперимента приведены в работе [2]. В данном случае

$$t_{табл} = 2,78.$$

3.3. Проверка адекватности модели по F – критерию Фишера.

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_{ош}^2} \leq F_{табл}, \quad (6.14)$$

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{i=1}^4 2(\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{N - K}, \quad (6.15)$$

где $S_{ад}^2$ – дисперсия адекватности; $S_{ош}^2$ – дисперсия ошибки, обусловленная по

формуле (6.13); K – число значимых коэффициентов уравнения регрессии.

Численные значения для разных условий полного факторного эксперимента приведены в работе [2]. Для рассмотренного случая [2] $F = 12$.

Для определения дисперсий $S_{ош}^2$ и $S_{ад}^2$ удобно пользоваться табл.6.3.

Таблица 6.3

i	$2\left(\hat{Y}-\bar{Y}\right)^2$	\hat{Y}	$\left(\hat{Y}-\bar{Y}\right)$	$\left(\hat{Y}-\bar{Y}\right)^2$	$2\left(\hat{Y}-\bar{Y}\right)^2$
1					
2					
3					
4					

4. Домашнее задание.

4.1. Выучить материал по конспекту лекций и этим методическим указаниям. При необходимости использовать работу [2].

4.2. Выучить порядок выполнения лабораторной работы (разд.5 методических указаний) и подготовить протокол и бланк таблицы по форме, приведенной в табл. 6.2 и табл. 6.3 для занесения результатов исследований и их обработки (см. табл. индивидуальных заданий).

5. Порядок выполнения работы.

5.1. Получить индивидуальное задание у преподавателя относительно верхнего и нижнего уровней варьируемых факторов (табл.6.2).

5.2. Установить выбранные режимы шлифования и записать мощность шлифования в каждом из запланированных опытов. Заполнить табл. 6.1 и табл.6.3.

5.3. По методике раздела 2 получить эмпирическую зависимость мощности плоского шлифования от режимных параметров t и V .

5.4. По методике раздела 3 осуществить проверку однородности дисперсий по G - критерию Кохрана, значимости полученных коэффициентов по t - критерию Стьюдента и адекватности модели по F - критерию Фишера.

6. Содержание отчета.

Протокол выполненной работы должен содержать такие пункты:

- цель работы;
- выполненная домашняя задача;
- результаты исследований с необходимыми расчетами;
- выводы по выполненной работе.

7. Контрольные вопросы.

7.1. Для чего может быть использована эмпирическая зависимость мощности шлифования от режимных параметров процесса?

7.2. В чём сущность полного факторного эксперимента?

7.3. Каким методом может быть осуществлена линеаризация искомой математической модели процесса?

7.4. Для чего осуществляются проверки математической модели по критериям Кохрана, Стьюдента и Фишера?

7.5. Можно ли использовать метод полного факторного эксперимента для установления математических моделей процесса по его теоретическому описанию (имитационное моделирование)?

Таблица 6.4

Значения G -критерия Кохрана при уровне значимости $\alpha=0,05$

N	$f = n - 1$						
	1	2	3	4	5	6	7
2	0,999	0,975	0,939	0,906	0,877	0,853	0,833
3	0,967	0,871	0,798	0,746	0,707	0,677	0,653
4	0,907	0,768	0,684	0,629	0,590	0,560	0,537
5	0,841	0,684	0,598	0,544	0,507	0,478	0,456
6	0,781	0,616	0,532	0,480	0,445	0,418	0,398
7	0,727	0,561	0,480	0,431	0,397	0,373	0,354
8	0,680	0,516	0,438	0,391	0,360	0,336	0,319
9	0,639	0,478	0,403	0,358	0,329	0,307	0,290
10	0,602	0,445	0,373	0,331	0,303	0,282	0,267

Примечание: N - число опытов; n - число повторений однотипных опытов.

Таблица 6.5

Значения t -критерия Стьюдента при $\alpha=0,05$

Число степеней свободы (f)						
1	2	3	4	5	6	7
12,71	4,30	3,18	2,78	2,57	2,45	2,36

Таблица 6.6

Значения F -критерия Фишера при $\alpha=0,05$

f_2	$f_1 = N - k'$						
	1	2	3	4	5	6	7
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,35
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79
8	3,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29
10	4,97	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14
11	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71

Примечание: $f_2 = N(n - 1)$; k' - число значимых коэффициентов уравнения регрессии

Таблица 6.7

Индивидуальные задания на проведение экспериментов

Номер варианта	S_{non} , мм/ход	t_{min} , мкм	t_{max} , мкм	V_{min} , м/мин	V_{max} , м/мин
1	1,2	5	45	2,0	7,0
2	1,2	10	50	2,0	7,0
3	1,2	15	55	1,0	6,5
4	1,2	20	60	1,0	6,5
5	2,4	25	65	1,0	5,0
6	2,4	5	45	1,0	6,0
7	2,4	10	50	1,0	6,0
8	2,4	15	55	1,0	6,5
9	2,4	20	60	1,0	6,0
10	3,6	5	45	1,0	5,5
11	3,6	10	50	0,5	5,0
12	3,6	15	55	0,5	4,5

Примечание: S_{non} , t , V - поперечная подача, глубина шлифования, скорость детали; min , max - минимальное и максимальные значения соответствующего параметра

Литература:

1. Справочник технолога- машиностроителя. В 2-х т. Т.2 / Под ред. Косиловой А.Г. и Мещерякова Р.К. - 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1986.- 496с.
2. Моделирование и оптимизация в машиностроении: Учеб. пособие / Душинский В.В., Кравченко С.К. - К.: НМК ВО, 1992. - 304с.

Приложение 7

Исследование методов достижения точности замыкающего звена при сборке

Работа состоит из двух частей и рассчитана на 4 академических часа.

Часть 1

1. Цель работы.

Определение и анализ точности размера замыкающего звена размерной цепи механизма по методам полной и неполной взаимозаменяемости.

2. Методические указания к работе.

Для достижения требуемой точности замыкающего звена, при сборке механизмов и машин используются следующие методы: полной, неполной, групповой взаимозаменяемости, а также методы пригонки, регулирования и сборки с компенсирующими материалами [1].

В общем случае при n увеличивающихся и p уменьшающихся размерах номинальный размер A_0 замыкающего звена определяют по формуле [2]:

$$A_0 = \sum_{j=1}^n \bar{A}_j - \sum_{j=n+1}^{n+p} \bar{A}_j, \quad (7.1)$$

где \bar{A}_j , \bar{A}_j - соответственно увеличивающее и уменьшающее j -е звено, причем для увеличивающего звена $1 \leq j \leq n$, а для уменьшающего звена $n+1 \leq j \leq n+p$.

Колебания размера замыкающего звена по методу полной взаимозаменяемости (метод максимума-минимума)

$$W(A_0) = \sum_{j=1}^{n+p} TA_j + T, \quad (7.2)$$

где A_j - размер j -ого звена размерной цепи (как увеличивающего так и уменьшающего).

Допуск замыкающего звена по методу неполной (частичной) взаимозаменяемости (теоретико-вероятностный метод) [1]

$$TA_0 = t_0 \sqrt{\sum_{j=1}^{n+m} \lambda_j^2 TA_j^2}, \quad (7.3)$$

где t_0 - коэффициент риска (аргумент функции Лапласу); λ_j^2 - коэффициент относительного рассеяния.

Коэффициент t_0 зависит от принятого процента риска P и закона распределения. При распределении размеров по закону Гаусса процент риска P (процент ожидаемого брака при совпадении центра группирования с координатой середины поля допуска) связан с коэффициентом t_0 следующей известной зависимостью [1]:

$P, \%$	0,1	0,2	0,27	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	10,0	32,0
t_0	3,29	3,12	3,00	2,8	2,57	2,33	2,17	2,06	1,96	1,65	1,00

В соответствии с теоремой Ляпунова при числе составных звеньев $n+p \geq 4$ независимо от закона распределения размеров этих звеньев, распределение размеров замыкающего звена подчиняется закону Гаусса. Поэтому, если принять $t=3$, процент брака P составит 0,27%. На практике это означает, что на каждую 1000 сборочных соединений за пределами допуска (то есть за пределами полосы шириной от -3σ до $+3\sigma$) окажется приблизительно 3 соединения.

Для законов Гаусса, Симпсона и равной вероятности величина λ_j^2 соответственно составляет [1]: 1/9, 1/6, 1/3.

Таким образом, при распределении размеров составляющих звеньев по закону Гаусса формула (7.3) преобразуется к виду

$$TA_0 = \sqrt{\sum_{j=1}^{n+m} TA_j^2}. \quad (7.4)$$

При проектных расчетах размерных цепей (когда законы распределения размеров составных звеньев неизвестные) принимают [1]

$$TA_0 = 1,2 \sqrt{\sum_{j=1}^{n+m} TA_j^2}. \quad (7.5)$$

3. Порядок выполнения работы.

3.1. Построить схему замкнутой размерной цепи для механизма, который показан на рис.7.1, обнаружить увеличивающие и уменьшающие звенья (относительно замыкающего звена).

3.2. Для заданной модели механизма (рис.7.1) выполнить измерение составных размеров $L_1...L_5$, которые влияют на величину размера S замыкающего звена.

3.3. Данные измерения параметров $L_1...L_5$ и S для двух комплектов сборочного узла ("большого" и "маленького" комплектов) занести в табл.7.1.

То есть принимают, что законы распределения размеров составных звеньев одинаковые и отвечают закону Симпсона.

3.4. Размах колебаний размеров составных звеньев $W(L_i)$ принять равным допуску на этот размер, то есть

$$W(L_i) = L_{i\max} - L_{i\min} = T(L_i). \quad (7.6)$$

3.5. По формулам (7.2) и (7.4) определить допуск замыкающего звена по методам полной и неполной взаимозаменяемости, соответственно.

3.6. Сравнить результаты вычислений по формулам (7.2) и (7.4) и объяснить чем вызвано их различие.

3.7. Сравнить результаты расчета допуска замыкающего звена с результатами определения одноименных параметров по формуле

$$W(S) = S_{\max} - S_{\min}, \quad (7.7)$$

где S_{\max} , S_{\min} - максимальное и минимальное значения размеров звена, которое замыкает, в столбике S табл.7.1. Объяснить различие между результатами определения допуска замыкающего звена по формулам (7.2) и (7.7).

3.8. Составить протокол лабораторной работы и сформулировать выводы, в которых отобразить п.3.7.

Часть 2

1. Цель работы.

Освоить методику расчета компенсатора, который обеспечивает требуемую точность замыкающего звена при сборке механизма (ступенчатые компенсаторы).

2. Методические указания.

Для модели механизма (рис.7.2) возможны две схемы включения компенсатора в замкнутую размерную цепь, когда компенсатор является увеличивающим (рис.7.2, а) и уменьшающим (рис.7.2, б) звеном. По формуле (7.1) соответственно получим [2]

$$A_0 = \sum_{j=1}^n \vec{A}_j - \sum_{j=n+1}^{n+p} \vec{A}_j \mp K, \quad (7.8)$$

где знаки "-" и "+" перед K соответствуют случаям, когда компенсатор является соответственно уменьшающим и увеличивающим звеном, (по отношению к замыкающему звену).

Если компенсатор является уменьшающим звеном, то [3, 4]

$$S_{min}^k = A_{0 min} = \sum_{j=1}^n \bar{A}_{j min} - \sum_{j=n+1}^p \bar{A}_{j max} - K_{min}, \quad (7.9)$$

$$S_{max}^k = A_{0 max} = \sum_{j=1}^n \bar{A}_{j max} - \sum_{j=n+1}^p \bar{A}_{j min} - K_{max}. \quad (7.10)$$

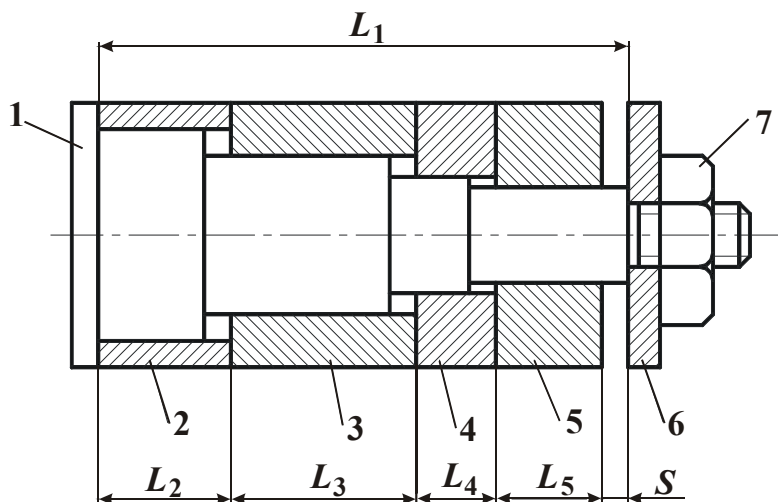


Рис.7.1. Модель механизма (сборочного узла): 1 - ступенчатый вал; 2...5 - втулки, 6 - шайба; 7 – гайка.

Таблица 7.1.

Результаты измерений осевых размеров составляющих звеньев и замыкающего звена

Номер сб. узла	Размеры, мм						Прим.
	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	S	
Комплект № 1 («большой»)							
1							
2							
3							
4							
5							
$W(L_i)$							
Комплект № 2 («малый»)							
1							
2							
3							
4							
$W(L_i)$							

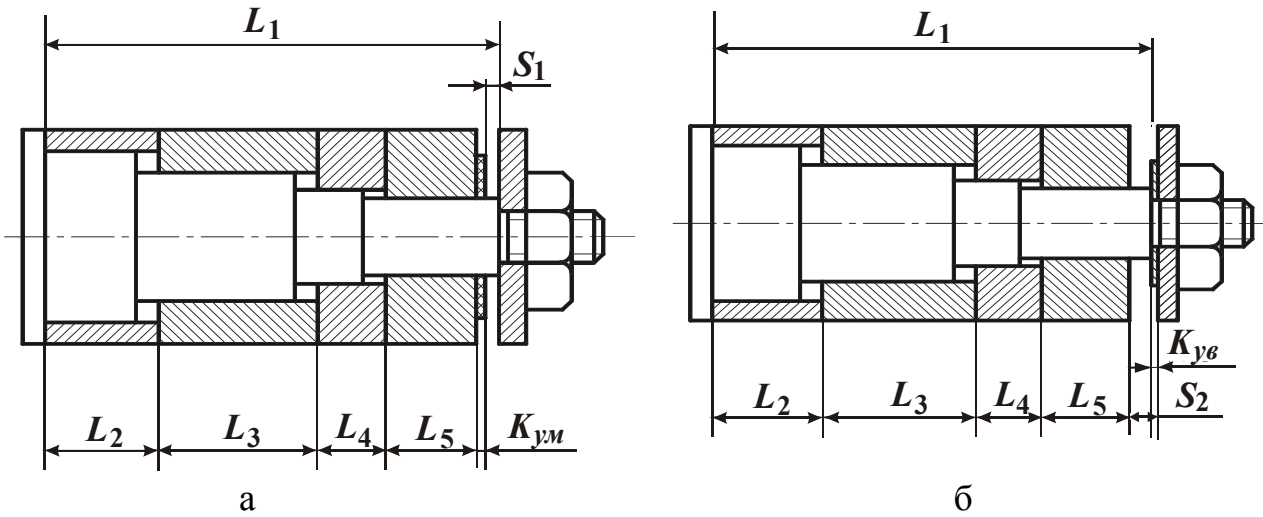


Рис.7.2. Схемы механизма с уменьшающим (а) и увеличивающим (б) компенсаторами: $K_{ум}$ и $K_{ув}$ - размеры компенсаторов; S_1 и S_2 - размеры замыкающего звена.

В этом случае

$$K_{min} = \sum_{j=1}^n \bar{A}_{jmin} - \sum_{j=n+1}^p \bar{A}_{jmax} - A_{0min}, \quad (7.11)$$

$$K_{max} = \sum_{j=1}^n \bar{A}_{jmax} - \sum_{j=n+1}^p \bar{A}_{jmin} - A_{0max}. \quad (7.12)$$

Если компенсатор является увеличивающим звеном, то [3, 4]

$$S_{min}^k = A_{0min} = \sum_{j=1}^n \bar{A}_{jmin} - \sum_{j=n+1}^p \bar{A}_{jmax} + K_{max}, \quad (7.13)$$

$$S_{max}^k = A_{0max} = \sum_{j=1}^n \bar{A}_{jmax} - \sum_{j=n+1}^p \bar{A}_{jmin} + K_{min}. \quad (7.14)$$

В этом случае

$$K_{min} = A_{0max} - \sum_{j=1}^n \bar{A}_{jmax} + \sum_{j=n+1}^p \bar{A}_{jmin}, \quad (7.15)$$

$$K_{max} = A_{0min} - \sum_{j=1}^n \bar{A}_{jmin} + \sum_{j=n+1}^p \bar{A}_{jmax}. \quad (7.16)$$

Интервал компенсации для обоих случаев

$$W(K) = K_{max} - K_{min}. \quad (7.17)$$

Для проверки правильности расчетов можно пользоваться уравнением

$$W(K) = W(A_0) - T(A_0), \quad (7.18)$$

где $W(A_0)$ и $T(A_0)$ - колебания размера замыкающего звена до и после компенсации.

Величину $W(A_0)$ определяют по формуле (7.2), а величину $T(A_0)$ находят как разность A_{0max} и A_{0min} .

Если требуемая точность замыкающего звена достигается за счёт использования неподвижного компенсатора, то число N компенсаторов определяют по формуле [3, 4]

$$N = \frac{W(K) + T(K)}{T(A_0) - T(K)} + 1, \quad (7.19)$$

где $T(K)$ - допуск на изготовление компенсатора.

Структура числителя дроби, которая входит в уравнение (7.19), обуславливается увеличением интервала компенсации при внедрении компенсатора в качестве дополнительного звена размерной цепи, так как в этом случае формула (7.2) принимает вид

$$W(A_0) = \sum_{j=1}^{n+p} T(A_j) + T(K). \quad (7.20)$$

Структура знаменателя дроби, которая входит в уравнение (7.19), обуславливается уменьшением различия номиналов двух соседних компенсаторов по мере уменьшения точности изготовления компенсаторов.

Из анализа формулы (7.19) вытекает, что по мере возрастания погрешности $T(K)$ изготовления компенсаторов увеличивается интервал компенсации (за счёт числителя дроби) и одновременно уменьшается различие номиналов двух соседних компенсаторов (знаменатель дроби).

Для объяснения приведенных выше формул (как контрольный пример) рассмотрим узел передачи, оснащённый компенсаторами (рис.7.3). Во втулках 1 подшипника 2 вращается вал 3, что через шпонки 4 приводит к вращению зубчатого колеса 5 через шкив 6. Между торцами шкива и втулки располагается регулирующее кольцо 7 (компенсатор). Нужно определить количество и размер компенсаторов, необходимых для обеспечения зазора, величина которого должна быть в установленных конструктором границах $0,1 \leq A_0 \leq 0,3$. При этом численные значения составляющих размерной цепи следующие [4]:

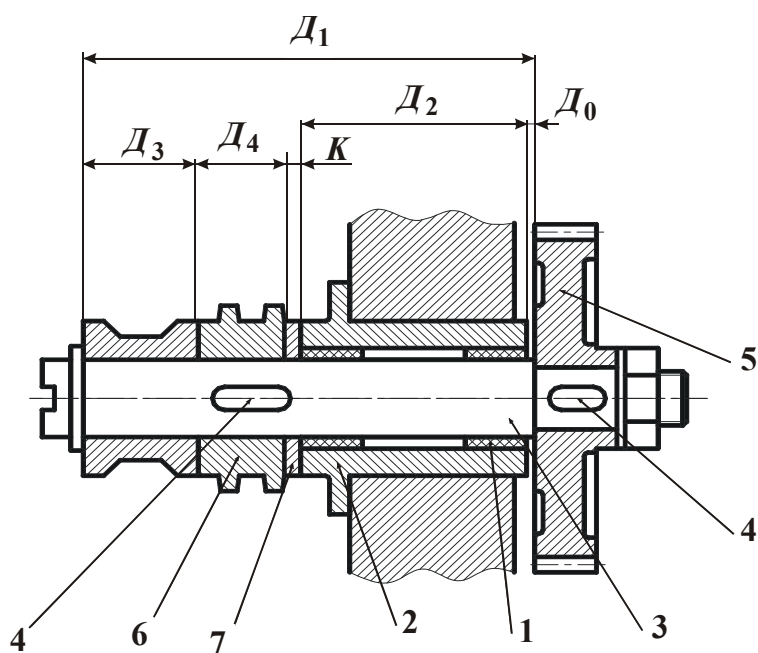


Рис.7.3.Схема узла передачи с компенсатором.

$$A_1 = 100^{+0,23}; A_2 = 42_{-0,17}; A_3 = 35_{-0,17}; A_4 = 20_{-0,12}; A_0 = 0,3_{-0,2}.$$

Допуск на изготовление компенсатора $T(K) = 0,06$ мм. По формулам (7.11) и (7.12) определяем

$$K_{min} = 100 - (42 + 35 + 20) - 0,1 = 3 - 0,1 = 2,9,$$

$$K_{max} = 100,23 - (41,83 + 34,83 + 19,88) - 0,3 = 3,39.$$

По формуле (7.17) определяем:

$$W(K) = 3,39 - 2,9 = 0,49.$$

Проверку делаем с использованием формул (7.2) и (7.18). По формуле (7.2) $W(A_0) = 0,23 + 0,17 + 0,17 + 0,12 = 0,69$. По формуле (7.18) получаем $W(K) = 0,69 - 0,2 = 0,49$. По формуле (7.19) определяем количество компенса-

торов $N = \frac{0,49 + 0,06}{0,2 - 0,06} + 1 = \frac{0,55}{0,14} + 1 = 3,92 + 1 = 4,92$. Принимаем $N = 5$.

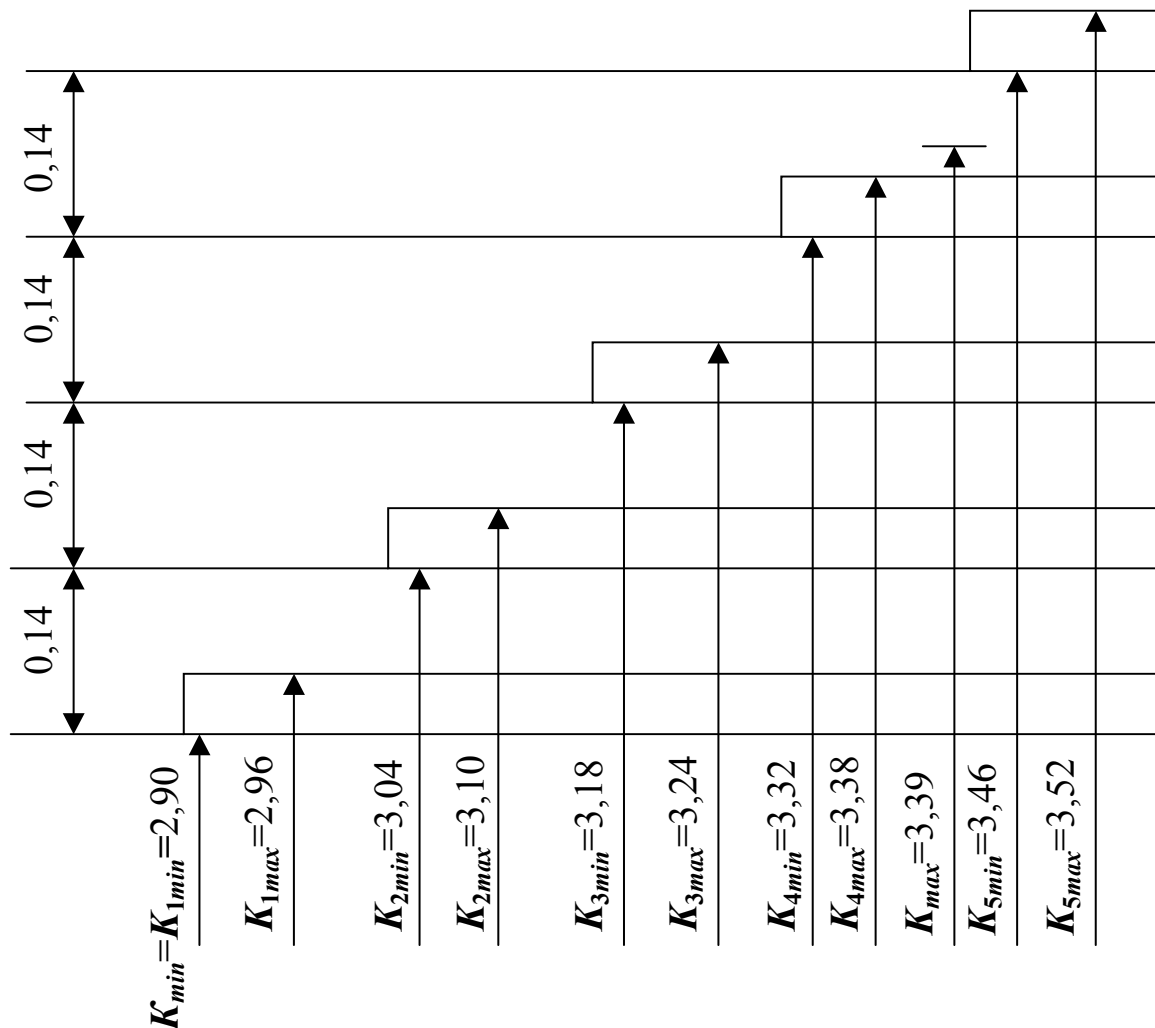


Рис.7.4. Схема расположения размеров компенсаторов.

Строим схему расположения размеров компенсаторов с учетом допуска $T(K) = 0,06$ мм (рис.7.4). Из анализа этой схемы вытекает, что максимальный

размер компенсатора $K_{max} = 3,39$ мм находится в интервале между четвертым и пятым компенсатором, то есть добавление единицы в формуле (7.19) обуславливает гарантированное перекрытие наибольшим компенсатором расчетной величины K_{max} .

Таким образом, для рассматриваемого примера получены следующие размеры компенсаторов, необходимые для обеспечения требуемого зазора (закрывающего звена): $K_1 = 2,96_{-0,06}$; $3,10_{-0,06}$; $3,24_{-0,06}$; $3,38_{-0,06}$; $3,52_{-0,06}$.

Схема, которая показывает соотношения между параметрами $W(A_0)$, $T(A_0)$ и $W(K)$ представлена на рис.7.5.

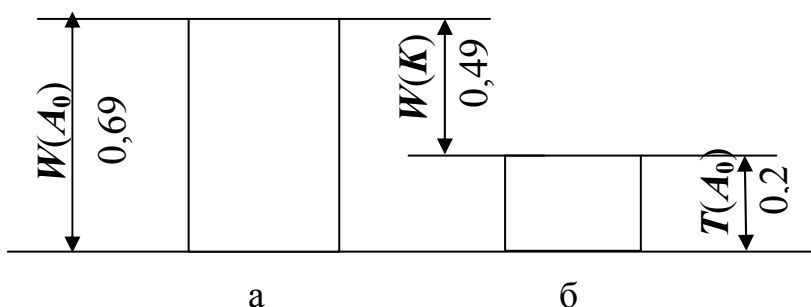


Рис.7.5. Колебания размера замыкающего звена до (а) и после (б) компенсации.

3. Порядок выполнения работы.

3.1. Перед выполнением работы каждый студент получает индивидуальную задачу в соответствии с табл.7.2.

Таблица 7.2

Индивидуальные задания по работе

Номер варианта	$T(A_0)$	$T(K)$	Номер варианта	$T(A_0)$	$T(K)$
1	0,20	0,05	11	0,70	0,15
2	0,25	0,05	12	0,75	0,15
3	0,30	0,06	13	0,80	0,20
4	0,35	0,07	14	0,85	0,20
5	0,40	0,08	15	0,90	0,20
6	0,45	0,09	16	0,95	0,20
7	0,50	0,10	17	1,00	0,20
8	0,55	0,10	18	1,05	0,20
9	0,60	0,15	19	1,10	0,20
10	0,65	0,15	20	1,15	0,25

Примечание: 1. $T(A_0)$, $T(K)$ – допуски замыкающего звена (после компенсации) и на изготовление компенсатора; 2. Номинальные значения размеров замыкающего звена составляют $A_0 = 2$ мм и $A_0 = 10$ мм для уменьшающего и увеличивающего компенсаторов соответственно.

3.2. Начертить схемы замкнутой размерной цепи для механизмов, показанных на рис.7.2.

3.3. Используя данные табл.7.1 по формулам (7.11), (7.12) - для уменьшающего компенсатора - и формулам (7.15) и (7.16)- для увеличивающего компенсатора - сделать расчет предельных значений размеров компенсаторов (K_{min}, K_{max}). Определить интервал компенсации $W(K)$ по формуле (7.17).

3.4. Выполнить проверку правильности расчетов по формуле (7.18).

3.5. По формуле (7.19) определить количество компенсаторов (количество ступеней компенсатора) и построить схему расположения размеров компенсаторов (рис.7.4).

3.6. Построить схему, которая показывает соотношения между колебаниями размеров замыкающего звена до и после компенсации.

3.7. Составить протокол лабораторной работы и сформулировать выводы, в которых отобразить последовательность действий по практическому подбору компенсаторов в процессе сборки механизма прибора.

Литература:

1. Маталин А.А. Технология машиностроения: Учебник для машиностроительных вузов по специальности "Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты". - Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. - 496 с.
2. Якушев А.И. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения: Учебник. - Изд. 5-е перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1979. - 343 с.
3. Скраган В.А., Амосов И.С., Смирнов А.А. Лабораторные работы по технологии машиностроения: Учебное пособие для студентов вузов по курсу "Технология машиностроения. - Изд. 2-е перераб. и доп. - Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1974. - 192 с.
4. Данилевский В.В. Технология машиностроения: Учебник для техникумов. - Изд. 3-е перераб. и доп. - М.: Высшая школа, 1972. - 544 с.
5. Ларшин В.П., Шарков В.А., Якимов А.В. Обеспечение точности сборки машин при изготовлении и ремонте // Вістник інженерної академії України. - Харків, 2001. - №3. - С. 37-41.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
---------------	---

Часть 1

Аналитические подходы в технологии машиностроения

Глава 1. Оптимизация структуры технологического процесса съема припуска при механической обработке	5
1.1. Общий теоретический подход к оптимизации структуры технологического процесса съема припуска при механической обработке.....	5
1.1.1. Оптимизация структуры технологического процесса съема припуска при обработке в два перехода.....	5
1.1.2. Оптимизация структуры процесса съема припуска при обработке с большим количеством переходов	8
1.2. Оптимизация структуры процесса съема припуска с дискретной скоростью радиальной подачи	17
1.3. Оптимизация структуры процесса съема припуска при обработке с непрерывной скоростью радиальной подачи.....	24
1.4. Аналитические подходы к описанию закономерностей съема припуска по схеме выхаживания.....	28
1.4.1. Сравнение схем выхаживания с дискретной и непрерывной скоростью радиальной подачи	28
1.4.2. Определение основного времени обработки по схеме выхаживания.....	29
1.4.3. Составление и решение дифференциального уравнения съема припуска по схеме выхаживания с непрерывной скоростью радиальной подачи.....	30
1.5. Условия снижения основного времени обработки с дискретной скоростью радиальной подачи.....	32
1.6. Закономерности изменения глубины шлифования на этапе выхаживания.....	37
Глава 2. Повышение эффективности технологий финишной механической обработки деталей машин	40
2.1. Задачи точности и шероховатости обработки деталей машин	40
2.1.1. Общие положения.....	40
2.1.2. Исследование упругих перемещений при механической обработке материалов.....	43
2.1.2.1. Связь величины упругого перемещения с точностью и производительностью обработки.....	43
2.1.2.2. Математическая модель баланса перемещений в технологической системе	49
2.1.2.3. Классификация схем механической обработки по характеру изменения параметров P_y и y	59

2.1.2.4.	Расчет и анализ параметров точности обработки	62
2.1.2.4.1.	Расчет и анализ параметров точности обработки для схемы с увеличивающимися во времени параметрами P_y и y	62
2.1.2.4.2.	Расчет и анализ точности обработки для схем, характеризующихся постоянством и уменьшением во времени параметров P_y и y	69
2.1.2.4.3.	Оптимизация параметров процесса выхаживания	71
2.1.3.	Исследование влияния параметров силовой напряженности процесса резания на точность и производительность обработки	74
2.1.3.1.	Теоретический анализ точности и производительности обработки на этапе выхаживания	74
2.1.3.1.1.	Общий подход к анализу точности и производительности обработки с учетом параметров силовой напряженности процесса резания	74
2.1.3.1.2.	Влияние параметров силовой напряженности процесса резания на точность и производительность обработки на этапе выхаживания при шлифовании	81
2.1.3.1.3.	Расчет и анализ шероховатости обработанной поверхности на этапе выхаживания при шлифовании	85
2.1.3.2.	Теоретический анализ точности и производительности обработки для установившихся процессов резания и шлифования	87
2.1.3.2.1.	Условия повышения точности и производительности обработки при шлифовании и точении	87
2.1.3.2.2.	Сравнение величины упругого перемещения при шлифовании и точении	95
2.1.3.3.	Условия уменьшения предельных значений отношения a_z / ρ	100
2.1.3.4.	Влияние длины среза единичным зерном на предельные значения отношения a_z / ρ	106
2.1.3.5.	Расчет величины упругого перемещения при прерывистом микрорезании	110
2.1.4.	Экспериментальные исследования влияния упругих перемещений в технологической системе на технологические показатели алмазного и алмазно-искрового шлифования по жесткой схеме	114
Глава 3.	Теоретические исследования температуры поверхностного слоя детали при ее механической обработке	124
3.1.	Новый упрощенный подход к расчету температуры поверхностного слоя детали при ее механической обработке	124

3.2.	Расчет и анализ температуры поверхностного слоя детали при резании лезвийным инструментом.....	137
3.3.	Расчет и анализ температуры поверхностного слоя детали на основе теплового баланса при механической обработке	142
3.4.	Условия снижения температуры поверхностного слоя детали при механической обработке	146
3.5.	Обоснование структуры и параметров технологического процесса механической обработки с учетом температурного фактора.....	150
3.6.	Условия уменьшения температуры поверхностного слоя детали за счет применения переменной скорости подачи.....	158
Глава 4.	Повышение эффективности технологии финишной обработки светоотражательных поверхностей особотонкостенных деталей	
4.1.	Общие положения	160
4.2.	Разработка математической модели формирования шероховатости поверхности при абразивной обработке	161
4.3.	Сравнение полученных теоретических решений с известными решениями	166
4.4.	Расчет и анализ относительной опорной длины профиля обработанной поверхности	171
4.5.	Установление функциональных связей между параметрами шероховатости и оптическими характеристиками обработанной поверхности	175
4.6.	Разработка методики расчета нового параметра шероховатости обработанных светоотражательных поверхностей.....	180
4.7.	Экспериментальное исследование шероховатости поверхности после обработки и ее связи с оптическими характеристиками.....	185
4.8.	Технологическое обеспечение шероховатости поверхности особотонкостенных деталей.....	189
4.9.	Влияние параметров режимов электрохимического полирования на шероховатость поверхности	192
4.10.	Абразивное полирование с применением полимерных технологических материалов.....	199
4.11.	Обработка прецизионных деталей с зеркальными поверхностями.....	201
4.12.	Технологическое обеспечение свойств декоративных поверхностей тонкостенных деталей.....	203
4.13.	Шероховатость и оптические характеристики электроосажденных поверхностей.....	206
4.14.	Формирование неровностей светорассеивающих поверхностей деталей	209
4.15.	Выводы	211

Часть 2

Компьютерные технологии в современном машиностроении

Глава 1. Исходная информация для компьютерного проектирования технологической оснастки	216
1.1. Общие сведения о станочных приспособлениях	216
1.1.1. Основные сведения из теории базирования	216
1.1.2. Основные узлы и детали приспособлений	218
1.1.3. Классификация приспособлений	222
1.1.4. Назначение специальных приспособлений	227
1.1.5. Требования к приспособлениям	229
1.2. Способы базирования заготовок и опорные элементы	230
1.2.1. Общие сведения о базировании заготовок в приспособлении. Правило шести точек	230
1.2.2. Опорные элементы и их условное графическое обозначение	238
1.2.3. Выбор баз. Погрешности, связанные с выбором баз	239
1.2.4. Погрешность базирования. Определение погрешностей базирования исходной базы	240
1.2.5. Выбор главной базы	244
1.2.6. Способы базирования заготовки с главной базой, имеющей форму плоскости	246
1.2.7. Способы базирования заготовки с главной базой, имеющей форму наружной цилиндрической поверхности	253
1.2.8. Способы базирования заготовки с главной базой, имеющей форму цилиндрического отверстия	260
1.2.9. Правило базирования заготовок группой баз	263
1.2.10. Способы базирования заготовок дополнительными базами	269
1.2.11. Примеры базирования заготовок группой баз	281
1.3. Зажимные устройства приспособлений. Расчёт надёжности закрепления заготовок	287
1.3.1. Правила закрепления заготовок	287
1.3.2. Классификация зажимных устройств и основные этапы их расчёта	288
1.3.3. Определение сил и моментов резания	291
1.3.4. Составление расчетной схемы и исходного уравнения для расчёта зажимного усилия	295
1.3.5. Выбор типа зажимного устройства и силового механизма. Определение необходимого исходного усилия	301
1.4. Основы проектирования приспособлений	319
1.4.1. Разработка технического проекта	319
1.4.2. Оформление сборочного чертежа	323
1.5. Задачи для самостоятельной работы ⁴	324
Глава 2. Компьютерное моделирование и диагностика технологических систем	328
2.1. Компьютерное моделирование температурного поля при	

резьбошлифовании.....	328
2.2. Разработка способа компьютерного управления процессом шлифования	338
2.3. Моделирование технологической системы и разработка алгоритмов диагностики и управления.....	344
2.4. Программирование компьютерных и микропроцессорных систем.....	383
Глава 3. Современные системы автоматизированного проектирования (САПР) для машиностроения	388
3.1. Обзор современных САПР для машиностроения.....	388
3.1.1. Основные функции и проектные процедуры, реализуемые в САПР	388
3.1.2. Примеры программ САПР	391
3.2. Общие подходы и алгоритмы при проектировании в различных системах автоматизированного проектирования	399
3.2.1. Алгоритм создания чертежей в САПР AUTOCAD (AUTOCAD MECHANICAL).....	400
3.2.1.1. Алгоритм построения детали «Корпус».....	400
3.2.1.2. Технология реализации алгоритма построения детали «Корпус»	402
3.2.1.3. Алгоритм построения сборочного чертежа «Клапан».....	404
3.2.2. Общий алгоритм создания параметрических чертежей в системе T-FLEX CAD	411
3.2.3. Общие подходы и выполнение моделирования деталей и сборочных узлов в САПР INVENTOR	412
3.3. Оптимизация формы заготовки при трехмерном компьютерном моделировании деталей	425
3.4. Примеры выполнения трехмерных твердотельных моделей деталей, сборочных узлов в различных САПР	430
3.5. Примеры выполнения трехмерных твердотельных моделей деталей, сборочных узлов в САПР КОМПАС-3D И T-FLEX CAD	448

Часть 3

Этапы становления научных технологических школ

Глава 1. Итоги и перспективные направления развития технологии машиностроения	452
1.1. История, основоположники и этапы развития науки “Технология машиностроения”	452
1.2. Научная школа профессора Якимова Александра Васильевича.....	455
1.3. Научная школа алмазно-абразивной обработки инструментальных и композиционных материалов Института сверхтвёрдых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины	470
Заключение.....	478
Список литературы	499
Приложения	525

Научное издание

**Физико-математическая теория процессов обработки
материалов и технологии машиностроения**

**В десяти томах под общей редакцией
Ф.В.Новикова и А.В.Якимова**

Том 10

Концепции развития технологии машиностроения

Монография

**Авторы: Новиков Федор Васильевич
Якимов Александр Васильевич
Новиков Григорий Васильевич
Якимов Алексей Александрович
Ларшин Василий Петрович
Шепелев Анатолий Александрович
Лавриненко Валерий Иванович
Кривошапка Юрий Николаевич
Ковальчук Александр Николаевич
Яценко Сергей Михайлович
Шкурупий Валентин Григорьевич
Тигарев Владимир Михайлович**

Ответственный за выпуск Новиков Ф.В.

Редактор Лучнева Т.И.

Корректор Мищенко Н.В.

ISBN 966 – 7810 – 33 – X

ISBN 966 – 7810 – 64 – X

Подписано к печати 6.04.2005. Формат 60 84/16.

Бумага белая. Печать – ризография. 35,2 усл. печ. л. 29,4 уч.– изд. л.

Тираж 500 экз. Заказ №1630 Цена договорная.

Одесский Национальный политехнический университет
г. Одесса, проспект Шевченко, 1

Издательство Курсор, г. Харьков, пр. Театральный, 11/13

Отпечатано в типографии завода «ФЭД»
г. Харьков, ул. Сумская, 132