

В. А. Жовтобрюх, Ф. В. Новиков

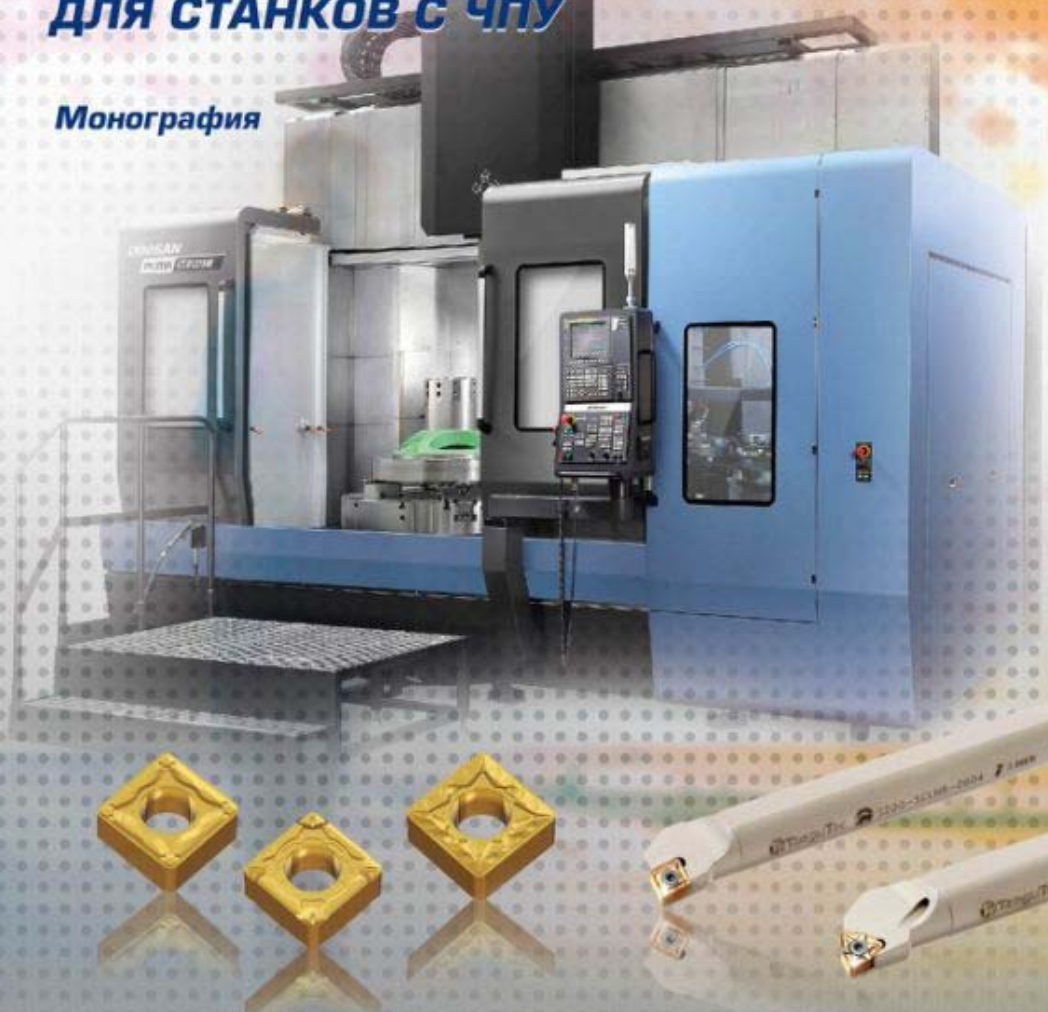
ПРОЕКТИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ СТАНКОВ С ЧПУ

Монография

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ
ПРОГРАММИРОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
ДЛЯ СТАНКОВ С ЧПУ**

**В. А. Жовтобрюх
Ф. В. Новиков**

**Днепр
ЛИРА
2019**



**В. А. Жовтобрюх
Ф. В. Новиков**

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И
АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ
ПРОГРАММИРОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ СТАНКОВ С ЧПУ**

Монография

Днепр / **ЛИРА** / 2019

УДК 621.01(02.064)

Ж 78

Рецензенты: докт. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой "Технология машиностроения" ГВУЗ "Приазовский государственный технический университет" *Андилахай А. А.*; докт. техн. наук, профессор, профессор кафедры "Технология машиностроения" Одесского национального политехнического университета *Ларшин В. П.*; докт. техн. наук, профессор, профессор кафедры "Мехатроника и детали машин" Харьковского национального технического университета сельского хозяйства имени Петра Василенко *Коломиец В. В.*

Авторский коллектив: канд. техн. наук Жовтобрюх В. А. – предисловие, разделы 1 – 3; докт. техн. наук, профессор Новиков Ф. В. – введение, разделы 4 – 7, общие выводы.

Жовтобрюх В. А.

Ж 78 Проектирование и автоматизированное программирование современных технологий для станков с ЧПУ : монография / В. А. Жовтобрюх, Ф. В. Новиков. – Днепр : ЛИРА, 2019. – 480 с.
ISBN 978-966-981-173-8

Обобщен практический опыт эффективного применения на предприятиях Украины современных технологий, металлорежущих станков с ЧПУ типа "обрабатывающий центр" и сборных лезвийных твердосплавных и керамических инструментов с износостойкими покрытиями зарубежного производства. Обоснованы возможности автоматизированного проектирования и программирования технологических процессов для металлорежущих станков с ЧПУ с применением высокотехнологичного программного продукта САПР ESPRIT. Предложены новые теоретические подходы к проектированию технологических процессов механической обработки деталей машин, включая процессы резания лезвийными и абразивными инструментами, обеспечивающие повышение точности, качества и производительности. Даны практические рекомендации.

Рекомендовано для студентов, аспирантов и преподавателей инженерных и экономических специальностей высших учебных заведений, а также для специалистов и руководителей предприятий, повышающих свою квалификацию.

УДК 621.01(02.064)

© Жовтобрюх В. А., Новиков Ф. В.,
2019

ISBN 978-966-981-173-8

© ЛИРА, 2019

Предисловие

Индустрия 4,0 Четвертая промышленная революция стремительно входит в нашу жизнь



Валерий Алексеевич Жовтобрюх
– руководитель ИТЦ группы
компаний "ВариУс"

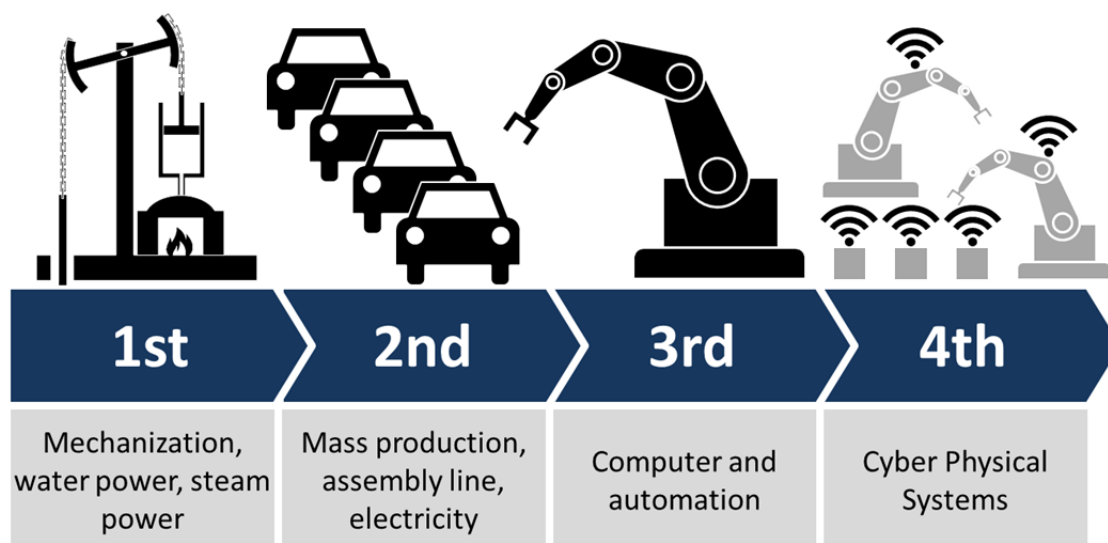
Стремительность развития процессов четвертой промышленной революции – главное ее отличие от трех предшествующих. К такому выводу я пришел летом этого года, когда мне посчастливилось побывать на нескольких инновационных промышленных предприятиях Израиля и Финляндии. А на конференции, собравшей разработчиков информационных платформ для автоматизации конструкторско-технологических процессов, состоявшейся весной в Будапеште, довелось пообщаться с представителями IT-компаний из нескольких европей-

ских стран, разрабатывающих программное обеспечение для промышленного оборудования в США, Франции, Италии, России и в других странах ближнего и дальнего зарубежья. Откровенно говоря, я был ошеломлен темпами технологического развития в течение последнего года даже соседних с нами стран. Но еще больше меня сразил невероятный объем потока информации вокруг таких тем, как "промышленный интернет вещей", "цифровой станок", "имитационное моделирование" и т.п.

Такой качественный скачок в умах и производственных планах представителей машиностроительной отрасли во всем мире ввел меня в состояние некоторого страха. Следует отметить, что страх отстать, не успеть или опоздать всегда был одной из моих фобий в учебе, в спорте и в работе, конечно! Я понял, что, возглавляя предприятие, которое всегда находилось на передовой технического прогресса в Украине, упустить такой рывок в развитии новых технологий не могу себе позволить. Конечно, я и ранее осознавал, что мы, как инжиниринговая компания, всего лишь внедряем на украинских предприятиях передовое оборудование, инструмент, технологии и специализированное ПО, прежде всего, от зарубежных разработчиков. Зарубежных – исключительно потому, что нет отечественных конкурентных аналогов. А это значит, что страна в целом существенно отстает в уровне внедрения инноваций от индустриально развитых стран мира. Любопытно, что наука и образование в Украине находились на пике своего развития в 1970–80-х годах. Причем, еще в начале 1990-х научный потенциал был способен давать промышленности серьезные, в том числе и программные, продукты по автоматизации процессов, часто опережая зарубежные разработки, включая и область информационных технологий. Все это, к сожалению, в прошлом.

Я осознал, что чуть не пропустил самое интересное – еще более стремительный рывок информационных технологий, когда соревнование между станкостроителями за самую совершенную конструкцию станка переместилось в область автоматизации и оцифровки процессов, в центре которых находится станок. Прямо сейчас в этом активное участие принимают практически все производители станков с ЧПУ. Причем предприниматели, не желающие в ближайшие годы "вылететь" с рынка, не только с все большим интересом наблюдают за развитием событий, но и стремятся действовать. Яркое и обнадеживаю-

щее свидетельство тому – активизация в течение последнего года работы Ассоциации предприятий промышленной автоматизации Украины (АППАУ) во главе с Александром Юрчаком.



В настоящий момент наши коллеги из Европы и даже из России полным ходом реализуют проекты оцифровки методов сбора информации со станков и других производственных механизмов не только в опытных объемах, но и по заказам крупных промышленных холдингов, оцифровывая процессы сбора и аналитики информации с помощью современных интернет–технологий. Причем проекты с реальным финансированием – как от частных заказчиков, так и в рамках государственных программ. И что интересно: почти повсеместно проекты реализуются с участием молодых талантливых специалистов с украинским паспортом. Парадокс, но, находясь за пределами нашей страны, я нашел объяснение странному и довольно неприятному изменению украинского рынка труда, замеченному мной осенью 2017 – весной 2018 гг.

Будучи за рубежом, я понял, почему стало так сложно найти хорошего специалиста в любое подразделение компании даже при достойной мотивации. Все просто: элита украинской молодежи, получив дипломы инженера, массово выезжает работать в Европу и дальше. К тому же, до недавнего времени не всем рядовым украинским гражданам финансово доступная возможность обучения детей в зарубежных вузах с последующим трудоустройством – сегодня стала обычной практикой. Особенно для жителей областных центров Украины и, без-

условно, Киева. Летом 2014 г. один из известных украинских олигархов в ответ на беспокойство моего товарища о том, что скоро в Украине невозможно будет нанять молодых рабочих и инженеров вместо уходящих с заводов пенсионеров и уезжающих на заработки в Польшу и Чехию специалистов, цинично ответил: "Да ладно, это еще не скоро, на наш век хватит!.. ". И – ошибся!

Все меняется стремительнее, чем ожидали даже те люди, которые давно имеют "паспорт успеха в бизнесе". Я встретил немало наших молодых инженеров, работающих за пределами страны. И хорошо работающих! Ребята, нам не угнаться! Предполагаю, что молодежь и без хорошего образования также за последний год в немалой степени пополнила мировой генофонд стран, развивающих науку, образование и предпринимательство, а потому не имеющих проблем с наличием рабочих мест как для коренных жителей, так и для мигрантов из Украины...

Интернет и информационные технологии все активнее проникают не только в бытовую среду, но и в производственную, помогая ей становиться более эффективной. Автоматизированные системы управления (АСУ) производственными процессами никого уже не удивляют и давно стали нормой для любого предприятия. Но, как правило, они представляют собой совокупность разрозненных, и нередко разбросанных по территории предприятия, вычислительных машин или операционных центров, объединенных в локальные сети и решающих узкий круг задач, весьма ограниченной компетенцией специалистов определенного департамента.

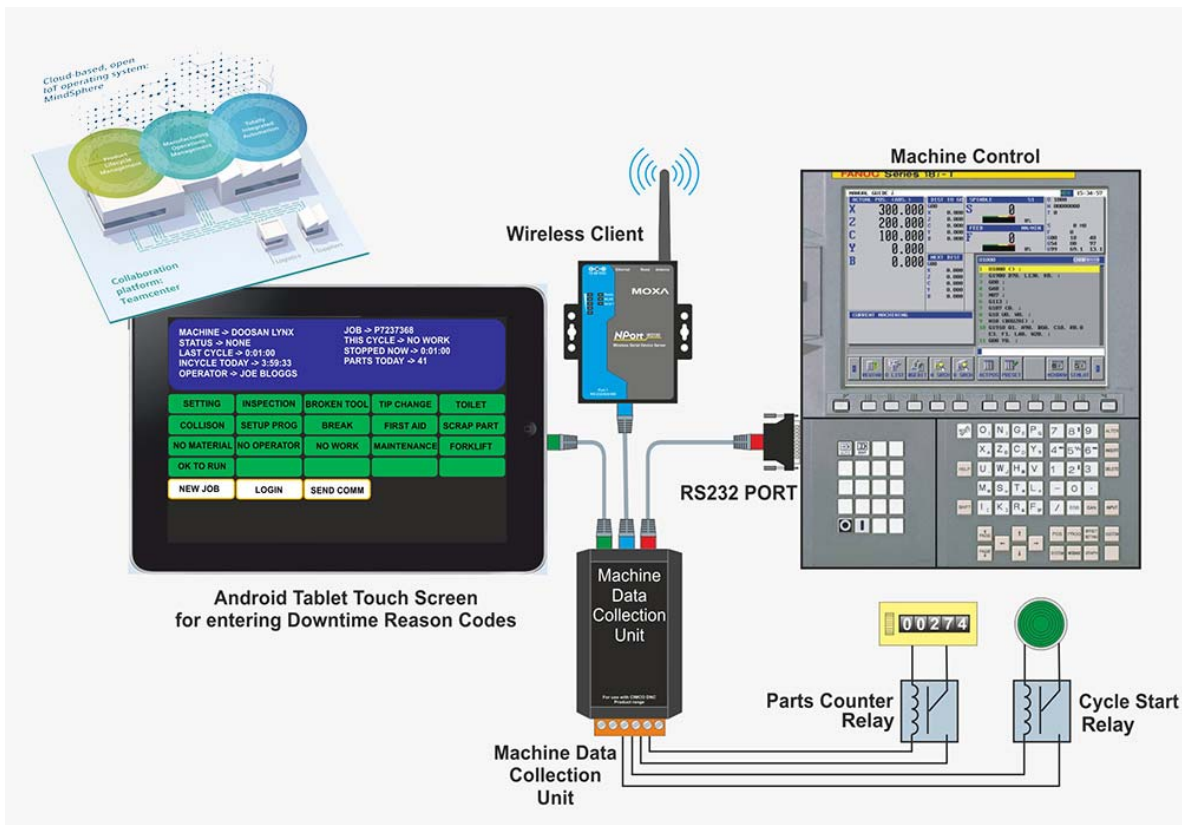
Вообще-то, если честно, нынешняя ситуация с внедрением цифровых решений на украинских предприятиях мне напоминает один анекдот из начала 1990-х. "Встретились два директора заводов из Японии и Союза, выпускающих одну и ту же продукцию в одинаковых объемах. Директор японского завода рассказывает, что всю работу выполняет 8 человек и задает вопрос коллеге, а сколько у него работников? Директор советского предприятия, у которого работало в три смены 300 сотрудников, чтобы не "упасть в грязь лицом", не моргнув глазом, ответил – девять! На следующее утро встречаются в аэропорту. У японца красные глаза, он всю ночь не спал, увидев своего вчерашнего собеседника, спрашивает: "Чем все же занимается ваш девятый сотрудник?.. ".



Рано или поздно каждый думающий руководитель предприятия задается вопросом, действительно ли внедренные 5 – 15 лет назад ERP (Enterprise Resource Planning) и CRM (Customer Relationship Management) системы являются достаточными для контроля производительности и эффективности работы? Ведь, как и 10 лет назад, чтобы действительно понять, насколько сбалансированно работает производство, все еще необходимо регулярно выходить из кабинета в цех, в буквальном смысле выполняя одну из главных заповедей бережливого производства Кайдзен о том, что из всех возможных методов контроля следует выбирать визуальный!

Согласно мнению многих украинских руководителей машиностроительных предприятий, причины низкой окупаемости инвестиций в оборудование кроются в невысокой степени или в искаженной информированности менеджмента предприятий о состоянии дел на производственных площадках. А также в неспособности персонала или информационных систем превентивно оценивать ситуацию, планируя своевременные мероприятия по предотвращению возможных сбоев в работе цеха, отдельного станка или даже определенного узла.

Сбор и подготовка данных для уже действующих систем ERP нередко является слабым местом, не позволяющим получить реальную картину о ключевых показателях эффективности, для каждого предприятия своих.



Мой питерский знакомый Андрей Ловыгин, очень талантливый успешный бизнесмен, являясь разработчиком одной из самых эффективных систем мониторинга работы оборудования, рассказал историю о том, что один его клиент, вложивший огромные средства в покупку нескольких десятков металлообрабатывающих станков с ЧПУ, в течение нескольких месяцев получал отчеты как на свой компьютер, так и в бумажном виде о загрузке оборудования на 90%! Но когда однажды, прежде чем принять решение о дополнительной закупке оборудования для полного выполнения объема заказов, он сам зашел в цех в разгар рабочего дня, то обнаружил, что ни один станок не работал в данный конкретный момент!

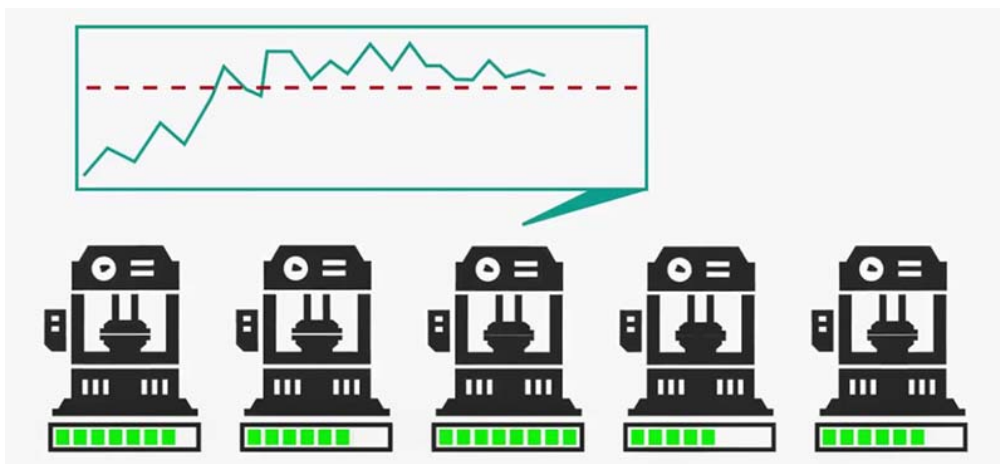
Внедрение на данном предприятии системы автоматизированного сбора информации о загрузке оборудования показало реальную ситуацию: лишь 17% эффективной загрузки! Принятые меры привели к тому, что отпала необходимость в новых инвестициях. Уже установленное оборудование с лихвой хватало для выполнения всей производственной программы.

Бережливое конкурентоспособное производство – мечта любого собственника промышленной компании. Чаще других этими вопросами бывают обеспокоены именно руководители предприятий, инвестиро-

вавшие немалые средства в организацию современных производственных участков и в приобретение современного оборудования. Они стремятся повысить эффективность процессов за счет внедрения быстрых и умных станков, мало зависящих от квалификации персонала. Но очень скоро оказывается, что этого недостаточно для превращения завода в безупречную "машинку для зарабатывания денег". Сроки окупаемости отличаются от тех, что планировались на этапе проектирования. Это напрямую влияет на повышение себестоимости продукции в результате:

- незапланированных простоев оборудования;
- низкой производительности процесса обработки;
- неэффективности служб, которые должны оперативно ликвидировать неплановые простои.

Причины простоев, неэффективного использования оборудования, поломок или нецелевого использования станков всегда одни и те же. Каждый опытный производственник имеет управленческие рецепты для "ручного" решения практически всех таких случаев. Именно поэтому эффективность любого производства всегда драматически возрастает в моменты физического присутствия высшего менеджмента предприятия в цехах.



Ключевой проблемой для такого собственника или руководителя предприятия является низкий уровень информированности о том, что же реально происходит в цехе. И здесь на помощь приходят продукты компаний, занимающихся разработкой и совершенствованием систем управления производственными процессами на базе автоматизированного сбора данных – MES (Manufacturing Execution System). Современные системы мониторинга эффективности работы оборудования

способны собирать и обрабатывать огромные потоки информации, предоставляя все более эксклюзивные отчеты сотрудникам и менеджменту предприятия.

Системы мониторинга еще в далеком 2005 году начали предлагать многие крупные производители оборудования (Siemens – Simco MDC-Max, FANUC – MTLINK), а двумя-тремя годами позднее и некоторые независимые интеграторы и разработчики (Zyfra – MDCPlus, Predator-Software, NetworkDNC и другие).

В Украине рынок MDC-систем (Machine Data Collection) пока еще не занят собственными разработчиками. Некоторые предприятия пользуются самописными разработками, учитывающими локальную специфику оборудования, другие приобретают ПО российского или китайского производства. Если говорить о самых известных зарубежных системах, то сравнительная таблица характеристик будет выглядеть примерно таким образом:

Таблица. Сравнение характеристик поставщиков MDC-услуг

	CIMCO MDC-MAX	FANUC MT-LINKI (Япония)	PREDATOR- SOFTWARE	СМПО Foreman (Россия)	MDCPlus (Финляндия)
Поддержка прямых протоколов					
MTConnect	Yes	Yes	Yes**	Yes	Yes
OPC UA	Yes	Yes	Yes**	Yes	Yes
DNC Opt #18	Yes	No	Yes**	Yes	Yes
FOCAS	Yes	Yes	Yes**	Yes	Yes
Siemens	Yes*	No	Yes**	Yes	Yes
M-NET	Yes	No	–	Yes	Yes
Работа с сигналами электроавтоматики					
Наличие аппаратного блока	Yes	No	Yes	Yes	Yes
Обратная связь рабочего места оператора					
Терминал оператора	No	No	No	Yes	Yes
Прочий функционал					
Клиент-серверная архитектура	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Интеграция в Windows домен	Yes	No	Yes**	Yes	Yes
Интеграция с MES и CRM	No	No	–	Yes	Yes
API	–	No	Yes**	–	Yes
Экспорт данных для дальнейшей обработки	Yes	No	No	Yes	No
Модуль ТОИР	No	No	No	No	Yes
Модули управления производством	–	No	No	Yes	Yes

Примечание: * — с аппаратным блоком;
** — в зависимости от версии ПО.

Представленные системы находятся примерно в одной ценовой категории.
Из зарубежных разработок лишь одна из систем полностью русифицирована — это финская MDC.

Использовать многочисленные российские разработки украинские предприятия откровенно остерегаются, опасаясь неоднозначной интерпретации законов, регламентирующих работу с зарубежными ПО. Несмотря на большое количество систем мониторинга, многие из них обладают избыточным функционалом, зачастую невостребованным заказчиком, но влияющим на стоимость. Малые и средние производства в первую очередь нуждаются в простых системах, которые будут

давать цеховым службам и менеджменту базовое понимание степени загруженности оборудования.

Совместно с IT-департаментом Инженерно-Технического Центра "ВариУс" мы приняли решение разработать собственный программно-аппаратный комплекс мониторинга, базовая версия которого будет распространяться для всех заказчиков оборудования DOOSAN бесплатно.

Данная версия позволит получать первичную управленческую информацию о загруженности оборудования, оснащенного стойками ЧПУ FANUC. Визуализацию этого комплекса мы представляли на стенде компании в рамках Промышленного форума в Киеве с 20 по 23 ноября 2018 г. И если рынок проявит интерес к данной разработке, то мы готовы выпустить и полноценное коммерческое решение, с учетом потребностей предприятий.

В последнее время лавинообразное развитие получили системы, позволяющие, с одной стороны, автоматизировать сбор данных с каждой производственной единицы подробно и почти абсолютно достоверно, а с другой – способные анализировать ситуацию и генерировать отчеты для любого структурного подразделения предприятия.

Это позволяет управляющему или собственнику предприятия из любой точки мира, где есть интернет, наблюдать за работой станков с экрана своего компьютера, планшета или телефона. А при необходимости – одним касанием сформировать отчет о загрузке оборудования за день, неделю, месяц или год. Современные системы позволяют формировать такие отчеты за несколько секунд, выдавая беспристрастные данные о реальном состоянии дел на каждом станке, у каждого оператора или всего цеха. Можно выяснить причины простоя, оценить оперативность работы сервисных служб.

А начальник цеха или главный технолог, в любой момент, подключившись к сети, может получить всю необходимую информацию прямо из СЧПУ любого станка, определить, какая деталь обрабатывается, просмотреть кадр управляющей программы в онлайн-режиме и оценить правильность выбранных режимов. Не говоря уже о том, что точно так же дистанционно можно предотвратить случаи нецелевого использования оборудования, например в третью смену. Очевидно, что сбор подобной информации может иметь колоссальное влияние на эффективность работы предприятия.

При этом, по признанию многих специалистов в области станкостроения, уже сейчас технические характеристики и конструкция аналогичных станков разных производителей становятся все ближе. В недалеком будущем разница между ними при оценке таких параметров, как мощность, жесткость и скорость, практически будет отсутствовать. В связи с этим, для формирования конкурентных преимуществ, станкостроители всё активнее создают свою программную экосистему с множеством полезных модулей. Внедряют, например, весьма полезные опции, позволяющие станку своевременно определить уровень вибрации ответственных элементов станка. Или, не снимая инструмент со станка, контролировать параметры его износа.

Или дать возможность системе управления самостоятельно сгенерировать наиболее эффективную траекторию движения фрезы с учетом всех исходных данных. И даже помогают выбрать оптимальный инструмент из имеющегося на складе для выполнения определенной технологической операции.



Сегодня можно сказать, что общество находится на середине пути к тотальной оцифровке различных процессов, включая промышленное производство и прежде всего машиностроение.

Согласно концепции Industry 4.0, которая была озвучена в 2011 г. в Давосе Клаусом Швабом, президентом Всемирного экономического

форума, благодаря ускоренной интеграции в промышленные процессы киберфизических систем участие человека в производстве продукции будет значительно сокращено. Человек и машина смогут работать вместе над поставленной задачей, поскольку сотрутся границы между цифровыми технологиями и биологическим миром. Это значит, что благодаря значительному повышению уровня программного обеспечения станки и вспомогательные устройства, объединенные между собой сетью, смогут оказать максимальное содействие человеку в достижении поставленных целей. И при этом результат будет получен самым эффективным и оптимальным по стоимости путем.

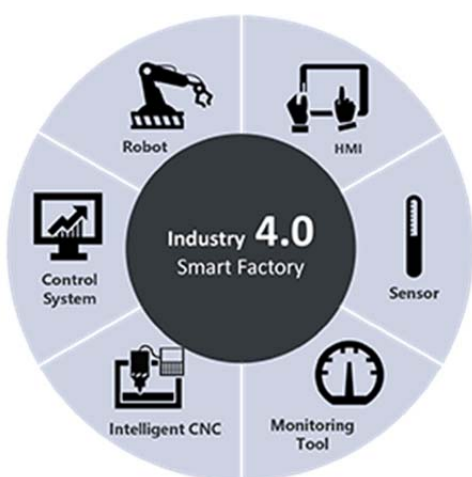
Например, уже сегодня производители массово предлагают к внедрению коллаборативные роботы, абсолютно безопасные для человека благодаря наличию в их конструкции специальных сенсоров и датчиков. Система управления этих машин позволяет легко интегрировать их в цеховую сеть типа Esetnet. Они без труда "общаются" со станками и обслуживающим персоналом согласно разработанным индивидуально под них или стандартным протоколам.

Преимущества такой концепции очевидны. Такие манипуляторы, да и другие вспомогательные механизмы, оснащенные сенсорами, не прекращают работу даже во время появления в рабочей зоне обслуживающего персонала для контроля, ремонта или с целью пополнения заказанного станком инструмента. А связь по сети, в соответствии с концепцией "интернета станков", позволит станкам и вспомогательным

механизмам самостоятельно перераспределять загрузку с учетом внештатных ситуаций, например при выходе из строя какого-то оборудования.

Конечно, ограничением массового внедрения подобных решений по-прежнему является стоимость таких "умных" устройств и сложность определения их эффективности, особенно для предприятий, работающих в нестабиль-

ной политико-экономической реальности. Но очень скоро ситуация с подготовкой и набором квалифицированных сотрудников станет настолько серьезной, что вопрос перед менеджментом промышленных предприятий будет лежать уже не в плоскости стоимости автомата или



робота, заменяющего человека. А в том, закрыть ли производство совсем или признать неотвратимость процессов Industry 4.0 и "нанять" на работу в заранее оснащенный "цифровой цех" наиболее эффективного робота.

Фрезерный центр, оснащенный СЧПУ с интеллектуальным интерфейсом, сразу после интеграции в цифровое пространство цеха сможет получить все необходимые данные из системы планирования производственных заданий. Выбрав свою задачу, определит остатки доступных заготовок, сверит технологическую карту с наличием режущего инструмента в магазине и на складе, дозокажет все необходимое, отправит sms/e-mail ответственному лицу: в ОГТ – если станку пришлось изменить технологию на альтернативную по причине повышенного износа фрезы или замены на другую; в ОГМ – если превентивный анализ свидетельствует о повышенной вибрации в шпиндельном узле и нужно заказать подшипник; в отделы обеспечения производства – если не хватает заготовок.

Фонды на интеграцию цифрового контроля – это сэкономленные инвестиции в техническое оснащение предприятия. Контроль и мониторинг производственных процессов позволяют устранить неэффективное использование имеющегося оборудования и в определенных случаях отказаться от закупки дополнительных мощностей там, где можно обойтись технологическими или административными решениями. Переоснащение само по себе является процессом непрерывным, а значит, состоит из этапов. Проще говоря, установить систему мониторинга эффективности работы оборудования имеет смысл на одном из этапов, чтобы с ее помощью оценить экономическую эффективность уже инвестированных средств.

В первую очередь необходимо очертить круг задач, которые должна решить автоматизация. Например, в каких-то случаях решения от крупных производителей систем автоматизации могут быть излишне сложными и дорогими. В то же время начинающие игроки могут быть недостаточно гибкими, оперативными в поддержке и развитии продукта. В идеале я бы рекомендовал выбирать разработчика ПО со штатом сотрудников, осуществляющих поддержку собственными силами, обладающего успешными кейсами интеграции задач, относящихся к вашему типу производства, а также с понятным планом выхода новых версий ПО и их обновления.

Введение

Применение современных металлорежущих станков с ЧПУ типа "обрабатывающий центр" и сборных лезвийных твердосплавных и керамических инструментов с износостойкими покрытиями производства ведущих зарубежных станко-инструментальных компаний открывает широкие технологические возможности повышения точности, качества и производительности обработки деталей машин и изготовления конкурентоспособной машиностроительной продукции на промышленных предприятиях Украины. В успешном решении этих задач важная роль принадлежит применению современных технологий механической обработки, максимально реализующих потенциальные возможности предлагаемых высокоэффективных металлорежущих станков с ЧПУ и инструментов, что требует создания новых теоретических подходов к проектированию и автоматизированному программированию технологических процессов изготовления деталей машин. Необходимо уметь проектировать технологические процессы и определять оптимальные условия обработки с учетом широких диапазонов изменения параметров режимов резания, которыми обладают современные металлорежущие станки с ЧПУ и инструменты. Необходимо также уметь осуществлять автоматизированное программирование технологических процессов для станков с ЧПУ и готовить управляющие программы, применяя для этого современные системы автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП).

Большой опыт в данном направлении накоплен в крупнейшей инжиниринговой компании Украины – Инженерно-Техническом Центре «ВариУс» (г. Днепр) благодаря широкому внедрению специалистами компании на промышленных предприятиях современных технологий, металлорежущих станков с ЧПУ типа "обрабатывающий центр" и инструментов зарубежного производства. Постоянными заказчиками компании являются фактически все действующие предприятия машиностроительной, металлургической и других отраслей промышленности, а также многие подразделения железной дороги.

В связи с этим в настоящей монографии обобщен опыт применения на предприятиях Украины современных технологий механической обработки, металлорежущих станков с ЧПУ и инструментов зарубежного производства, раскрыты их технологические возможности и даны

практические рекомендации по дальнейшему совершенствованию. Приведены многочисленные примеры их эффективного практического использования на основе оптимального проектирования технологических процессов обработки вполне конкретных и сложных в изготовлении деталей машин. Проведен сравнительный анализ различных систем автоматизированного проектирования и программирования технологических процессов для станков с ЧПУ и обоснована высокая эффективность использования на предприятиях Украины программного продукта САПР ESPRIT, разработанного американской компанией DP Technology и получившего широкое применение во всем мире.

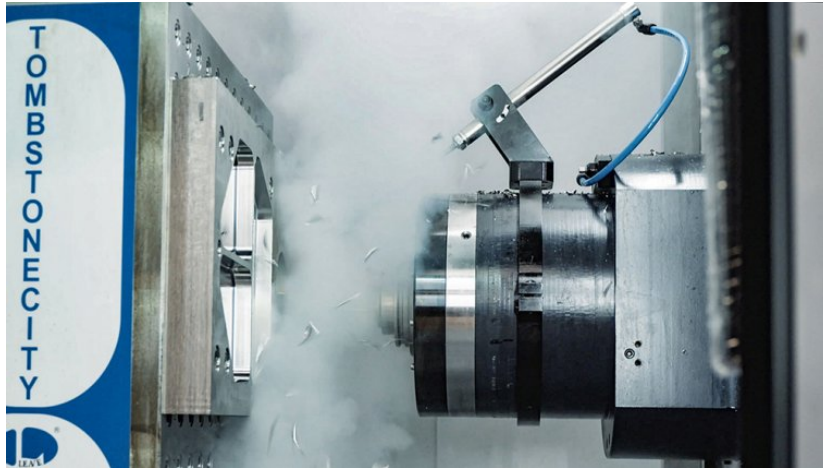
В работе приведены теоретические подходы и полученные оптимальные решения для проектирования высокоэффективных технологий производства. Они включают установленные условия снижения силовой и тепловой напряженностей процессов механической обработки деталей машин. С позиции управления упругими перемещениями, возникающими в технологической системе, и температуры резания определены условия повышения точности, качества и производительности обработки лезвийными и абразивными инструментами. Теоретически обоснована возможность осуществления высокоточной и высококачественной финишной обработки лезвийными инструментами из синтетических сверхтвердых материалов, а также твердосплавными и керамическими лезвийными инструментами с износостойкими покрытиями. Установлены оптимальные условия осуществления бездефектного высокопроизводительного глубинного шлифования и его эффективного использования на практике.

Особое внимание уделено определению условий снижения интенсивности автоколебаний и вынужденных колебаний, возникающих при резании материалов. Также приведены примеры решения дифференциального уравнения теплопроводности в частных производных методом Фурье разделения переменных для различных граничных и начальных условий, применяемых в теории резания материалов. Показана эффективность использования данного метода, позволяющего достаточно просто аналитически и численно определить распределение температуры в заданной области. Сравнение расчетных и экспериментальных значений температуры резания показало на их высокую сходимость, что открывает новые возможности поиска оптимальных условий механической обработки по температурному критерию.

Раздел 1

Современные технологии механической обработки и их промышленное применение

1.1. Криогенная обработка – новое слово в авиационной промышленности



Очевидный факт: механическая обработка сопровождается выделением тепла. Этот нежелательный побочный эффект вызывает множество проблем у машиностроителей. Само собой разумеется, что удаление его из процесса приведет к улучшению многих показателей: сокращению времени обработки, увеличению стойкости инструмента и повышению качества детали [10; 29 – 34; 82; 86; 116; 126]. Невозможно, даже теоретически, представить себе перспективы улучшения процесса резания, если удастся снизить температуру до -196°C в зоне обработки. Но с уверенностью можно сказать, что результат был бы потрясающим. Поэтому такие эффекты и являются областью изучения теории криогенной обработки. Но как обстоят дела на практике? Рассмотрим результаты совместной работы DOOSAN, компании 5ME@Cryogenics и конечного заказчика – с целью улучшения процесса изготовления деталей для коммерческого самолетостроения с использованием криогенной техники.

Немного о заказчике

Компания Milling Precision Tool Company (MPTC) – это механическая мастерская со станками ЧПУ в городе Уичите (штат Канзас), которая обслуживает потребности местной авиакосмической промышлен-

ности. Штат сотрудников составляет около 30 человек, и они производят самые сложные изделия для таких клиентов, как Cessna/Textron, авиационное подразделение Lockheed Martin, Boeing и многих других. Так как компания развивается в данной области уже более 55 лет благодаря прогрессивной культуре производства, организация непрерывно как-бы "переизобретает" себя, совершенствуя внутренние процессы, придерживаясь бережливого подхода, обеспечивая непрерывный поток в производстве и всегда думая о том, как сократить время наладки.

Партнер МРТС Майк Крейг сказал: "Примерно год назад мы начали изучать технологию криогенной обработки, насколько она может помочь нашему цеху в обработке твердых металлов, таких как титан, нержавеющая сталь и другие сплавы, а также композитов, все шире применяющихся в аэрокосмической промышленности".

Технология криогенной обработки

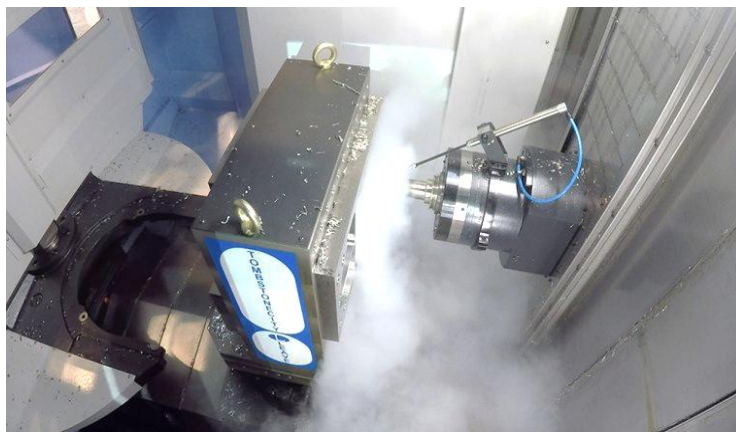
По воле судьбы, компания DOOSAN только что объединила усилия с компанией 5ME®Cryogenics, чтобы продемонстрировать преимущества криогенной обработки. Уникальный многопатентный процесс криогенной обработки 5ME® – это революционная технология, которая позволяет повысить скорость снятия металла и увеличить стойкость инструмента, обеспечивая подачу жидкого азота при температуре –196 °С через шпиндель/револьверную головку, корпус державки, режущий инструмент – непосредственно на режущую кромку. Такая экологически чистая технология обработки повышает производительность, качество изделий, стойкость инструмента, а соответственно, прибыльность предприятия, попутно сокращая расход СОЖ и снижая потребление энергии.

Как все сложилось

В качестве оборудования для криогенных операций был выбран горизонтальный обрабатывающий центр DOOSAN NHP 6300 с конусом шпинделя под инструментальную оправку BT50 и размером стола 630x630 мм, оснащенный шпинделем BIG PLUS со скоростью вращения 10000 об./мин. Выбранный горизонтальный обрабатывающий центр DOOSAN NHP 6300 обладал всеми требуемыми геометрическими и силовыми параметрами для обработки изделий заказчика.

Денни Крейц, менеджер Machine Tool Specialities (дистрибьютор Doosan Machine Tool America в этом регионе), знает свое дело. Послед-

ние 5 лет он работает с компанией MPTC над стандартизацией оборудования в цеху. Он пригласил представителей MPTC в город Уоррен, Мичиган (где находились специалисты из 5ME® и станок NHP 6300) для демонстрации процессов силовой и финишной обработки.



Убедившись, что такое решение подходит для текущих задач производства, компания MPTC без промедления разместила заказ на поставку модели ОЦ NHP 6300, оборудованного функцией криогенной обработки.

Результаты

По словам Уилла Грубера (Will Gruber), менеджера по маркетингу и продажам для 5ME®, компания Milling Precision Tool после инсталляции станка NHP 6300 без промедления запустила непрерывный цикл производства плановых изделий. В качестве обрабатываемых материалов выступали твердые металлы: титан (6AL4V), нержавеющая сталь (15-5 PH) и другие сплавы. Компания начала обрабатывать детали с применением криогенной технологии и значительно уменьшила время цикла: некоторые показатели сократились почти на 50 %. Скорость снятия материала возросла примерно вдвое, по сравнению с обработкой при подаче обычной охлаждающей жидкости поливом в зону резания. Кроме того, использование криогена обеспечило 30 %-ю экономию на покупке СОЖ (учитывалась цена охлаждающей жидкости, включая стоимость ее утилизации).

Несмотря на то, что срок службы инструмента остался постоянным на уровне 60 минут (отраслевой стандарт), MPTC стала обрабатывать детали в 2 – 2,5 раза быстрее. Поэтому логично, что стойкость инструмента в расчете на деталь (объем удаленного материала за единицу времени) увеличилась в 2 – 2,5 раза. Это моментально привело к более, чем двукратной экономии на закупках инструмента при

сохранении объема производства данных изделий. А далее, очевидно, что повышение производительности привело к снижению всех производственных затрат на этом участке, к снижению себестоимости изделий, к ускорению поставок для заказчиков и к увеличению объема выполняемых заказов.

Представитель криогенной обработки

Опираясь на свой опыт, компания Milling Precision Tool стала своего рода выставочным залом для 5ME® DOOSAN и Machine Tool Specialities, а также для местных клиентов из аэрокосмической отрасли. В конце 2018 года МРТС на своем предприятии провела двухдневную презентацию для компании Cessna/Textron, в рамках которой были представлены преимущества механической обработки с применением жидкого азота, возможности металлорежущего оборудования DOOSAN и образцы деталей, а также продемонстрированы возможные типы обработки без применения традиционной охлаждающей жидкости. Это привело к тому, что Cessna/Textron обновили производственные спецификации своих поставщиков оборудования, включив криогенную обработку в качестве допустимой методологии при изготовлении своих изделий.

Будущее

По мере того, как Milling Precision Tool расширяет свой бизнес с учетом открывшихся возможностей, благодаря приобретению современного оборудования DOOSAN, уже ведутся разговоры о расширении мощностей и добавлении новых станков, как для криогенной обработки алюминия, так и для обработки сложных изделий из твердых металлов за счет внедрения современных методов автоматизации. К примеру, компания DOOSAN предлагает модифицируемую линейную и поворотную систему паллет для модели NHP 6300, которая позволит оператору не присутствовать возле оборудования все время смены, минимизируя время наладки при обработке различных деталей.

В ногу с прогрессом

Описанная в настоящем параграфе установка считается самым первым горизонтальным обрабатывающим центром с функцией криогенной обработки в США; и первым горизонтальным центром для компании Milling Precision Tool. При этом для МРТС было важно находиться в центре внедрения данной технологии, ведь это позволило им представить преимущества технологии своим клиентам – важными ключевыми игроками в аэрокосмической отрасли.

1.2. Современные токарные металлорежущие инструменты



Компания TaeguTec (Южная Корея) предлагает широкий выбор твердосплавных пластин, выполненных по стандарту ISO. В зависимости от вида металлообработки технологи подберут требуемую комплектацию токарного инструмента.

Новейшие CVD- и PVD-покрытия твердосплавных пластин обеспечивают значительный рост производительности металлообработки. Твердосплавные пластины и стружколомы различной геометрии отвечают большинству задач механической обработки.

Токарный инструмент по режимам обработки

Металлорежущий инструмент серии TopMini

Серия TopMini – это высокоточные инструментальные решения от TaeguTec в области обработки деталей малых размеров. Особая конструкция токарных автоматных резцов компании TaeguTec позволяет эффективно расположить максимальное количество инструмента в резцедержателе и в то же время оставить его легкодоступным для замены лезвия целиком либо режущей пластины.

Металлорежущий инструмент серии TopDuty

Серия TopDuty – это серия металлорежущего инструмента от компании TaeguTec для тяжелого точения. Данный инструмент применяется в тяжелом машиностроении, кораблестроении и строительстве ветряков, где происходит обработка габаритных деталей на высоких режимах резания. Новая концепция крепления твердосплавной пла-

стины и уникальная геометрия придают жесткость при обработке сталей на тяжелых режимах и минимизируют усилия резания, что делает возможным обработку деталей при недостаточной, на первый взгляд, мощности существующего оборудования.

Токарный инструмент по функциональным особенностям

Металлорежущий инструмент серии T-Burst

Серия T-Burst – это новые державки от TaeguTec обеспечивающие подачу СОЖ в зону резания под максимальным давлением в 300 бар. Благодаря регулируемой насадке-соплу новая токарная державка обеспечивает подачу СОЖ под высоким давлением именно в ту область, где она наиболее необходима: через два отверстия охлаждающая жидкость направляется прямо на режущую кромку, создавая комфортную рабочую температуру в пространстве между стружкой и передней поверхностью твердосплавной пластины. Этим достигается значительное увеличение стойкости металлорежущего инструмента и вариативность выбора режимов резания. Данное решение идеально подходит для задач аэрокосмической промышленности, где требуется металлообработка сверхпрочных и жаростойких материалов.

Металлорежущий инструмент серии Top Rail

Серия TopRail – это комбинированная державка картриджного типа, исполнение которой минимизирует затраты в случае какой-либо поломки токарного инструмента. На этих токарных державках используют твердосплавные пластины типа LNMX, представленные в 2-х типоразмерах (19 и 30 мм). Для них были разработаны три вида новой стружколомающей геометрии: TWF, TWM и TWR, что дало превосходные результаты как при обработке новых, так и при точении восстанавливаемых железнодорожных колес на вагоноремонтных заводах. Основное назначение серии: обработка точением железнодорожных колес.

Токарный инструмент серии Turn Rush

Эта серия металлорежущего инструмента представляет собой твердосплавные пластины со специальным посадочным местом и стружколомом для получерновой обработки стали. Возможно применение данного инструмента на высоких подачах до 0,8 мм/об., что делает его лидером среди пластин того же класса.

Токарный инструмент серии T-Turn

Семейство токарных ISO-пластин пополнилось новой серией со стружколомающей геометрией для обработки нержавеющей стали.

За счет нового стружколома RA расширилась номенклатура круглых пластин типа "чашка". Данный тип пластин позволяет использовать их при черновой обработке на низких режимах и при прерывистом резании. Кроме того, компания вышла на новый уровень в точении труднообрабатываемых материалов пластинами из PCD. Применяя ее инструмент с геометрией типа CB, можно добиться превосходного стружкодробления в зоне резания, повышая при этом класс чистоты поверхности и стойкость инструмента в целом.

Токарный инструмент серии Rhino Rush

Серия разработана для решения задач автомобильной промышленности в области обработки чугуна. Для этого компанией Taegutec созданы новая геометрия и сплавы нового поколения, пластины из которого рекомендуются для обработки различных видов чугуна. Данные сплавы заменяют ранее применяемые сплавы марок TT1300 и TT7310. Компания TaeguTec запустила новую линию по изготовлению пластин из твердых сплавов марок TT7005 и TT7015 с многослойным покрытием, которое наносят методом CVD. Пластины, изготавливаемые по разработанным технологиям, являются лучшим выбором для обработки серого и высокопрочного чугуна, обеспечивая высочайшую производительность без риска увеличения расхода инструмента.

Токарная державка с системой мультизажима Combi Clamp

По сравнению с существующей серией державок, новая экономичная система крепления T-типа CombiClamp позволяет устанавливать пластины различной толщины. Благодаря такому решению удалось получить более универсальный инструмент: с помощью одной державки можно выполнить больше операций механической обработки. Основные преимущества:

- применимы к существующим державкам при изменении зажима;
- доступны три различных вида пластин для одной державки.

Новая технология покрытия твердосплавных пластин Life Plus:

- высокая износостойкость и превосходное сопротивление скалыванию;
- специально обработанная поверхность GoldRush;
- увеличенная стойкость и стабильность;
- стабильная стойкость инструмента при обработке на высоких температурах;

- продлевает стойкость инструмента при более высоких режимах резания по сравнению с существующими сплавами;
- гарантированная стабильность в условиях высоких подач и скорости резания.

Структура покрытия твердосплавных пластин:

- специальное покрытие для сопротивления к скалыванию;
- слой диоксида кремния для термостойкости и твердости;
- твердый связующий слой;
- прессованный твердосплавный слой для высокой прочности и твердости.

Новые КНБ сплавы: ТВ610, ТВ670, ТВ730

Отличная производительность при обработке закаленной стали и чугуна.

ТВ610:

- стойкость к окислению, химическая стабильность;
- для легкой прерывистой обработки;
- для обработки твердой, легированной, инструментальной и закаленной стали.

ТВ670:

- высокая жесткость и ударопрочность;
- для непрерывного и прерывистого резания;
- для обработки легированной, инструментальной, закаленной стали и закаленного чугуна.

ТВ730:

- высокая твердость и стойкость к излому;
- токарная обработка и фрезерование;
- для обработки серого чугуна, магниевого чугуна и твердосплавных материалов.

Применение твердых сплавов:

- CBN ТВ610 – чистовая обработка (непрерывной резание);
- CBN ТВ650 – чистовая обработка (непрерывной резание);
- CBN ТВ670 – первый выбор для чистовой и черновой обработки.

Общее применение:

- CBN ТВ670 – для тяжелого прерывистого резания.

Керамический сплав ТС430

Керамический сплав, армированный нитевидными кристаллами для обработки высокопрочных и жаропрочных материалов:

- высокая твердость и изломостойкость;
- подходит для токарных и фрезерных операций;
- возможна обработка никелевых жаропрочных сплавов (Инконель, Веспаллой, Рене), закаленной стали и белого чугуна на высоких скоростях резания.

1.3. SWISS TOOLS системы и инструмент для обработки отверстий

Компания Swiss Tools Systems AG была основана в 1971 году в городе Бюрглен, Швейцария, в районе Боденского озера и начала свою деятельность с разработки и производства систем для расточки отверстий на фрезерных станках. В настоящее время производство заводов Swiss Tools насчитывает десятки высокопроизводительных прецизионных станков. Компания Swiss Tools является ведущим мировым разработчиком и одним из лидеров в производстве систем инструмента и оснастки для черновой и чистовой расточки отверстий диаметром от 3 мм до 2205 мм.

Номенклатура расточных головок

Прецизионные головки предназначены для расточки высокоточных отверстий от диаметра \varnothing 3 мм до \varnothing 88 мм (рис. 1.1). Для покрытия этого диапазона диаметров к головкам поставляются соответствующие задаче расточные державки в зависимости от необходимого диаметра расточки:



Рис. 1.1. Прецизионная головка для растачивания высокоточных отверстий от \varnothing 3 – до \varnothing 88,1 мм

точные державки (Серия В54 ...);

- \varnothing 29,75 – 88,1 мм стальные регулируемые расточные державки (Серия В56 ...);

- \varnothing 3 – 19 мм расточные резцы с напайными твердосплавными пластинами (Серия В64 ...);
- \varnothing 5,8 – 40,1 мм твердосплавные расточные державки (Серии В74 ... и В94 ...);
- \varnothing 9,75 – 88,1 мм стальные расточные державки (Серия В54 ...);

- Ø 5,3 – 48,6 мм стальные расточные державки для обработки штифтов (Серия В94 ...).

Расточные головки могут быть 2 вариантов для этого диапазона:

- с микрометрической подачей;
- одновременно с микрометрической подачей и цифровой индикацией. Цифровая индикация позволяет контролировать диаметр расточки с дополнительной точностью.

Чистовые расточные системы

Чистовые расточные системы предназначены для обработки точных отверстий диаметром от 3 мм до 320 мм (рис. 1.2). Диапазон диаметров может быть покрыт при помощи 6 расточных державок и 2-х легкосплавных мостов-переходников.



Рис. 1.2. Чистовые расточные системы для обработки точных отверстий диаметром от 3 мм до 320 мм



Рис. 1.3. Прецизионная система для расточки точных отверстий Ø 23,9 – 171,1 мм

Прецизионные системы предназначены для расточки точных отверстий диаметром от 23,9 мм до 171,1 мм (рис. 1.3). Для этого диапазона диаметров компания Swiss Tools поставляет 7 расточных головок и 20 типоразмеров державок. Глубина расточки увеличивается при помощи добавления переходников-удлинителей. При этом диаметр наружного переходника меньше диаметра совпадающего с посадочным кругом.

Растачивание отверстий диаметром от 86 мм до 402 мм возможно с помощью расточных головок серии С44.088.086.112, которые предназначены для чистовой обработки.

Черновые расточные системы

Расточные головки серии D44.080.086.112 предназначены для черновой обработки (рис. 1.4). Диапазон диаметров от 86 мм до 402 мм может быть достигнут при помощи смены 6 державок-насадок.



Рис. 1.4. Расточные головки серии D44.080.086.112 для черновой обработки



Рис. 1.5. Расточная головка для черновой расточки отверстий диаметров от 23,5 мм до 153,0 мм

Расточные головки предназначены для черновой расточки отверстий диаметров от 23,5 мм до 153,0 мм (рис. 1.5). Требуется 7 видов инструментов, чтобы охватить указанные диапазоны. Каждый инструмент имеет два держателя режущих пластин. Державки режущих пластин существуют в исполнении 70° и 90° в плане, с одиночной либо синхронной регулировкой. При резании в тяжелых условиях можно применить метод ступенчатого резания (когда режущие вершины державок находятся на разных диаметрах и вылетах по оси "Z").



Рис. 1.6. Мост-переходник для растачивания отверстий

Растачивание отверстий диаметром от 150 мм до 2205 мм осуществляется мостами-переходниками (рис. 1.6), выполненными из прочного, но легкого материала. Диапазон диаметров 130 – 655 мм достигается сменой 10 мостов-переходников.

Растачивание отверстий диаметром от 150 мм до 2205 мм осуществляется мостами-переходниками (рис. 1.6), выполненными из прочного, но легкого материала. Диапазон диаметров 130 – 655 мм достигается сменой 10 мостов-переходников.

Оснастка для токарных станков с ЧПУ

Новейшие разработки компании Swiss Tools:

- оснастка типа HSK-T для токарных станков с ЧПУ;
- двойной держатель HSK-T для токарно-фрезерных обрабатывающих центров.

1.4. Высокоточные производительные метчики от компании Morse



В любой отрасли индустрии, а особенно в машиностроении, самым распространенным методом соединения узлов и деталей машин является резьбовая пара, для создания которой необходимо нарезать внутреннюю и наружную резьбу. Поэтому в параграфе пойдет речь об



Рис. 1.7. Метчик с прямыми канавками для нарезания резьбы в сквозном отверстии

инструменте для нарезания внутренних резьб с высокой производительностью – метчиках из современных инструментальных материалов. Метчик представляет собой цилиндрический валик с режущей (заборной) и калибрующей частями с одной стороны, хвостовиком с элементами крепления – с другой. Для отвода стружки в конструкции метчиков предусмотрены стружечные канавки, прорезанные под прямым (рис. 1.7) или винтовым углом.

Процесс нарезания резьбы обособленно определяет эксплуатационные характеристики и существенную долю экономичности сборного изделия. Это требует от ответственного за производственный участок технолога применения современного и высоконадежного инструмента для качественного выполнения данной ответственной операции.

Очевидно, что при работе метчиком процесс осложняется весьма значительными силами резания и трения, а также затрудненным удалением стружки, часто приводящим к ее пакетированию и, как следствие, к поломке инструмента.

Благодаря разнообразию конструкций и геометрических форм инструмента линейка метчиков Morse охватывает широкий диапазон решаемых производственных задач и позволяет:

- обрабатывать глухие и сквозные отверстия;
- нарезать метрическую резьбу с нормальным (крупным) шагом (M2-M30) и с мелким (MF4x0,5-MF30x1,5);
- нарезать дюймовую резьбу с крупным шагом в диапазоне UNC #4 – UNC 1" и с мелким – UNF #4 – 1";
- обеспечивать поле допуска ISO 2-6H, гарантируя в каждом случае облегченный вывод стружки и высокопроизводительную надежную обработку.

Краткий ассортимент геометрических форм линейки (взяты из каталога):

- геометрия W (желтый) – для хорошо обрабатываемой стали ($R_m < 750 \text{ Н/мм}^2$);
- геометрия S (синий) – для нержавеющей стали;
- геометрия H (красный) – для закаленных сталей и жаропрочных сплавов;
- геометрия G (белый) – для серого чугуна;
- геометрия N (зеленый) – для низколегированной стали ($R_m > 750 \text{ Н/мм}^2$);
- геометрия A (черный) – для алюминия и его сплавов;
- геометрия F (желтый) – для всех материалов с эластичностью не менее 8 – 10 %;
- геометрия M – для всех материалов (универсальная).



Рис. 1.8. Стружка выталкивается вперед

Для высокопроизводительной обработки сквозных отверстий компания Morse представляет метчики с прямыми канавками и винтовой подточкой (рис. 1.7), форма заборной части которых имеет 4 – 5 ниток (форма В).

Такая геометрия облегчает процесс нарезания внутренней резьбы благодаря свободному выталкиванию стружки в направлении подачи (рис. 1.8).

Специальным решением для нарезания резьбы в глухих отверстиях являются метчики с правосторонними спи-

ральными канавками под углом 40° и заборной частью в 2 – 3 нитки (рис. 1.9). Такое исполнение позволяет выводить стружку вверх (рис. 1.10), не допуская ее пакетирования на дне отверстия и повреждения режущих кромок.



Рис. 1.9. Метчик со спиральными канавками для нарезания резьбы в глухом отверстии

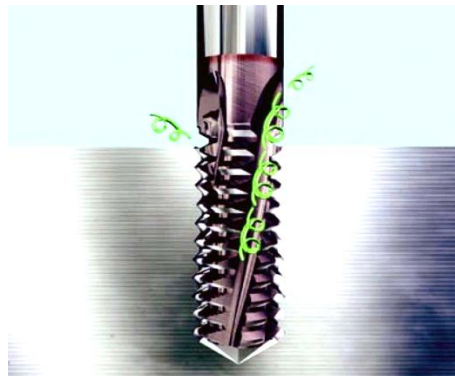


Рис. 1.10. Стружка выводится вверх

Кроме этого, в конструкции резьбонарезного инструмента Morse предусмотрены несколько типов хвостовиков: тонкий (DIN376, DIN374) и утолщенный (DIN371) для увеличения жесткости метчика.

Кроме достижения основной цели – получения качественной поверхности резьбы – на выбор метчика может повлиять и ряд других критериев, таких как: заданная производительность, износостойкость инструмента или экономичность процесса в целом. Важнейшим преимуществом инструмента компании Morse является широчайший выбор вариантов режущих материалов и покрытий, позволяющих решить любую задачу с наилучшей эффективностью.

Согласно стандартной классификации материал режущей части маркируется как:

- HS – быстрорежущая сталь (M2);
- HE – быстрорежущая сталь HSS-E с 5 %-м содержанием кобальта;
- PM – прессованный порошок;
- HM – твердый сплав.

Например, если Ваша цель – экономия затрат при резании цветных металлов, то идеальным решением станет метчик из быстрорежущей стали без покрытия.

Если же Вы делаете ставку на высокую стойкость метчика на средних и высоких режимах резания, следует обратить внимание на вороненый тип покрытия. Процесс образования оксида железа на поверхности инструмента обеспечивает в этом случае идеальные условия для

отвода стружки, а также уменьшает нарост на режущей кромке. Об этом свидетельствуют неоднократные испытания метчиков Morse в техническом центре и опыт применения в реальном производстве (рис. 1.11).



Рис. 1.11. Высокоточные производительные метчики от компании Morse

Инструмент с покрытием из нитрида титана TiN обладает максимальной износостойкостью режущих кромок, обеспечивая рекордную производительность процесса обработки и хорошую стойкость даже на высоких режимах резания.

TiN-покрытие, нанесенное методом PVD, обеспечивает повышенную стойкость инструмента и плавность операций при обработке широкого спектра материалов на консервативных режимах резания. Эффект достигается за счет оптимального сочетания низкой теплопроводности, высокой твердости, химической стабильности покрытия и жаропрочности инструментального материала.

Как установлено в результате многочисленных исследований, новая серия метчиков от компании Morse демонстрирует отличную производительность и комфортную универсальность в широком диапазоне задач. Однако, современное машиностроение зачастую ставит достаточно специфические задачи при нестандартных услови-

ях, требуя при этом максимальных результатов. Ценным преимуществом новой линейки резьбонарезного инструмента от компании Morse является возможность расширить спектр эффективно решаемых задач в соответствии с требованиями конкретного заказчика. Для каждой задачи уже есть решение. Нужно лишь выбрать.

Помимо машинных метчиков производитель выпускает целый ряд ручных (комплект из 1, 2 и 3) метчиков (рис. 1.12) для нарезания резьбы вручную вне станка.



Рис. 1.12. Ручные метчики

Официальным представителем производителя MORSE на территории Украины является компания "ТАЕГУТЕК УКРАИНА".

1.5. Morse Cutting Tools – достойный соперник труднообрабатываемым материалам

Компания Morse Cutting Tools специализируется на разработке и производстве цельного вращающегося режущего инструмента. Номенклатура Morse включает в себя инструментальные решения, предназначенные для различных отраслей современной металлообработки, таких как авиастроение, изготовление штампов и пресс-форм, автомобилестроение, общее машиностроение, производство медицинских деталей и т.д.

Производство инструмента Morse основано на использовании прогрессивных инструментальных материалов, например, таких как ультрамелкозернистые марки твердого сплава и быстрорежущие стали, легированные кобальтом, которые в комбинации с современной технологией нанесения защитных покрытий обеспечивают исключительную износостойкость. Кроме того, компания Morse осуществляет

переточку различных видов изношенного инструмента с его последующим покрытием по методу конденсации из парогазовой среды (физическое напыление, PVD).

Компания Morse Cutting Tools сертифицирована по ISO 9001:2008 и признана надежным производителем режущего инструмента для ведущих предприятий мировой авиастроительной промышленности. Вся продукция (концевые фрезы, сверла, метчики и специализированные инструменты, рис. 1.13) производства Morse Cutting Tools отвечают самым высоким требованиям качества.

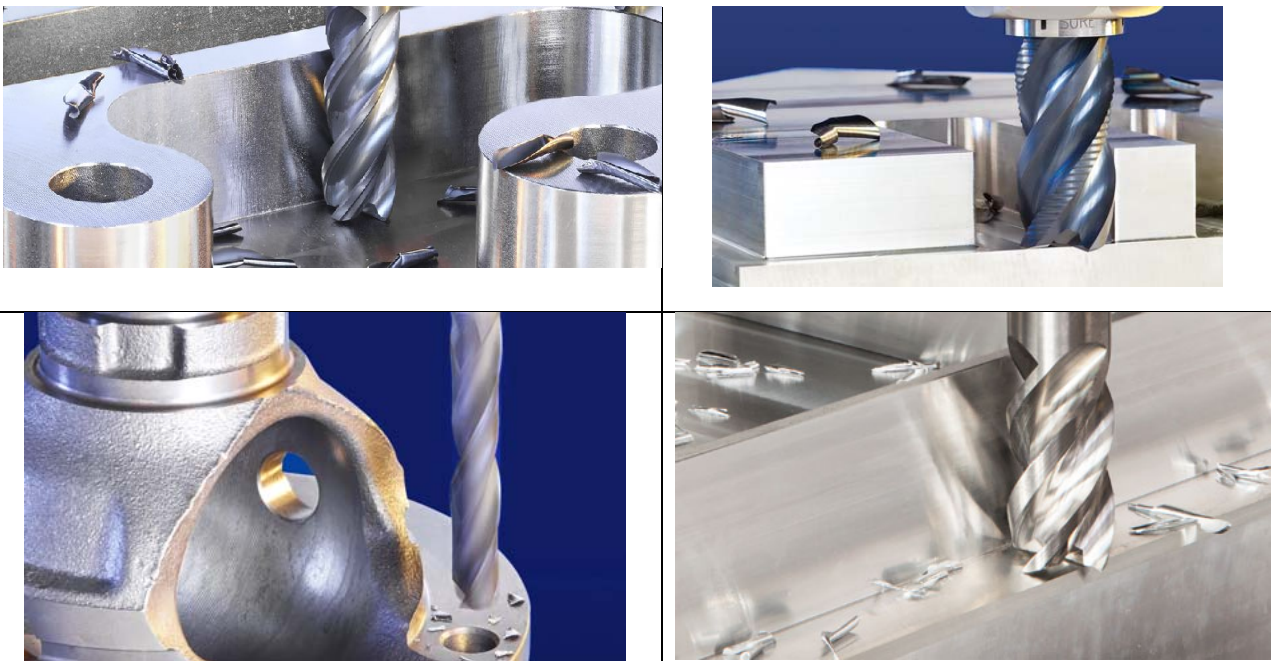
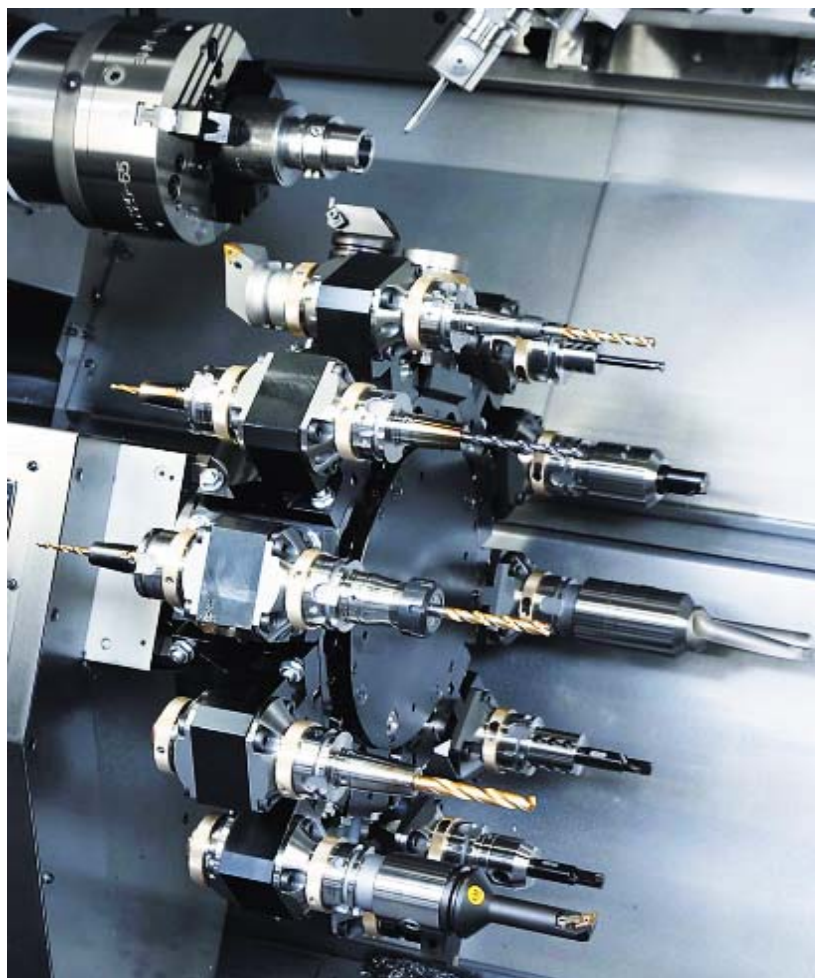


Рис. 1.13. Монолитные твердосплавные осевые инструменты компании Morse Cutting Tools

1.6. Станочная оснастка SWISS TOOLS – максимально эффективное использование рабочего пространства обрабатывающего центра и повышение производительности обработки

Компания Swiss Tools Systems AG является одним из мировых лидеров в разработке и производстве высокопрецизионных расточных систем для обработки отверстий на фрезерных центрах. Именно специалисты Swiss Tools первыми внедрили на такие высокотехнологичные предприятия, как BMW AG, Airbuss S. A. S., Porsche AG, Siemens AG и

др., прецизионный приводной и стационарный инструмент, используемый с единой стандартной оснасткой.



Фиксатор и зажим, разработанные компанией Swiss Tools, позволяют зафиксировать 24 единицы стационарного и приводного инструмента на одной револьверной головке.

Инструментальная оснастка серии HSK – наиболее популярный вид зажимных устройств для фрезерных обрабатывающих центров – на токарных станках встречается пока редко. Но производители оборудования все чаще устанавливают револьверные головки серии HSK-T для высокоскоростной токарной обработки.

Swiss Tools специализируется на проектировании и изготовлении инструментальных башен с размещением одного, двух и более инструментов – как приводных, так и статических – на каждом посадочном месте. Инструменты можно заменить и отрегулировать за 1 – 2 минуты, тогда как ранее на это требовалось от 10 до 15 минут. Такая регулировка происходит автоматически во время процесса замены инструмента. Благодаря хвостовику HSK на державке и новому фиксатору

ру на инструментальном блоке Swiss Tools удваивает количество инструмента, который можно установить одновременно на револьверной головке. Таким образом, заказчики могут использовать этот значительный ресурс для оптимизации и сокращения вспомогательного времени в производственном цикле, максимального использования рабочего пространства обрабатывающего центра и повышения производительности. Благодаря сменным втулкам можно устанавливать инструмент с хвостовиками HSK-T 40/63/100 и PSC 40/50/63 (рис. 1.14).

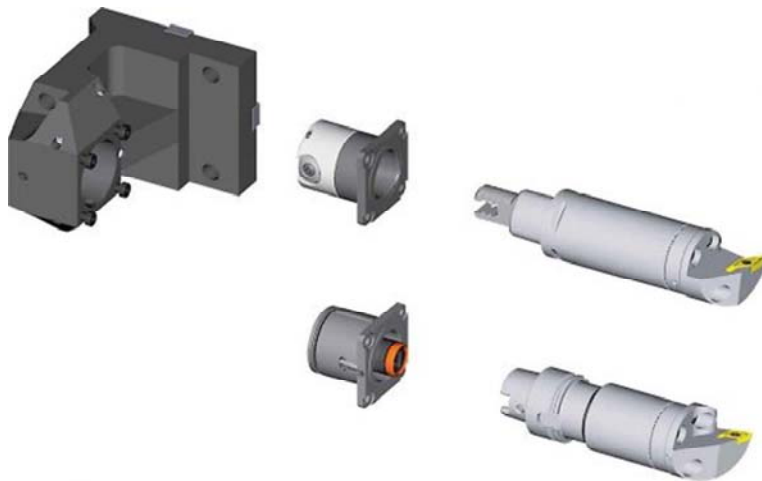


Рис. 1.14. Схема установки инструмента в блок

Двойной инструментальный блок HSK-T предназначен для использования на токарно-фрезерных обрабатывающих центрах. Конструкция данного держателя позволяет увеличить количество инструмента, закрепляемого в револьверной головке, что значительно снижает вре-

менные затраты на переустановку инструмента и, тем самым, уменьшает время изготовления одной детали.

Новая система зажима и соответствующий фиксатор позволяют удвоить количество инструмента, который находится на револьверной головке токарного обрабатывающего центра. Время, которое тратится на переустановку инструмента, минимизировано до предела, так как весь инструмент, размещенный на револьверной головке, имеет одну и ту же систему фиксации. Больше не нужно отдельно идентифицировать стационарный и приводной инструмент. Инструмент заранее настроен на положение "0", что также способствует экономии времени при его смене. Также необходимо использовать всего один винт для установки либо извлечения инструмента. Зажимное устройство A63, выполненное в соответствии с DIN 69893, обеспечивает осевое усилие, равное 30,5 кН, и вращающий момент – 20 Нм.

Специалисты украинского представительства компании рекомендуют планировать комплектацию оборудования оснасткой данного типа уже на стадии проработки проекта и инвестирования средств в но-

вый станок (рис. 1.15). Следует тщательно продумать, какой инструмент позволит наиболее быстро окупить вложенные средства. Технический директор компании Swiss Tools Systems AG г-н Хансаруди Байэр утверждает: "Это напоминает покупку сначала автомобильных дисков вместе с шинами, а лишь потом выбор непосредственно нового автомобиля ...".



Рис. 1.15. Варианты установки инструментальных блоков Swiss Tools на револьвере обрабатывающего центра

Револьверная головка с инструментальными блоками Swiss Tools

Расходы на инструмент составляют лишь 10 – 15 % от стоимости станка, однако его выбор играет определяющую роль в рациональном использовании оборудования на протяжении всего времени эксплуатации. Все это подтверждает огромный потенциал грамотного выбора инструмента и инструментальной оснастки, позволяющий экономить время и деньги за счет будущей производительности, когда выбор инструмента столь же тщателен, как и выбор станка (рис. 1.16).



Рис. 1.16. Револьверная головка с инструментальными блоками Swiss Tools

Официальным представителем компании Swiss Tools на украинском рынке является Технический Центр "ВариУс". За это время компания сумела утвердить себя в качестве серъ-

езного технического эксперта промышленных предприятий Украины. Глубокий анализ задач и высокий уровень технической поддержки, постоянное развитие, внедрение новых инструментов и технологий, проведение семинаров для специалистов отрасли – все это позволяет выстраивать долгосрочное взаимовыгодное сотрудничество с нашими партнерами.

Станочная оснастка SWISS TOOLS: компактно и эффективно!

1.7. Прецизионная регулировка инструмента прямо на шпинделе станка от компании Swiss Tools



Рис. 1.17. Точность
регулировки – 0,001 мм

Компания Swiss Tool является ведущим мировым разработчиком и одним из лидеров в производстве оснастки для черновой и чистовой расточки отверстий диаметром 0,3 ... 2205 мм (рис. 1.17).

Компания Swiss Tool активно внедряет последние достижения науки и техники в свои изделия и представляет на украинском рынке новейшие цифровые расточные системы (рис. 1.18 – рис. 1.20). Главное в данной разработке – удобство пользователя и скорость наладки – теперь есть возможность производить точную настройку системы, не снимая ее со станка! Совместно с цифровой расточной головкой идет Устройство с LCD-дисплеем, на котором и отображается смещение резцов. Дисплей отображает данные в мм/дюймах. Расточные системы не требуют специального ухода.



Рис. 1.18. Цифровые чистовые расточные головки диаметром 23,9 ... 171,1 мм: диаметральная регулировка 0,001 мм, с внутренним подводом СОЖ



Рис. 1.19. Цифровые чистовые расточные головки диаметром 0,3 ... 88,1 мм: диаметральная регулировка 0,001 мм, с внутренним подводом СОЖ, расточные оправки проходят через головку



Рис. 1.20. Цифровая чистовая расточная головка диаметром 155,0 – 2205,0 мм: для использования с мостами и переходниками, диаметральная регулировка 0,001 мм

Инструмент содержит минимальное количество электронных компонентов внутри. Установлен всего один датчик измерения регулировки. Внутри самой системы нет ни батарейки, ни соединителей, ни кабелей. Это позволяет использовать цифровую систему даже в миниатюрных расточных головках.

Дисплей LCD устройства подсвечивается, поэтому при недостаточном освещении рабочего пространства экран хорошо виден. Используется стандартная батарейка AAA. Присутствует функция автоматического отключения после эксплуатации. Системы с цифровым регулированием представлены во всем диапазоне расточных систем компании Swiss Tool – от 0,3 до 2205,0 мм.

Основные преимущества систем с цифровой регулировкой

- система цифровой регулировки позволяет производить прецизионную настройку инструмента (диаметральная регулировка 0,001 мм), не снимая его со шпинделя;
- прямая система измерения без мертвого хода;
- удобство в эксплуатации, быстрая установка;
- не требуется специальный уход;
- необходимо только одно устройство для всех используемых расточных головок;
- используется внешнее электронное устройство;
- система доступна для головок с внутренним подводом СОЖ.

Расточные системы компании Swiss Tools на украинском рынке представляет Инженерно-Технический Центр "ВариУс". Глубокий анализ задач и высокий уровень технической поддержки, постоянное развитие, внедрение новых инструментов и технологий, проведение технических семинаров для специалистов заказчика – все это позволяет клиентам ИТЦ "ВариУс" быть всегда на шаг впереди конкурентов.

1.8. Реализованные проекты ИТЦ "ВариУс" по токарной и фрезерной обработке деталей

В Инженерно-Техническом Центре "ВариУс" реализовано большое количество проектов по токарной и фрезерной обработке деталей на промышленных предприятиях Украины [298 – 34; 82; 88; 116; 126]. В качестве примеров рассмотрим некоторые наиболее эффективные технологические решения по изготовлению деталей.

Обработка детали "Пресс-форма" производится на станках DOOSAN DCM 2760W (5-осевой порталный обрабатывающий центр) и DBC 110S (горизонтально-сверлильный фрезерный центр) с применением угловой головки (рис. 1.21).



Рис. 1.21. Обработка детали "пресс-форма"

Деталь "Шнек" изготовлена на вертикальном обрабатывающем центре DOOSAN Мунх 5400/50 с помощью непрерывной 4-осевой обработки с применением поворотного стола производства GSA+ (рис. 1.22).



Рис. 1.22. Обработка детали "Шнек" на вертикальном обрабатывающем центре DOOSAN Мунх 5400/50

Деталь "Корпус" изготовлена на горизонтально-расточном обрабатывающем центре DOOSAN DBC 110 (рис. 1.23).



Рис. 1.23. Обработка детали "Корпус"

Деталь "Дно" изготовлена при помощи 5-осевой обработки на 5-осевом обрабатывающем центре DOOSAN VC 630/5AX. Все станки с

ЧПУ компания ВАРИТЕК поставляет с программным обеспечением ESPRIT для реализации Проектов "Под ключ". По итогам поставки VC 630/5AX в 2015 г. компания ESPRIT разместила информацию об успешно реализованном Проекте (в разделе Machine Tool Solution выбрать DOOSAN): <http://www.espritle.com/products/5-axis>



Рис. 1.24. Обработка детали "Дно"

1.9. Международные промышленные форумы с участием ИТЦ "ВариУс"

1.9.1. XII Международный промышленный форум

На украинской выставке оборудования и инструмента для металлообработки "XII Международный промышленный форум", которая состоялась в ноябре 2013 года, Инженерно-Технический Центр "ВариУс" продемонстрировал крупнейшую в своей истории экспозицию

современного оборудования с ЧПУ, металлорежущего инструмента, оснастки и программных методов подготовки технологических процессов. На стенде были представлены ведущие мировые производители оборудования и инструмента:



GMTK Multi-Process Machining, S.A. (Испания) – разрабатывает уникальные роботизированные комплексы для обработки деталей практически любой сложности и габаритов за минимальное количество установок. Модельный ряд оборудования компании включает следующие серии станков: токарно-карусельные станки серии VR, токарно-фрезерные станки серии HR.



DOOSAN Machine Tools (Южная Корея) – один из пяти крупнейших в мире производителей металлорежущих станков. Предлагает лучшие в мире решения в серии вертикальных и горизонтальных токарных обрабатывающих центров, а также в производстве 3-х, 4-х и 5-ти координатных фрезерных обрабатывающих центров.



TaeguTec Ltd. (Южная Корея) – мировой лидер в производстве металлорежущего инструмента и оснастки. Производство твердосплавных порошков и индустриальной продукции (твердосплавные прокатные валки, ролики, стержни и пр.). Специальный инструмент и лучшие технологические решения в области машиностроения.



The Right Choice ESPRIT (США) – САМ-система для решения широкого спектра задач программирования обработки изделий на станках с ЧПУ, надежное средство для программирования обработки на фрезерных, токарных, электроэрозионных и многозадачных токарно-фрезерных обрабатывающих центрах.



LOCH

Präzisionsbohrtechnik

GmbH (Германия) – производитель станков для глубокого сверления, которые используют все существующие инструментальные системы: ELB, BTA, DTS.



LINK Spa. (Италия) – в состав корпорации входит компания **IDF S.r.l.** – ведущий европейский производитель измерительного инструмента и контрольно-измерительных приборов, а также компания **GUABO S.r.l.** – один из крупнейших мировых производителей ленточных пил.

Интересно, что каждая из восьми единиц оборудования производства компании "**DOOSAN Machine Tools**" демонстрировалась в работающем виде, выполняя сложнейшие операции точения, фрезерования, растачивания, нарезания шлицев и многоосевой токарно-фрезерной обработки.

Технологами и сервис-инженерами группы компаний Технический Центр "ВариУс" были представлены технологические процессы обработки на следующих моделях:

Технологами и сервис-инженерами группы компаний Технический Центр "ВариУс" были представлены технологические процессы обработки на следующих моделях:

- DNM500 (вертикально-фрезерный обрабатывающий центр);
- DNM500HS (высокоскоростной вертикально-фрезерный обрабатывающий центр);
- DNM350/5AX (5-ти осевой вертикально-фрезерный обрабатывающий центр);
- PUMA400LMB (горизонтальный токарный станок с фрезерной функцией);
- PUMA2600LY (токарный станок с фрезерной функцией и осью Y);
- PUMA3100ULY (токарный станок с ультра длинной станиной, фрезерной функцией и осью Y);
- LYNX220LM (горизонтальный токарный станок с фрезерной функцией);
- LYNX300M (горизонтальный токарный станок с фрезерной функцией).

Каждый обрабатывающий центр укомплектован инструментом компании "TaeguTec Ltd.". Каждый технологический процесс подкреплен наглядной визуализацией обработки в САМ-системе ESPRIT. Отдельные станки оснащены оснасткой ведущих фирм: "LNS SA." (автоматический податчик прутка), "MT S.R.L." (поворотная головка и приводные блоки), "SMW-AUTOBLOK Spannsysteme GmbH" (люнеты, фиксирующая оснастка) и др. Наиболее сложные Технические Задания Заказчиков решались путем совместных совещаний технологов компаний "DOOSAN Machine Tools", "ВариТек" и специалистов Заказчиков.

Как всегда, технологи компании "ТаегуТек Украина" представили интереснейшую экспозицию металлообрабатывающего инструмента, включая такие нашумевшие линейки как:

- **Рино-Паш (Rhino Rush)**: новая серия высокопроизводительного, но экстраэкономичного инструмента в сравнении с ISO-инструментом, благодаря малым габаритам пластин;

- **Квад-Паш (Quad Rush)**: 4 режущие кромки со стружколомом для нарезания канавок, отрезки и растачивания кольцевых канавок;

- **Голд-Паш (Gold Rush)** сплавы: оригинальное решение, выводящее режущий инструмент TaeguTec на совершенно новый уровень.

Для предприятий, имеющих в своем составе заготовительное производство и службу Главного метролога, были представлены ленточные пилы совместного итальяно-украинского производства под брендом "**VariUs**", а также измерительный инструмент, хорошо зарекомендовавший себя в Украине, компании "**IDF S.r.l.**". Представители компаний-производителей из Италии профессионально консультировали постоянных и потенциальных заказчиков.

Впервые в Украине было представлено профессиональное оборудование одного из двух мировых лидеров по производству оборудования для глубокого сверления – станки компании "**LOCH Präzisionsbohrtechnik GmbH**". Предприятие представил Директор и собственник компании Mr. Wolfgang Loch.

Ярким фрагментом экспозиции стал стенд компании "**GMTK Multi-Process Machining, S.A.**". Образец сложнейшей обработанной детали "Коленвал" весом 5 тонн наглядно демонстрировал возможности этого уникального оборудования из Испании.

Большая часть оборудования с выставки была отправлена прямо на производственные площадки Заказчиков.

1.9.2. XVI Международный промышленный форум

В рамках XVI Международного промышленного форума, который проводился с 21 по 24 ноября 2017 года в г. Киеве, компания "ВариТек" – официальный представитель компании DOOSAN Machine Tools – представила лучшие модели металлорежущего оборудования для различных задач механической обработки металлов.



На стенде компании проводилась демонстрация работы 5 моделей металлообрабатывающего оборудования Doosan. Специалисты компании знакомили с особенностями работы каждой модели и грамотно сопровождали обработку технологически сложных деталей, которая проводилась на протяжении всей выставки!

Высокопроизводительный вертикальный фрезерный обрабатывающий центр нового поколения DNM 5700

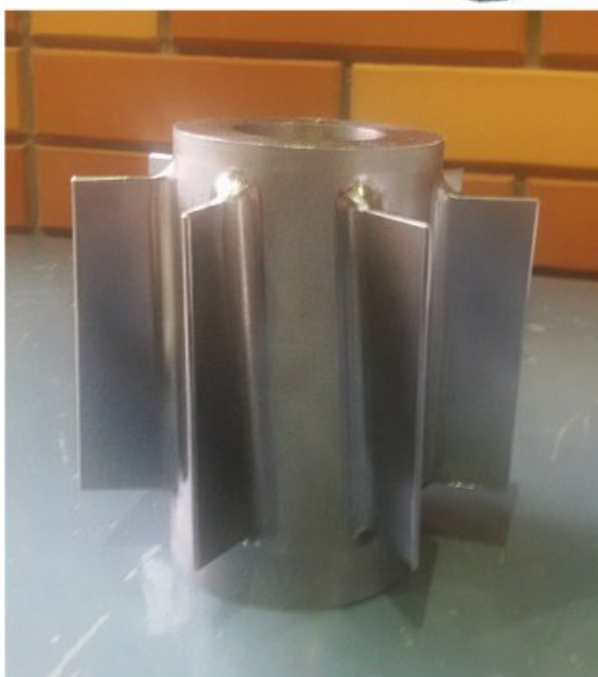
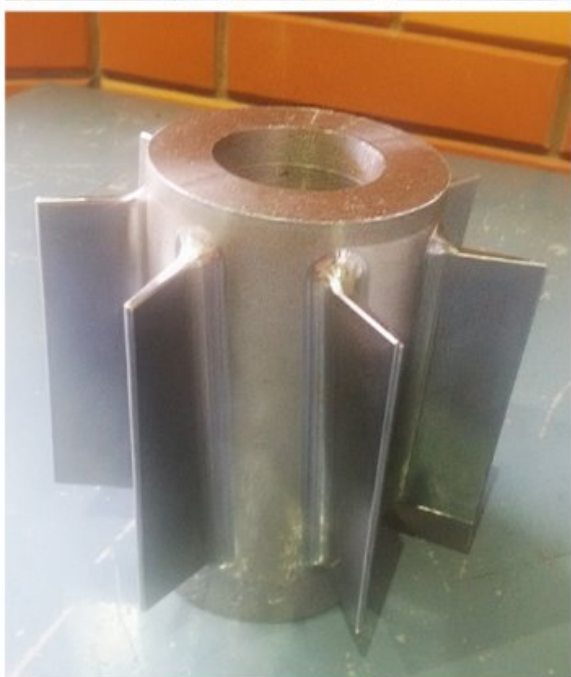
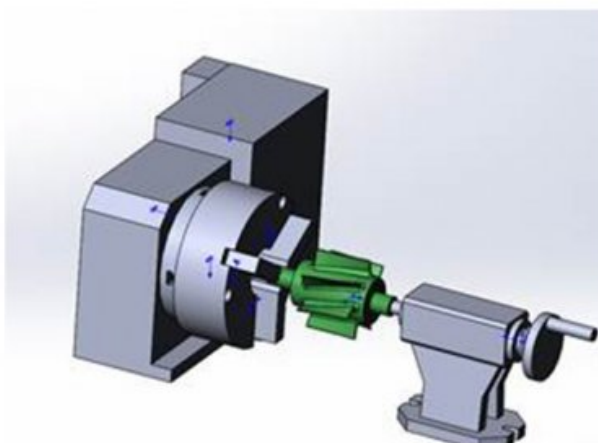


На фрезерном обрабатывающем центре DOOSAN модели DNM 5700 изготавливалась деталь "Блок цилиндров V6" из алюминиевого сплава. Для изготовления данной детали за минимальное количество операций (установок) станок был укомплектован поворотным столом (4-я ось) с поддерживающим столом, между которыми смонтирована переходная плита с приспособлением в виде двухместных тисков.

Деталь обрабатывалась за две операции с шести сторон (наличие 4-й оси позволило сократить обработку детали с 6 операций).

Основная задача – хорошее качество поверхностей отверстий под цилиндры – была реализована благодаря обработке по круговой интерполяции с использованием монолитной фрезы TaeguTec. В результате, достигнут 8 класс чистоты.

Высокопроизводительный вертикальный фрезерный обрабатывающий центр DNM 400II



На фрезерном обрабатывающем центре DOOSAN DNM 400II изготавливалась деталь "Турбина" из стали 45X. Для изготовления данной детали за 1 операцию станок был укомплектован поворотным столом (4-я ось) с трехкулачковым патроном и задней бабкой, в которые была зажата оправка с заготовкой. Заготовка прошла предварительную подготовку на токарном оборудовании.

Благодаря САМ-программе "ESPRIT" была достигнута оптимальная траектория движения режущего инструмента с минимальным количеством холостых проходов. Основная задача – высокая чистота обработки ($R_a0,4$) на элементе "лопатка" – была реализована благодаря непрерывной обработке с использованием монолитной фрезы TaeguTec.

Компактный токарный центр LYNX 220LC



Возможностью данной модели оборудования является обработка криволинейных поверхностей на торце детали. В качестве образца была выбрана деталь сложной формы – "Колесо". Благодаря применению инструмента TaeguTec серии T-Clamp во время демонстрационной обработки удалось достичь зеркальной криволинейной поверхности на торце изделия. Кроме этого, проводилась демонстрация синхронизации осей на станках серии Lynx.

Компактный токарный обрабатывающий центр серии LYNX 220LYC

При обработке детали на данном оборудовании Doosan были применены новейшие разработки в токарной обработке компании TaeguTec: серии RhinoTurn, RhinoGroove, QuadRush. А устройство автоматической подачи прутка LNS позволило увеличить степень автоматизации механической обработки.



Компактный токарный обрабатывающий центр серии LYNX 300M



На этом обрабатывающем центре обработка детали осуществлялась с применением фрезерной функции и круговой интерполяции по осям X и C. В режиме реального времени посетителям выставки продемонстрировали превращение металлической заготовки в изделие – "Спиннер". Специалисты сервисного центра и службы технологов компании "ВариТек" грамотно отвечали на вопросы посетителей и демонстрировали процесс обработки тестовых деталей сложных форм, а также особенности каждой модели нашего оборудования.

1.9.3. XVII Международный промышленный форум

В рамках XVII Международного промышленного форума, который проводился с 20 по 23 ноября 2018 года в г. Киеве, компания "ВариТек" продемонстрировала работу пяти моделей металлообрабатывающего оборудования DOOSAN. Технологи компании на протяжении всей выставки сопровождали обработку технологически сложных деталей на выставочном оборудовании и познакомили гостей стенда с особенностями работы каждой представленной модели.

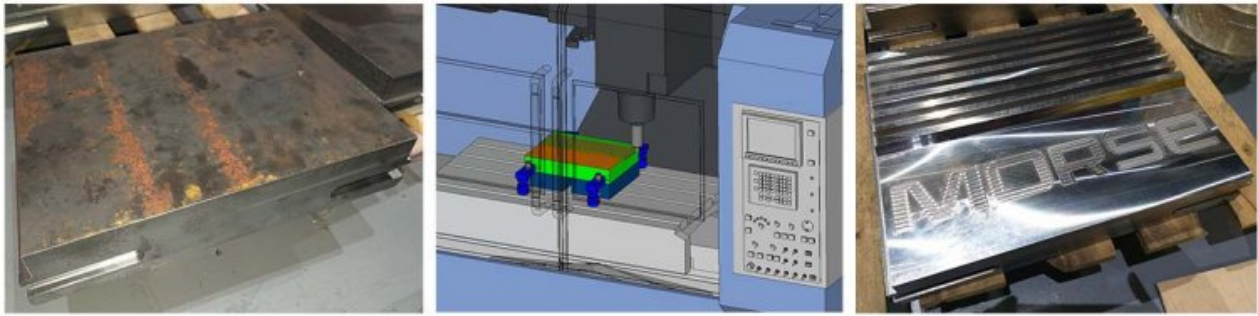
Вертикальный фрезерный обрабатывающий центр MYNX 5400/50



Фрезерный обрабатывающий центр DOOSAN MYNX 5400/50 с большим конусом шпинделя #50 и с направляющими скольжения для нагруженных фрезерных операций демонстрировал силовые характеристики при обработке тестовой детали "Плита" на двух типах операций:

1. Операция №1 "Торцевое фрезерование плоскости". Обработка выполнялась крупногабаритной фрезой $\varnothing 125$ на режимах: скорость резания $V=180$ м/мин, подача $F=0,1$ мм/зуб и глубина резания $A_p=2,5$ мм. Нагрузка на шпиндель составляла всего 60 – 63 %.

2. Операция №2 "Фрезерование пазов". Демонстрация работы оборудования с применением твердосплавной фрезы MORSE $\varnothing 10$ антивибрационной геометрии VIBRAFREE на режимах: скорость резания $V = 120$ м/мин, подача $F_z = 0,03$ мм/зуб и глубина резания $A_p = 20$ мм за один проход.

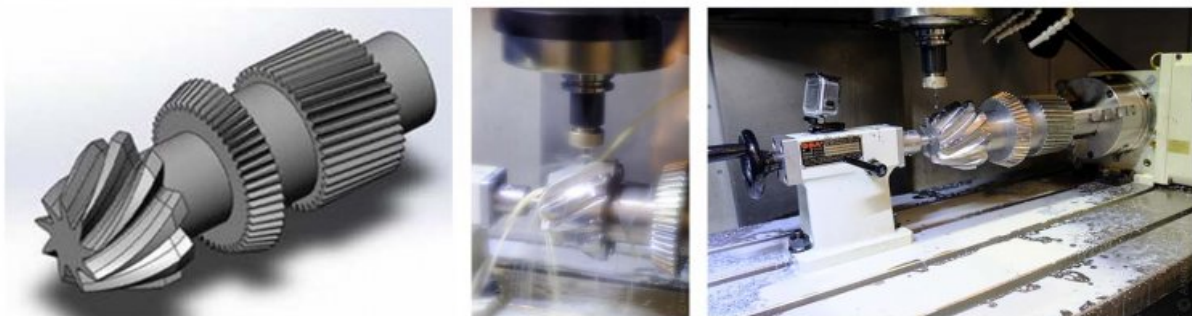


Деталь "Плита": демонстрация станка большой мощности, работа инструмента MORSE при фрезеровании пазов

Высокопроизводительный вертикальный фрезерный обрабатывающий центр нового поколения DNM 5700



Вертикальный обрабатывающий центр DNM 5700 обеспечивает повышенную производительность, высокую точность и превосходное качество обработки. Время смены инструмента (Т-Т-Т) составляет 1,2 с, что в сочетании с высокой точностью перемещений X/Y/Z позволяет существенно сократить время обработки детали.



Деталь "Вал зубчатый"

Проводилась демонстрация обработки зубьев сложной формы, с применением поворотного стола CNC 200R в комплекте с патроном и задней бабкой. Максимальные обороты шпинделя – 12000 об./мин.

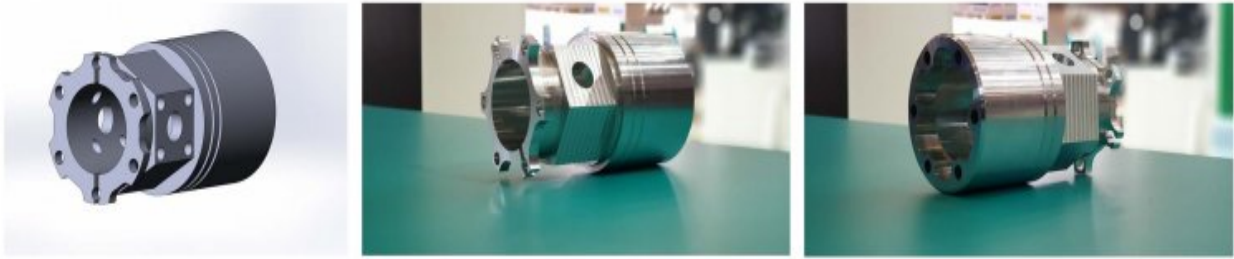
Высокопроизводительный токарный обрабатывающий центр нового поколения LYNX 2100LYB



Серия LYNX создана для производства небольших деталей с непревзойденной точностью и скоростью обработки. Высокоскоростное индексирование револьверной головы и быстрые перемещения минимизируют перерыв между операциями, что обеспечивает эффективную производительность. Токарный центр оснащен револьверной головой и системой ЧПУ и предназначен для обработки деталей в патроне, в центрах и с подачей прутка через шпиндель.

На обрабатывающем центре LYNX 2100LYB проводилась демонстрация следующих операций изготовления сложной детали произвольной формы из алюминиевого сплава:

- наружное точение;
- обработка канавок;
- сверление и растачивание сверлом с механическим креплением пластин;
- фрезерование криволинейных поверхностей на торце детали с помощью оси С;
- сверление отверстий на торце;
- фрезерование шестигранника с осью Y;
- фрезерование отверстия по спирали на диаметре;
- фрезерование пазов грибковой фрезой.



Детали произвольной формы

Высокомощный токарный обрабатывающий центр PUMA 4100B



PUMA 4100B – это высокомощный токарный обрабатывающий центр с револьверной головкой для смены инструмента и системой управления (ЧПУ) FANUC 0i-TF. Передача мощности от двигателя к шпинделю осуществляется через 2х-скоростной редуктор, что обеспечивает при необходимости как высокие обороты шпинделя – до 2000 об./мин, так и достижение максимального крутящего момента – до 2379 Нм.



Деталь "Прокатный валок" и ее обработка на станке

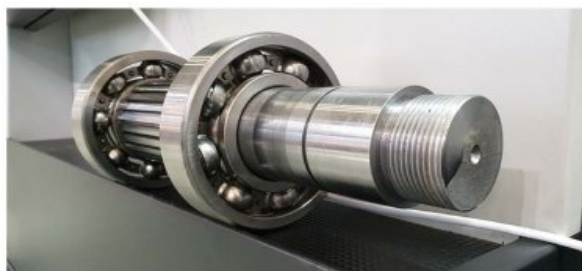
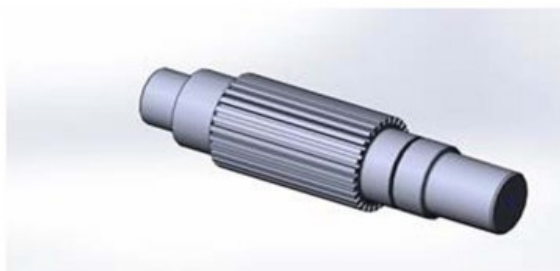
Технические характеристики модели позволили продемонстрировать особенности обработки прокатного профиля на крупногабаритной детали "Прокатный валок".

Высокопроизводительный токарный обрабатывающий центр PUMA GT2600LM



Превосходная точность обработки и расширенные функциональные возможности модели PUMA GT2600LM позволили показать особенности при изготовлении детали "Вал со шлицами", материал Ст. 45:

- нарезка зубьев концевыми фрезами MORSE;
- получение высокого качества поверхности и размеров под подшипник;
- обработка канавок под стопорные кольца;
- работа в люнете.



Деталь "Вал со шлицами"

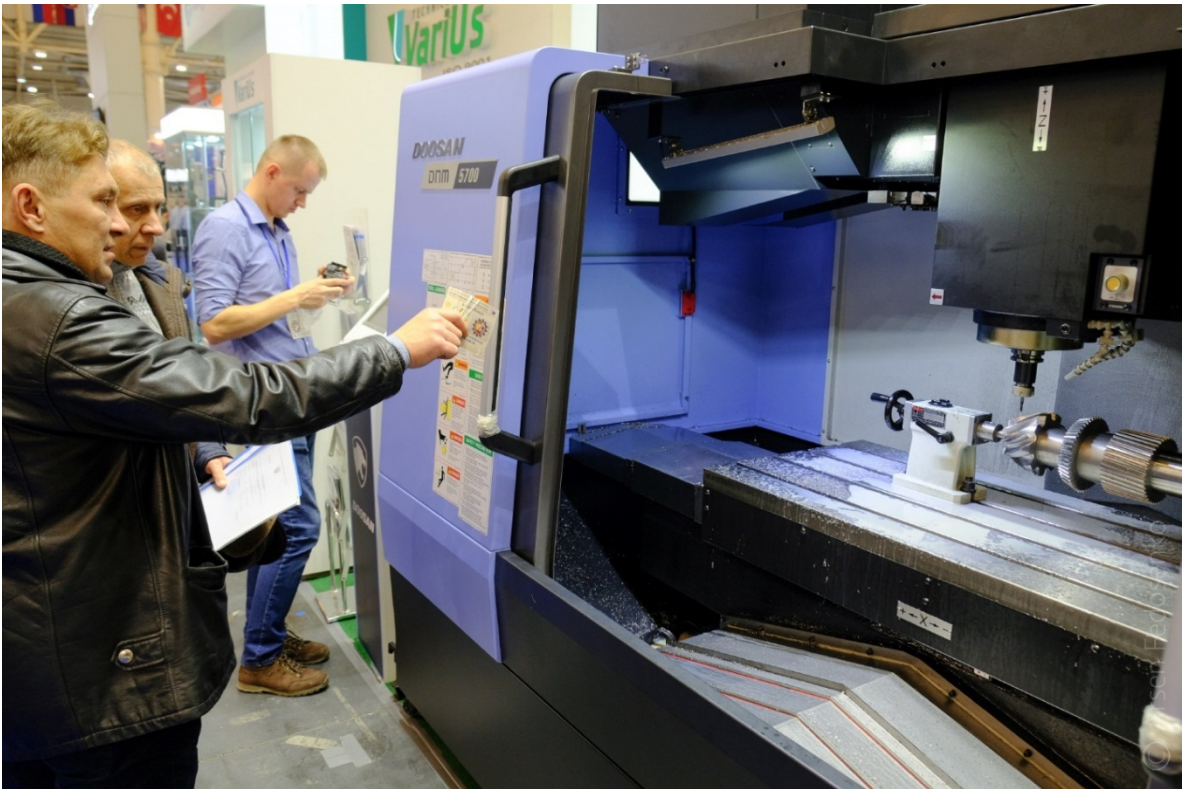
XVII Международный промышленный форум в фотографиях



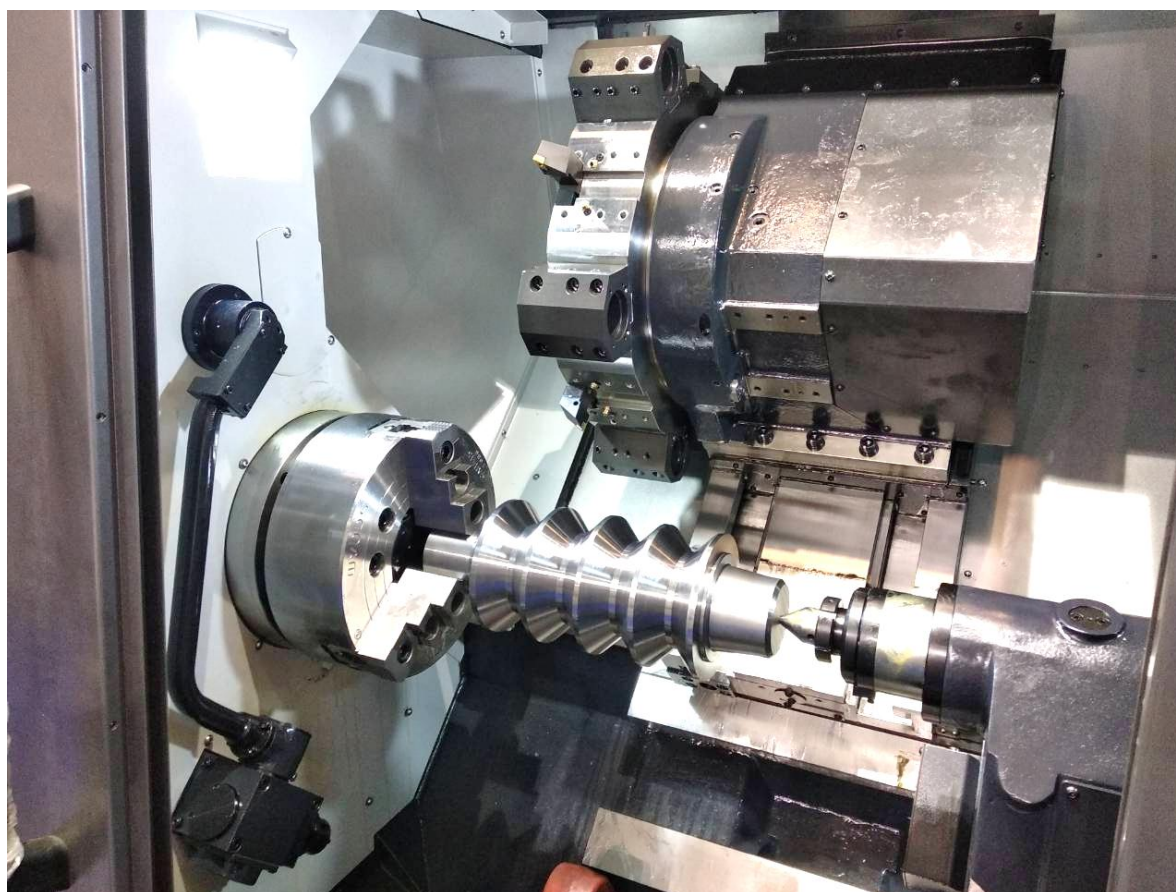
Жовтобрюх В. А. с партнерами компании







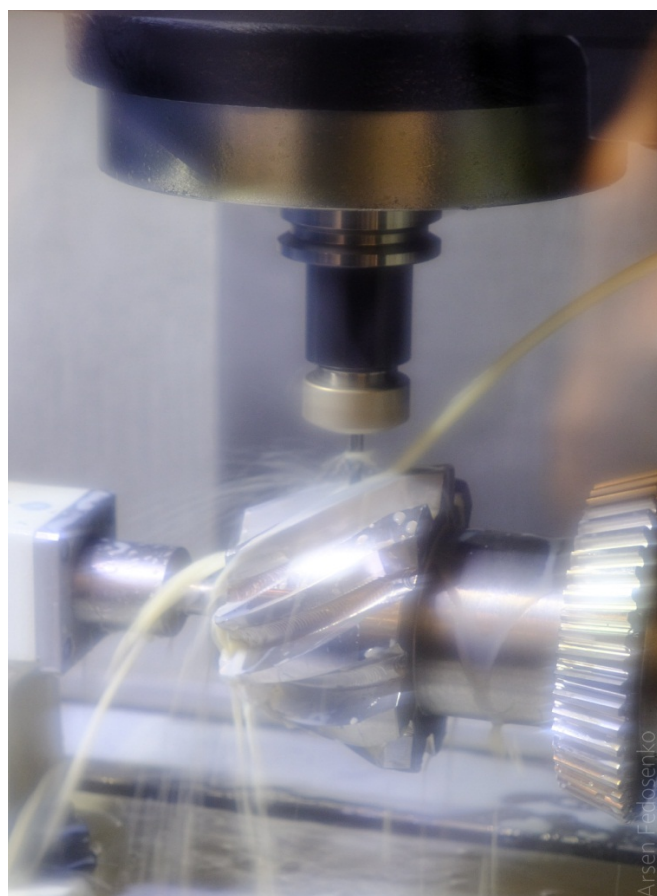
Обработка детали "Прокатный валок"



Высокомощный токарный обрабатывающий центр PUMA 4100B



Обработка детали "Вал зубчатый"







Станки для глубокого сверления LOCH

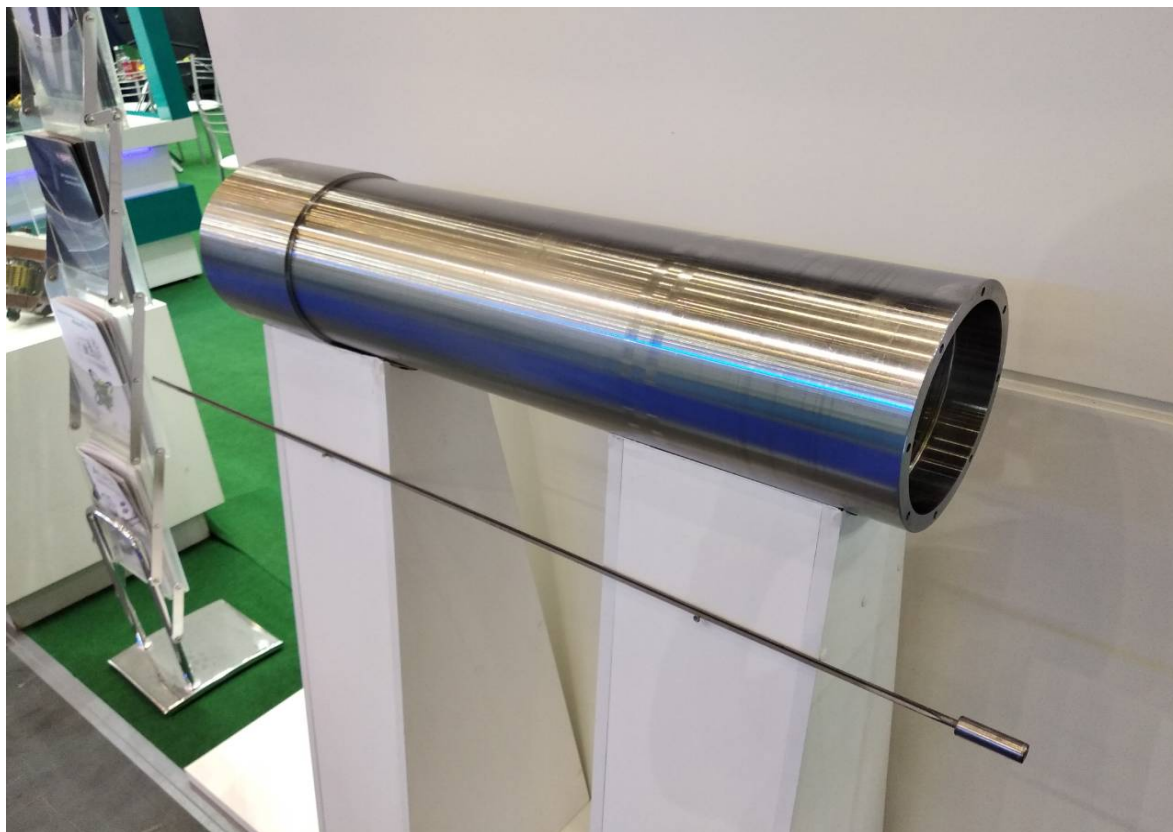




LOCH
PRÄZISIONSBOHRTECHNIK



Деталь, изготовленная на оборудовании LOCHN



Обрабатывающий центр DOOSAN PUMA 4100B



Металлорежущее оборудование DOOSAN





Обрабатывающий центр DOOSAN PUMA 4100B



Компания "ВАРИТЕК" на Промышленном форуме 2018



Металлорежущее оборудование DOOSAN



Гости МПФ-2018 знакомятся с возможностями оборудования DOOSAN



Система мониторинга оборудования



Специалисты ESPRIT® в Украине



Компания "ВАРИТЕК" на Промышленном форуме 2018





Выводы

1. В работе обоснованы возможности эффективного применения и проектирования экологически чистой технологии криогенной обработки, позволяющей снизить температуру в зоне обработки до -196°C и тем самым повысить производительность, качество изделий, стойкость инструмента, а соответственно, прибыльность предприятия, попутно сокращая расход СОЖ и снижая потребление энергии. Показано, что в этом случае появляется возможность обрабатывать детали в 2 – 2,5 раза быстрее, стойкость инструмента в расчете на деталь (объем удаленного материала за единицу времени) увеличивается в 2 – 2,5 раза, а это приводит к более, чем двукратной экономии на закупках инструмента при сохранении объема производства данных деталей. Повышение производительности обеспечивает снижение всех производственных затрат и себестоимости изделий, обеспечивает ускорение поставок для заказчиков и увеличение объема выполняемых заказов.

2. Обоснованы технологические возможности, области эффективного применения и условия проектирования современных технологий производства с применением токарных металлорежущих инстру-

ментов (производства ведущих зарубежных компаний) с новейшими CVD- и PVD-покрытиями твердосплавных режущих пластин, обеспечивающих значительное увеличение производительности металлообработки. Предложены новые режущие пластины из твердых сплавов марок TT7005 и TT7015 с многослойным покрытием, которое наносится методом CVD, являющиеся лучшим выбором для обработки серого и высокопрочного чугуна, обеспечивая высочайшую производительность без риска увеличения расхода инструмента. Предложены новые КНБ сплавы: ТВ610, ТВ670, ТВ730, обладающие высокой производительностью при обработке закаленной стали и чугуна.

3. Определены перспективные направления применения систем и инструментов для обработки отверстий производства компании Swiss Tools Systems AG: прецизионные головки для расточки высокоточных отверстий от диаметром от 3 мм до 88 мм; чистовые расточные системы для обработки точных отверстий диаметром от 3 мм до 320 мм; расточные головки серии D44.080.086.112 для черновой обработки отверстий диаметром от 86 мм до 402 мм. Показано, что растачивание отверстий диаметром от 150 мм до 2205 мм можно осуществить мостами-переходниками, выполненными из прочного, но легкого материала. Диапазон отверстий диаметром от 130 мм до 655 мм может быть реализован сменой 10 мостов-переходников.

4. Определены перспективные направления применения высокоточных и производительных метчиков от компании Morse. Для отвода стружки в конструкции метчиков предусмотрены стружечные канавки, прорезанные под прямым или винтовым углом. Для высокопроизводительной обработки сквозных отверстий компания Morse представляет метчики с прямыми канавками и винтовой подточкой, форма заборной части которых имеет 4 – 5 ниток, что облегчает процесс нарезания внутренней резьбы благодаря свободному выталкиванию стружки в направлении подачи. Для нарезания резьбы в глухих отверстиях предложены метчики с правосторонними спиральными канавками под углом 40° и заборной частью в 2 – 3 нитки, позволяющие выводить стружку вверх, не допуская ее пакетирования на дне отверстия и повреждения режущих кромок. Показано, что в конструкции резьбонарезного инструмента Morse предусмотрены несколько типов хвостовиков: тонкий (DIN376, DIN374) и утолщенный (DIN371) для увеличения жесткости метчика, а важнейшим преимуществом инструмента компании

Morse является широчайший выбор вариантов режущих материалов и покрытий, позволяющих решить любую задачу с наибольшей эффективностью.

5. Показано, что станочная оснастка компании Swiss Tools Systems AG позволяет максимально эффективно использовать рабочее пространство обрабатывающего центра и обеспечивает повышение производительности обработки, например, за счет разработки и применения высокопрецизионных расточных систем для обработки отверстий на фрезерных центрах. Отмечается, что специалисты этой компании первыми внедрили на ряде высокотехнологичных предприятий прецизионный приводной и стационарный инструмент, используемый с единой стандартной оснасткой. Для практического использования в работе предлагается эффективная револьверная головка с инструментальными блоками Swiss Tools, прецизионная регулировка инструмента прямо на шпинделе станка от компании Swiss Tools. Рассмотрены основные преимущества систем с цифровой регулировкой.

6. Приведены реализованные проекты Инженерно-Технического Центра "ВариУс" по токарной и фрезерной обработке сложнопрофильных деталей с обеспечением высоких показателей точности, качества и производительности. Даны практические рекомендации по эффективному использованию в производстве разработанных технологий механической обработки.

7. Обобщен опыт участия Инженерно-Технического Центра "ВариУс" на ежегодных Международных промышленных форумах оборудования и инструмента для металлообработки, проводимых в г. Киеве. Представлены основные направления деятельности Инженерно-Технического Центра "ВариУс" и показаны результаты применения современных технологий производства на промышленных предприятиях Украины, что позволило подойти к решению важной и актуальной проблемы технического перевооружения предприятий и создания конкурентоспособной машиностроительной продукции.

Раздел 2

Технологические возможности современных металлорежущих станков с ЧПУ, применяемых на предприятиях Украины

2.1. DOOSAN снова вырывается вперед с серией вертикальных обрабатывающих центров Mynx!

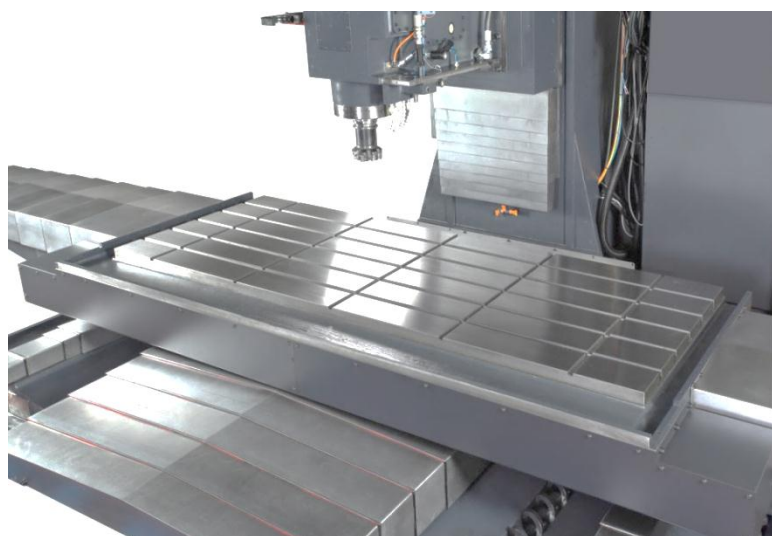


Рис. 2.1. Вертикальный обрабатывающий центр Mynx

Подбор идеального состава игроков – главный метод тренера любой профессиональной футбольной команды на пути к завоеванию Кубка Чемпионов. При этом наставнику даже самого сильного клуба важно понимать, как запланированные им и разученные игроками тактические схемы сработают на поле в условиях реальной игры.

У компании DOOSAN также есть собственная программа развития и стремления к победам. И основана она не на теоретических выкладках или надежде на чудесный технологический прорыв. Только на собственных технических знаниях и опыте менеджмента предприятия. Особое внимание, так же как и в спорте, уделяется "специальным игрокам" – сериям станков, разработанным под конкретные задачи. Например, если производство специализируется на тяжелой обработке металлов с повышенным срезанием удаляемого в стружку материала, то стоит подумать о "включении в игру" вертикального обрабатывающего центра серии Мунх (рис. 2.1).

Крепкий сверхмощный игрок DOOSAN

Независимо от того, "играет" ли ваше предприятие "на своем поле" – предоставляя решения для технологически отработанных отраслей промышленности, или задача для вас незнакома – вертикальный центр Мунх продемонстрирует непревзойденную мощность обработки и высокую производительность для самых разных производственных потребностей.

Фрезерные обрабатывающие центры данной серии спроектированы и построены так, чтобы "держат строй" при встрече с труднообрабатываемыми материалами, такими как титан, жаропрочные сплавы или инструментальная сталь. К тому же, эти станки отличаются высокой жесткостью: станина Мунх специально спроектирована с коробчатыми направляющими скольжения по всем осям. Таким образом, когда начинается обработка на повышенных режимах, конструкция станков DOOSAN не только позволяет уменьшать вибрации, но и получать детали чрезвычайно высокой точности.

Мунх – многофункциональная линейка оборудования

Для обработки более широкого ассортимента заготовок всегда полезно иметь большую скамью запасных, продолжая аналогию с тщательно подобранной командой футболистов. Вот почему универсальная серия Мунх предлагает вариативность при выборе скорости вращения шпинделя (от 6000 до 12000 об./мин) с конусами CAT40 и

CAT50, а также диапазон габаритов стола по оси X, который начинается с 1200 мм и может достигать до 2500 мм. Такой функционал и широкая размерная линейка оборудования DOOSAN позволяет легко собрать выигрышную комбинацию под конкретные операции производства, не забывая об экономии при инвестировании.

Диапазон решаемых задач станками данной серии можно представить, учитывая, что шпиндели в серии оборудования Mynx способны комплектоваться как сверхточным прямым приводом, так и сверхмощным 2-ступенчатым редуктором. Инструментальная система BIG-PLUS с двумя точками контакта является стандартной и обеспечивает одновременный двойной контакт конуса и фланца инструментальной оправки для достижения повышенной жесткости и идеального контроля вылета инструмента. Выбирайте систему привода шпинделя и технические характеристики станка, которые идеально подойдут под ваши типы обрабатываемых материалов.

Mynx решает задачи украинских производств на протяжении почти 10 лет



Рис. 2.2. Станок DOOSAN модели Mynx 7500 (конус #40)

Компания ВариТек, являясь эксклюзивным представителем оборудования DOOSAN в Украине, не только предоставляет оптимальную модель станка по отличной цене, но и полный комплекс автоматизации производства, лучший сервис, технологическую поддержку при вводе оборудования в эксплуатацию и отработку технологии.

Приведем несколько примеров реализации проектов "под ключ" с поставкой оборудования Мунх предприятиям Украины.

На инструментальный участок запорожского сталелитейного предприятия был поставлен станок DOOSAN модели Мунх 7500 (конус #40) для изготовления различной литейной оснастки из серого чугуна (рис. 2.2). Оборудование работает бесперебойно уже 8 лет.

На этапе разработки управляющих программ использовалась САМ-система ESPRIT, позволившая в кратчайшие сроки рассчитать оптимальную траекторию движения инструмента, обсчитав сложную конфигурацию 3D-моделей деталей (рис. 2.3).

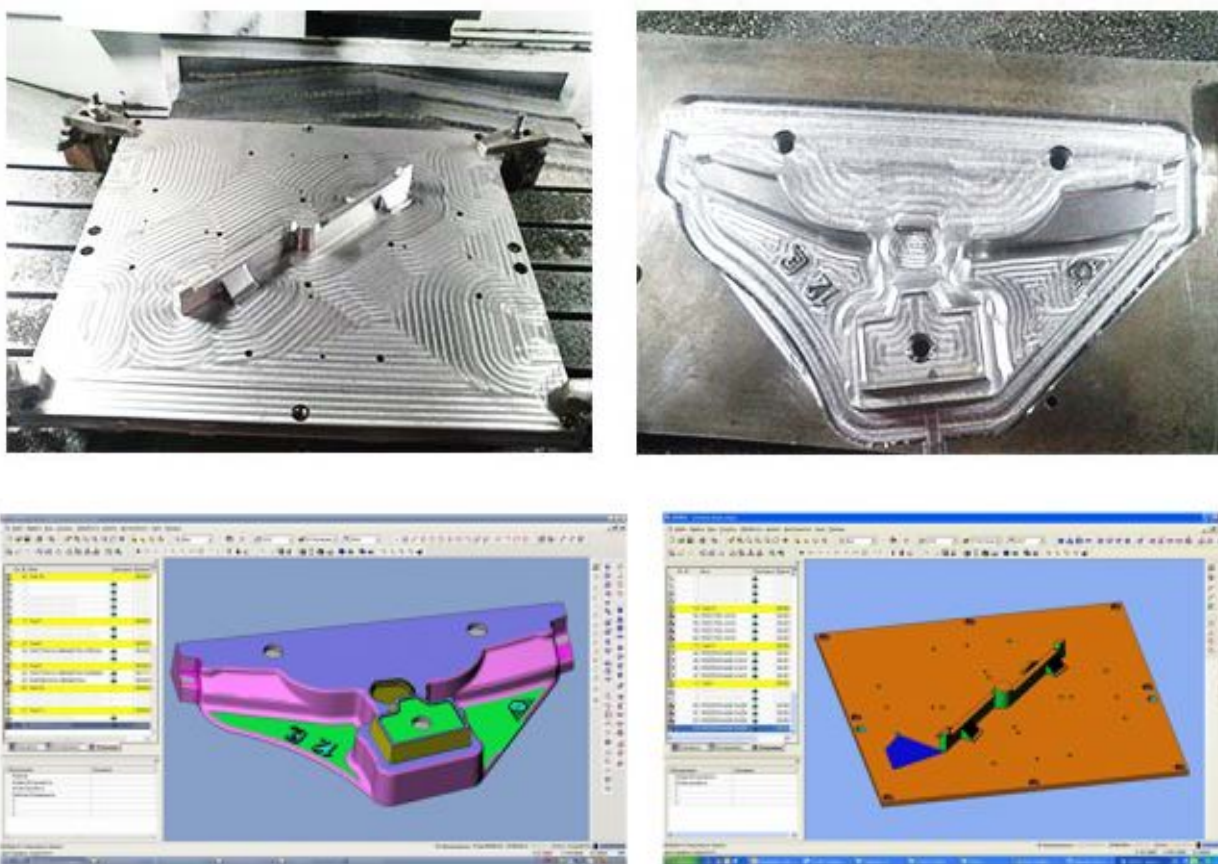


Рис. 2.3. Обработанные детали и конфигурации 3D-моделей деталей

Благодаря внедрению высокопроизводительного фрезерного центра DOOSAN и режущего инструмента производства компании TaeguTec (на черновых операциях – черновые фрезы CHASE2FEED; на чистовых переходах – чистовые фрезы FINEBALL), удалось значительно повысить точность обрабатываемых деталей, а также в 3 – 4 раза сократить время обработки в сравнении с ранее применявшейся технологией на предприятии.

На другом машиностроительном предприятии было запущено несколько вертикальных обрабатывающих центров Mynx 5400/50 (конус #50) (рис. 2.4) для серийного производства деталей насоса (рис. 2.5) в круглосуточном режиме.



Рис. 2.4. Станок DOOSAN модели Mynx 5400/50 (конус #50)

Для производства данных деталей, кроме использования стандартного режущего инструмента, была спроектирована и изготовлена специальная фасочная фреза TaeguTec с механическим креплением пластин для изготовления заходной фаски 20° в отверстиях под запрессовку втулок (рис. 2.6).



Рис. 2.5. Детали насоса

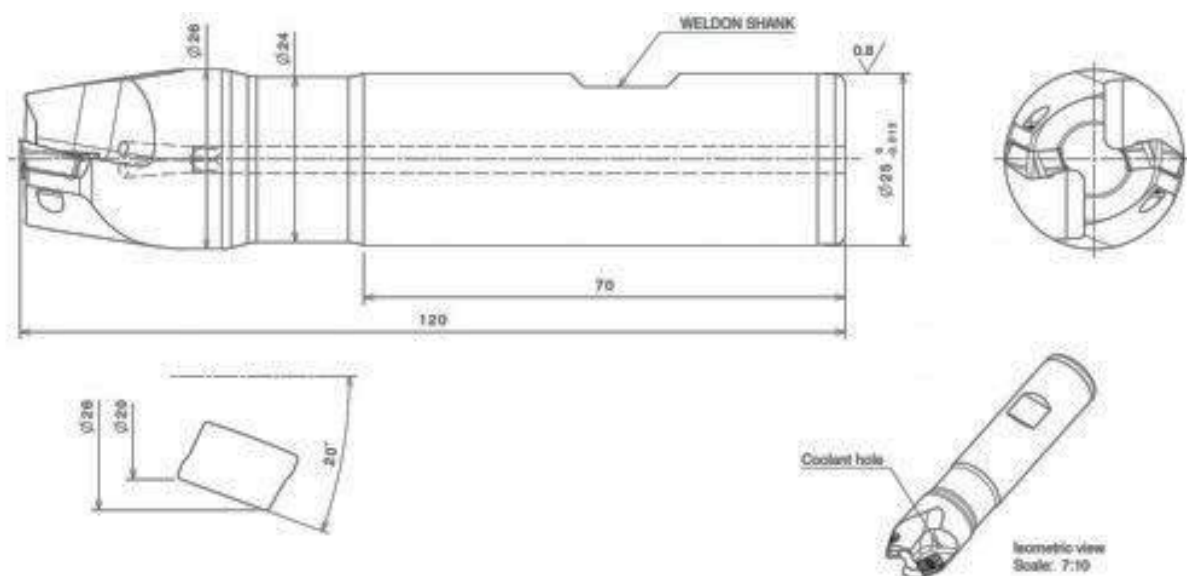


Рис. 2.6. Специальная фасочная фреза TaeguTec с механическим креплением пластин

Львиную долю обработки таких изделий составляли операции сверления и последующей расточки. Для достижения производительности и стойкости инструмента была установлена опция "Подача СОЖ через шпиндель 70 бар".

Управление временем с EOP

Программное обеспечение Easy Operation Package (EOP) – это тренер с мировым именем для вашей сборки. Эксклюзивная разработка DOOSAN, выполненная в виде удобного меню, позволит не только сократить время наладки, но и упростить общие задачи, снижая вероятность ошибок. Во время разработки уникального продукта EOP были добавлены полезные функции, позволяющие сократить время работы, защитить оборудование и инструмент, улучшить качество обработки и ускорить техническое обслуживание. Функционал Программного обеспечения EOP стал интуитивно понятным как для опытных пользователей, так и для нового поколения операторов, которые выросли на смартфонах и прочих современных гаджетах.

Дополнительные возможности серии

Необходимо больше инструментов?

Независимо от того, есть ли у вас 24, 30 или 40 инструментов, на свой Mupx вы сможете легко выбрать подходящее устройство автоматической смены инструментов. Замена тяжелого инструмента или инструмента с большим диаметром – тоже не проблема, а явное преимущество данной серии станков.

Если вы чувствуете, что уже вышли на позицию для решающего удара по мячу, и вам просто нужна небольшая помощь, чтобы достичь успеха, обратитесь в Представительство и Сервисный Центр DOOSAN в Украине: Компанию "ВариТек". Это мудрое решение.

2.2. Все в восторге от 5-осевой обработки: компактные вертикальные обрабатывающие центры DOOSAN серии DVF

Металлообрабатывающие производства все чаще заявляют, что современные детали разнообразных и сложных форм являются весомой долей их ассортимента. А передача заготовок между станками – слишком большая и дорогостоящая трата времени. Внимательно выслушав заказчиков, инженеры DOOSAN MACHINE TOOLS разработали революционную модель оборудования – новую серию компактных 5-осевых вертикальных обрабатывающих центров DVF!

Основные возможности серии DVF

Что за магическое решение придумали инженеры DOOSAN на этот раз? Вот основная информация. DVF – это новый 5-осевой вертикальный обрабатывающий центр, который полностью укомплектован для выполнения разнообразной 5-сторонней обработки или одновременных 5-осевых операций. Одним словом, это металлорежущее оборудование для удовлетворения самых разных потребностей клиентов. Линейка состоит из модели DVF 5000 (рис. 2.7) и старшего брата DVF 8000 (рис. 2.8).

DVF 5000 поставляется со стандартным конусом шпинделя BT 40 и скоростью вращения 18000 об./мин. Панель управления ЧПУ FANUC 31iB5 обеспечивает полную одновременную 5-осевую обработку, а, значит, и возможность непрерывной контурной обработки.

Модель оснащена встроенным поворотным столом диаметром 500 мм (630 мм – опционально). Уникальный стол с боковой поддержкой обеспечивает максимальную рабочую нагрузку 400 кг, при этом исключает любое его отклонение (провисание). Специально разработанный поворотный стол прост в использовании и эффективен в работе, минимизирует помехи при обработке детали.

Модель DVF 8000 включает основные функции своего младшего брата – DVF 5000. Но при этом она имеет качественно другую структу-

ру конструкции и дополнена множеством полезных опций. Так, станок DVF 8000 оснащен двумя шарико-винтовыми парами и двигателями на оси Y, а также двойными приводами, управляющими осью A и прямым приводом по оси C.



Рис. 2.7. 5-осевой вертикальный обрабатывающий центр DVF 5000



Рис. 2.8. 5-осевой вертикальный обрабатывающий центр DVF 8000

Увеличены и габариты рабочей зоны: более крупный поворотный стол (диаметр 800 мм) поддерживает максимальную нагрузку до 1400 кг! Стол с двумя приводами вращается со скоростью 60 об./мин, т.е., обеспечивая еще больше производимых изделий за единицу времени. Хотите узнать подробнее о серии DVF? Смотрите популярные вопросы и ответы на них ниже.

Вопрос: Можно ли автоматизировать серию оборудования DVF для выполнения обработки без оператора?

Ответ: Вертикальные обрабатывающие центры DVF предлагают широкий выбор специально разработанных функций и возможностей автоматизации, которые делают их идеальными для обработки в автоматическом режиме. Они могут поставляться полностью готовыми к автоматизации и снабжаться устройством автоматической смены паллет (AWC, Auto Work Changer), за счет этого модель получает дополнительную производительность. Для модели DVF 5000 предусмотрено 8 единиц паллет.

Вопрос: Сколько позиций инструмента может вмещать серия станков DVF?

Ответ: Стандартная комплектация DVF 5000 поставляется с автоматическим сменщиком инструмента и сервоприводом на 30 позиций (инструментальные АТС на 40, 60, 90 и 120 позиций являются дополнительными). Станок DVF 8000 поставляется с АТС на 40 позиций (АТС на 60, 90 и 120 позиций являются дополнительными). Данная опция позволяет использовать больше инструментов для обработки сложных деталей различных профилей.

Вопрос: Как насчет долговременной точности?

Ответ: Стандартная система тепловой компенсации DOOSAN предусматривает наличие ряда датчиков в критических точках конструкции (например, в узлах станины, колонны и головы шпинделя), сводя, таким образом, к минимуму любые эффекты теплового расширения. Серия DVF также оснащена направляющими качения роликового типа для достижения повышенной скорости при приличной жесткости.

Вопрос: Как они справляются со стружкой?

Ответ: Безупречно. 12 насадок для подачи СОЖ в область обработки полностью вымывают всю стружку во всех направлениях. Также предусмотрен большой объемный резервуар для сбора отработанного материала и защитный затвор магазина инструментов от попадания

стружки в посадочные места АТС. Доступен также транспортер боковой загрузки для удаления стружки.

Вопрос: Можно ли установить DVF в цех с ограниченным пространством?

Ответ: Можно, не сомневайтесь! Компактная конструкция станка позволяет установить его даже там, где производственная площадь ограничена или идет борьба за каждый миллиметр. Площадь модели DVF 5000 составляет 2,700 x 2,205 мм, а DVF 8000 – 4,097 x 3,188 мм.

Вопрос: Какова ширина дверного проема?

Ответ: Обе модели отличаются более широкими дверными проемами для легкого фронтального доступа оператора. Ширина двери у модели DVF 5000 ... 900 мм, а у DVF 8000 ... 1000 мм.

Работая с DOOSAN, предприятия не просто выбирают оптимальную модель станка по отличной цене, но и полный комплекс автоматизации производства, лучший сервис, технологическую поддержку при вводе оборудования в эксплуатацию и отработку технологии. И все это входит в стандартную стоимость станка!

2.3. Станки DOOSAN укрощают титан

Когда самолет взмывает в небо с сотнями пассажиров на борту, их окружают тонны титана. Инженерам аэрокосмической отрасли очень нравится этот материал. Основным преимуществом титана является высокое отношение предела прочности к весу – проще говоря, он суперлегкий, но при этом обладает колоссальным пределом прочности при растяжении. Именно этот параметр важен при эксплуатации воздушного транспорта. Антикоррозионные характеристики титанового сплава (рис. 2.9) делают этот материал привлекательным не только в аэрокосмической промышленности, но также в автомобилестроении и даже для медицинского применения. К слову, у пилота, управляющего самолетом с каркасом из титана, может быть коленный или тазобедренный сустав из титана. Звучит как идеальный материал, не правда ли?

Крепкий орешек в металлообработке

И другой парадокс: даже если вы высококвалифицированный оператор станка, которому доверили производство весьма дорогих изделий из титана, скорее всего, вас не слишком воодушевит обработка титановых заготовок. Полезные на практике качества титана делают

его достаточно сложным материалом для механической обработки на станках. Твердость и сопротивление резанию металла с высоким содержанием никеля (в титано-никелевых сплавах) при резании приводят к выделению огромного количества тепла и, как следствие, к стремительному износу режущего инструмента. Приходится чаще заменять дорогостоящие режущие пластины или инструмент в целом, чаще останавливать станок для наладки или снижать режимы обработки, что, соответственно, влечет за собой и увеличение затрат на механическую обработку.

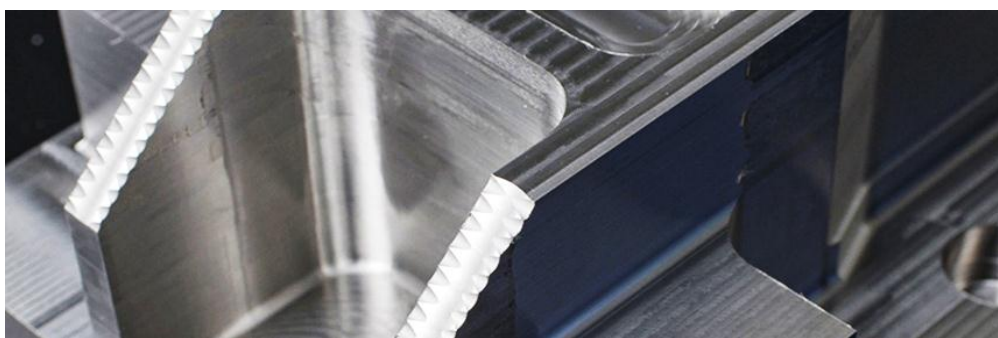


Рис. 2.9. Сложнопрофильная деталь из титанового сплава

При обработке резанием на недостаточно жестком оборудовании титан может "нахально" вибрировать, скалывая режущую кромку, а при неправильно выбранных режимах – стирать режущий инструмент или налипать на режущую кромку. И даже опытному специалисту будет не просто выбрать "золотую середину" в определении оптимальных подач и скоростей, чтобы избежать последствий. Обработать медленно, но глубоко? Или быстро, но тонкими слоями? Даже время, затрачиваемое на решение всех этих вопросов, влияет на итоговый результат. Тем временем заказчик ждет детали "на вчера".

Однако есть хорошая новость – DOOSAN предлагает станочные решения для легкой и эффективной обработки титановых сплавов. Вне зависимости от планируемого вами объема производства и бюджета, важно понимать, что очень немногие производители станков в мире могут предложить оборудование для производства титановых изделий. DOOSAN же имеет целый ряд станков, которые способны обрабатывать титановые заготовки любых размеров. Обработать производительно и стабильно на протяжении многих лет.

Среди моделей металлорежущего оборудования DOOSAN представлены станки для работы с труднообрабатываемыми материалами.

Поэтому, работая с DOOSAN, задача сложной механической обрабатываемости титана решается выбором подходящего для конкретного технологического процесса станка.

Например, для тех, кому требуется обработка на тяжелых режимах резания, доступны вертикальные и горизонтальные обрабатывающие центры с коробчатыми направляющими скольжения, шпинделем с конусом #50 и редуктором.

Фрезерные обрабатывающие центры MYNX



Рис. 2.10. Фрезерный обрабатывающий центр MYNX

Фрезерные обрабатывающие центры MYNX (рис. 2.10): высокая скорость и мощность обработки, работа при тяжелых режимах резания и сохранение точности обработки в течение длительного времени, благодаря жесткой конструкции с плоскими направляющими скольжения и жестким конусом #50.

Можно выбрать модель с линейными направляющими роликового типа и шпинделем с прямым подключением двигателя, которые обеспечивают большой крутящий момент и высочайшие скорости холостых передвижений. Идеальная комбинация свойств для выполнения чистовых операций при обработке титана.

Вертикальные обрабатывающие центры DNM 6700

Вертикальные обрабатывающие центры DNM 6700 (рис. 2.11) обеспечивают повышенную производительность, высокую точность и превосходное качество обработки. 8000 – 12000 об./мин – прямой привод шпинделя, большая рабочая зона, жесткая литая конструкция,

удобное управление, большие габариты обработки, повышенная стабильность обработки. Опционально доступен шпиндель с частотой вращения 15000 – 20000 об./мин.



Рис. 2.11. Вертикальный обрабатывающий центр DNM 6700

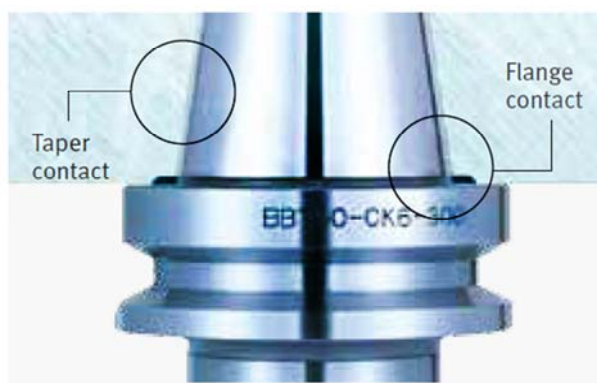


Рис. 2.12. Инструментальная оправка

Двойной зажим типа Big-Plus®taper инструментальных оправок (рис. 2.12) является стандартным для всех обрабатывающих центров DOOSAN, что дает возможность сочетать и экспериментировать с инструментом в широком диапазоне режимов, совершенствуя технику обработки наилучшим для вас образом.

5-осевые металлорежущие станки (отличный вариант для сложных контурных деталей в медицинской или аэрокосмической промышленности) обеспечивают полный цикл обработки изделия: от сырого полуфабриката до готовой детали.

5-координатные обрабатывающие центры VC 630/5AX

Серия 5-координатных обрабатывающих центров VC 630/5AX (рис. 2.13) обеспечивает высокую производительность, точность и скорость обработки сложных и дорогостоящих изделий.



Рис. 2.13. 5-координатный обрабатывающий центр VC 630/5AX

Подбираете универсальную модель обрабатывающего центра?

В линейке многофункциональных токарно-фрезерных станков серии PUMA SMX доступны направляющие гибридного типа (коробчатые/линейные), обеспечивающие хорошее сочетание жесткости и скорости.

Высокоточные токарно-фрезерные станки серии SMX

Высокоточные токарно-фрезерные станки серии SMX (рис. 2.14) позволяют выполнять различные операции: от простейших токарных и фрезерных до сложной многокоординатной синхронной обработки. Одно и двух шпиндельное исполнение, стандартный магазин инстру-

мента на 60 мест с возможностью увеличения, мощный фрезерный поворотный шпиндель и другие позволяет выполнять самые сложные изделия для авиакосмической и энергетической отраслей за одну установку.



Рис. 2.14. Высокоточный токарно-фрезерный станок серии SMX

Если же вы решили, что существующий технологический процесс с применением горизонтального токарного центра можно существенно улучшить путем обработки на вертикальной компоновке токарного центра (с функцией фрезерования либо без нее) – выбирайте подходящую модель из линейки вертикальных токарных центров PUMA VTS.

Вертикальные многофункциональные токарные центры PUMA VTS1214

Вертикальные многофункциональные токарные центры PUMA VTS1214 (рис. 2.15) с ползунковой шпиндельной бабкой предназначены для работы с тяжелыми по весу изделиями при высоких нагрузках. С достижением наилучшей производительности и высокой точности обработки, а также для ответственной обработки внутренних отверстий высотой до 2000 мм.

Постоянный контроль процесса обработки

Кроме оптимальных для обработки титана параметров станков DOOSAN, следует уделить внимание стойке ЧПУ.



Рис. 2.15. Вертикальный многофункциональный токарный центр
PUMA VTS1214

DOOSAN является одним из крупнейших в мире пользователей панели управления FANUC. Smart Machine Control FANUC имеют адаптивную функцию управления подачей, которая оптимизирует скорость подачи в зависимости от условий работы станка: нагрузки, температуры и положения. Такая функция легко программируется и полезна при обработке труднообрабатываемых материалов, таких как титан. С ней вы сможете быстрее найти "золотую середину", будь то время обработки, чистота поверхности или стойкость инструмента, которая соответствует задачам вашего производства. Таким образом, станки DOOSAN одними из первых в мире становятся на дорогу, ведущую

наших Клиентов к созданию идеального производства. Когда станочный парк и персонал обмениваются между собой информацией, помогая друг другу оптимизировать затраты, снизить до нуля незапланированные простои и минимизировать потери на перерасходе инструмента и оснастки.

DOOSAN всегда подстрахует

Преимуществом компании DOOSAN является постоянное совершенствование и расширение модельного ряда станков для выполнения ответственных задач любой сложности. В том числе, для обработки труднообрабатываемых материалов. Мы всегда думаем наперед, чтобы первыми представить нашим клиентам прогрессивные методы производства изделий из титана или для других сложных задач. К примеру, вы когда-нибудь слышали о криогенной обработке? Это всего лишь один из случаев разработки инновационных технологий, которые инженеры DOOSAN создают совместно с 5ME® Cryogenics.

Ускорение автоматизации

В дополнение к титанообрабатывающим станкам, компания DOOSAN предлагает повысить ценность вашего производства с помощью полного комплекса систем автоматизации.

Давайте будем откровенны. У каждого активного собственника производственного предприятия есть планы по развитию производства. Но под вашей дверью вряд ли стоит очередь квалифицированных операторов-станочников, да и вообще достойных соискателей на любую ответственную работу. Все мы знаем, как сложно найти хорошего оператора. Тем более для ответственных операций по обработке дорогостоящего титана.

Решением этой известной многим компаниям сложности является процесс автоматизации производства. Что если, к примеру, подключить линейную систему паллет к нескольким станкам? Такое решение может значительно ускорить производство. Кроме того, вероятно, следует установить в промышленную линию станки с коробчатыми направляющими скольжения для тяжелых черновых операций и станки с быстрыми линейными направляющими роликового типа для более легких и чистовых работ. Только представьте, как удобно! Оказывается, механическая обработка титана может быть не такой и сложной. Да и обслуживать ее будет всего 1 оператор и 1 технолог (на несколько таких линий).

Какими бы ни были задачи по изготовлению титановых изделий, у DOOSAN имеются решения для их реализации. Работая с DOOSAN, предприятия не просто выбирают оптимальную модель станка по отличной цене (что само по себе неплохо), но и полный комплекс автоматизации производства, лучший сервис, технологическую поддержку при вводе оборудования в эксплуатацию и отработку технологии. И все это входит в стандартную стоимость станка!

2.4. Удобная автоматизация с помощью DooCell!

Вы периодически задумываетесь об автоматизации производства, не так ли? И все чаще встречаете роботов-помощников на выставках, в цехах, на автоматических сортировочных линиях. Конечно, их возможности, скорость и эффективность работы завораживают и подключают "коммерческую жилку". Но жизненный опыт не дает взглянуть в будущее: "Автоматизация – слишком серьезный шаг для небольших производств, вроде нашего". И добавляет: "Слишком дорого – будь реалистом!".

Автоматизируйте, а не сомневайтесь!



Рис. 2.16. Автоматизация производства с роботом DooCell

Мы готовы развеять все сомнения и познакомить с новым продуктом, разработанным специально для небольших и средних производств. Это – элемент автоматизации "DooCell" (рис. 2.16), который уже сегодня позволит внедрить все те идеи, о которых вы давно задумываетесь.

Только представьте! Больше никаких остановок для загрузки и выгрузки детали. Снижается себестоимость, увеличивается время эффективной работы оборудования. И все это при сравнительно небольших инвестициях, если учесть эффект от увеличения производственной программы.

Большая польза при малых габаритах

DooCell имеет модульную конструкцию для быстрой установки в ограниченное пространство (рис. 2.17). Фактически, вы можете объединять от 1 до 3 новых или существующих единиц оборудования DOOSAN в разных конфигурациях для максимальной гибкости.



Рис. 2.17. Робот DooCell в работе

Из чего состоит типичный DooCell?

- 1 – 3 единицы оборудования DOOSAN;
- контейнер с 3 – 6 отделениями;
- робот (обычно FANUC M10iA или M20iA);
- ПО для интеграции и программирования роботов;
- ограждение безопасности, включая световые завесы;
- интерфейс HMI (человеко-машинный интерфейс).

Все это – в компактном дизайне, который занимает намного меньше места, чем вы ожидаете.

Хранение деталей

Есть ли у DooCell хранилище деталей? Да! Прочный и компактный контейнер большого объема. Каждый контейнер может вмещать до 150 кг деталей. Три контейнера являются стандартными, но всего можно установить до 6, в зависимости от максимальной высоты детали:

- 3 контейнера – 244,475 мм;
- 4 контейнера – 177,8 мм;
- 5 контейнера – 139,7 мм;
- 6 контейнера – 114,3 мм.

Для размещения деталей разного диаметра в выдвигаемых контейнерах можно установить ступицы. Контейнер устроен таким образом, что детали не касаются друг друга до или после обработки.

Повышенный уровень безопасности

Световая завеса предотвращает вход оператора в область выдвигания контейнера, когда робот открывает/закрывает его. Фактически, весь DooCell огражден, чтобы обеспечить безопасность работника. У ограждения есть дверь доступа оператора с электронной блокировкой. В то же время оператору обеспечен легкий доступ к панели ЧПУ станка и операторской части контейнера вне ограждения.

Адаптируемое робототехническое оборудование

Робот-манипулятор включает в себя 2 "захвата" – для заготовки и для готовой детали. "Захват" входит в комплект поставки и будет специально разработан под вашу задачу, т.е., под требуемый образец детали. Вы можете обновлять производимые детали без дополнительных инструментов.

Большая польза DooCell при малых габаритах

Выдвижной контейнер также является стандартным. Хотите изготавливать новую деталь? Мы будем работать с вами при смене производственного плана. Если вы используете большой диапазон размеров или типов деталей (плунжер, вал или корпус), мы можем обеспечить быстросменную пару "захватов" для обеспечения быстрой переналадки.

Легкая эксплуатация

Робот DooCell прост и понятен в применении. Он поставляется со стандартной 12-дюймовой сенсорной панелью. Этот экран HMI при-

креплен к ограждению и доступен оператору. Интерфейс позволяет запускать, останавливать или приостанавливать цикл робота, сбрасывать его ошибки, отображать состояние каждого контейнера и состояние дисплея. Также доступна возможность ввода коррекции инструмента с панели HMI.

Контейнеры выдвигаются с обеих сторон. Оператору остается только заполнить их заготовками. Дальше робот возьмет задачу на себя: извлекать заготовки и помещать в ящик детали после обработки. После чего, оператор извлекает готовые детали – и так сколько угодно циклов. Четко и просто.

Если вы хотите начать автоматизацию сейчас, просто свяжитесь с нашими специалистами. Свой собственный робот уже сегодня. И никаких сомнений!

2.5. Наши мультифункциональные токарные центры стали еще более производительными

Многофункциональный инструмент – это вещь, которую нужно иметь под рукой. Спросите об этом любого владельца швейцарского армейского ножа.

Специалисты DOOSAN считают именно так, выпуская универсальную продукцию. Конечно же, мы говорим не о пинцете или зубочистках. Но если вы хотите получить больше готовых изделий на одном станке с меньшими временными затратами, то подходящим решением станет серия оборудования PUMA SMX ST. И есть весомые причины называть эту модель супермультифункциональным токарным центром (рис. 2.18).

Что же представляет собой такой класс оборудования?

Представьте, что вы объединили модели ВОЦ и ТОЦ в одну конструкцию, в которой доступны все оси: X, Y, Z, X2, Z2, A, B, C1 и C2. А оба шпинделя, левый и правый, способны точно управлять осью C. Сам станок при этом выполняет различные функции механической обработки, такие как токарная, фрезерная и синхронизированная обработка ... И это все за одну установку детали!

Начнем с производительности PUMA SMX

Модели ST имеют все преимущества и технические характеристики серии SMX, что уже говорит о многом. Во-первых, такое оборудо-

дование отличается высокопрочной механической конструкцией, минимальной термической деформацией благодаря масляному охлаждению, функцией контроля точности на основе термокомпенсаторов и увеличенной областью обработки по оси Y благодаря прямоугольной конструкции.



Рис. 2.18. Супермультифункциональный токарный центр серии оборудования PUMA SMX ST

Наряду с самой большой площадью рабочей зоны среди машин такого же класса, модель PUMA SMX снабжена стандартными эргономическими решениями DOOSAN, которые повышают удобство работы оператора и эффективность обслуживания оборудования.

Усовершенствованная револьверная головка

При том, что модель SMX уже отличается высокой производительностью, версия оборудования ST получила еще больше улучшений благодаря наличию нижней револьверной головки с функциями точения и фрезерования к существующим левому и правому шпинделям и функции фрезерования по оси B. Обе новые модели SMX ST оснащены нижней револьверной головкой: версия с 10-дюймовым патроном (PUMA SMX 2600ST) и версия с 12-дюймовым патроном (PUMA SMX3100ST).

Давайте раскроем возможности этой новой функции

Добавление нижней револьверной головки с магазином инструмента на 12 позиций позволяет оператору получить еще большую производительность на одном станке с ЧПУ. Стационарная револьверная головка идет в качестве стандартной опции, а револьверная голова для инструмента с механическим приводом – на выбор.

Однако эта нижняя револьверная головка предназначена не только для металлорежущего инструмента. Также ее можно использовать для оснастки, фиксирующей заготовку (неподвижный и подвижной люнеты, узел задней бабки, тиски).

Только задумайтесь о новых возможностях! Вы изготавливаете сложные детали для аэрокосмической промышленности? Это не имеет значения. Детали трансмиссии автомобиля? Не важно. Вы пытаетесь увеличить производительность, чтобы не вылететь с рынка? Это не ...

Ладно, вот это уже действительно важно! Такой очевидный факт: компании, использующие возможности серии SMX ST, будут вне конкуренции (рис. 2.19).

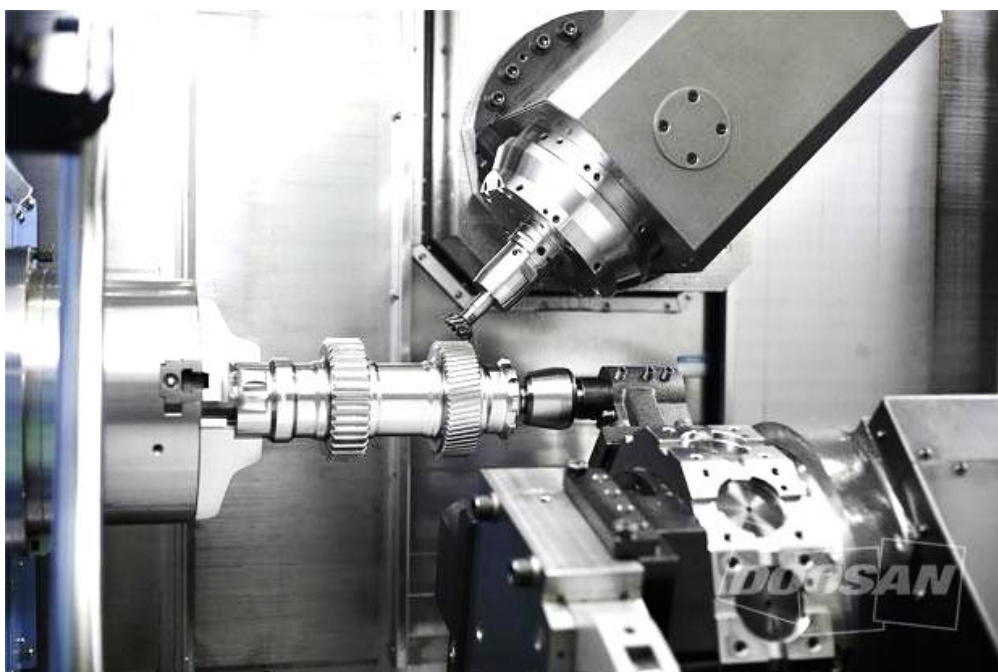


Рис. 2.19. Обработка детали на станке

Выберите производительность с упрощенной настройкой

Талантливому оператору ЧПУ не найти днем с огнем. Новые модели оборудования DOOSAN PUMA SMX2600ST / SMX3100ST позволят вам перенести все производственные задачи на один станок с ЧПУ. Оператору, при этом лишь останется контролировать процесс.

Отличный список преимуществ, не так ли?

Серия SMX ST оснащена множеством функций, которые, возможно, не так просто уложить в голове.

Давайте сделаем шаг назад и посмотрим на картину в целом. Мы начали с полного 5-осевого многофункционального токарно-фрезерного станка с фрезерным шпинделем на 12000 об./мин и барабаном на

80 позиций инструментов. Затем мы добавили нижнюю револьверную головку на 12 позиций, которую можно использовать как для токарных, так и фрезерных операций. Помним, что при этом все еще используется полноценный фрезерный шпиндель для выполнения действительно многозадачных операций. Что это значит? То, что вы получаете безграничную производительность при покупке только одного станка!

Итак, у вас есть два варианта. Вы можете купить три различных 3х-осевых станка и перемещать заготовку между рабочими местами, вынужденно обеспечивая дополнительное пространство и время на каждую из операций. Другими словами, очередная партия полуфабрикатов будет занимать место, ожидая следующего этапа обработки.

Или вы можете использовать модель оборудования PUMA SMX2600ST / SMX3100ST, которая способна выполнить все эти металлорежущие операции и позволит отгрузить готовую продукцию уже СЕГОДНЯ!

2.6. Двухшпиндельный вертикальный обрабатывающий центр – двойная эффективность обработки при той же площади занимаемой производственной поверхности

Вертикальный обрабатывающий центр (ОЦ) с двумя шпинделями позволяет увеличить выпуск серийной продукции в условиях небольшого пространства и других ограничивающих факторов.

Представьте себе, что габарит металлорежущего оборудования в производственном помещении является фиксированным, то есть ограниченным его площадью. При этом станки работают в многосменном режиме, поэтому время доступа к оборудованию жестко регламентировано. Другими словами, этому цеху некуда физически развиваться – нет практического способа расширения. Для многих предприятий – это суровая реальность. Каким образом цех механической обработки, поставленный в такие ограниченные условия работы, может увеличить свою производительность?

Ответ заключается в модернизации станочного парка. Причем, таким оборудованием, которое обеспечивает большую производительность в рамках наложенных ограничений. Один из способов – сделать выбор в пользу необычного вида металлорежущего оборудова-

ния. А именно: вертикального обрабатывающего центра с двумя шпинделями (ВОЦ).

Недавно компания DOOSAN анонсировала вертикальный обрабатывающий центр DMP 500/2SP. Представители компании проинформировали о роли и способах эксплуатации оборудования. Задача данного класса оборудования предельно проста: производство двух деталей, вместо одной, за одно и то же время, ценой незначительного увеличения площади фундамента оборудования, по сравнению с одношпиндельным станком.

Высокопроизводительный вертикально-обрабатывающий центр DMP 500 / 2SP с двумя высокооборотистыми шпинделями

Компания DOOSAN заявляет, что такое двухшпиндельное оборудование (рис. 2.20) поставляется исключительно на предприятия с крупносерийным производством. Однако, данное решение, очевидно, будет полезно для любых предприятий с ограниченными производственными площадями и с высокой степенью загрузки.



Рис. 2.20. Высокопроизводительный вертикально-обрабатывающий центр DMP 500 / 2SP с двумя высокооборотными шпинделями

Двухшпиндельный ВОЦ имеет один стол и один набор осей. Его работа, таким образом, является "стереосистемой" – станок одновременно обрабатывает две идентичные детали. Один цикл работы инструмента, запрограммированный так же, как и для стандартного ВОЦ,

выполняется на поверхностях обеих деталей. Следует отметить существенное преимущество в модели DMP 500/2SP – это одна ось W. Директор по продажам DOOSAN Энди Макнамара (Andy McNamara) говорит, что это изменение упрощает использование двухшпиндельного вертикального обрабатывающего центра.

"У меня большой опыт работы на двух- и трехшпиндельных фрезерных станках" – говорит он. "Неудобное требование таких станков более ранних версий – инструмент и приспособление должны были быть жестко зафиксированы, включая точность длины режущей части обоих инструментов, используемых синхронно.

В новом вертикальном ОЦ такой контроль не требуется. Ось W обеспечивает параметр, который на сегодняшний день является самым сложным фактором при синхронизации двух шпинделей: соответствие по Z-высоте. Расположенная на правом шпинделе ось W регулирует положение всплывающей подсказки шпинделя в Z, чтобы автоматически компенсировать любое небольшое несоответствие между высотами установки двух заготовок и длиной режущей части двух инструментов".

По его словам, есть и другие аспекты координации работы между шпинделями, все еще требующие внимания. Потенциальные расхождения в относительных положениях заготовок по осям X и Y должны быть решены, и здесь есть, по крайней мере, два подхода. Один из них состоит в том, чтобы двумя шпинделями одновременно обрабатывать две закрепленные детали. При этом логично, что крепление будет выверенным относительно положения шпинделя, что обеспечит точность. Задача данного класса оборудования предельно проста: производство двух деталей, вместо одной, за одно и то же время.

Мистер Макнамара добавляет: "Крупные заводы, заинтересованные в этом станке, как правило, используют высокопроизводительные крепежные приспособления, на основе которых можно без проблем собрать прецизионную крепежную систему для двухшпиндельного вертикального ОЦ. Одной из особенностей такой системы могут быть регулирующие винты, способные тонко настроить положения по осям X и Y одной заготовки относительно другой".

Самый первый заказчик DOOSAN, получивший двухшпиндельный ВОЦ, как раз отвечал данному описанию. Он столкнулся с таким спросом на количество типовых деталей, что ему потребовалось бы приоб-

рести 66 обычных вертикально фрезерных станков – слишком много для имевшегося в распоряжении цехового пространства завода. Применение модели DMP позволило этому заказчику приобрести только 33 единицы оборудования. Позднее он приобрел дополнительное оборудование для производства большего объема деталей другой номенклатуры на оставшейся цеховой площадке.

Двухшпindelный ВОЦ (рис. 2.21) имеет один стол и один набор осей. Его работа, таким образом, является "стереосистемой" – станок одновременно обрабатывает две идентичные детали.

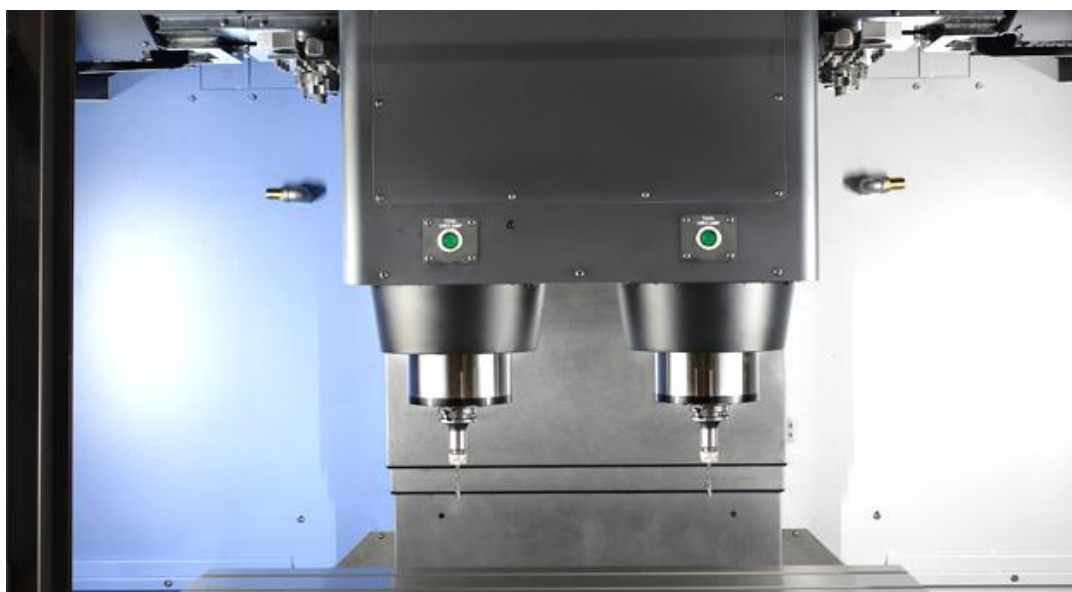


Рис. 2.21. Двухшпindelный вертикальный обрабатывающий центр

Уильям Карр (William Carr), директор по ключевым клиентам и инженерным приложениям DOOSAN, участвовал в проекте с данным крупным производителем, а также в прочих проектах с использованием двухшпindelного станка. Мистер Карр говорит, что есть некоторые важные нюансы использования такого оборудования, выходящие за рамки вопросов точности позиционирования. Одним из них является аккуратность, требуемая при обработке деталей в более чем четырех осях. Поворотные столы могут быть эффективными с этим типом станков, но поворотный стол с двумя поворотными осями делает дальнейшее позиционирование по осям X-Y еще более сложным, чем у обычных ОЦ. Так, для деталей, произведенных на оборудовании в первоначальном проекте, угловые отверстия в деталях обрабатывались с использованием двухосевого поворотного стола на одношпindelном вертикальном ОЦ модели VMC.

Мистер Карр утверждает, что еще один важный фактор, который следует учитывать, связан с потенциалом высокой производительности и ролью оператора станка с ЧПУ. "Когда дверь машины открывается, оператор должен выгрузить две готовые детали и загрузить две новых заготовки. Для производств с высококвалифицированным персоналом это не проблема. Однако чтобы не снижать производительность оборудования за счет человеческого фактора, следующая версия станка, скорее всего, будет оснащена устройством смены паллет, позволяющим загружать и выгружать пары деталей вне рабочей зоны, не прерывая синхронный цикл обработки".

2.7. Большому стейку – большой гриль: выполняйте объемные задачи металлообработки на крупнейших станках DOOSAN

Представьте обработку заготовки размером с ворота гаража. Сразу возникают образы с огромными цехами и невероятных размеров станками! А если вы уже работаете в такой отрасли, как аэрокосмическая или нефтегазовая промышленность, автомобилестроение, строительная техника и металлургическое оборудование, тогда это ваш рутинный рабочий день. Компания DOOSAN предлагает полный спектр мощных станков (рис. 2.22), разработанных и сконструированных для выполнения самой объемной и неприятной работы с огромными массами срезаемого металла.



Рис. 2.22. Крупногабаритный станок DOOSAN

Суть габаритных проектов

Инженеры DOOSAN не согласны, что габариты изготавливаемого изделия обратно пропорциональны его качеству. Каким бы ни был размер заготовки, основные условия и параметры прецизионной обработки одинаково важны и должны быть достижимы. Мы говорим о таких параметрах, как точность, термическая стойкость, производительность, жесткость и амортизация вибрации.

Превосходные технические характеристики, к которым привыкли клиенты DOOSAN во всем мире, обусловлены дополнительным вниманием наших материаловедов к конструкции любого вида оборудования. Для максимальной жесткости и амортизации вибрации конструктивные элементы оборудования изготовлены из специального чугуна и никогда – из стали. Поэтому любой материал, от алюминия до титана, наши механические монстры разделяют так же легко, как опытный повар разделяет сочный стейк.

Большой габарит – это не все, ведь у каждой машиностроительной отрасли свои уникальные потребности. DOOSAN имеет в стандартной линейке модели обрабатывающих центров с различными функциями, максимально соответствующими задачам именно вашего производства. Предлагаем узнать больше о "крупных парнях" от DOOSAN.

Модель DCM: 5-осевой обрабатывающий центр с двумя колоннами (портальный тип)

Необходимо обрабатывать заготовку габаритом более 3000 мм в ширину? Расстояние между колоннами в серии оборудования DCM достигает 3700 мм. Даже самая маленькая модель DCM обеспечивает достаточный зазор по высоте колонн для использования угловой головки – до 2500 мм. Профиль рамы добавляет жесткости конструкции, так что вы уверенно можете вести обработку на дальнем конце хода без вибраций. Именно эти преимущества важны при использовании тяжелого производительного инструмента и массивных поворотных голов (рис. 2.23).

Например, на заводе тяжелого машиностроения "Днепрополимермаш" модель DCM-2760W DOOSAN позволяет не только производительно фрезеровать плоскости огромных размеров, но также произвести сверление и фрезерование точных отверстий в изделии "Рукав электрода" с внутренним диаметром $d = 2920_{-5,4}$ мм и полем допуска по диаметру $\pm 0,02$ мм.

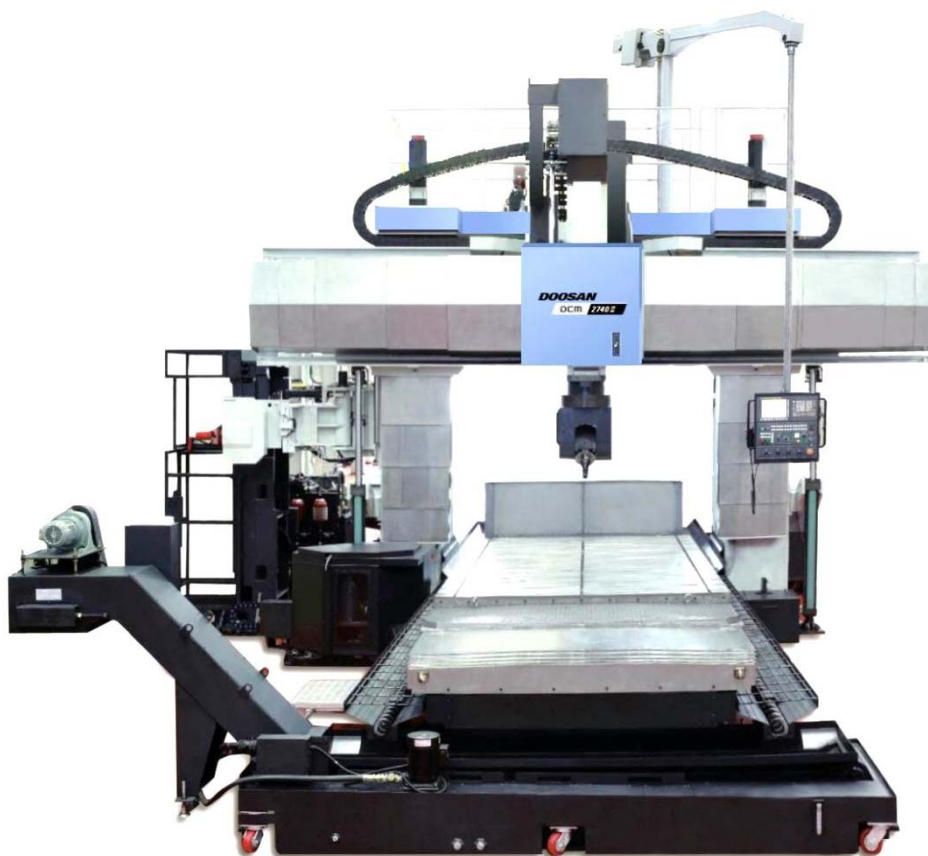


Рис. 2.23. 5-осевой обрабатывающий центр с двумя колоннами (портальный тип) модели DCM

Модель VM: Многофункциональный обрабатывающий центр портального типа для обработки крупногабаритных изделий

Если производственная программа требует большей универсальности, отличным выбором станет модель DOOSAN серии VM (рис. 2.24). Поперечная траверса в данном оборудовании фиксирована, поэтому станок подходит для обработки заготовок высотой до 1 метра. При этом жесткая конфигурация позволяет увеличить скорость подачи при обработке заготовок меньшего размера. Кроме того, можно взять одну большую заготовку и очень эффективно (быстро), так сказать, "нарезать", партию сложных кронштейнов с одной установки. Беспроегршный вариант для многозадачных производств.

Обрабатывающий центр портального типа DOOSAN серии VM занял почетное место в парке оборудования компании "ДНЕПРМЕТАЛЛ-СЕРВИСГРУПП" и уже более пяти лет успешно решает задачи механической обработки металлов на данном предприятии, выполняющем заказы на изготовление крупных изделий для ветроэнергетической отрасли от компании SIEMENS.



Рис. 2.24. Многофункциональный обрабатывающий центр порталного типа модели VM для обработки крупногабаритных изделий

С учетом того, что габариты и вес обрабатываемых изделий значительно отличаются (весьма широкий диапазон), в качестве опции для моделей DCM и VM реализовано управление счетчиком рабочей нагрузки, который эффективно регулирует движение оси привода в зависимости от веса изделия.

Модель DBC: Горизонтально-расточной центр с ЧПУ

Большинство крупных деталей, при производстве которых требуется растачивать с высокой точностью, производятся на горизонтальных обрабатывающих центрах, стандартных для DOOSAN размеров.

Но если вы находитесь в стране, где добывается нефть и газ, или изготавливаете оборудование для карьерных работ или тяжелое строительное оборудование, то размер заготовок заставит вас повысить требования к металлорежущему оборудованию.

Скорость и мощность расточных обрабатывающих центров DOOSAN серии DBC (рис. 2.25) делают эти станки идеальным выбором для стабильной и непрерывной механической обработки сложных габаритных изделий из любых материалов, включая такие труднообрабатываемые, как различные модификации брони.

Предприятие "Днепрополимермаш" для выполнения ряда ответственных проектов сделало выбор в пользу следующих моделей расточного оборудования:

1. **DBC 130:**

- обработка базовых поверхностей для сборки изделия "Венец зубчатый", $D = 2990$ мм;
- нарезка зуба $m 45$ в сборе изделия "Венец зубчатый";
- расточные операции детали "Узел главного балансира".

2. **DBC 130L** для выполнения расточных операций при изготовлении детали "Установка барабанов".

3. **DBC 110S** для производства бурового оборудования и запасных частей.



Рис. 2.25. Горизонтально-расточной центр с ЧПУ модели DBC



Рис. 2.26. Расточной обрабатывающий центр DOOSAN серии DBC

Возможности данной серии (рис. 2.26) оценили и другие ведущие украинские предприятия тяжелого машиностроения, среди которых такие флагманы украинского машиностроения и металлургии как "Днепроотяжмаш", "Свет Шахтера", "ТРИЗ", "Кременчугский сталелитейный завод".

PUMA VTR1216: Вертикальный токарно-карусельный станок с жесткой колонной ползункового типа



Рис. 2.27. Вертикальный токарно-карусельный станок PUMA VTR1216 с жесткой колонной ползункового типа

Станок VTR1216 (рис. 2.27) оснащен системой индексирования инструмента для тяжелой черновой обработки и высокой жесткости оборудования даже при максимальном вылете ползуна. В 4х-позиционном держателе инструмента для автоматического выбора можно установить до четырех позиций инструмента. Это сокращает время на его переустановку и улучшает производительность.

Если вы заинтересованы выполнять крупные заказы на собственных мощностях, как это делает предприятие "Днепрополимермаш", выполняя обработку изделий типа "Шестерня подвенцовая" или обработку колес грузового оборудования на токарно-карусельном обрабатывающем центре VTS 1620M (рис. 2.28), – обратите внимание на данные модели DOOSAN.



Рис. 2.28. Токарно-карусельный обрабатывающий центр VTS 1620M

В отличие от многих других станков этой категории, оборудование DOOSAN выполняет и фрезерные операции, например, обработку отверстий фланцев. Что существенно повышает точность изделия и экономит время на переустановке.

Очень требовательный заказчик

Важный факт, подтверждающий качество крупногабаритного оборудования DOOSAN, состоит в том, что сама компания DOOSAN, являясь мировым лидером в энергетическом и станкостроительном машиностроении, широко использует такие станки в собственном производстве, соответствующем всем мировым стандартам качества, поставляя 15000 станков DOOSAN ежегодно для требовательных рынков Европы, Японии, США и Азии.

2.8. Как избавиться от механической головной боли или 5 причин использовать программное обеспечение DOOSAN Easy Operation Package (EOP)

Два факта о компании DOOSAN, которые важно знать.

Во-первых, мы очень ценим мнение своих заказчиков, и поэтому действительно умеем слушать.

Во-вторых, компания DOOSAN всегда улучшает свою продукцию, не останавливаясь на достигнутом уровне.

Поэтому, когда наши клиенты признали, что предпочитают систему ЧПУ FANUC за производительность и надежность, но хотели бы, чтобы система стала еще проще в использовании – мы начали действовать.

Инженеры программного обеспечения DOOSAN объединились для разработки новых удобных функций ПО. Рабочим названием проекта стало Easy Operation Package (для краткости – EOP).

Что же получилось?

Программное обеспечение EOP – именно то, чего так ждали операторы и технологи наших Заказчиков.

Эта эксклюзивная разработка DOOSAN, выполненная в виде удобного меню, позволит не только сократить время настройки, но и упростить общие задачи, снизить вероятность ошибок. Во время разработки нашего уникального продукта были добавлены полезные функции, позволяющие сократить время работы, защитить оборудование и инструмент, улучшить качество обработки и ускорить техническое обслуживание.

Функционал данного ПО стал интуитивно понятным как для опытных пользователей, так и для нового поколения операторов, которые выросли на смартфонах и прочих современных гаджетах.

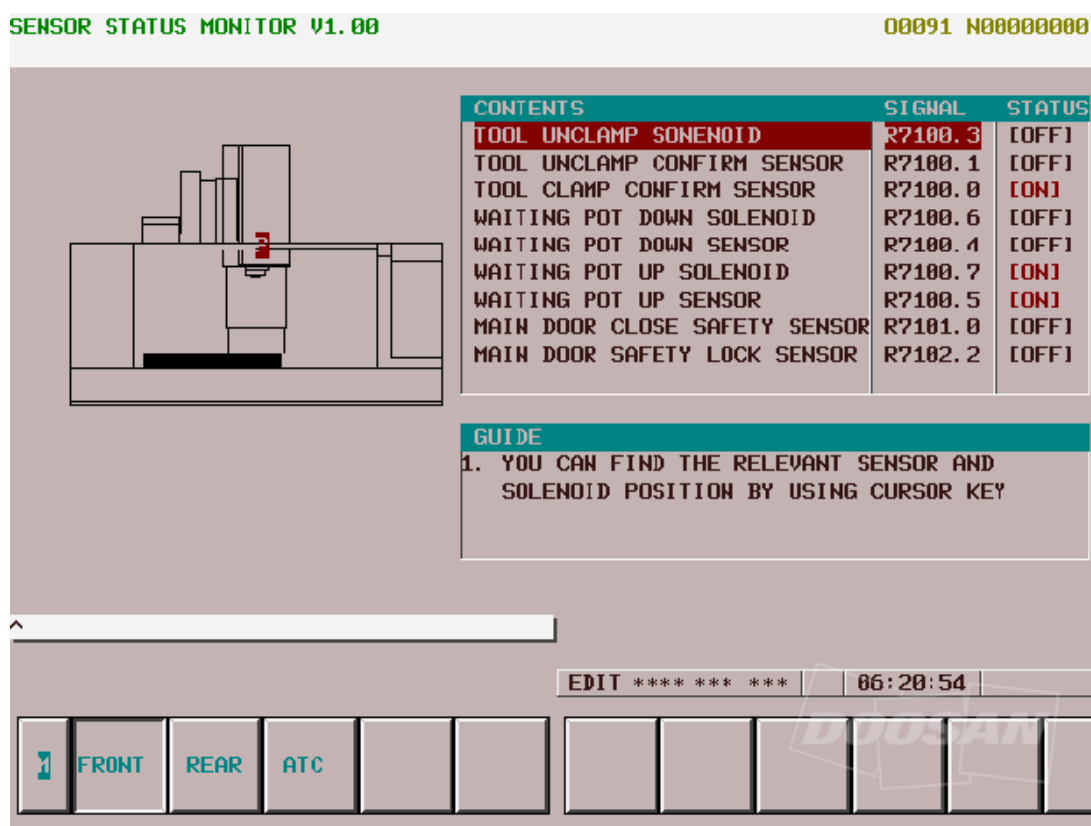
Нам понадобился бы целый день, чтобы перечислить все преимущества нового продукта и рассказать, на что будет способно Ваше производство с EOP. Отметим лишь некоторые ключевые возможности программы:

1. Work Coordinate Utility – Инструмент рабочих координат

Успешность запуска деталей обычно определяется еще до начала работы шпинделя. Настройки координат могут как улучшить, так и ухудшить производительность и качество изготовления деталей. Пло-

хая новость заключается в том, что настройка точек привязки X, Y и Z может быть сложным процессом в несколько этапов. Если такая операция выполняется вручную, каждый шаг может подразумевать ошибку оператора. Но EOP упрощает процесс настройки рабочих координат, уменьшая количество используемых кнопок и визуализируя процесс экранной графикой. Так пользователь с легкостью, шаг за шагом, выполняет все необходимые настройки, сводя возможность ошибочных действий к минимуму.

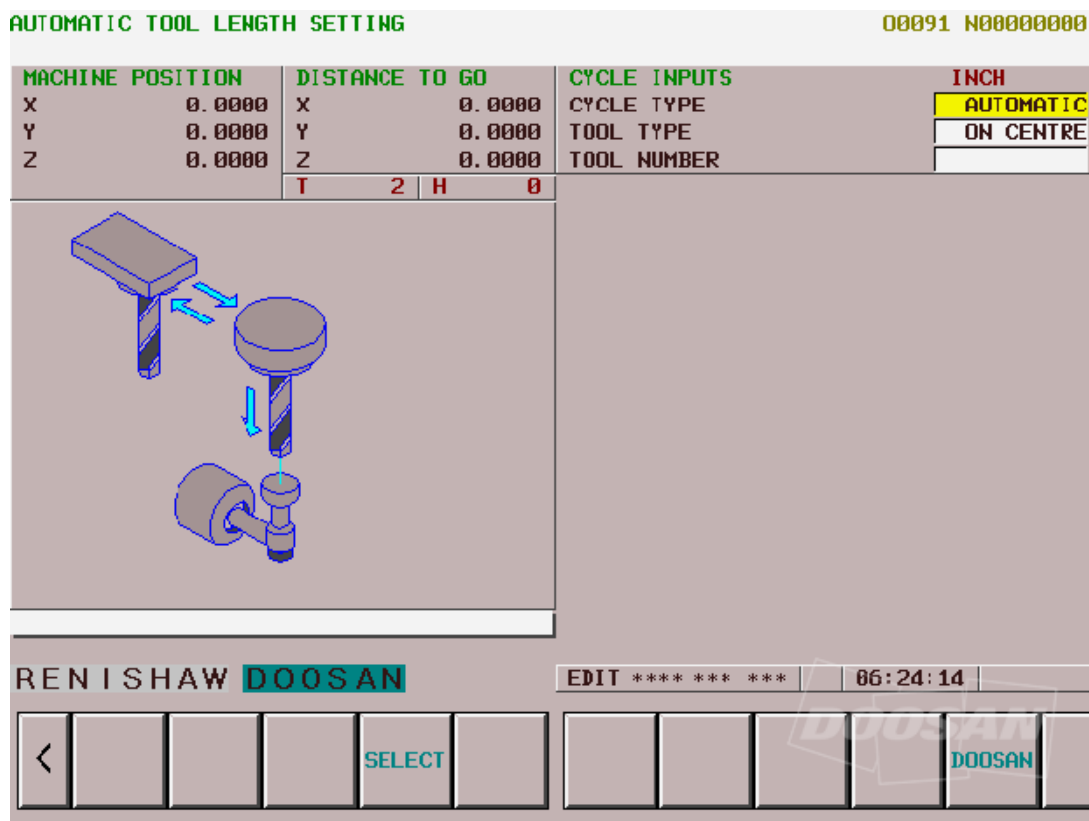
Результат: быстрые, безошибочные настройки увеличивают качество партии, а, следовательно, и прибыль.



2. New Operation Status Monitor – Новый экран статуса режима работы

Летчики-истребители используют оптическую систему "heads up" (с отображением информации на лобовом стекле), которая позволяет собирать все необходимые данные для миссии перед глазами пилота. Аналогично *Новый экран статуса режима работы* отображает все важные экраны состояния на одном дисплее. Больше нет необходимости перескакивать с монитора на монитор для сбора информации во время обработки. Кроме того, удобная в применении приборная па-

нель еще больше упростит работу оператора. Так что пользователю ничего не остается, как взять курс на увеличение производства.



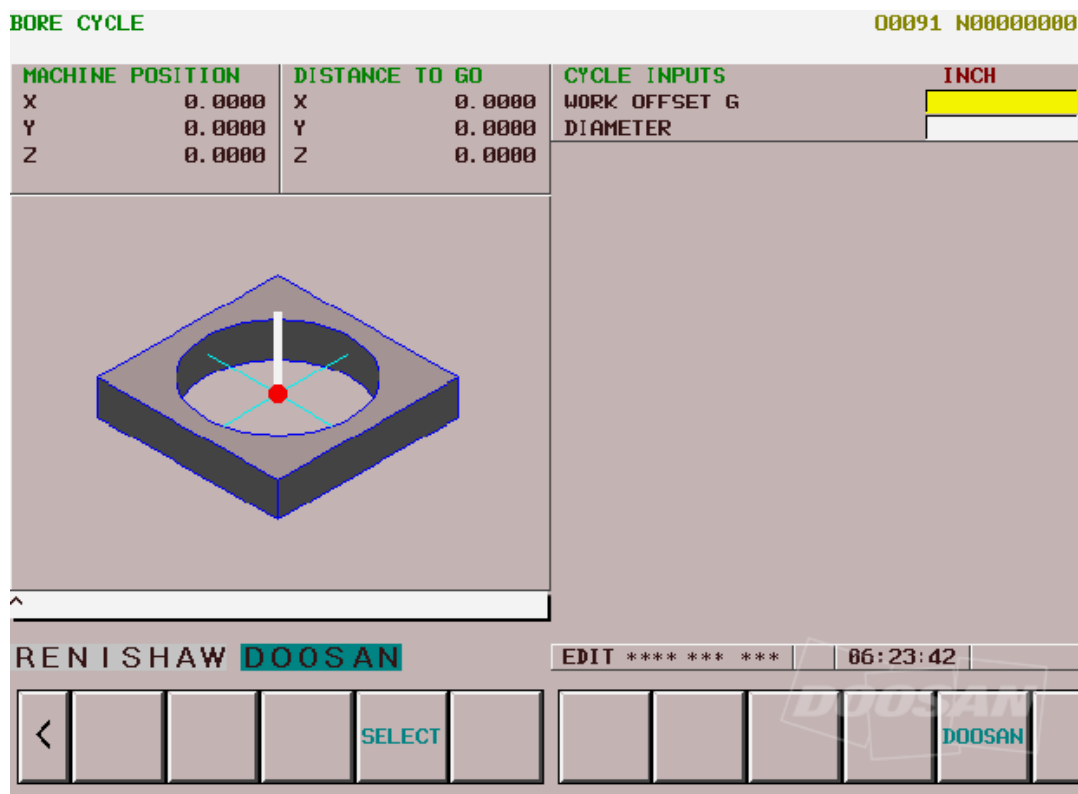
3. Alarm Guidance – Руководство по сигналам

Просто вспомните свои мысли, когда загорается индикатор двигателя в автомобиле. Очень неоднозначное извещение, согласны? То ли крышка топливного бака не зафиксирована, то ли коробка передач почти на износе, то ли еще что похуже. Сложно понять и становится тревожно.

Руководство по сигналам EOP не только сообщает номер соответствующей ошибки, но и отображает графически ту часть оборудования, которая требует внимания. Для получения дополнительной информации о тревожном сигнале предусмотрена кнопка с подробным описанием.

Таким образом, специалист по техническому обслуживанию сразу переходит к источнику проблемы, не затрачивая время на поиски руководства и не просматривая список неисправностей для идентификации ошибки.

Результат: ликвидация поломки занимает минимум времени, и работа участка мгновенно восстанавливается.



4. Adaptive Feed Control – Адаптивное управление скоростью подачи

Слишком быстро или слишком медленно? Поиск "идеальной" скорости подачи для обработки конкретной детали может стать непростой задачей, так как глубина врезания обычно варьируется на протяжении всей обработки. Но как, в таком случае, можно контролировать скорость подачи для достижения максимальных результатов? Скорее всего, так же, как водитель гоночного автомобиля знает, когда выжать, а когда притормозить, достигая в итоге максимальных результатов прохождения круга.

Вот по такому принципу и работает *Адаптивное управление скоростью подачи (АУСП)*. Программа устанавливает оптимальную скорость, основываясь на результатах проверки нагрузки на шпиндель в реальном времени. Например, скорость подачи автоматически снижается при работе инструмента в углах, уменьшая риск его повреждения. И, наоборот, на ровных поверхностях скорость подачи увеличивается, сокращая, тем самым, время обработки. Все, что вам нужно для повышения производительности – это потратить немного времени на разработку исходных данных для обрабатываемых деталей.

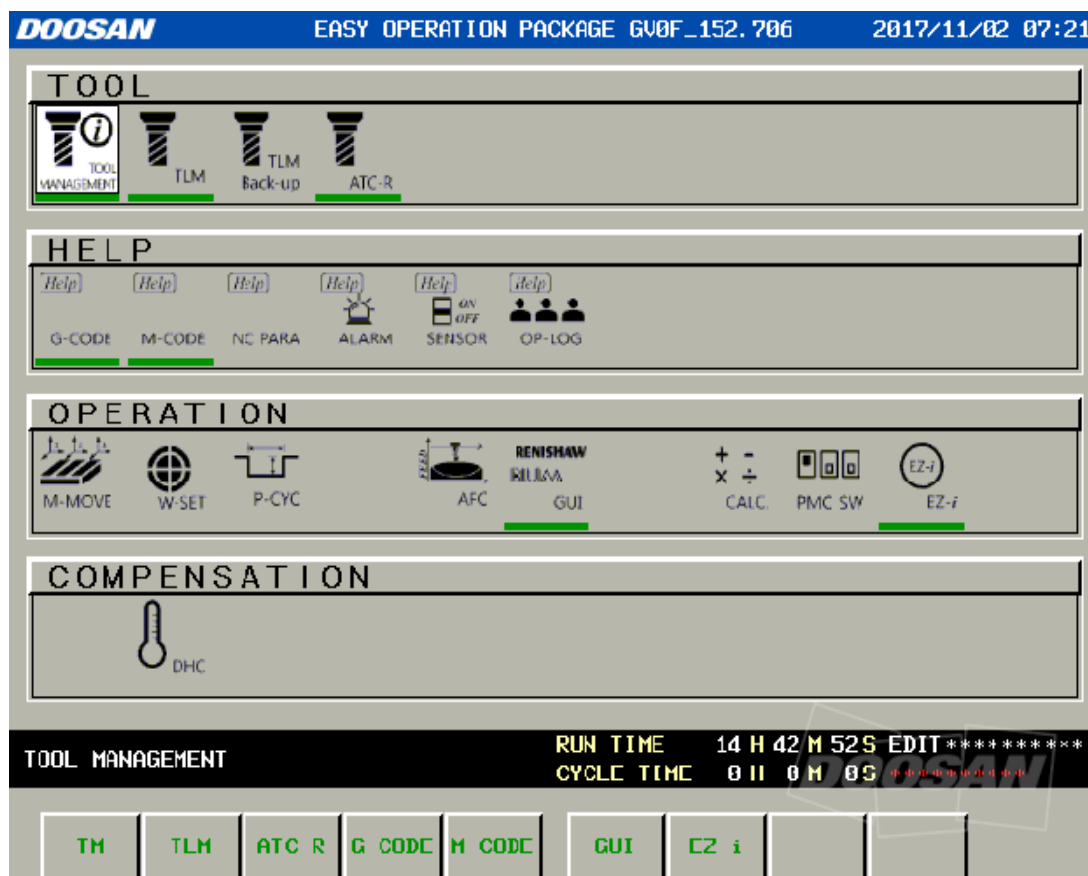
Данное патентованное программное обеспечение простое в использовании и включено в пакет ЕОР* в качестве стандартной опции.

5. Renishaw Probe Utilities – Датчики Renishaw

Ломаете голову над некоторыми периодически возникающими проблемами? А представьте, что жизнь оператора – это постоянное решение проблем. Идентификация нулевых точек, диаметра инструмента, краев заготовки, центров окружности и других точек привязки требует множество сложных математических вычислений. И ошибка в 20 мм может привести с одной стороны к столкновению, а с другой – к недостижению инструментом рабочей зоны!

Лучше разрешить датчикам Renishaw (как измерительной головке, устанавливаемой в шпиндель, так и контактному датчику для настройки инструмента), встроенным в EOP, помочь Вам с вычислениями. Системы экранной навигации просты в использовании и загружают координаты в регистр смещения.

И даже если Вам достаточно 1 минуты для установки 1 инструмента, что говорить о 20 инструментах? Это ведь целых 20 минут производства, которые лучше потратить на что-то более продуктивное. Датчики Renishaw решат вопрос, прежде чем Вы успеете заточить карандаш.



Добавленная стоимость с EOP

О влиянии программы EOP на повышение производительности можно говорить часами, но, напоследок, ловим еще одно преимущество. С программой EOP можно обучить менее опытных операторов работать со станками ЧПУ, ускорив процесс обучения, как никогда ранее, что трудно переоценить при создании неразрывной цепочки передачи опыта среди операторов станков. Необходимо отметить, что большая часть фрезерных станков DOOSAN (однако, не все) поставляется с патентованным программным обеспечением.

2.9. Как подготовить собственника к приобретению горизонтального обрабатывающего центра

Итак! Вы готовы раскошелиться на горизонтальный обрабатывающий центр. Прекрасный выбор. Один такой станок может выполнять работу трех вертикальных ОЦ. А скорость и надежность оборудования Doosan означают быструю 100 %-ю окупаемость.

Что же может стать затруднением? Мышление собственника.



Рис. 2.29. Станок горизонтально-фрезерный Doosan серии HM 1000/1250

Скорее всего, на вашем рынке присутствует множество производств, которые десятилетиями создавались и развивались под тщательным контролем собственника. Он очень гордится успешным биз-

несом, в который вложил время, силы и ресурсы. Поэтому убедить его в обновлении парка оборудования на горизонтальные модели – непростая задача (рис. 2.29).

Станок горизонтально-фрезерный Doosan серии HM 1000/1250

Наша команда провела множество встреч, жарких споров и презентаций, и теперь готова подсказать, как в этом случае работать с возражениями. С гордостью представляем подробное руководство "Как подготовить собственника к приобретению горизонтального ОЦ".

"Я построил этот бизнес с нуля, когда вы еще пешком под стол ходили"

И это правда – он построил. Но и у вас есть преимущество. Вы не настолько сильно срослись с правилами игры в компании. Вам проще сделать шаг назад и увидеть картину целиком. И когда вы это сделаете, посмотрите, в чем сейчас индустрия нуждается больше всего?

И ответом станет – производительность. От этого зависит итоговый результат. Но в то же время ваши сотрудники имеют личную жизнь и горят желанием работать бессрочно, вкладывая всю свою энергию в процесс. Тем более что интенсификация труда увеличивает количество человеческих ошибок. Как нарастить продуктивность производства, не усложняя жизнь сотрудникам? Здесь помощником станет непрерывное (и автоматизированное) производство, обеспеченное горизонтальным ОЦ (рис. 2.30).

Фрезерный обрабатывающий центр Doosan серии DHF 8000



Рис. 2.30. Фрезерный обрабатывающий центр Doosan серии DHF 8000

"У нас нет бюджета для горизонтального ОЦ"

Сильный аргумент, но преждевременный. Стратегический аргумент в данном случае (и наиболее подходящий для успеха вашего бизнеса) фокусируется на огромном скачке производительности при переходе на горизонтальные модели оборудования. Благодаря следующим преимуществам:

- Коэффициент загрузки горизонтальных ОЦ Doosan намного выше. Встроенный сменщик "паллет" позволяет сделать необходимые настройки, в то время как шпиндель продолжает выполнять свою работу. В целом вы получаете коэффициент использования горизонтального ОЦ в 3 ... 5 раз выше, чем работа шпинделей в вертикальных ОЦ.
- Поскольку горизонтальный ОЦ работает по управляющей программе без участия оператора, то и окупается он намного быстрее, чем другое оборудование. Просто представьте огромную стопку денег на своем рабочем месте. И так каждое утро.
- Улучшенный отвод стружки позволяет избежать повторного ее резания, что обеспечивает ощутимую экономию затрат на инструмент.

"Период обучения слишком долгий и дорогостоящий"

На самом деле есть необходимость обучения работе с горизонтальным ОЦ, но это не так сложно, как считает собственник. Программы легко переносятся с вертикальных ОЦ, в Doosan, FANUC и поставщики САМ-систем помогут быстро переключиться на работу с горизонтальным ОЦ. Кроме того, вы сможете использовать существующую оснастку, а любые другие новые затраты на оснащение будут компенсированы за счет повышения эффективности и экономии затрат на режущий инструмент.

Важно не ошибиться! Переход на горизонтальные обрабатывающие центры в первый раз – это изменение. А изменения обычно пугают. Мысль, возникающая при рассмотрении вопроса о переходе на горизонтальный ОЦ, понятна. Но в то же время эта неуверенность может препятствовать здоровому росту компании. Не следует принимать решения, руководствуясь только привычным "но мы так всегда делали".

Учитывая предостережение выше...

"Ладно. Ваши аргументы неплохи, и я подумаю об этом. Но мы так всегда делали"

И вот мы снова здесь: "Мы так всегда делали". Классический аргумент для завершения обсуждения.

Теперь важно рассказать собственнику, как вы признательны ему. Как он работал, не покладая рук, учил вас честности и трудовой этике. И сегодня ваш характер и критическое мышление, сформированное им же, привели к осознанию – пришло время для горизонтального ОЦ! (рис. 2.31).

Станок горизонтально-фрезерный Doosan серии HP 4000 II /5100 II



Рис. 2.31. Станок горизонтально-фрезерный Doosan серии HP 4000 II /5100 II

Горизонтальные центры дают широкие возможности для автоматизации процесса производства. Утром, включив свет, вы обнаружите готовую деталь. И пока все спят, оборудование мечет стружку и зарабатывает деньги.

Переход на горизонтальные центры – это верный способ повысить скорость и производительность работы предприятия. А выбор Doosan – лучший выбор, поверьте!

Мы готовы к открытому анализу с другими моделями металлорежущего оборудования на рынке. И держим пари, что победим и покажем все возможности Doosan, установив станок в цехе вашего предприятия.

2.10. DHF 8000 – идеальное решение для обработки технологически сложных деталей

5-осевой горизонтальный обрабатывающий центр с двойным поддоном и шпиндельной головкой поворотного типа

Новинка от Doosan позволяет производить обработку деталей различной конфигурации из широкого диапазона материалов – в том числе и труднообрабатываемых (рис. 2.32). Благодаря шпинделю поворотного типа и поворотному столу (оси A и B) модель DHF 8000 способна выполнять весь спектр операций механической обработки металлов: от черновой до чистовой за один установ.



Рис. 2.32. 5-осевой горизонтальный обрабатывающий центр с двойным поддоном и шпиндельной головкой поворотного типа

Эта конфигурация обеспечивает быструю обработку многогранных заготовок и 5-осевую обработку деталей сложных форм, используемых в аэрокосмической, нефтяной и автомобильной отраслях промышленности.

Усовершенствованная серия DHF 8000 способна легко обрабатывать заготовки весом до 2000 кг. При этом точность обработки не уступает точности обработки резанием заготовок меньших габаритов. Расширенная рабочая зона легко вмещает детали диаметром до 1400 мм (рис. 2.33).



Рис. 2.33. Рабочая зона обработки на станке модели DHF 8000

Шпиндель поворотного типа вращается на 160 градусов (вверх / вниз) с максимальной скоростью 6000 об./мин и крутящим моментом 960 Нм, благодаря чему DHF 8000 обеспечивает максимальную производительность обработки. Оси Y и Z оснащены двойными шариковыми винтами, что обеспечивает большую стабильность оборудования и точности обработки. А конструкция колонны с высокой статической и динамической жесткостью гарантирует оптимальную производительность металлорежущих операций.

Улучшения и усовершенствования, позволяющие повысить точность обработки:

- стеклянная шкала для каждой оси;
- системы охлаждения шпинделя и шариковых винтов;
- централизованное удаление стружки;
- улучшенная система удаления отходов.

2.11. Новая серия обрабатывающих центров Doosan DNM 750 II – для высокоточной и высокоскоростной обработки деталей

Новый вертикальный обрабатывающий центр DNM 750 II от Doosan Machine Tools обеспечивает повышенную производительность обработки благодаря новому шпинделю с высокими техническими характеристиками.

Обновления и улучшения серии DNM:

- 8000/12000 об./мин – прямой привод шпинделя;
- увеличенная рабочая зона;
- повышенная жесткость конструкции станины;
- более эргономичное управление;
- увеличенные габариты обработки.

Время смены инструмента (Т-Т-Т) составляет 1,3 секунды, что в сочетании с высокой скоростью перемещений X/Y/Z позволяет существенно сократить время обработки детали.

Конструкция шпинделя с прямым приводом (двигатель соединен непосредственно со шпиндельным блоком – для моделей DNM 750 II и DNM 750L II) обеспечивает повышенный уровень надежности и производительности в сочетании с пониженным уровнем шума работы шпиндельного узла. Скорость шпинделя 12000 об./мин обеспечивает высокоскоростную и высокоточную обработку широкого диапазона материалов.

Улучшенная обработка на тяжелых режимах (для моделей DNM 750/50II и DNM 750L/50II) возможна благодаря стандарту BIG PLUS, обеспечивающему двойной контакт (прилегание) инструментальной оправки к торцу и конусу шпинделя (стандартная комплектация).

Конструкция шпинделя с прямым подключением двигателя позволяет значительно снизить тепловые деформации, улучшая точность обрабатываемой детали. Кроме того, сокращается время ускорения/замедления шпинделя, что дополнительно повышает производительность обработки.

Концепция шпинделя также минимизирует вибрацию во время работы на высоких оборотах, улучшая чистоту поверхности и точность обрабатываемой детали.

Стабильность станка обеспечивается жесткой колонной в виде рамы трапециевидной формы, разработанной с применением современной технологии проектирования САПР и анализа FEM. Применение роликовых направляющих большого размера обеспечивает оптимальную жесткость при обработке в тяжелых условиях.

Модельный ряд данной серии включает в себя станки средних и крупных габаритов.

В табл. 2.1 приведены характеристики вертикального обрабатывающего центра Doosan модели DNM 750 II.

Таблица 2.1

Характеристики DNM 750 II

Характеристика	Ед. изм.	DNM 750 II	DNM 750L II	DNM 750/50 II	DNM 750L/50 II
Максимальная скорость вращения шпинделя	об./мин	8000 {12000}		8000 {10000}	
Двигатель шпинделя	кВт	18,5/15 (15/11, 15.6/15.6)		15/11 (26/22)	
Конус шпинделя		ISO #40, 7/24 TAPER		ISO #50, 7/24 TAPER	
Перемещения по осям X/Y/Z	мм	1630 / 762 / 650	2160 / 762 / 650	1630 / 762 / 650	2160 / 762 / 650
Емкость магазина инструмента	шт.	30 (40/60)		24 (30)	
Размер стола (Ш x Д)	мм	1630 x 760	2160 x 760	1630 x 760	2160 x 760
Система управления	–	DOOSAN-FANUC i		DOOSAN-FANUC i	

2.12. VM 1530M и VM 2035M – 3-осевые обрабатывающие центры с двумя колоннами для обработки крупногабаритных пресс-форм

Компания Doosan запустила новую серию 3-х осевых обрабатывающих центров с двумя колоннами моделей VM 1530M и VM 2035M, рассчитанных для обработки крупногабаритных пресс-форм (рис. 2.34, табл. 2.2).

Конструкция новой серии VM с двумя симметрично расположенными колоннами обеспечивает более высокую жесткость и точность обработки, что в сочетании с функцией компенсации тепловых погрешностей шпинделя и рамы является необходимым параметром для точной обработки больших и тяжелых пресс-форм.

Кроме того, в качестве стандартной функции ко всем осям серии VM была применена система охлаждения шарико-винтовой пары для предотвращения тепловых деформаций в системе подачи осей. В то время, как по осям X, Y и Z в качестве стандартной функции были

установлены направляющие качения роликового типа и оптические датчики линейного положения, чтобы обеспечить большую точность и жесткость при тяжелых режимах обработки тяжелых заготовок.



Рис. 2.34. 3-х осевой обрабатывающий центр серии VM с двумя колоннами для обработки крупногабаритных пресс-форм

Таблица 2.2

Характеристики 3-х осевых обрабатывающих центров с двумя колоннами моделей VM 1530M и VM 2035M

Характеристика	Ед. изм.	VM 1530M	VM 2035M
Максимальная скорость вращения шпинделя	об./мин	12000	12000
Двигатель шпинделя (30 мин/непрерывно)	кВт	30 / 25	30 / 25
Максимальный крутящий момент	Нм	420,42	420,42
Конус шпинделя		ISO #50, 7/24 TAPER	ISO #50, 7/24 TAPER
Размер стола (Ш x Д)	мм	3000 x 1350	3500 x 1850
Максимальная нагрузка на стол	кг	8000	10000
Расстояние между колоннами	мм	1700	2200
Перемещения по осям X/Y/Z	мм	3000 / 1550 / 800	3500 / 2050 / 800
Система управления	–	FANUC 31i-B	FANUC 31i-B

Шпиндель с большим вылетом, позволяющий достичь оптимальной стойкости и жесткости, обеспечивает доступ к глубоким полостям в пресс-формах, сохраняя при этом высокопроизводительную и качественную обработку чистовой поверхности.

Стабильная конструкция с 2 симметрично расположенными колоннами. Серия VM отличается максимальной жесткостью конструкции с широкой опорой колонн. Используя метод анализа конечных элементов (FEA), разработчики провели тщательный анализ конструкции и устранили возможные слабые места и неожиданные проблемы, которые могли бы снизить мощность оборудования высокой жесткости при высокой точности обработки.

Компенсация тепловой погрешности шпинделя и рамы – в качестве стандартной функции. Для компенсации тепловой погрешности в серии оборудования VM предусмотрен контроль температуры головки шпинделя, станины и колонны с помощью датчиков температуры. Компенсация тепловых смещений происходит в режиме реального времени.

Шарико-винтовые пары с системой охлаждения по линейным осям – в качестве стандартной функции. Серия VM позволяет свести к минимуму тепловые деформации шариковых винтов и подшипников, которые возникают при подаче тяжелых заготовок по линейным осям. Это достигается благодаря применению шариковых винтовых пар с системой охлаждения и охлаждаемых опорных подшипников – в качестве стандартной функции.

Направляющие качения роликового типа и оптические датчики линейного положения – в качестве стандартной функции для высокоточной обработки. Оси X, Y и Z серии VM оснащены направляющими качения роликового типа для максимальной точности обработки, а оптические датчики линейного положения установлены на всех линейных осях для высокоточной обработки при длительной эксплуатации.

2.13. Новая серия DNM – вертикальный обрабатывающий центр международного стандарта

Компания Doosan Machine Tools выпустила новую серию обрабатывающих центров DNM (рис. 2.35), в которую входят модели DNM 4500, 5700 и 6700 (табл. 2.3). Новинки являются улучшенными верси-

ями всемирно известной серии оборудования DNM II и предназначены для механической обработки деталей с еще более высокой точностью и производительностью.



Рис. 2.35. Вертикальный обрабатывающий центр серии DNM

Новинки и улучшения:

- увеличенная рабочая зона;
- увеличенные габариты рабочего стола;
- прямой привод шпинделя в стандарте;
- улучшенная конструкция станка;
- увеличено количество опорных точек станка;
- более высокие ускорения по осям;
- уменьшено время смены инструмента;
- система смазки консистентной смазкой;
- новая панель оператора.

Следуя основному принципу компании – "Надежность превыше всего" – оборудование новой серии DNM обеспечивает повышенную производительность, удобство эксплуатации и экологичность, превышая, в очередной раз, ожидания пользователей.

Таблица 2.3

**Характеристики обрабатывающих центров DNM
моделей DNM 4500, 5700 и 6700**

Характеристика	Ед. изм.	DNM 4500	DNM 5700	DNM 6700
Скорость вращения шпинделя	об./мин	8000 {8000, 12000}	8000 {8000, 12000}	8000 {8000, 12000}
Двигатель шпинделя	кВт	18,5 /11 {8000 об./мин: 15/11, 12000 об./мин: 18,5/11}	18,5 /11 {8000 об./мин: 15/11, 12000 об./мин: 18.5/11}	18,5 /11 {8000 об./мин: 15/11, 12000 об./мин: 18,5/11}
Конус шпинделя		ISO #40, 7/24 TAPER	ISO #40, 7/24 TAPER	ISO #40, 7/24 TAPER
Размер стола	мм	1000 x 450	1300 x 570	1500 x 670
Максимальная нагрузка на стол	кг	600	1000	1300
Перемещения по осям X/Y/Z	мм	800 / 450 / 510	1050 / 570 / 510	1300 / 670 / 625
Система управления		DOOSAN FANUC i	DOOSAN FANUC i	DOOSAN FANUC i

{ } : Опция

В новой серии ОЦ DNM увеличены зона резания и габариты стола, однако, несмотря на максимальную нагрузку, площадь, занимаемая оборудованием, осталась прежней. Кроме того, производители сократили время смены инструмента, увеличив производительность.

Лучшая производительность в своем классе, благодаря:

- увеличенной на 6 % зоне резания при тех же габаритах станка;
- увеличенному ходу вдоль осей X и Y;
- увеличенному на 14 % размеру стола, что дает возможность обработки заготовок большего габарита и больше пространства для дополнительного поворотного стола;
- увеличенной на 25 % максимальной грузоподъемности стола – для более тяжелых заготовок;
- увеличенным мощности шпинделя и крутящему моменту (по сравнению с предыдущими моделями) – для максимальной производительности;

- шпинделю с прямым приводом – для улучшенных показателей ускорения/торможения, что сокращает время запуска и остановки шпинделя и повышает производительность при жестком нарезании резьбы.

Стандартный шпиндель с прямым приводом для повышенной производительности

Новая серия DNM в стандартной комплектации оснащена шпинделем с прямым приводом (8000 об./мин; 18,5 / 11 кВт) вместо шпинделя ременного типа, благодаря чему вибрация и шум во время работы на высокой скорости сводятся к минимуму.

Шпиндели с прямым приводом также способствуют уменьшению термической деформации примерно на 40 %, что обеспечивает более стабильную механическую обработку. Кроме того, уникальная система контроля тепловой погрешности в значительной степени уменьшает влияние температуры на точность обработки.

Ключевые преимущества

Наибольшая зона обработки в своем классе	Шпиндель с прямым приводом в стандартной комплектации	Простота управления и безопасность окружающей среды
		
<p>Увеличены: рабочая зона; размеры стола; допустимая нагрузка</p>	<p>сокращает время простоя благодаря более быстрой смене инструмента; улучшенные показатели ускорения/торможения; функция компенсации тепловой погрешности в базовой комплектации</p>	<p>система консистентной смазки в качестве стандартной опции для улучшения условий труда; система простого управления – в качестве стандартной опции</p>

Экологичность и безопасность эксплуатации

В отличие от предыдущих моделей, в которых использовалась жидкая смазка для направляющих, оборудование новой серии DNM

использует систему консистентной смазки, тем самым, улучшая условия труда и уменьшая годовые расходы на техническое обслуживание на 55 %. Таким образом, не придется смазывать механизмы станка каждые 3 дня – достаточно проводить смазку 1 раз в 3 месяца. Кроме того, поскольку масло для направляющих не смешивается с СОЖ, нет потребности в маслоотделителе.

Выводы

1. В работе приведены технические характеристики и обоснованы технологические возможности современных металлорежущих станков с ЧПУ типа "обрабатывающий центр", применяемых на предприятиях Украины. Показаны преимущества станков с ЧПУ компании DOOSAN (Южная Корея) серии вертикальных обрабатывающих центров Mynx, которые почти 10 лет компания "ВариТек" успешно внедряет на предприятия Украины, выбирая оптимальную модель станка по отличной цене и предоставляя полный комплекс автоматизации производства, лучший сервис, технологическую поддержку при вводе оборудования в эксплуатацию и отработку технологии. Приведены примеры реализации проектов "под ключ" с поставкой оборудования Mynx предприятиям Украины. Так, благодаря внедрению высокопроизводительного фрезерного центра DOOSAN и режущего инструмента TaeguTec (на черновых операциях – черновые фрезы CHASE2FEED; на чистовых переходах – чистовые фрезы FINEBALL), удалось значительно повысить точность обрабатываемых деталей, в 3 – 4 раза сократить время обработки в сравнении с ранее применявшейся технологией на предприятии. Поставленный на инструментальный участок запорожского сталелитейного предприятия станок DOOSAN модели Mynx 7500 (конус #40) для изготовления различной литейной оснастки из серого чугуна работает бесперебойно уже 8 лет.

2. Предложены компактные 5-осевые вертикальные обрабатывающие центры DOOSAN серии DVF, которые полностью укомплектованы для выполнения разнообразной 5-сторонней обработки или одновременных 5-осевых операций, т.е. это металлорежущее оборудование для удовлетворения самых разных потребностей клиентов. Линейка состоит из моделей DVF 5000 и DVF 8000. DVF 5000 поставля-

ется со стандартным конусом шпинделя BT 40 и скоростью вращения 18000 об./мин.

3. Для обработки труднообрабатываемых материалов, и в особенности титана, компания DOOSAN предлагает обратить внимание на правильный выбор подходящего для конкретного технологического процесса станка. Так, фрезерные обрабатывающие центры MYNX, обеспечивают высокую скорость и мощность обработки, работают при тяжелых режимах резания и сохраняют точности обработки в течение длительного времени благодаря жесткой конструкции с плоскими направляющими скольжения и жестким конусом #50. Вертикальные обрабатывающие центры DNM 6700 обеспечивают повышенную производительность, высокую точность и превосходное качество обработки. Серия 5-координатных обрабатывающих центров VC 630/5AX обеспечивает высокую производительность, точность и скорость обработки сложных и дорогостоящих изделий. Высокоточные токарно-фрезерные станки серии PUMA SMX позволяют выполнять различные операции: от простейших токарных и фрезерных до сложной многокоординатной синхронной обработки. Существующий технологический процесс с применением горизонтального токарного центра можно улучшить путем применения обработки на вертикальной компоновке токарного центра (с функцией фрезерования либо без нее), выбрав подходящую модель из линейки вертикальных токарных центров PUMA VTS, например, вертикальные многофункциональные токарные центры PUMA VTS1214.

4. Показаны преимущества автоматизации производства от применения робота DooCell, который имеет модульную конструкцию для быстрой установки в ограниченное пространство, позволяет объединять от 1 до 3 новых или существующих единиц оборудования DOOSAN в разных конфигурациях для максимальной гибкости. Робот DooCell прост и понятен в применении.

5. Предложен супермультифункциональный токарный центр серии оборудования PUMA SMX ST, позволяющий получать больше готовых изделий с меньшими временными затратами, выполняет различные функции механической обработки, такие как токарная, фрезерная и синхронизированная обработка.

6. Предложены высокопроизводительный вертикально-обрабатывающий центр DMP 500 / 2SP с двумя высокооборотными шпинде-

лями; крупногабаритные станки DOOSAN модели DCM: 5-осевой обрабатывающий центр с 2-мя колоннами (портальный тип); многофункциональный обрабатывающий центр портального типа модели BM для обработки крупногабаритных изделий; модель DBC: горизонтально-расточной центр с ЧПУ; вертикальный токарно-карусельный станок PUMA VTR1216 с жесткой колонной ползункового типа. Приведены результаты эффективного применения станков модели DBC на ведущих предприятиях тяжелого машиностроения Украины: "Днепротяжмаш", "Свет Шахтера", "ТРИЗ", "Кременчугский сталелитейный завод".

7. Показано, что разработанное программное обеспечение DOOSAN Easy Operation Package (EOP) для станков с ЧПУ позволяет не только сократить время их настройки, но и упростить общие задачи, снизить вероятность ошибок. В программное обеспечение добавлены полезные функции, позволяющие сократить время работы, защитить оборудование и инструмент, улучшить качество обработки и ускорить техническое обслуживание.

8. Показано, что 5-осевой горизонтальный обрабатывающий центр модели DHF 8000 с двойным поддоном и шпиндельной головкой поворотного типа является идеальным решением для обработки технологически сложных деталей, изготовленных из широкого диапазона материалов – в том числе и труднообрабатываемых. Благодаря шпинделю поворотного типа и поворотному столу (оси A и B) модель DHF 8000 способна выполнять весь спектр операций механической обработки металлов: от черновой до чистовой за один установ.

9. Предложена новая серия обрабатывающих центров Doosan DNM 750 II – для высокоточной и высокоскоростной обработки деталей, обеспечивающих повышенную производительность обработки благодаря новому шпинделю с высокими техническими характеристиками.

10. Предложены 3-х осевые обрабатывающие центры компании Doosan серии BM (BM 1530M и BM 2035M) с двумя колоннами для обработки крупногабаритных пресс-форм, приведены их технические характеристики и технологические возможности.

11. Показано, что компания Doosan Machine Tools выпустила новую серию обрабатывающих центров DNM, которая является улучшенной версией всемирно известной серии оборудования DNM II и предназначена для механической обработки деталей с еще более высокой точностью и производительностью.

Раздел 3

Автоматизированное проектирование и программирование технологических процессов для станков с ЧПУ

3.1. Системы автоматизированного проектирования и программирования технологических процессов для станков с ЧПУ



Современное развивающееся предприятие немислимо без использования средств автоматизации технологических процессов, неотъемлемой частью которых являются системы автоматизированного проектирования (САПР) [30; 31; 62]. Так, например, САПР ESPRIT позволяет значительно повысить производительность и качество готовой продукции. Разработчиком продукта ESPRIT является американская компания DP Technology, обладающая более чем тридцатилетним опытом разработки программ для машиностроения.

Высокопроизводительная система предлагает мощные средства автоматизации программирования технологических процессов для любого станка с ЧПУ. Функциональность ESPRIT включает программирование фрезерной обработки от 2-х до 5-ти осей, токарной обработки от 2-х до 22-х осей, электроэрозионной обработки от 2-х до 5-ти осей, многозадачных токарно-фрезерных станков с синхронизацией, а также станков с осью В.

Лицензионными пользователями программы в Украине с 2010 года стало более 50 предприятий, а во всем мире – более 150 тысяч

компаний. Свой выбор в пользу ESPRIT сделал также флагман украинской металлургии "Интерпайп Нижнеднепровский Трубопрокатный Завод", причем с весьма интересным техническим заданием.

Специалисты "Интерпайп НТЗ" использовали до этого момента только конструкторский САПР (CAD), поэтому задача касалась системы автоматизации технологической подготовки производства (CAM).

Проработав техническое задание, компания "ТВИСТ ИНЖИНИРИНГ", официальный представитель программы ESPRIT в Украине, подготовила визуализацию обработки железнодорожного колеса. Задачей была предусмотрена обработка деталей на станках токарно-карусельного типа, оснащенных двумя суппортами с возможностью их синхронизации (рис. 3.1).

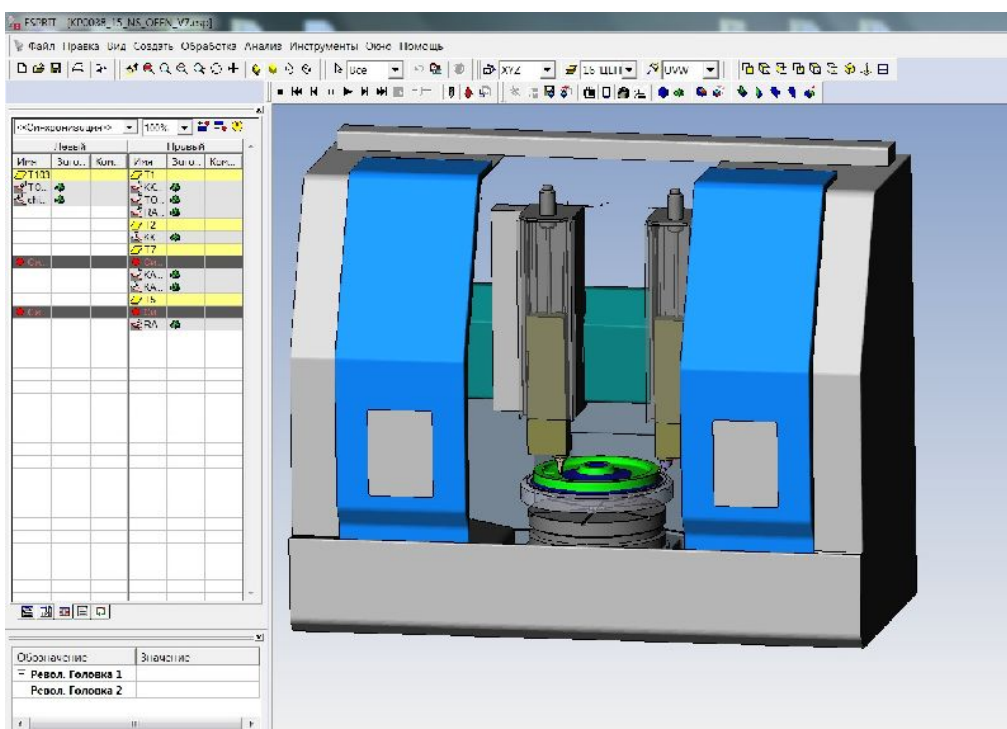


Рис. 3.1. Визуализация процесса обработки изделия согласно техническому заданию

Важной особенностью задачи была также необходимость применения специального инструмента, который система должна учитывать во время моделирования обработки (рис. 3.2).

Демонстрация функционала программы, соответствие требованиям технического задания и, возможно, скорость проработки задачи украинским представительством сыграли ключевую роль в выборе заказчиком системы САПР среди аналогичных продуктов.

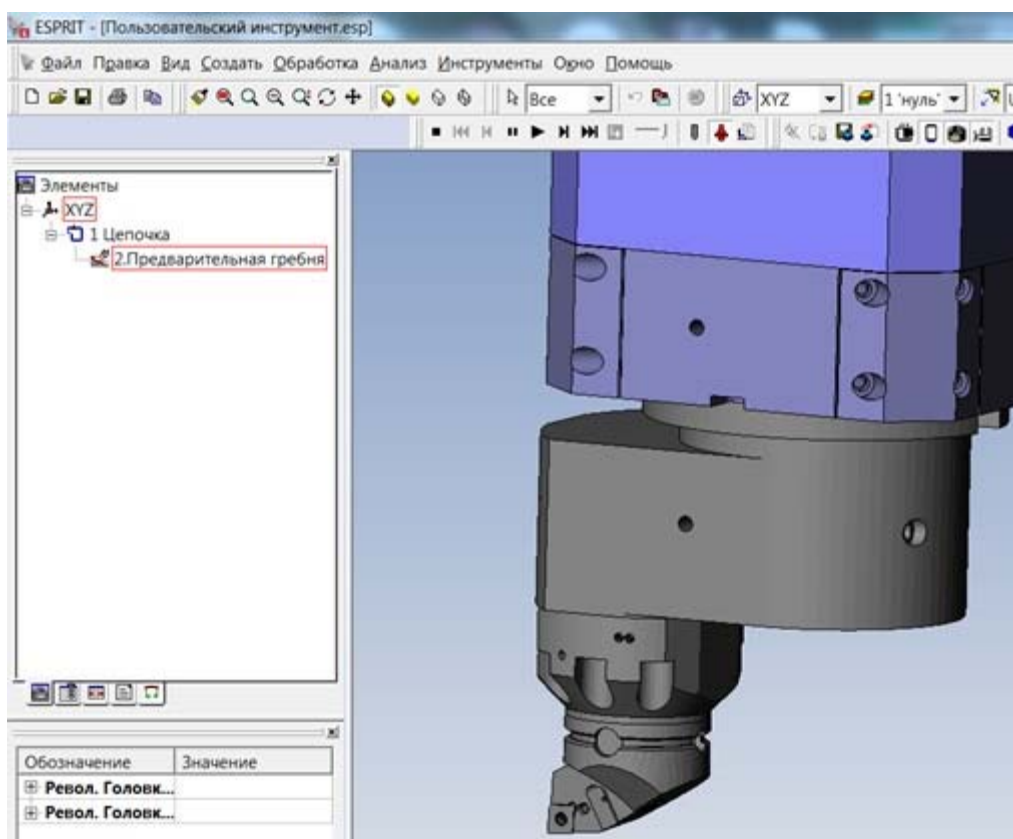


Рис. 3.2. Демонстрация возможности использования специального (пользовательского) инструмента

Победив в тендере, команда "ТВИСТ ИНЖИНИРИНГ" углубилась в реализацию проекта. Условиями договора была предусмотрена разработка трехмерных моделей элементов станка (рис. 3.3) и десяти специальных инструментальных блоков, сборка построенных моделей с соблюдением кинематических связей и разработка постпроцессоров.

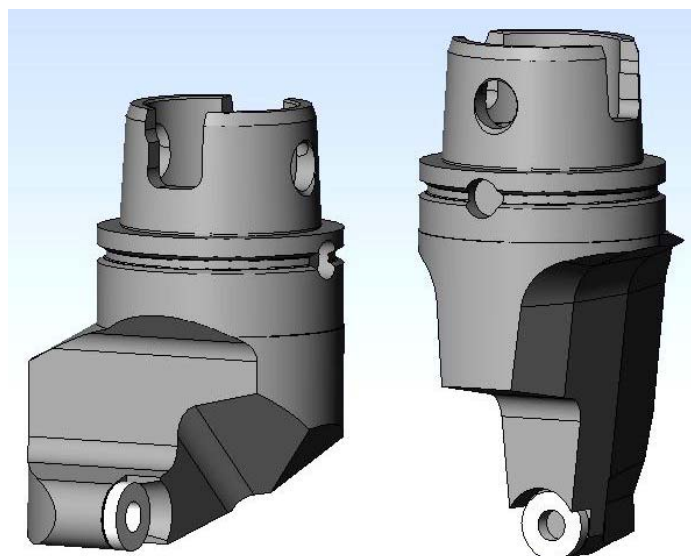


Рис. 3.3. Модели, построенные по чертежам

Программа ESPRIT предоставляет возможность пользователю конфигурировать настройки виртуального станка с тем, чтобы они максимально соответствовали оригиналу. Таким образом, в процессе эксплуатации можно подключить модели необходимых узлов, участвующих в обнаружении столкновений, задать необходимое количество осей станка, определить их направления и лимиты. На сайте разработчика программы имеется многочисленная база файлов станков, которые доступны бесплатно для лицензионных пользователей ESPRIT.

В процессе внедрения системы у заказчика периодически возникала необходимость в использовании специальных команд/функций, которых стандартно не было в данном САПР. Специально для таких случаев, когда обнаруживается необходимость в реализации собственного алгоритма, САПР ESPRIT оснащен интерфейсом прикладного программирования API (Application Programming Interface), базирующимся на платформе Microsoft Component Object Model (COM), и языке программирования Microsoft Visual Basic for Applications (VBA). Интерфейс API обеспечивает разработчикам программного обеспечения (ПО) доступ к значительному количеству CAD/CAM-технологий, встроенных в ESPRIT. Гибкая модульная архитектура позволяет пользователю/разработчику создать любой новый функциональный модуль.

Различные компоненты из стандартного состава ESPRIT могут быть использованы для добавления нового CAD/CAM решения, которое можно реализовать в пределах существующего графического пользовательского интерфейса GUI (Graphical User Interface). В рассматриваемом случае были разработаны три функциональных модуля (макроса, рис. 3.4), которые позволяют выполнять такие функции, как:

- трансфер данных непосредственно из чертежа в отдельный файл УП;
- возможность управления дополнительными черновыми и чистовыми припусками в автоцикле;
- определение граничных точек необходимых элементов обработки для дальнейшего использования в УП.

Макросы реализованы в виде интерактивного интерфейса, содержащего подсказки, проверку условий и контроль вводимых данных с обратной связью. Использование созданных под нужды заказчика макросов позволило автоматизировать процесс путем минимизации рутинных операций и исключения ручного вмешательства, а также использовать дополнительный контроль процессов (рис. 3.5).

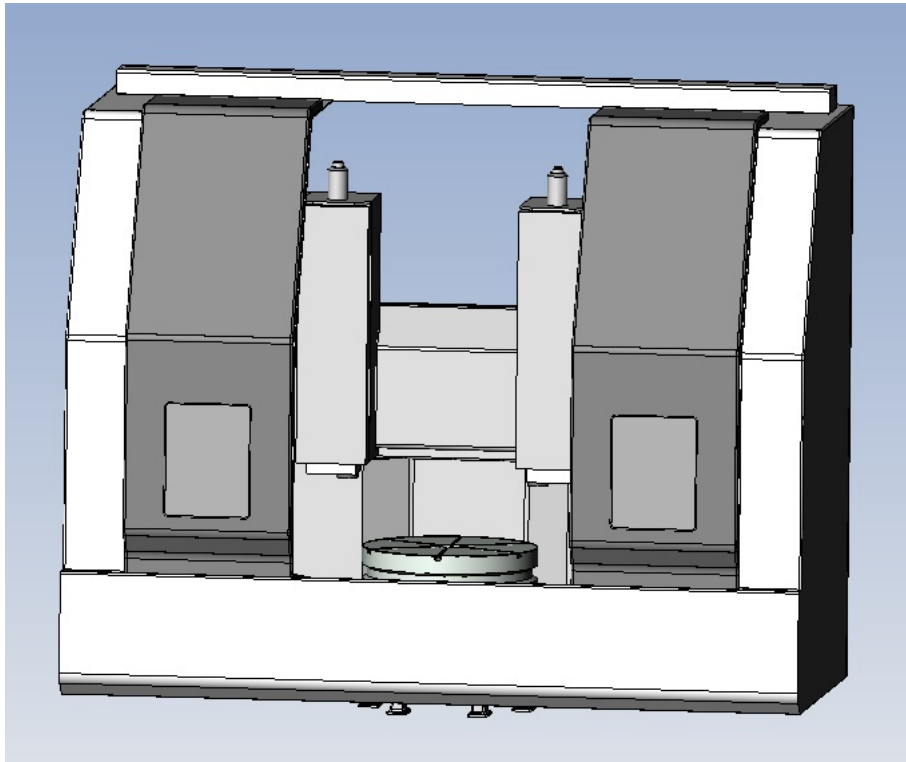


Рис. 3.4. Среда разработки макросов для ESPRIT – были собраны вместе и сохранены в едином файле станка (рис. 3.3)

В рамках реализации данного проекта были достигнуты все цели, которые поставил заказчик перед системой ESPRIT и командой сопровождения в Украине (рис. 3.6):

- построена и собрана математическая модель станка;
- разработаны необходимые постпроцессоры;
- подготовлены инструментальные блоки;
- дописан требуемый функционал.

Работая в тесном взаимодействии с поставщиком ПО ESPRIT, специалисты "Интерпайп НТЗ" эффективно настроили систему под свои задачи, обеспечивая достижение результата благодаря увеличению выпуска готовой продукции в пиковые периоды и снижению показателя брака. Слоган разработчика ПО ESPRIT – "The Right Choice". Таким образом, "Интерпайп НТЗ" сделал "правильный выбор" в свою пользу. От лица разработчика и поставщика программы желаем предприятию дальнейших производственных успехов и надеемся на продолжение сотрудничества.

Для обучения технологов, программистов и операторов станков с ЧПУ в г. Днепр открыт обучающий класс на базе сервисного центра Инжиниринговой Компании "ТвисТ".

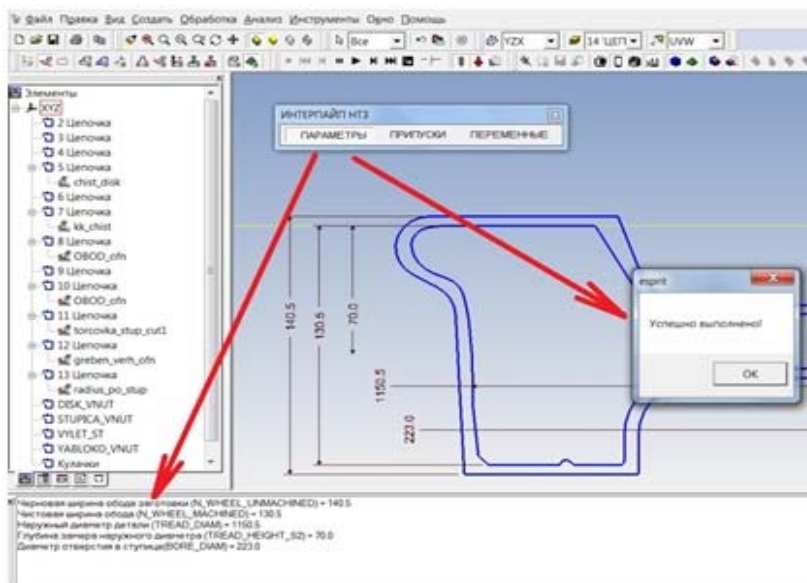
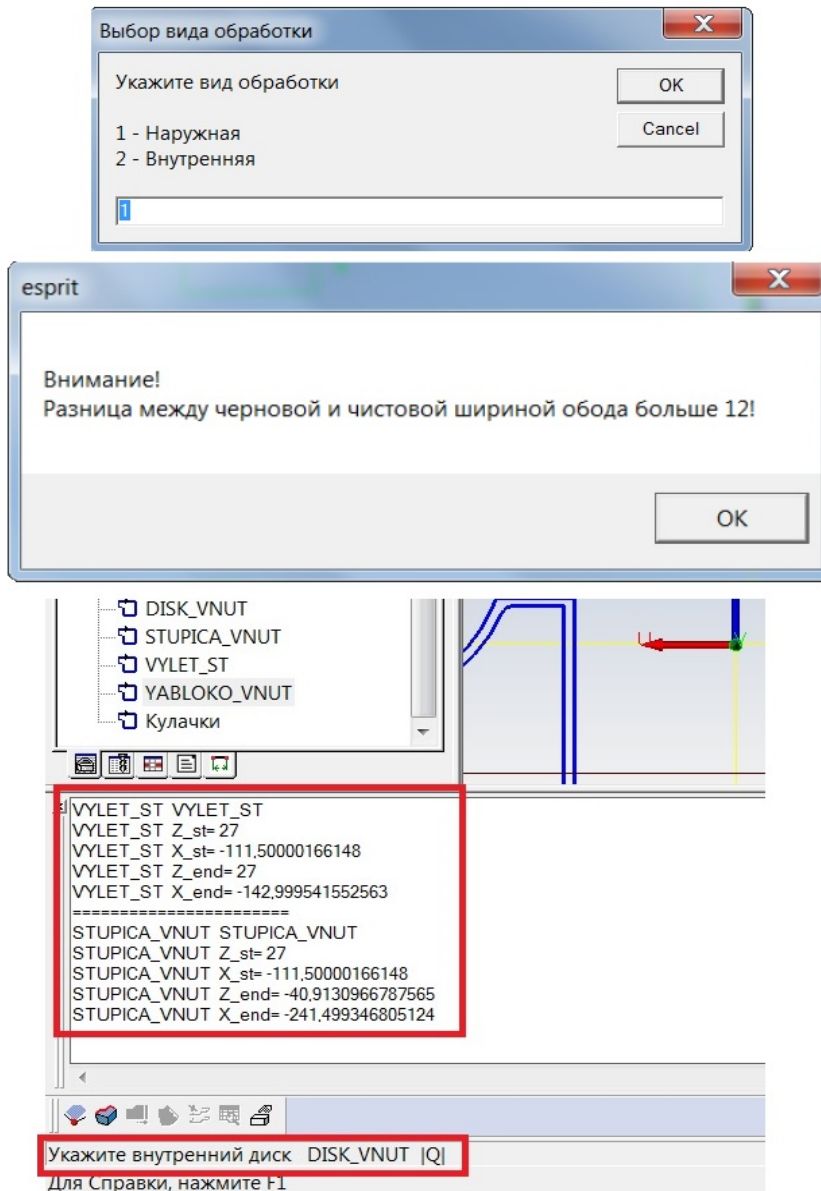


Рис. 3.5. Фрагменты работы макросов

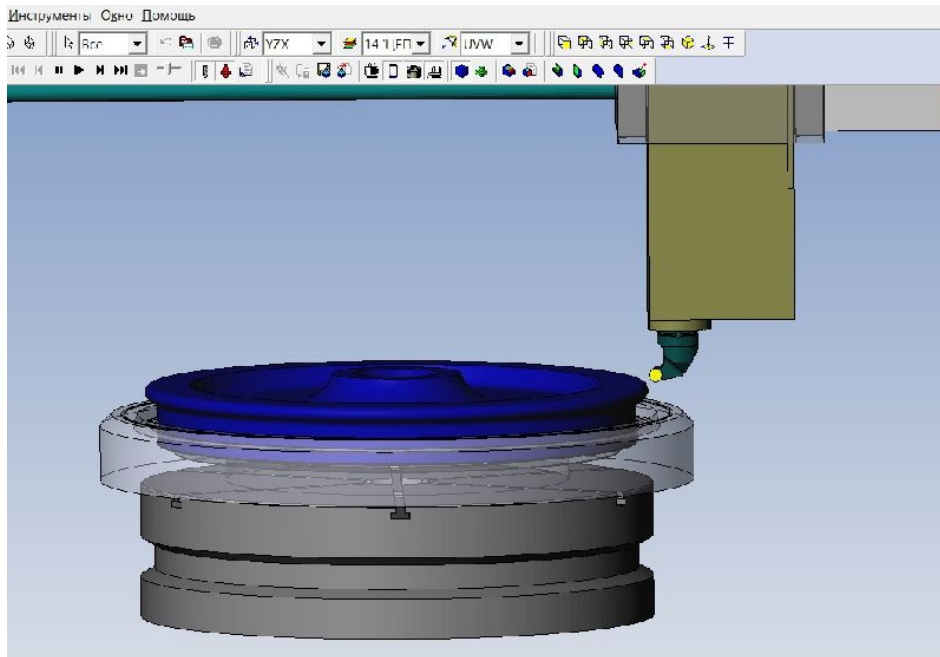


Рис. 3.6. Симуляция обработки в САПР ESPRIT и процесс резания на станке

3.2. ESPRIT – лучший программный инструмент для производства

Реальным шагом к построению эффективного производства в Украине может стать освоение передовых методов работы, которые применяют успешные зарубежные предприятия. Одним из них является автоматизированная разработка управляющих программ с помощью программного комплекса ESPRIT (рис. 3.7).

Комплекс ESPRIT, разработанный компанией DPTechnology (США), используют крупнейшие западные производители – лидеры

в своих сегментах рынка. В их числе: Boeing, NASA, Peugeot, Citroen, Audi, Volvo, Ford, Man, Nakamura-Tome, MoriSeiki, Mazak, Doosan, Fanuc, Завод "Салют", ВСМПО-АВИСМА, НПО "Сатурн" (Россия), ПО "ЮжМаш", Крюковский вагоностроительный завод (Украина) и многие другие. В целом управляющие программы с помощью ESPRIT разрабатывают на 15000 предприятий по всему миру, в том числе и на предприятиях Украины.



Рис. 3.7. Обработка детали "Вал" на станке DOOSAN 700XLY с применением ПО ESPRIT

"Раньше на разработку программ для наших токарных и фрезерных станков мы затрачивали дни, плюс как минимум еще день для отладки на станке. Теперь же для этого требуются часы или даже минуты. Сегодня для создания 200 новых УП в месяц и модификации 60000 уже готовых мы обходимся всего десятью программистами".

Walter Lentz, главный NC-программист компании Halliburton Manufacturing

"При запуске токарного обрабатывающего центра DOOSAN Puma 700 XLY (PMЦ 5.5 м, ось Y) для изготовления крупногабаритных валов на предприятии АО "Сумской завод "Насосэнергомаш" использовался программный комплекс ESPRIT (рис. 3.8). Фрезерный модуль постпроцессора обрабатывался непосредственно возле станка. В результате удалось достигнуть полной автоматизации выдачи данных УП без последующей "ручной" корректировки и ускорить введение сложнейшего станка в эксплуатацию".

Сергей Кулик, инженер отдела программирования станков с ЧПУ

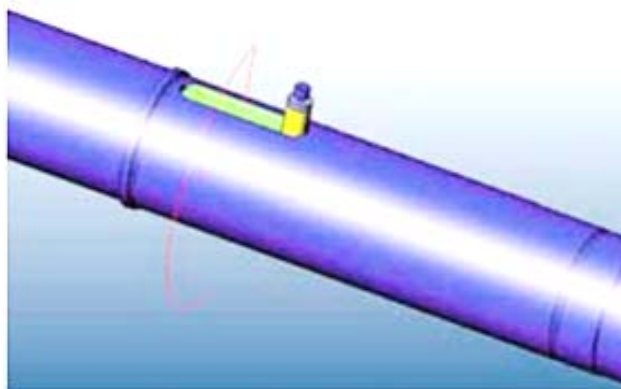


Рис. 3.8. Симуляция обработки шпоночного паза на валу с использованием оси Y

Почему ESPRIT так популярен среди разработчиков управляющих программ (УП) и так высоко ценится владельцами предприятий? Потому, что его применение позволяет:

- затрачивать на создание и отладку управляющих программ не дни, а часы или даже минуты;
- применять одно САМ-средство для программирования обработки на всех станках с ЧПУ в цехе (рис. 3.9): как самых простых, так и самых сложных;
- экономить производственные ресурсы и оберегать от поломки дорогостоящее оборудование, инструмент и оснастку, что достигается благодаря возможности быстро обнаружить и исправить ошибки в обработке еще до передачи УП в цех;
- использовать при подготовке УП как лучший мировой опыт, так и опыт собственных специалистов, благодаря наличию в системе ESPRIT пополняемой базы знаний KnowledgeBase и возможности автоматического применения оптимальных режимов обработки;
- получить важные конкурентные преимущества: повысить качество обработки, уменьшить машинное время, ускорить подготовку выпуска новых изделий, сократить сроки окупаемости станков.

"В современных условиях производства деталей путем обработки резанием требуется высокий уровень автоматизации технологического процесса, в частности использование надежных САМ-CAD систем. На нашем предприятии успешно применяются САМ системы: ESPRIT, Delcam, mastercam.

Хочется выразить особую благодарность высококвалифицированным специалистам, сопровождающим каждый программный про-

дукт. Однако специфика нашего производства требует эффективного обслуживания многоосевого и многошпиндельного оборудования. Мы сделали выбор в пользу ESPRIT.

```
%  
O0005 (STORONA1)  
((<< COMPANY_TWIST >>)  
((<< ESPRIT_VERSION_2011 >>)  
( DATA_YEAR_TIME )  
((<<PUMA_700 X L Y >>)  
  
G21 G40 G80  
N10 (TOOL D32)  
N12  
(2PAZ2 C ROT Z Z_CHERN)  
N20 (PAZI ZAXOD I CHERNOV)  
M5 P11  
M5 P12  
C0 G28 V0 U0  
G28 H0  
G28 C0  
N30 T1212
```

Рис. 3.9. Пример управляющей программы, сгенерированной в САМ-системе ESPRIT

Комплекс ESPRIT позволяет нашим пользователям легко решать вопросы, связанные с автоматизацией программирования станков любой сложности за счет возможности полного моделирования процесса обработки деталей.

Преимущества ESPRIT: открытый доступ к следующим модулям программы – к огромной базе разработанных 3D-моделей станков разных производителей; к базе рабочих постпроцессоров для всех известных систем ЧПУ. Кроме того, комфортная работа с данной программой обеспечивается возможностью создания пользовательских 3D-моделей оборудования, а также благодаря великолепному сопровождению от представительства в Украине в любое время суток".

*Чубенко М.Г., ведущий программист
ПО "Южный машиностроительный завод", г. Днепр*

Все виды современной механической обработки

Средствами ESPRIT эффективно программируются все виды обработки, которые востребованы современным машиностроением (рис. 3.10 – рис. 3.12). Как показано в п. 3.1, в их числе 2 – 5-осевая фрезерная обработка, 2 – 22-осевая токарная обработка, обработка на многофункциональных токарно-фрезерных центрах и станках с осью В, а также 2 – 5-осевая электроэрозионная обработка.

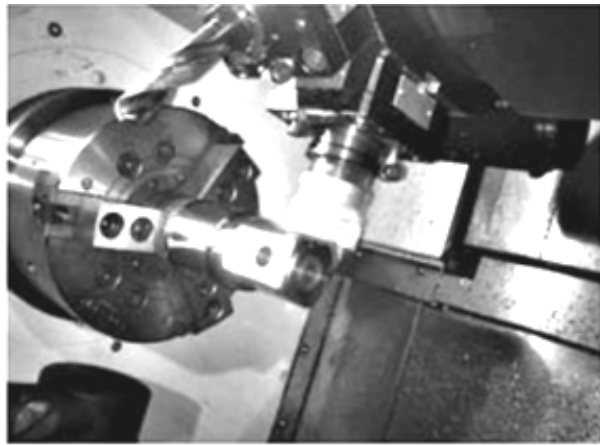
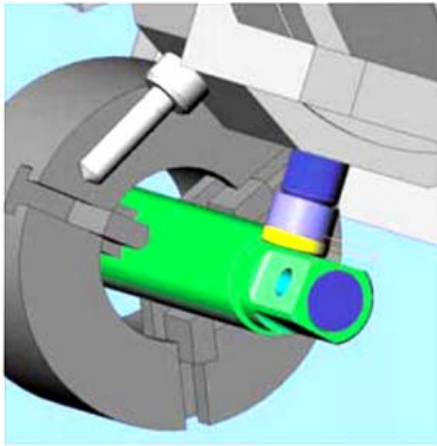


Рис. 3.10. Симуляция и процесс обработки детали "Валик" на станке DOOSAN PUMA 2100 SY

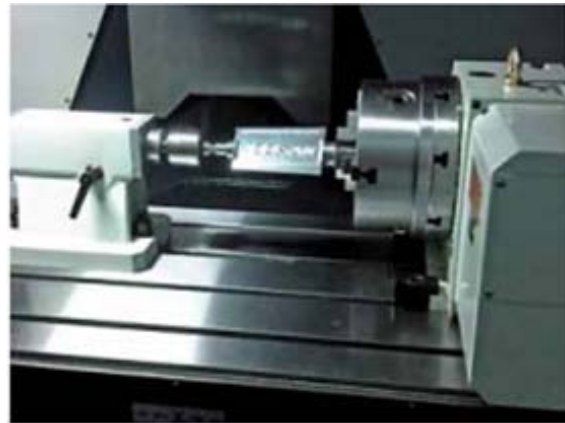
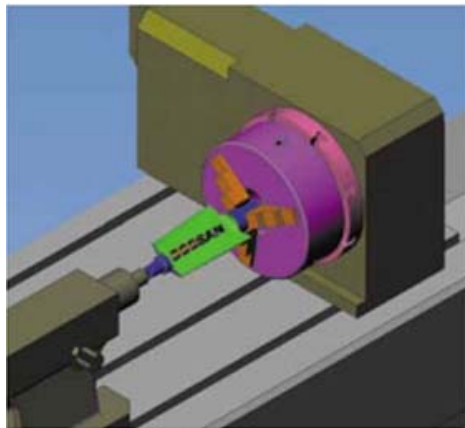


Рис. 3.11. Симуляция обработки и обработка детали "Лопатка" на станке DOOSAN DNM500 с поворотным столом

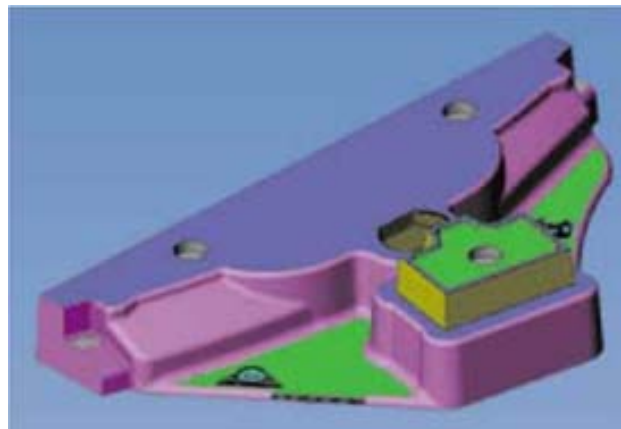


Рис. 3.12. Симуляция обработки детали "Башмак" на станке DOOSAN Mynx7500

Если на предприятии начинают работать с ESPRIT, вероятность того, что понадобится какой-либо другой инструмент для программирования обработки, практически равна нулю.

Легко, удобно, быстро

Возможности программного комплекса позволяют легко и быстро (и это без преувеличения!) разрабатывать управляющие программы, как для простых, так и для самых сложных станков. Основанный на платформе Windows, комплекс ESPRIT использует все преимущества этой операционной системы – удобный и настраиваемый интерфейс, интеграцию с Microsoft Office для создания документации, поддержку OpenGL, onLine-помощь, основанную на технологии HTML.

Благодаря наличию обширного набора трансляторов, ESPRIT напрямую работает с 3D-моделями из любой САПР, импортируя их без каких-либо повреждений. Это позволяет исключить необходимость редактирования или восстановления исходной геометрии. К тому же при разработке управляющих программ появляется возможность использования 3D-моделей любого типа: твердотельные, поверхностные, каркасные, фасетные (в формате STL). Все это значительно повышает эффективность процесса разработки управляющих программ и уменьшает его длительность.

Лучшие методы плюс производственный опыт

ESPRIT KnowledgeBase позволяет замкнуть цепь между разработчиками управляющих программ и цехом, так как с ее помощью весь приобретенный опыт сохраняется в единой базе знаний и впоследствии может быть легко использован. Любой технолог-программист одним нажатием кнопки может выбрать наиболее подходящий метод обработки, исходя из особенностей новой детали. При этом система автоматически предлагает оптимальный процесс обработки, режущий инструмент и режимы резания. Освобождая технологов-программистов от рутинных операций, KnowledgeBase дает им возможность сосредоточиться на совершенствовании процессов обработки, а предприятию – выйти на принципиально новый уровень производственных возможностей.

Каждый раз, когда при создании управляющей программы используется база знаний, процесс обработки автоматически проверяется на соответствие лучшим методикам и обновляется, что позволяет постоянно повышать качество обработки. KnowledgeBase помогает устранить из процесса разработки УП догадки и предположения и обеспечить лучший результат на каждом ее этапе. Все это способствует повышению производительности и рентабельности производства.

Универсальный постпроцессор ESPRIT позволяет быстро создавать качественные управляющие программы в G-кодах. Каждый пользователь ESPRIT получает полный доступ к обширной библиотеке готовых постпроцессоров для конкретных станков и стоек ЧПУ, в том числе, сертифицированных ведущими производителями оборудования. Благодаря открытой архитектуре ESPRIT, пользователи могут без особого труда корректировать их, исходя из своих предпочтений и производственных требований.

Визуализация и проверка на столкновения

Быстрая, точная и надежная проверка обработки средствами ESPRIT позволяет не прибегать к дорогостоящей отладке управляющих программ непосредственно на станке (рис. 3.13).

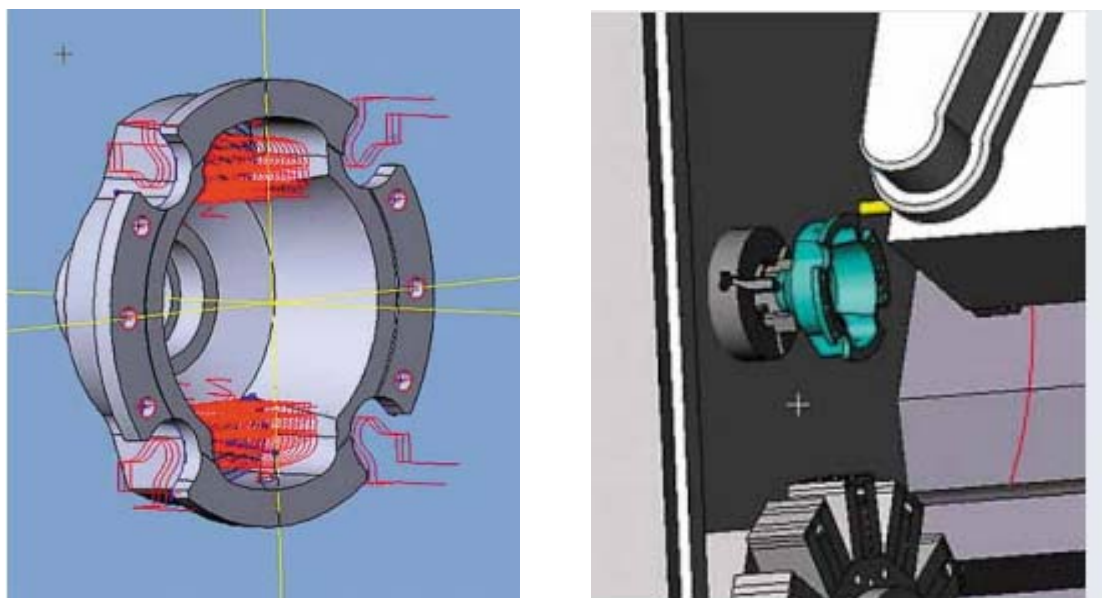


Рис. 3.13. Пример визуализации обработки сложной детали на многоосевом обрабатывающем центре MAZAK

Визуализация процесса обработки в среде ESPRIT дает полную уверенность в его правильности, позволяя сравнить модель детали, "обработанной" в ESPRIT, с ее конструкторской версией. Система проводит всестороннюю проверку УП, моделируя всю среду обработки – станок, инструмент, оснастку, приспособление, заготовку и деталь. Высококачественная визуализация обработки в режиме реального времени и надежный метод обнаружения столкновений гарантируют, что даже самые сложные детали будут корректно изготовлены с первого раза, а дорогой станок, инструмент и оснастка не будут повреждены.

Таким образом, применение ESPRIT позволит сократить простои оборудования, максимально увеличить производительность и уменьшить стоимость станочной обработки.

Всегда с поддержкой

Каждый день перед производителями встают все новые задачи, и для их успешного решения требуются новые подходы. Система поддержки ПО ESPRIT обеспечивает полный доступ к различным ресурсам для изучения возможностей программного продукта, автоматизированное обновление ПО, доступ к web-ресурсам ESPRIT и подписку на журнал "ESPRIT de CORPS", где обсуждаются актуальные проблемы программирования станочной обработки и способы их решения.

Пользователи, подписавшиеся на активную поддержку, систематически получают обновления программного продукта. Каждый новый релиз предлагает значительное расширение функциональных возможностей, сделанное с учетом многочисленных пожеланий пользователей. Отдача от таких обновлений будет высокой, а затраты времени на освоение новых возможностей – минимальными.

3.3. Испытайте систему ESPRIT и станьте ее фаном!

Как часто вы отказываетесь от проекта из-за отсутствия средств для его реализации?

Как часто, пытаясь работать с разными программами, вы не находите качественной?

Когда наконец-то разработчики САМ-систем создадут продукт, который поможет решить любые задачи проектирования технологических процессов на станках с ЧПУ? В далеком 1982 году молодые программисты Дэниел Фрейссинет и Пол Рикард для того, чтобы заниматься автоматизацией разработки технологических процессов, организовали компанию DP Technology (D-Дэниел, P-Пол). Ее основным продуктом стала программа ESPRIT, реализующая задачи зарождающегося в то время САМ направления. В 2012 году DP Technology отметила свое 30-летие. За эти годы произошла эволюция программы от ESPRIT Basic (1984), ESPRIT Unix (1989), ESPRIT X (1992), ESPRIT NT (1995), ESPRIT98 (1998), ESPRIT 2010 до ESPRIT 2012.

Из года в год разработчики неустанно совершенствовали ее, поддерживая обратную связь с производителями со всего мира,

прислушиваясь к их пожеланиям и отзывам, превращая ESPRIT в наиболее эффективный инструмент для программирования станков с ЧПУ (рис. 3.14). К 1998 году на предприятиях было установлено 533 тысячи лицензионных копий программы ESPRIT, а к 2011 году – уже 105 миллионов!

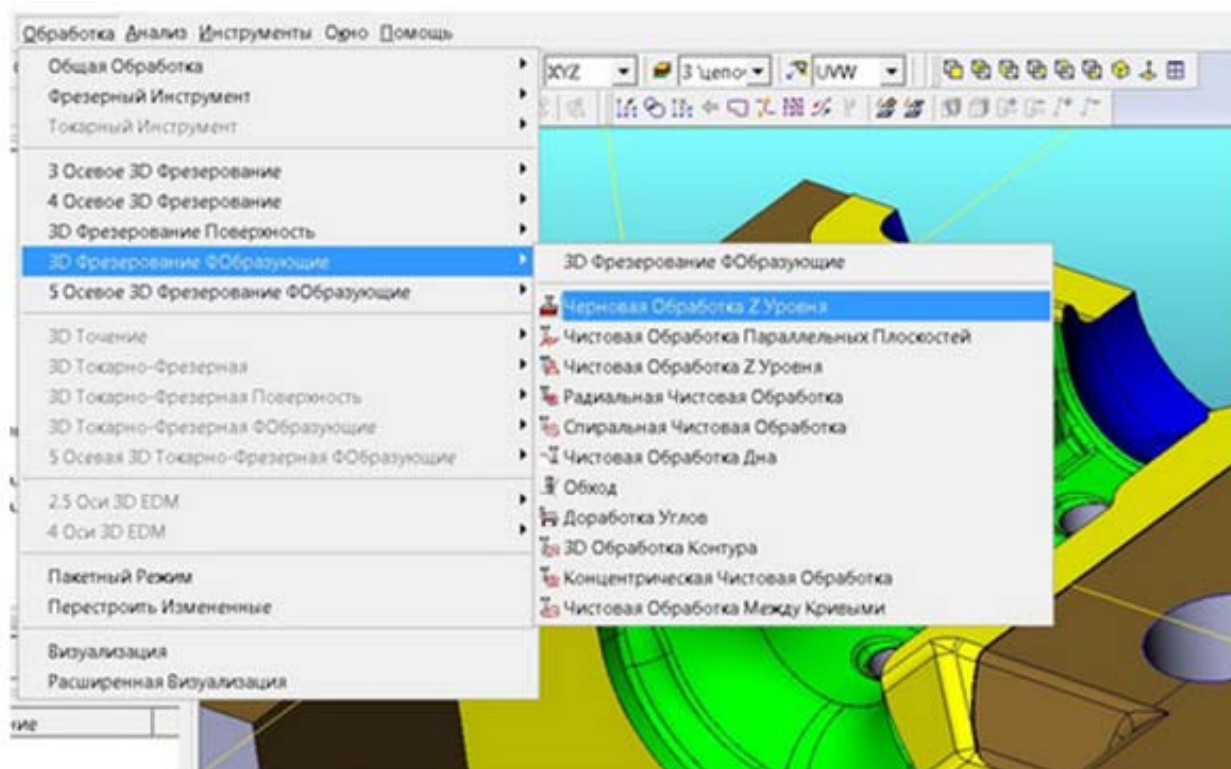


Рис. 3.14. Набор циклов и подциклов

На ежегодной международной конференции ESPRIT, которая проходила с 4 по 8 июня 2012 года в США, на родине ESPRIT, собралось более 350 человек из 27 стран мира, в том числе из Украины.

Это подчеркивает необыкновенную популярность программного комплекса ESPRIT во всем мире. Следует отметить, что один из разработчиков ядра ESPRIT – русский математик, хорошо знающий особенности технологических задач и менталитет наших пользователей. Возможно, именно этот факт объясняет высокий уровень интереса, проявляемого специалистами СНГ к данной программе. По словам одного из основателей компании – Дэниела Фрейссинета – российские технологи программисты сыграли одну из ключевых ролей в совершенствовании современной версии программы ESPRIT. Заслуги специалистов были отмечены вручением Андрею Ловыгину – директору представительства ESPRIT в России – особой премии.

Около двух лет этот универсальный САМ-продукт завоевывает уважение у отечественных специалистов, демонстрируя его возможности. За это время на многих отечественных предприятиях установлены программы для ее тестирования в реальных производственных условиях и обучены специалисты, десятки лицензионных версий ESPRIT уже используются. Созданы сотни постпроцессоров, адаптированных для станков DOOSAN, HAAS, MAZAK, MITSUBISHI, OKUMA, TOS, GORATU и др.

Но в то же время, несмотря на то, что руководители многих предприятий хорошо понимают, что "пиратская" программа может повести себя непредсказуемо и тогда ремонт оборудования или бракованная деталь могут привести к значительным затратам, приобретать лицензионные CAD/CAM программы из-за их дороговизны не спешат.

Принимая во внимание особенности нашего рынка, для популяризации программы ESPRIT, компания DP Technology временно снизила стоимость комплекса для украинских заказчиков.

За время работы представительства реализовано множество проектов "от чертежа до готовой детали", организованы технические семинары, в частности в технических ВУЗах Украины. В настоящее время продолжается активное обучение и обеспечивается техническая поддержка продуктов ESPRIT, как для новичков, так и специалистов предприятий, являющихся лицензированными пользователями.

ESPRIT имеет широкий набор готовых решений. В зависимости от типа программируемого оборудования, кинематики и количества осей, конкретному пользователю подбирается необходимая конфигурация программного обеспечения (рис. 3.15). В каждом решении находится набор вариантов для определенных операций, что делает систему гибкой, а интерактивная справка на русском языке помогает не только легко сделать правильный выбор, но и детально раскрывает значение каждого параметра в предлагаемом наборе функций, позволяющем добиться наилучшего результата. Например, при помощи всего двух подциклов "Черновая Обработка Переменного Z" (3D Фрезерование Поверхности) и "Чистовая Обработка Z Уровня" (3D Фрезерование Формообразующих) была обработана деталь, представленная на рис. 3.16. Программа имеет широкие возможности, как в выборе вида обработки, так и в разнообразии используемого инструмента, карт наладки, пользовательских решений.

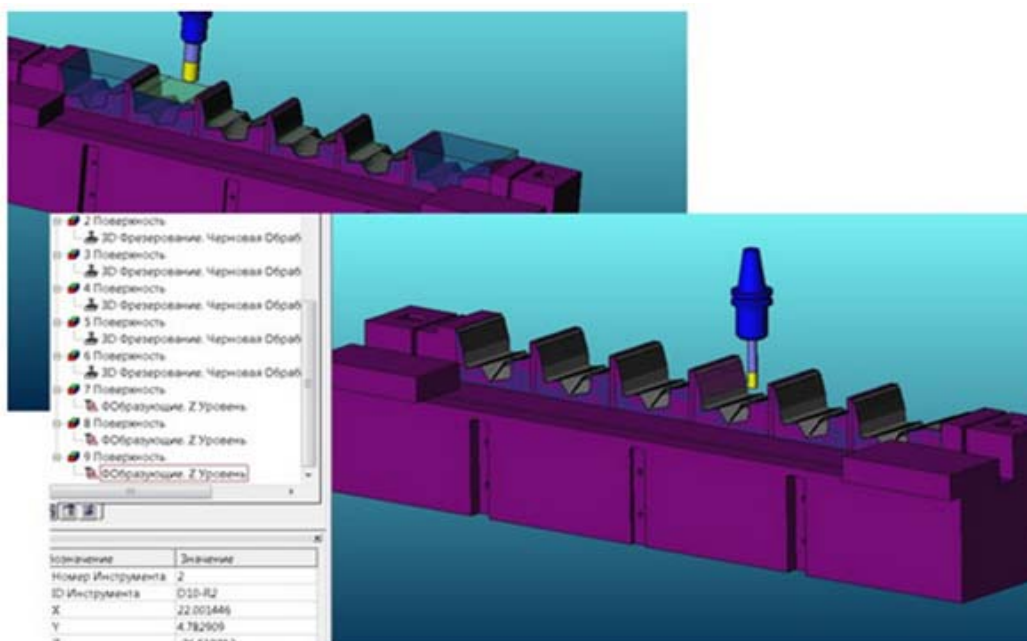


Рис. 3.15. Разработка проекта в ESPRIT



Рис. 3.16. Обработанная деталь

В доступной базе постпроцессоров имеется множество решений для таких стоек как Fanuc, Sinumerik, БалтСистем, Westlabs, Mitsubishi, Heidenhein и др. Кроме того, ESPRIT имеет открытую архитектуру постпроцессора, что позволяет пользователю самостоятельно настраивать вывод программы "под себя", используя встроенную справку по постпроцессору.

ESPRIT предоставляет широкие возможности программирования токарных, токарно-фрезерных, фрезерных, многоосевых обрабатывающих центров, электроэрозионного оборудования. В ESPRIT есть "База Знаний", служащая для настройки и хранения данных о режущем инструменте, материале детали, режимах обработки.

Использование всего потенциала оборудования, уменьшение влияния человеческого фактора, приложение Windows, поддержка практически всех форматов CAD-систем (в т.ч. программы Компас), предупреждение столкновений, автоматическое распознавание геометрических фигур, открытый и универсальный постпроцессор с возможностью быстрого и несложного редактирования, наличие библиотеки постпроцессоров для станков ведущих производителей, наличие библиотеки режущего инструмента, а также возможность создания библиотеки исходя из собственных потребностей, верификация (просмотр) процесса обработки прямо в программе, отображение среды обработки (стол, шпиндель, приспособление), верификация любой операции с учетом отработки предыдущей, гибкий выбор типа обработки, сравнение детали и заготовки, автоматическое создание программы обработки с помощью Базы Знаний, синхронизация токарно-фрезерной обработки, удобный интерфейс на русском языке, быстрое реагирование на проблемы официального дилера в Украине – далеко не полный список преимуществ программы.

3.4. PROFITMILLING для эффективного фрезерования



В новой версии программы ESPRIT-2013 представлена революционная технология, известная как ProfitMilling (прибыльное фрезерование). Для достижения отличного качества и точности обработки металлов резанием и высокой производительности предлагаем рассмотреть это великолепное CAM решение.

Жесткая рыночная конкуренция заставляет производителей постоянно искать простые и эффективные решения для изготовления качественной продукции с минимальными затратами. Естественно, речь обычно идет о сокращении машинного времени.

Технология ProfitMilling от ESPRIT позволяет радикально сократить время цикла и время программирования, а также значительно снизить энергопотребление оборудования и увеличить срок службы инструмента, что в целом существенно увеличивает производительность и снижает затраты.

Эмпирическим путем установлено, что ProfitMilling по сравнению с традиционными концентрическими стратегиями черновой обработки сокращает время цикла до 75 %, при этом повышает срок службы инструмента приблизительно на 500 %!

Данная технология является лучшим решением, использующим преимущества и достаточно прогрессивной трохoidalной стратегии обработки, и традиционной траектории, получаемой путем линейного смещения инструмента.

Суть технологии заключается в том, что траектория ProfitMilling рассчитывается с учетом отслеживания толщины стружки и бокового усилия резания с сохранением постоянного угла врезания в определенном диапазоне скорости удаления материала. Благодаря этому в единицу времени удаляется существенно больше материала без ущерба для качества обработки. Стратегия ProfitMilling оптимизирует силы резания за счет контролируемого ускорения станка для получения оптимального результата.

ProfitMilling – это высокоскоростной цикл черновой обработки, позволяющий значительно увеличить глубину обработки и величину подачи инструмента при оптимальной скорости. Данная технология контролирует не один параметр, а сразу несколько важных характеристик станка в процессе резания (рис. 3.17). Для получения максимальных преимуществ обеспечивается динамическое изменение режимов резания по всей траектории движения инструмента.

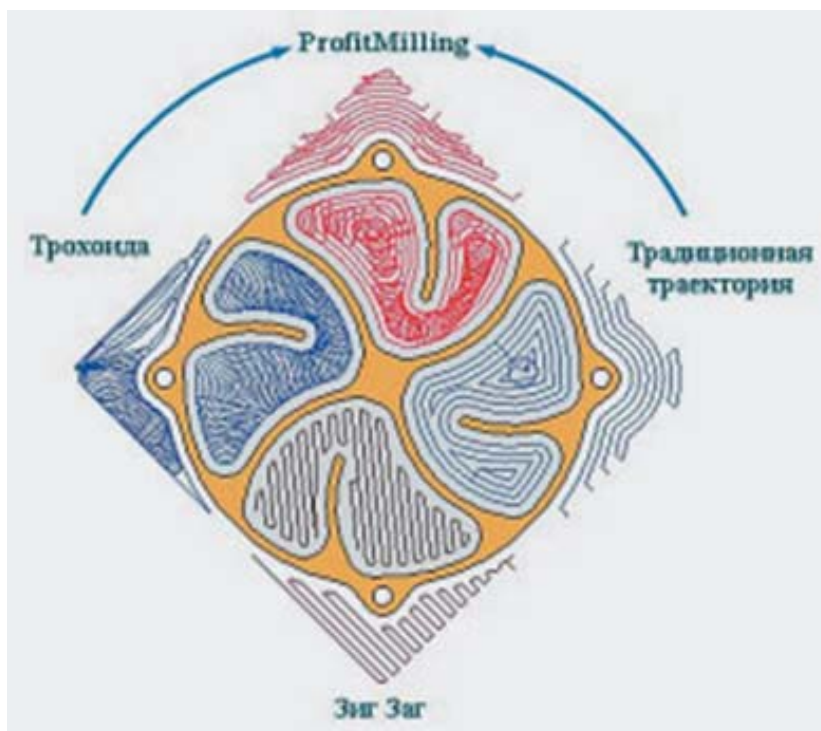


Рис. 3.17. Принцип создания ProfitMilling – оптимальная комбинация двух стратегий

Для сравнения, в традиционной обработке существуют некоторые ограничения (рис. 3.18):

- острые углы;
- полная ширина;
- постоянная подача;
- крутое врезание.

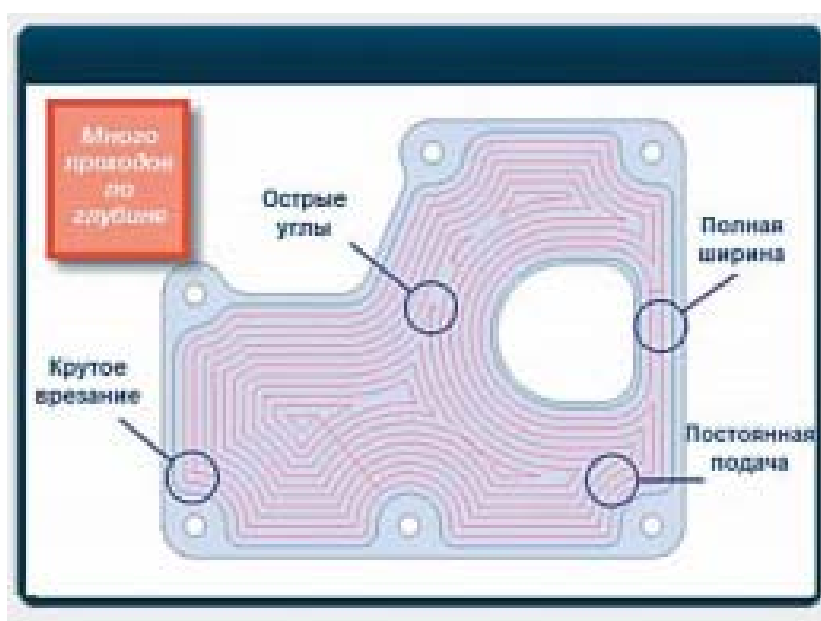


Рис. 3.18. Ограничения традиционной обработки

Новая технология ProfitMilling позволяет обойти данные ограничения и добиться следующих преимуществ (рис. 3.19):

- сглаженная траектория;
- высокоскоростная обработка в пазах;
- оптимальная подача;
- подборка углов.

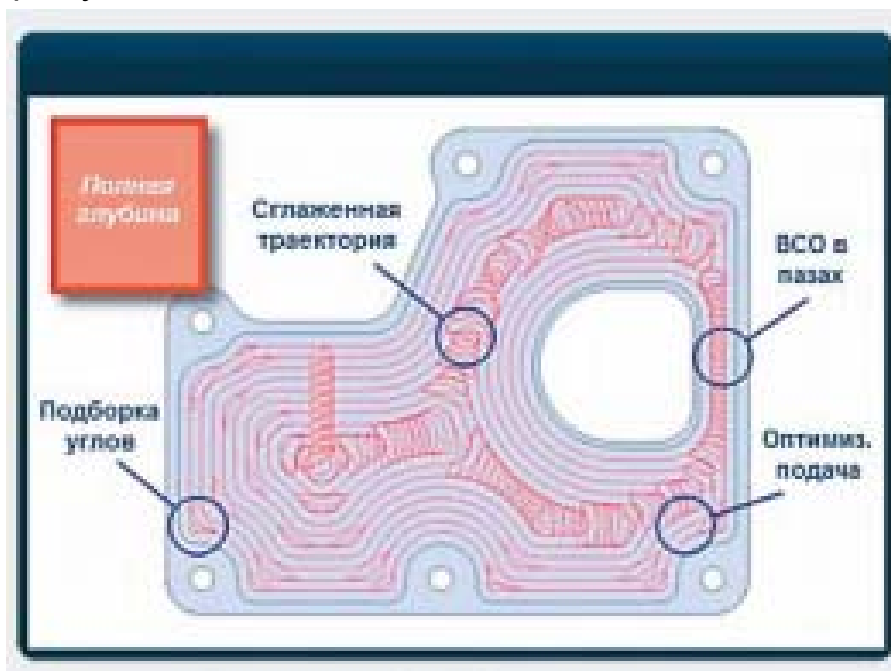


Рис. 3.19. Преимущества ProfitMilling

Таким образом, применение метода ProfitMilling при создании траектории движения инструмента позволяет достичь:

- плавного (сглаженного) перемещения инструмента по требуемой траектории;
- контролируемого трохоидального перемещения;
- сокращения количества режимов обработки, выполняемых с ускорением, что снижает износ оборудования и энергозатраты.

Для лучшего понимания преимуществ проектирования по методу ProfitMilling предлагаем сравнить советы разработчиков инструмента технологом, использующим в работе программу ESPRIT, и тем, кто пока ее не освоил.

Обычные рекомендации производителей режущего инструмента технологом:

- Применяйте определенную подачу и постоянную скорость резания при определенных условиях. Настройте параметры износа/производительности.

- Для закаленной стали, титана и других твердых и жаропрочных материалов используйте радиальное врезание в пределах 27 % ... 37 %. Для более мягких материалов используйте радиальное врезание вплоть до 90 %. Большинство деталей могут быть обработаны на глубине двух диаметров инструмента.

- Всякий раз, когда возможно, используйте инструменты с большим числом режущих кромок. Охлаждающая жидкость, как правило, не рекомендуется к применению, так как ее использование может увеличить риск теплового удара на режущей кромке инструмента. Высокое давление воздуха в зоне резания может быть полезным, так как способствует удалению стружки.

- Проверьте настройки ЧПУ станка. Функция "look-ahead" или настройки контроля углов могут отрицательно сказаться на времени цикла. Убедитесь, что требуемые подачи достигнуты.

Технология ProfitMilling может использоваться для 2,5; 3-х, 4-х и 5-осевой обработки в следующих циклах (рис. 3.20):

- обработка кармана;
- черновая обработка переменного Z;
- черновая обработка Z уровня в стратегиях формообразующих;
- 5-осевая черновая обработка.

Рекомендации технологам, работающим в программе ESPRIT:

- для расчета траектории методом ProfitMilling в ESPRIT достаточно просто выбрать нужную схему движения инструмента или стратегию резания в зависимости от используемого цикла обработки (рис. 3.21) в закладке траектория инструмента.

Применение ProfitMilling позволяет еще более эффективно отводить тепло, генерируемое в процессе обработки от детали и от инструмента, передавая его в стружку (до 97 %).



Рис. 3.20. Моделирование обработки в ESPRIT посредством технологии ProfitMilling для 3-х, 4-х и 5-осевой обработки

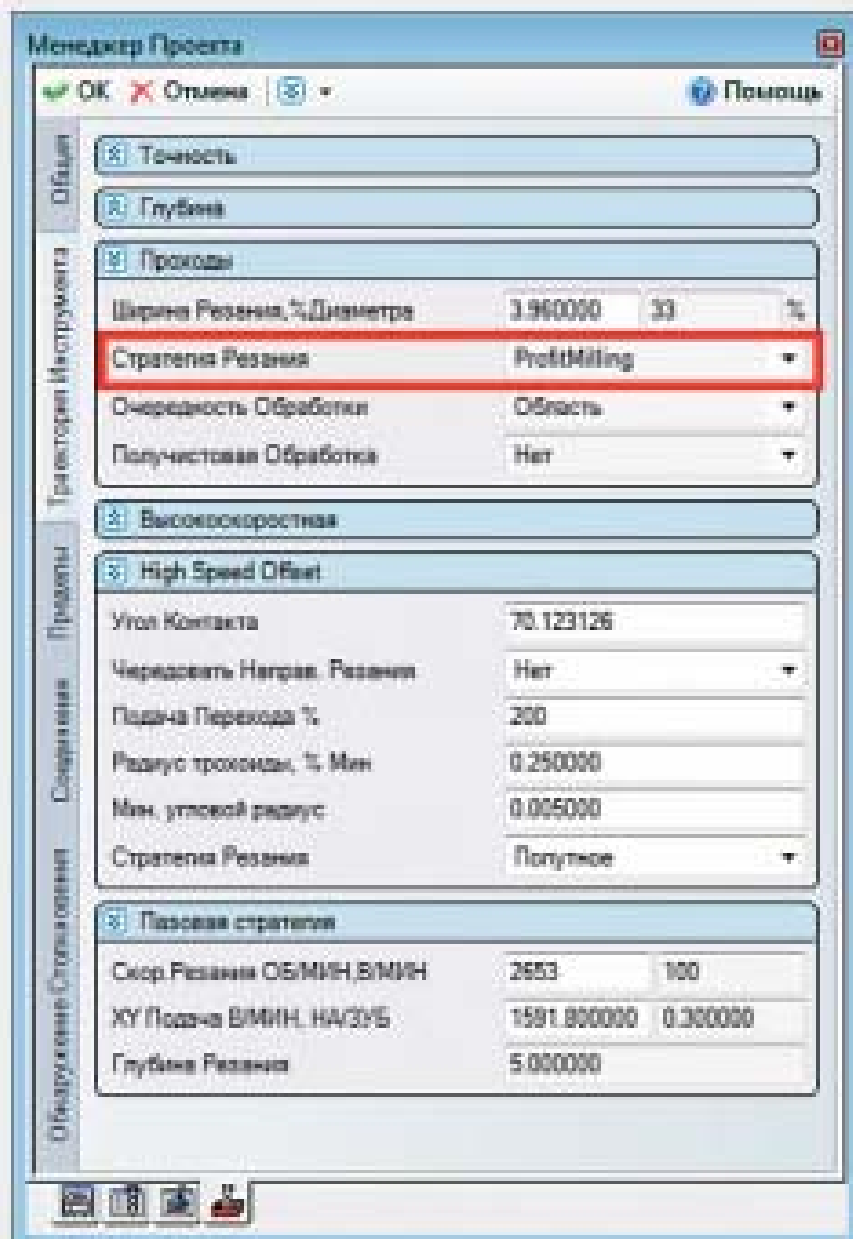
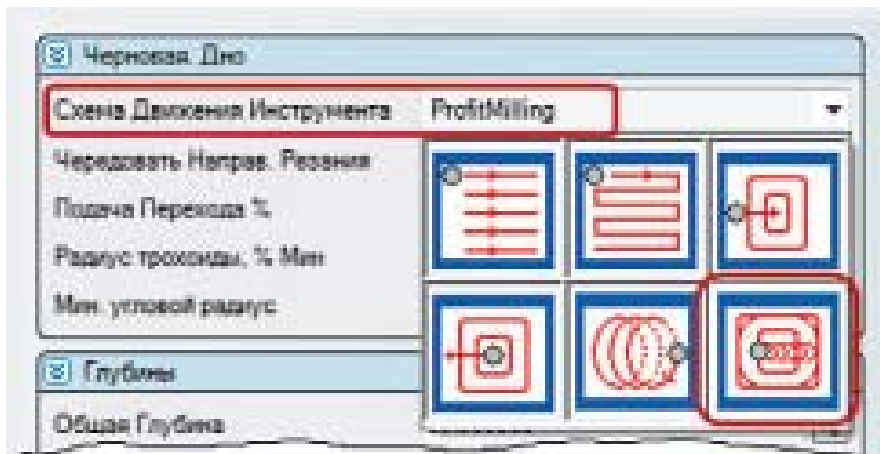


Рис. 3.21. Выбор технологии ProfitMilling в САМ системе ESPRIT

3.5. В помощь инструментальным решениям: новые стратегии обработки, повышающие стойкость инструмента и производительность технологических операций

Разработчики CAD/CAM-систем предлагают новые стратегии обработки, повышающие стойкость инструмента и производительность технологических операций.

Многофункциональная CAM-система ESPRIT от компании DP Technology (США) позволяет решать широкий круг задач программирования механической обработки на станках с ЧПУ. Благодаря совместимости с оборудованием любой сложности, этот высокопроизводительный продукт удовлетворяет потребности различных отраслей промышленности: от производства медицинского инструмента различной геометрии до ответственных деталей военного назначения.

Разработчики наиболее мощного и гибкого ПО представляют обновленную версию продукта, включающую как усовершенствованные функции системы, так и принципиально новые стратегии для обработки металлов резанием.

Общие обновления ПО

- увеличение скорости визуализации за счет обновления ядра симуляции до версии MachineWorks 7.4;
- улучшение и расширение типов файлов для обмена данными.

Новые и обновленные команды и функции:

- исправление незначительных дефектов в твердом теле;
- сглаживание поверхности (рис. 3.22);

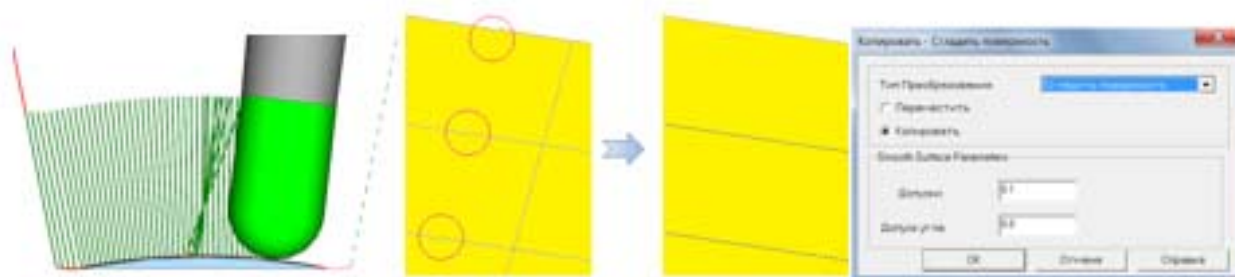


Рис. 3.22. Сглаживание дефектов

- редактирование скругления 3D-модели – удаление или редактирование значения величины скругления (рис. 3.23);

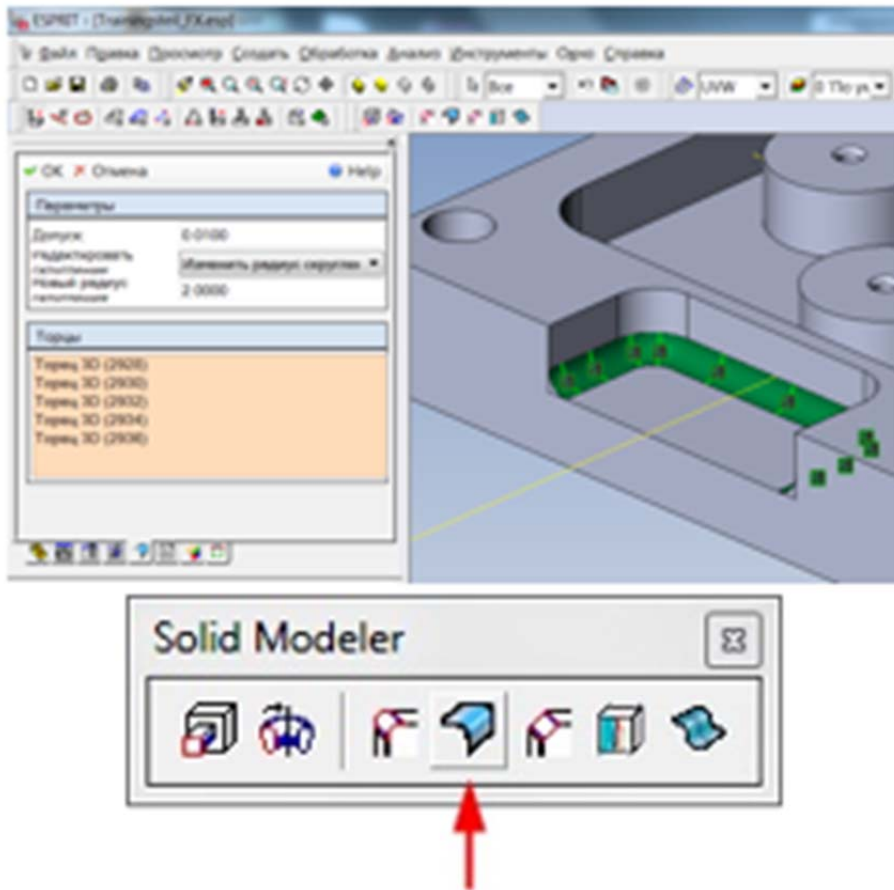


Рис. 3.23. "Редактировать Скругление" на панели "3DМоделирование"

- упрощение механизма распознавания отверстий, расширение типов сложных отверстий (рис. 3.24).

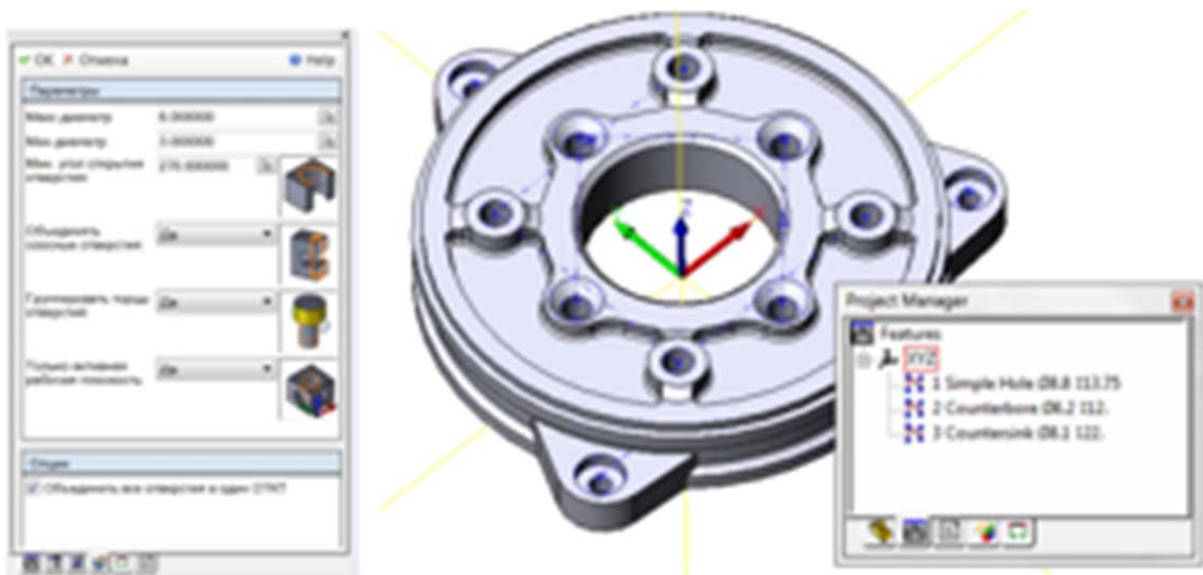


Рис. 3.24. Больше возможностей в "Автоматическом распознавании отверстий"

Расширились и возможности постпроцессирования: теперь экспорт созданной управляющей программы (УП) можно осуществлять в отдельные документы. Удобство решения заключается в возможности сохранять УП для каждой операции или типа инструмента отдельно. Для этого добавлены следующие команды:

- Begin Redirect (FileName as string) – экспортирует УП в указанный пользователем файл;
- End Redirect – возвращает экспорт УП в исходный файл окна настройки "Вывод УП".

Введенные опции заточены под повышение стойкости инструмента и, соответственно, производительности технологических операций в целом. Ниже рассмотрим обновленные стратегии ESPRIT-2016 в программировании различных видов механической обработки.

Новые стратегии в программировании фрезерной обработки

Высокоскоростная стратегия фрезерования ProfitMilling обновилась возможностью управления шириной резания, что, в свою очередь, помогает использовать трохoidalную обработку для карманов любой формы и размера. Величина ширины обработки по трохоиде пропорциональна площади фрезерования и задается пользователем (рис. 3.25).

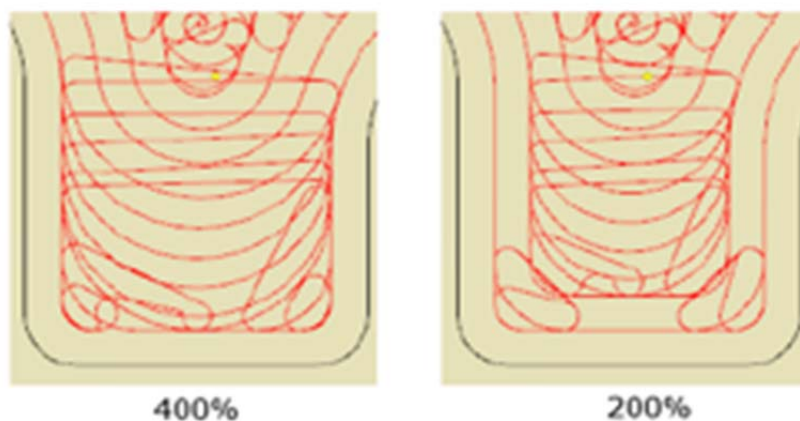


Рис. 3.25. Зависимость заданной ширины и площади обработки

Для случаев обработки на пониженных скоростях предусмотрен контроль стабильности нагрузки на инструмент при движении со смещением. Новая опция разработана для обработки карманов, черновой обработки "Z-уровня" и циклов "Свободная Форма".

Изменения коснулись и 5-осевой черновой и чистовой обработки. Отметим наиболее существенные из них:

1. Контроль глубины врезания при обработке деталей сложной геометрии с переменной высотой (рис. 3.26):

- дополнение цикла "Боковая Обработка" опцией "постоянная высота" – обеспечение постоянной глубины резания для всех проходов и исключение вертикального перемещения инструмента;
- расширение стратегии "Обработка Боковой Стороной" опцией постоянной или адаптивной глубины резания – контроль нежелательного врезания.

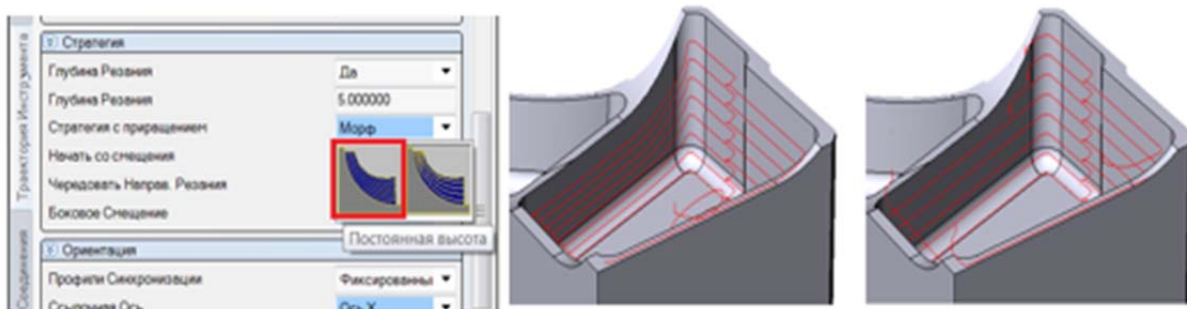


Рис. 3.26. Контроль глубины врезания при боковой обработке

2. Обновление Стратегии 5-ти осевой спиральной обработки (ранее – "Обработка Лопатки"). Соответственно, внесены изменения в названия циклов: "5-ти осевая Черновая Спиральная Обработка" (ранее – "Черновая Лопатка") и "5-ти осевая Чистовая Спиральная Обработка" (ранее "Чистовая Лопатка"):

- расширен перечень обрабатываемых деталей более сложными формами: от медицинских протезов до деталей двигателей;
- добавлена опция для исправления и сглаживания дефектов на поверхностях и торцах деталей;
- добавлена возможность увеличения подачи на кромках;
- упрощена процедура указания параметров траектории.

Советы от разработчиков

- Любая неточность геометрии в цикле 5-осевой чистовой спиральной обработки влечет за собой нестабильность траектории инструмента. В случае, когда САМ-система не позволяет исправлять такие дефекты, пользователю рекомендуется редактировать неточности геометрии в среде САД-системы.

- В цикле черновой спиральной обработки можно увеличить подачу при холостых движениях инструмента, используя параметр "Максимальное изменение подачи" в настройках "Траектории Инструмен-

та". Таким образом, сокращается время обработки для прерывистого резания и при подводе инструмента к заготовке при стандартной величине подачи.

Новые стратегии в программировании черновой токарной обработки

В качестве идеального решения для программирования операций чернового точения и обработки канавок разработчик ПО ESPRIT рекомендуют новую стратегию ProfitTurning.

Данная опция высокоскоростной обработки основана на комбинации двух видов траектории инструмента – трохоидальной и линейной. Постоянные круговые движения (трохоидальная траектория) являются наиболее эффективными при обработке углов, а линейное перемещение в виде дуг обеспечивает мягкость ввода–вывода инструмента вдоль прямолинейных поверхностей заготовки. При этом стратегия ProfitTurning заменяет движение инструмента под острым углом мягким скругленным переходом, значительно увеличивая подачу и сокращая время обработки.

Дополнительно к описанным выше возможностям ProfitTurning стоит добавить контроль стабильной нагрузки на режущий инструмент и увеличение его стойкости, что по достоинству оценят производители изделий из твердых материалов.

В обновленной версии ПО ESPRIT традиционные стратегии чернового точения ProfitTurning расширились тремя новыми опциями (рис. 3.27): обработка параллельно оси – мягкая обработка в углах, обработка со смещением (при этом тип инструмента должен соответствовать направлению и усилиям резания) и точение под углом.



Рис. 3.27. Траектории обработки: параллельно оси, со смещением и под углом

Однако в среде данной стратегии есть ограничения по геометрии режущих пластин – предусматривается двусторонняя обработка инструментом только с круглыми съемными пластинами (полный радиус

для канавочного резца, круглая пластина для токарного резца и фасонный резец пользователя любой геометрии).

Дополнительные опции:

- улучшен формат страниц описания инструмента в соответствии со страницами технологических операций;
- предусмотрена поддержка приложения MachiningCloud для легкого импорта перечня инструмента любого типа;
- добавлена возможность настройки модели инструмента для реалистичности и точности программирования обработки благодаря применению 3D-моделей адаптеров (рис. 3.28);

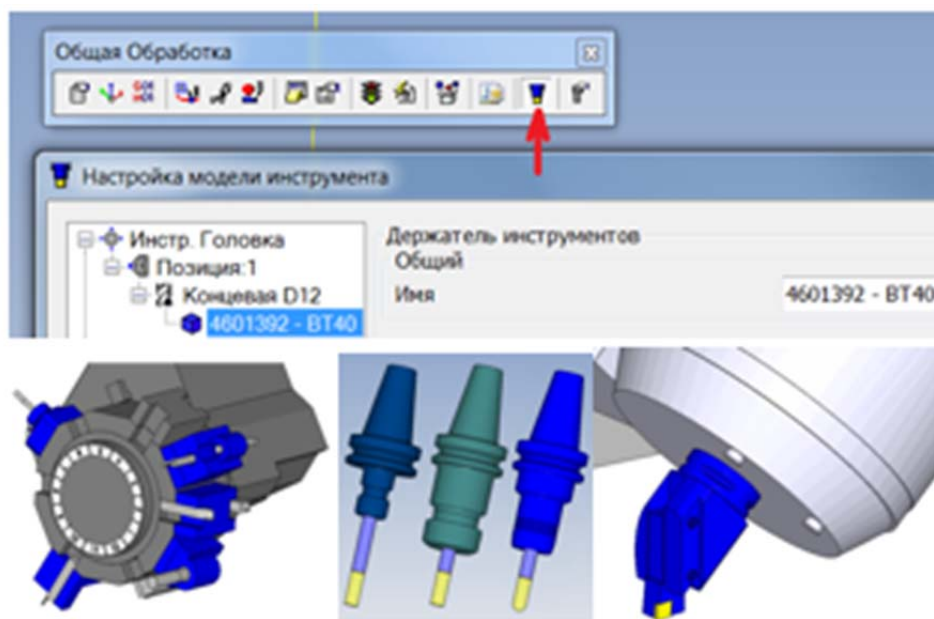


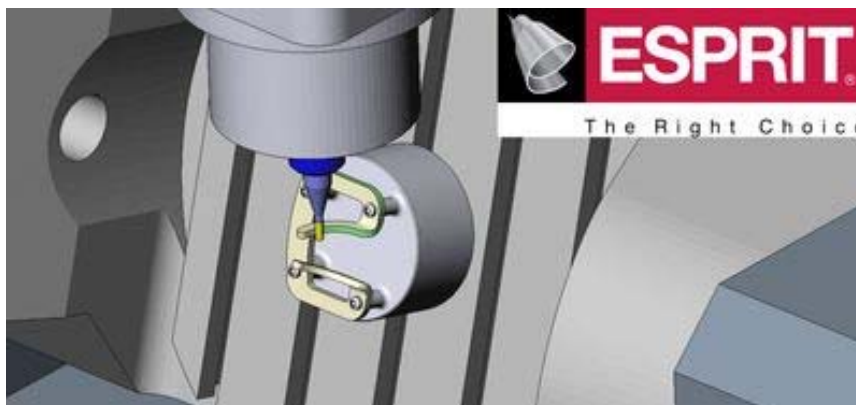
Рис. 3.28. Настройка и примеры моделей адаптеров для фрезерной и токарной обработки

- предусмотрена 3D-компенсация инструмента для 5-осевых операций с возможностью изменения радиуса фрезы без редактирования управляющей программы.

3.6. Новые возможности ESPRIT-2014: причины успеха в мире и в Украине

Компания DP Technology (США) выпустила уже второй релиз рабочей САМ системы ESPRIT версии 2014 года. Программа по-прежнему обладает мощным функционалом, позволяющим программировать токарные, фрезерные, электроэрозионные станки, обраба-

тывающие центры любой сложности. Но, наряду с удобством программирования и эффективностью работы программы ESPRIT, разработчики побеспокоились о новых возможностях для максимального комфорта пользователя. Новые решения уже реализованы в версии ESPRIT – 2014 и успешно прошли тестирование в течение года на тысячах производственных площадках во всем мире. Более подробно о них рассказывают программисты и технологи компании "ТвистТ Инжиниринг" (г. Днепр).



Распознавание токарных Элементов

Теперь пользователи могут генерировать элементы для токарных операций автоматически при работе с 3D-моделью детали или с ее профилем. Элементы будут относиться к одной или двум рабочим координатам, также созданным автоматически. Цепочки создаются вдоль наружных и внутренних профилей, канавок и торцов. Таким же удобным образом создаются Элементы ОТКТ для внутреннего сверления. Названия Элементов присваиваются в соответствии с их расположением и типом так, чтобы их было легко выбирать для создания токарных операций.

Преимущества команды Распознавания Элементов (рис. 3.29):

- позволяет программировать быстрее с использованием автоматических токарных элементов;
- программисты могут создавать элементы и рабочие координаты буквально за несколько кликов мышкой;
- использование наглядных названий элементов для быстрого выбора.

Генератор отчетов в Excel

В новой версии системы отчеты об обработке из ESPRIT экспортируются в удобном и готовом для печати формате Microsoft Excel (.xlsx), рис. 3.30. В дополнение к графическому списку инструментов,

операций, рабочих координат, отчет содержит инструкции для наладки, а также графики времени выполнения операций.

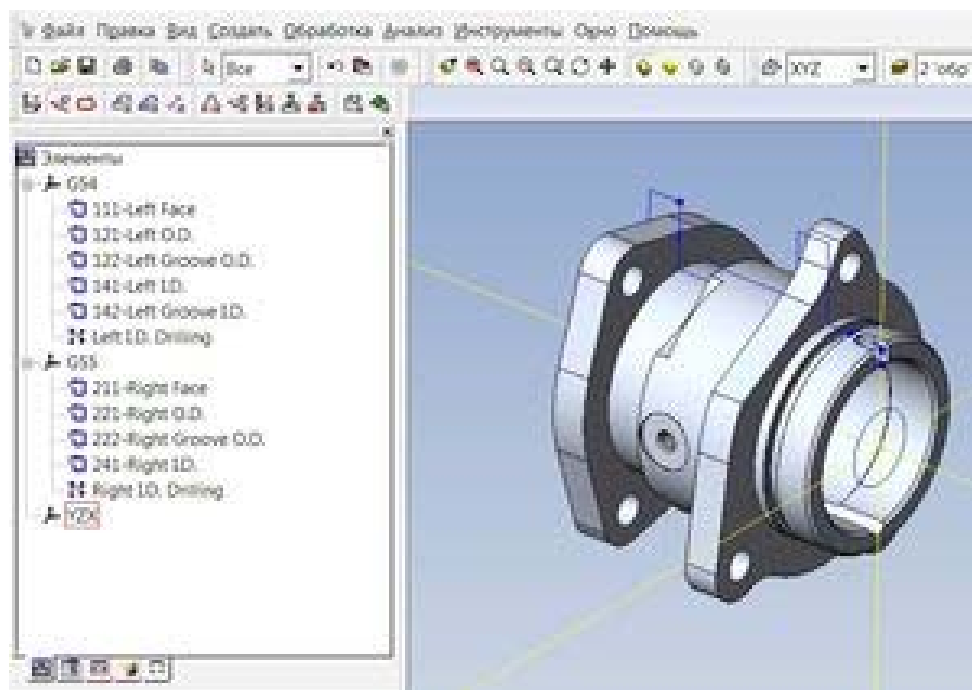


Рис. 3.29. Результат работы распознавания токарных элементов

Преимущества ESPRIT EXCEL® Генератора Отчетов:

- минимизирует время наладки при помощи инструкций для оператора и списка всех необходимых для работы инструментов;
- устраняет возможные ошибки оператора, используя точную информацию о текущем задании;
- увеличивает производительность с графическими временными диаграммами различного вида;
- позволяет убедиться, что процессы выполняются в правильном порядке, при помощи распечатанных отчетов для каждого задания;
- позволяет сравнить текущую работу с аналогичными задачами для ускорения производственного процесса.

Плагин eMerge

Предоставляется возможность экспортировать (создавать) и импортировать (объединять) пакеты данных ESPRIT (*.emp) для передачи объектов из одного проекта ESPRIT (*.esp) в другой. Поддерживаемые типы объектов: элементы, слои, твердые тела, STL модели, рабочие плоскости и координаты.

В пакет для экспорта можно добавить все объекты или только выделенные объекты или же объекты из списка пользователя. Анало-

гично, при импорте пакета предоставляется возможность выбрать либо все объекты пакета, либо объекты из списка. Ассоциированные объекты, например, элемент, расположенный на отдельном слое и в рабочей координате, автоматически добавляются в пакет.

Machine Name	Токарно-фрезерный ОЦ		
Material Class			
Material Condition			
Unit (in / mm)	Metric		
Stock Type	Bar		
Bar OD	32		
Bar / Part Length:	200 / 100		
Sp1 / Sp2 Stickout	51 / 132		
Parts/Setup	1		
Setup Quantity	1		
Part Quantity	1		
Cycle Time (min)	9,07		

Рис. 3.30. Фрагмент отчета, созданного генератором отчетов в Excel

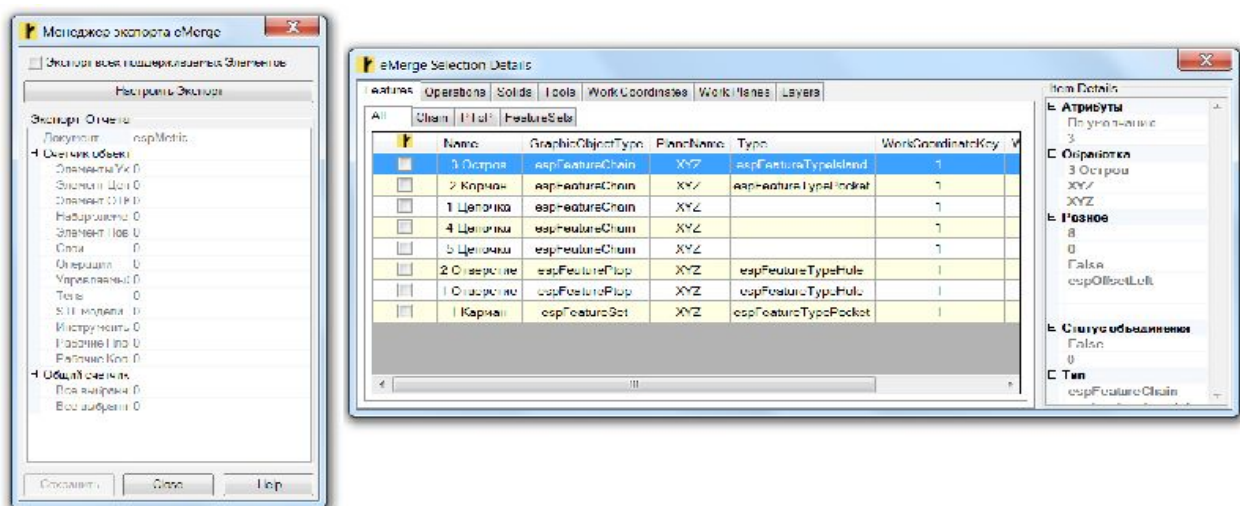


Рис. 3.31. Диалоговые окна плагина eMerge

Преимущества плагина eMerge (рис. 3.31):

- увеличивает производительность процесса, импортируя данные в ESPRIT файлы;
- позволяет подгружать данные в существующий документ ESPRIT без создания нового проекта;
- упрощает обмен данными с другими пользователями ESPRIT;
- сохраняет группу различных элементов в едином пакете данных;
- позволяет улучшить согласованность этапов, создавая библиотеки, содержащие наборы часто используемых элементов.

Редактор инструментов

Значительно упрощен процесс редактирования инструментов и их параметров Редактором Инструмента ESPRIT (рис. 3.32), который использует единый интерфейс для корректировки параметров множества инструментов.

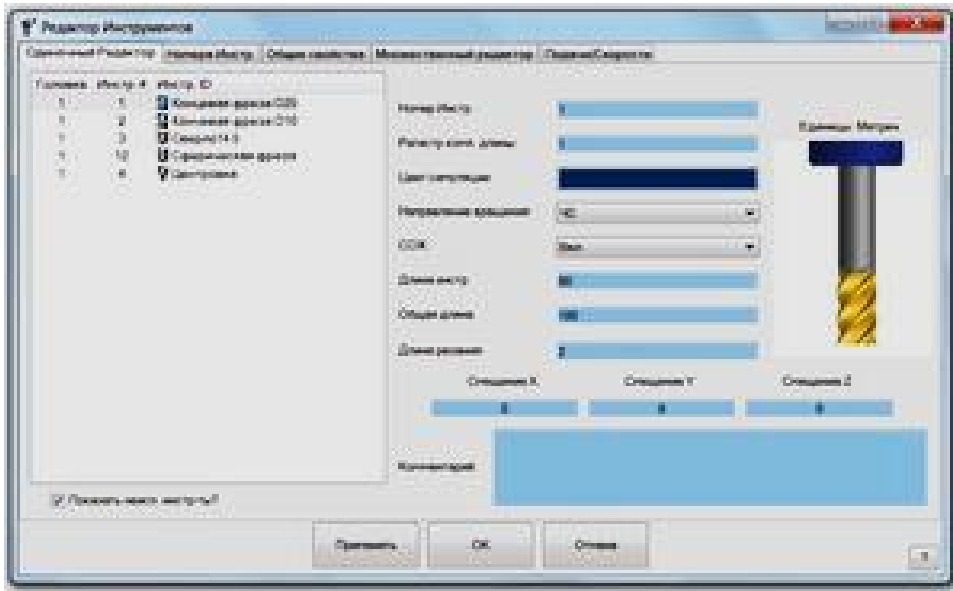


Рис. 3.32. Окно редактора инструментов

Существует два режима редактирования (Одиночный Редактор и Множественный Редактор), которые позволяют изменять параметры и общие свойства любого числа инструментов. При помощи закладок меню существует возможность сравнивать результаты от корректировки единичных параметров, таких как охлаждение, номер инструмента, геометрия инструментов и др. Более того, пользователь может назначить режимы резания для всех операций, использующих определенный вид инструмента.



В пакет для экспорта можно добавить все объекты или только выделенные объекты или же объекты из списка пользователя. Аналогично, при импорте пакета предоставляется возможность выбрать либо все объекты пакета, либо объекты из списка. Ассоциированные объекты, например, элемент, расположенный на отдельном слое и в рабочей координате, автоматически добавляются в пакет.

Преимущества Редактора Инструмента:

- сокращает время на редактирование множества инструментов при помощи единого интерфейса;
- снижает вероятность ошибки, сравнивая общие параметры множества инструментов;
- улучшает согласованность с единым интерфейсом при назначении скоростей и подач для всех операций /инструментов.

Симулятор вращения кулачков

При помощи данной функции в токарных операциях предоставляется возможность включить динамическое вращение кулачков для проверки на наличие столкновений (рис. 3.33). Что действительно важно, ведь по понятным причинам есть вероятность некорректных результатов проверки при неподвижных кулачках.

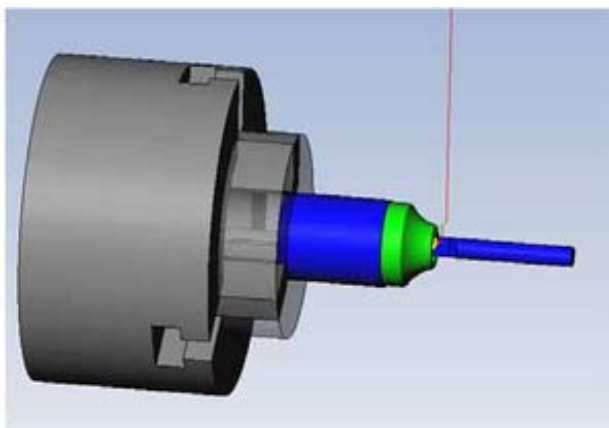


Рис. 3.33. Симуляция вращающегося патрона с неактивной и активной функцией вращения кулачков

Во время токарных операций визуализация отображает полупрозрачную модель, представляющую профиль кулачков, повернутых на полные 360° вокруг оси вращения шпинделя. Вращающиеся кулачки задействованы в проверке на столкновения.

При неактивной функции, в процессе отработки визуализации, видны только неподвижные кулачки.

В пакет для экспорта можно добавить все объекты или только выделенные объекты или же объекты из списка пользователя. Аналогично, при импорте пакета предоставляется возможность выбрать либо все объекты пакета, либо объекты из списка. Ассоциированные объекты, например, элемент, расположенный на отдельном слое и в рабочей координате, автоматически добавляются в пакет. Данная

функция позволяет производить более реалистичное и безопасное моделирование обработки токарных операций.

Таким образом, специалистами украинского центра обслуживания системы ESPRIT произведен обзор лишь некоторых комфортных функций обновленной версии программы. Более наглядно ознакомиться с новыми функциями одной из самых популярных в мире САМ систем можно достаточно просто. Необходимо запросить временную лицензию в полной версии в департаменте программирования и технической поддержки компании "Твист Инжиниринг".

3.7. ESPRIT и Компас-3D – полная совместимость

Мы рады началу сотрудничества с группой компаний АСКОН и уверены, что вместе сможем предложить украинским предприятиям уникальное комплексное САМ решение по разумной цене.

David Meynaud, директор по развитию DP Technology Europe



Инжиниринговая Компания "Твист", официальный поставщик САМ программного обеспечения ESPRIT в Украине, объявила о заключении партнерского соглашения с ООО "АСКОН-КР", официальным дистрибьютором комплекса автоматизированных систем КОМПАС в Украине. На основании данного соглашения в рамках "ESPRIT – КОМПАС", компании будут совместно заниматься продвижением и организацией продаж ESPRIT и КОМПАС-3D в Украине.

КОМПАС-3D – это система автоматизированного проектирования, разработанная компанией АСКОН и ставшая стандартом работы для многих предприятий, благодаря удачному сочетанию простоты освоения и легкости работы с мощными функциональными возможностями твердотельного и поверхностного моделирования.

Система позволяет реализовать классический процесс трехмерного параметрического проектирования – от идеи к ассоциативной объемной модели и от модели к конструкторской документации. Ключевой особенностью продукта является использование собственного математического ядра и параметрических технологий, разработанных специалистами АСКОН.

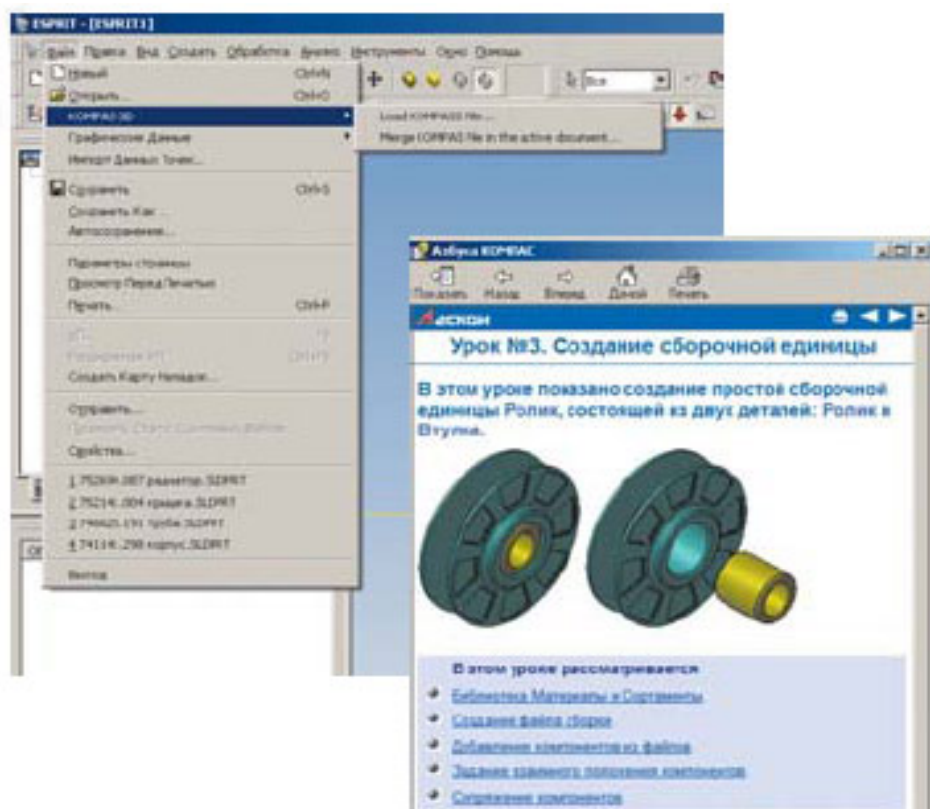
Как универсальная система трехмерного моделирования, КОМПАС-3D находит свое применение при решении различных задач, в том числе и архитектурно-строительного и технологического проектирования.

Базовый функционал системы включает:

- развитый инструментарий трехмерного моделирования, в том числе возможности построения различных типов поверхностей;
- механизм частичной загрузки компонентов и специальные методы оптимизации, позволяющие обеспечить работу со сложными проектами, включающими десятки тысяч подборок, деталей и стандартных изделий;
- функционал моделирования деталей из листового материала;
- специальные возможности, облегчающие построение литейных форм;
- инструменты создания пользовательских параметрических библиотек типовых элементов;
- возможность получения конструкторской и технологической документации: встроенная система КОМПАС-График позволяет выпускать чертежи, спецификации, схемы, таблицы, текстовые документы;
- средства защиты пользовательских данных, интеллектуальной собственности и сведений, составляющих коммерческую и государственную тайну, и другие компоненты.

Конструкции могут содержать как стандартизованные, так и оригинальные (созданные пользователем) конструктивные элементы. Параметрическая технология позволяет быстро получать модели типовых элементов на основе однажды спроектированного прототипа, а

многочисленные сервисные функции облегчают решение вспомогательных задач проектирования и конструирования. По умолчанию КОМПАС-3D поддерживает экспорт/импорт наиболее популярных форматов моделей, за счет чего обеспечивается интеграция с различными CAD/CAM/CAE пакетами.



Компанией "АСКОН" разработаны различные приложения в области трехмерного моделирования, дополняющие функционал КОМПАС-3D инструментарием для решения специализированных инженерных задач. Модульность системы позволяет пользователю работать с иным поставщиком программного обеспечения ESPRIT в Украине – продуктом для автоматизированного проектирования обработки на оборудовании с ЧПУ. Инжиниринговая Компания "ТвисТ" обеспечивает поставку продукции, разработку технологии, запуск в производство и поддержание работы станочного комплекса предприятий в целом.

Партнерами Инжиниринговой Компании "ТвисТ" являются многие известные изготовители инструмента и оснастки, такие как Vargus (Израиль) и Guehring (Германия). Среди постоянных заказчиков – предприятия энергетической отрасли, оборонно-промышленного и аэрокосмического комплексов, транспортного и сельскохозяйственного машиностроения и другие.

Автоматизация процесса программирования станков с ЧПУ на базе ESPRIT позволяет не только ускорить или упростить процесс доведения задачи от чертежа до детали, но и гарантирует правильную обработку с первого раза.

В Россию и Украину на протяжении последних пяти лет ESPRIT поставлялся как OEM-решение, то есть в комплекте с оборудованием ведущих мировых производителей, таких как Sodick, ONA и Mori Seiki. Естественно, что возник вопрос о том, кто будет заниматься технической поддержкой, обучением пользователей, и DP Technology приняла решение о формировании в России собственной сети, а официальным дилером стала группа компаний АСКОН.

В результате система ESPRIT широко разошлась по странам СНГ и при этом потребители получили полностью готовые решения, включающие сертифицированные и протестированные на заводе-изготовителе постпроцессоры и 3D-модели для соответствующих станков. Но учитывая, что Россия, Украина и другие страны постсоветского пространства для построения 3D-моделей деталей широко используют САД-систему КОМПАС-3D, возникла необходимость совместимости. Сегодня ESPRIT поддерживает также расширения программы Компас (m3d и др.), благодаря чему не теряется ассоциативность файлов, нет погрешности при конвертировании и т.д.

Кроме того, появилась возможность проверки двух файлов (конструкторского исходника в КОМПАС-3D и технологического в ESPRIT). Если конструктор, к примеру, изменил размеры детали или размер отверстия в КОМПАС-3D, то нажатием одной клавиши в ESPRIT можно проверить наличие изменений, перестроить деталь, и автоматически изменить технологию ее производства.

Подобная совместимость программ открывает широкие возможности перед выпускниками украинских высших и средних специальных заведений. КОМПАС-3D в Украине изучают как одну из самых мощных САД-программ. А учитывая, что разработчиком ее является российская компания и, соответственно, программы максимально адаптированы под "нас", то теперь производитель может свободно, пользуясь навыками работы в САД-программе КОМПАС-3D, работать и в САМ-системе ESPRIT. Для обучения технологов, программистов и операторов станков с ЧПУ в г. Днепр открыт обучающий класс на базе сервисного центра Инжиниринговой Компании "Твист".

3.8. Успешные истории побед в машиностроении



Так как компания Castle намеревается расширить бизнес за границей, который сейчас составляет около 10 % ее дохода, то проект рекорда наземной скорости Bloodhound является определенно хорошим стартом. "Этот проект – это мгновенный дифференциатор между нами и нашими конкурентами и он обеспечивает компании Castle глобальную платформу". На повестке дня компании Castle Precision Engineering стоит креативное решение проблем с помощью программы ESPRIT.

Когда вы слышите слова "механический цех", то в воображении всплывают образы не обязательно чистого и опрятного помещения. И несмотря на то, что далеко не каждый цех работает с лужами СОЖ на полу и липкой смазкой повсюду, компания Castle Precision Engineering Services представляет собой ряд красивых голубых зданий, аккуратно вписанных в индустриальный, но неизменно зеленый шотландский пейзаж. Прецизионная во всех смыслах компания с опытом более 60 лет установила высокие стандарты и креативное решение проблем на повестку каждого своего рабочего дня. Без исключений.

Основанная Джеком Тифенбруном в Глазго в 1951 году, когда ее самым большим заказчиком был филиал компании Singer Sewing Machine Co., расположенный в Глазго, Castle Precision постоянно эво-

люционировала, меняя свой производственный пейзаж. Председатель Правления и Управляющий Директор Маркус Тифенбрун принял бразды правления компанией в начале 1990-х, тогда же он нацелился на область прецизионного машиностроения, которая требует наивысшего уровня экспертных знаний и применения инноваций. Castle добилась прогресса и достигла высоких стандартов благодаря своей впечатляющей интегрированной структуре Информационных Технологий или IT. Используя готовые приложения и разрабатывая их собственными силами, компания способна модифицировать оборудование, в соответствии с требованиями заказчика, отслеживать его работу с помощью пультов управления, установленных по всему заводу. Компания стремится постоянно улучшать и автоматизировать процессы, а так же интегрировать все элементы автоматизации в свой отлаженный корпоративный механизм. Все очень просто: IT – это ключ к успешному бизнесу. "Бизнес не смог бы существовать без IT-систем" – говорит Директор Производства Ян Тифенбрун. "Система изменяется, как изменяемся мы". В 2009 году Castle расширила свое производство, добавив 12000 квадратных футов (3657 м²) к площади завода, тем самым увеличив свою мощность и количество технологий под своей крышей. На протяжении всех 2000-х годов компания стремительно развивалась и к концу десятилетия стала первой шотландской компанией, которая получила награду Сетей Поставок 21-го Века "SC21", символизирующую, что за период в 24 месяца компания обеспечила более 90 % своевременных доставок и более 95 % качества для авиакосмических заказчиков. В 2010 году журнал The Manufacturer назвал компанию "Фирмой-производителем мелко- и среднесерийной продукции Года", в том же году компании были присвоены "Президентская Награда Шотландского Инжиниринга" и награда "Производитель Года".

Усовершенствованный Обмен Данными

78 % клиентов Castle Precision считаются членами аэрокосмической промышленности, а это значит, что детали, которые производит компания, должны соответствовать строжайшим стандартам производства и документации данной индустрии. Остальные клиенты компании, которые приносят около 25 миллионов долларов в год, принадлежат: к оборонной промышленности 11 %, автомобильной 2 %, электронной 2 %, энергетической 1 %, а так же 6 % составляют разнообразные компании, которые не относятся к вышеперечисленным сферам индустрии.

На предприятии Castle, где работают всего 160 человек, в том числе 8 программистов и разработчиков ЧПУ, можно увидеть комплексные проекты, связанные с офтальмологическим оборудованием, новейшей звуковой аппаратурой и деталями для оборонной промышленности (рис. 3.34).

Как команда Castle нашла ESPRIT



Рис. 3.34. Инженер по организации производства Castle использует множество продвинутых CAD/CAM и средств моделирования технологии

Castle производит компоненты для различных рынков из материалов: от алюминия до титана, включая такие изделия, как диски вентиляторов для авиационных двигателей, клапаны, дисковые тормоза и осевые компоненты. Для сектора электроники Castle производит все работы по обработке металлов, связанные с проигрывателем компакт-дисков LinnCD12, предварительным усилителем Linn Klimax Kontrol и усилителем мощности Linn Klimax.

Поскольку заказчики требуют развиваться в ногу с эволюцией программного обеспечения станков и комплексных систем автоматизированного проектирования и управления производством (CAM), потребность производителей оставаться конкурентоспособными и квалифицированными, инвестируя в новейшие технологии, стала намного значимее, чем раньше.

Тридцать лет назад программирование выполнялось обыкновенным письмом от руки и без сокращений, код писали построчно, а про-

дукты были менее сложными, потому что проектирование соответствовало возможностям производства.

В 2011 году команда профессионалов Castle Precision осознала, что используемое программное обеспечение САМ весьма ограничено в способности успешного выполнения механической обработки намного более сложных деталей, а поставщик САМ не предлагал услуг технической поддержки заказчика соответствующего качества.

"Мы хотели получить наилучшее доступное программное обеспечение, а так же гибкую команду поддержки и способность упростить технологии нашего производства" – сказал Ян Тифенбрун.

Изучив ряд альтернатив, Castle Precision приобрела комплекс ESPRIT® САМ от DP Technology, поскольку пришла к заключению, что это передовое программное обеспечение, в особенной степени удобное при программировании множества разных высокоточных деталей, что и есть специализацией компании. Так же компанию впечатлил уровень клиентской поддержки DP Technology и ее крепкие отношения с ведущими производителями станков с ЧПУ.

Поскольку компания Castle Precision использует станки Mori Seiki, Doosan, Mazak и DMG для обработки сложных многооперационных деталей с жесткими допусками, то имело смысл выбрать продукт САМ, который идеально интегрируется с имеющимся оборудованием.

Интеграция САМ с оборудованием – это Ключ

Парк Castle Precision состоит из более 70 основных станков с ЧПУ, в том числе более 30 токарных станков, 4 вертикальных 5-осевых обрабатывающих центра, 5 токарных многоцелевых станков, 20 горизонтальных обрабатывающих центров и 4 шлифовальных станка с ЧПУ (рис. 3.35). Выбирая ESPRIT, компания нашла программное обеспечение САМ, которое может программировать любой вид станка и идеально интегрировано с продукцией уважаемых производителей станков. В дополнение к легкой интеграции со станками с ЧПУ уровня Mori Seiki, для которой комплекс ESPRIT был встроен в программу MAPPS IV Control от Mori Seiki, Castle Precision выбрала ESPRIT, благодаря его способности к взаимодействию с программным обеспечением для компьютеризированного проектирования (CAD) SolidWorks® и с программным обеспечением для контроля траектории движения инструмента Vericut®. Имея под рукой такую комбинацию программ, Castle способна придерживаться своей строгой политики наименьшего вмешательства.

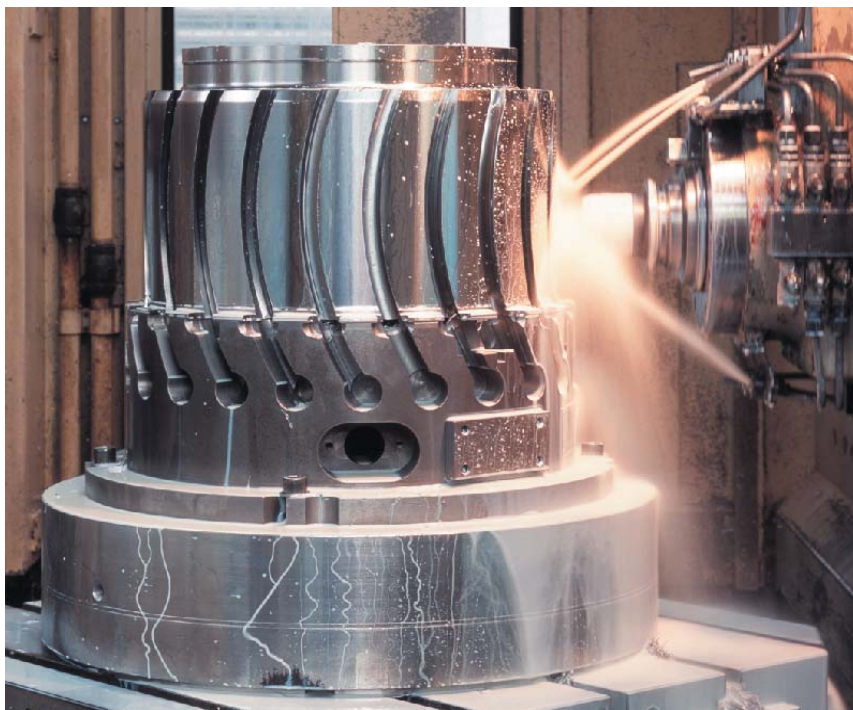


Рис. 3.35. Образец из ряда дисковой продукции, которую Castle Precision Engineering производит для своих клиентов

Цитируя Яна Тифенбруна, "Полная интеграция CAD-CAM и верификация – это ключ к конкурентоспособности".

ESPRIT помогает Castle Precision в сокращении количества операций по механической обработке, что значительно уменьшает время на транспортировку и наладку, а так же количество ошибок операторов. Открытая архитектура ESPRIT также позволяет компании лучше интегрировать программное обеспечение в ее IT систему собственной разработки.

Несмотря на сложности подсчета сэкономленного с помощью ESPRIT времени, компания Castle Precision сообщает, что теперь она выполняет механическую обработку комплексных деталей быстрее, чем когда-либо. "Мы получаем желаемое качество и вовремя справляемся с очень сложными проектами" – говорит Ян Тифенбрун.

С его точки зрения, дополнительным бонусом является превосходная поддержка, обеспечиваемая сотрудниками DP Technology и представителями торгового посредника, которые помогли Castle в адаптации новых 5-осевых стратегий механической обработки для сложных аэрокосмических деталей, в программировании сложного импеллера и протестировали производство детали на станке перед поставкой программы.

Иметь правильную CAD/CAM систему – это всего полдела, вторая половина залога успеха все же заключается в правильных людях, которые будут управлять этой системой.

В недавнее время шотландская производственная компания была избрана для изготовления колес для автомобиля, который попытается развить наземную скорость до рекордной отметки 1000 миль в час (1609 км/ч). Bloodhound – самый последний в линейке наземных скоростных автомобилей-рекордсменов сейчас переходит к стадии ранней сборки после 5 лет проектирования.

Castle Precision является первой шотландской компанией, привлеченной к производству критического узла автомобиля, и лидирующим интегратором-производителем колесного блока.

На передовой с Castle Precision Engineering

Компания изготовит серию из 18 колес для использования в пустыне и тестирования, а так же ряд вспомогательных деталей, таких как колпаки внутренних и внешних колес и колпаки ступиц внутренних колес.

"Bloodhound представляет собой огромный технологический и производственный вызов и возможность стать частью чего-то очень особенного – говорит Директор производства Castle Ян Тифенбрун – около 3000 деталей должно быть изготовлено, чтобы воплотить в жизнь этот проект, но самые быстрые в истории человечества колеса будут изготовлены прямо здесь, в Глазго. Это настоящий повод для гордости и мотивации компании, а так же фантастическая возможность показать в выгодном свете некоторые наши способности".

Цельные алюминиевые колеса весом 90 кг и диаметром 900 мм будут вращаться до 177 раз в секунду на максимальной скорости (рис. 3.36), принимая на себя нагрузку 50000 радиального ускорения на обод, когда 7,5-тонный реактивный автомобиль с ракетным двигателем будет нестись по гоночному треку Южно-Африканской пустыни.

Команда Castle (рис. 3.37) преодолела основные сложности проектирования, в том числе создание детали, которая не вылетит при вращении 10200 раз в минуту, и которая может выдержать потенциальные удары о камни без риска катастрофического провала. Castle надеется, что некоторые из вдохновленных специалистов станут следующим поколением инженеров CAD/CAM. "Больше всего этот проект нацелен на воспламенение воображения молодых людей" –

говорит Тифенбрун. "Участие в проекте является неотъемлемой частью поощрения и привлечения следующего поколения талантливых молодых людей к карьере в сфере инжиниринга и научно-технологического инжиниринга и математики STEM".



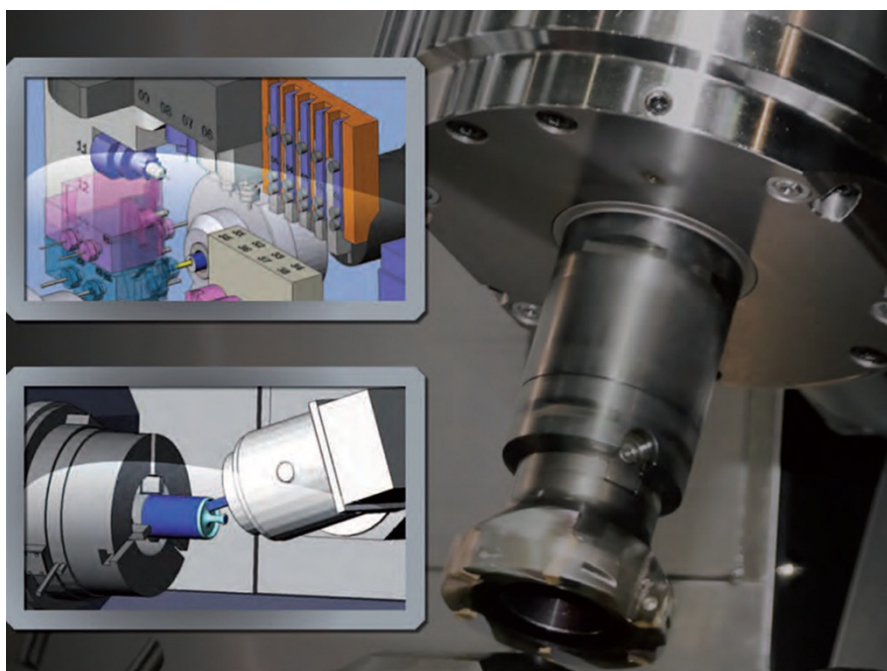
Рис. 3.36. Цельные алюминиевые колеса весом 90 кг и диаметром 900 мм



Рис. 3.37. Вся команда Castle Precision Engineering с членами проекта Bloodhound

Поскольку Castle намеревается расширить бизнес за границей, который сейчас составляет около 10 % ее дохода, то проект рекорда наземной скорости Bloodhound является определенно хорошим стартом. "Этот проект – это мгновенный дифференциатор между нами и нашими конкурентами и он обеспечивает компании Castle глобальную платформу".

Обзор новых возможностей САМ-системы ESPRIT 2015



Компания DP Technology подготовила второй релиз 2015 версии своего флагманского продукта – САМ-системы ESPRIT, которой успешно пользуются в военной и гражданской промышленности всего мира. Новая версия предлагает пользователям множество нововведений практически по всему функционалу (от инструментов 3D-моделирования до стратегий 5-осевой фрезерной обработки), которые призваны удовлетворить потребности технологов-программистов, вывести программный продукт на новый уровень производительности и удобства использования. Рассмотрим некоторые из возможностей нового ESPRIT 2015 (табл. 3.1).

Усовершенствованный Обмен Данными

Новые типы геометрии могут быть импортированы через модуль обмена данными ESPRIT FX. Эскизы, профили, кривые будут доступны из файлов CATIA, Pro-Engineer (CREO) и NX. Кроме того, из DXF/DWG файлов система считывает все аннотации и размеры. Если же кликнуть правой кнопкой мыши по эскизу или профилю в дереве построения, то

появившееся контекстное меню позволит создать геометрию или активировать рабочую плоскость. Трансляторы данных были обновлены и теперь способны импортировать геометрию из файлов последних версий практически всех известных CAD-систем.

Таблица 3.1

Возможности ESPRIT 2015 по импорту/экспорту CAD – данных

CAD-система	Формат	Версия	Чтение	Запись	Обмен параметрами	Данные эскиза
ACIS	*.sat	Up to Version 21	■	■		
AutoCAD	*.dwg, *.dxf	2000, 2004, 2007, 2010, 2013	■	■		
Catia V4	*.model, *.div, *.exp, *.session	All V4.xx Versions	■			
Catia V5	*.CATPart, *.CATProduct, *.cgr	R7 — R24/V5-6R2014	■		■	■
Inventor	*.ipt, *.iam	V6 — 2015	■		■	
JTOper	*.jt	Up to v9.5	■			
Parasolid	*.x_b, *.x_t	Up to Version 27	■	■		
Pro/ENGINEER	*.prt, *.asm, *.neu	Up to Creo 2.0 M090	■		■	■
Rhino	*.3dm	All Versions		■		
STEP	*.stp, *.step	203/214/242	■	■		
STL	*.stl	All Versions	■	■		
Solid Edge	*.par, *.asm, *.asm	V12 — S77	■		■	
SolidWorks	*.sldprt, *.sldasm	2005 — 2015	■		■	
Unigraphics	*.prt	Up to NX 9	■		■	■

Усовершенствования по упрощению твердотельных моделей

Новые команды дают возможность объединять грани на твердотельной модели, покрывать полости, продлевать грани и заполнять зазоры между гранями. Команда "Объединить Грани" (рис. 3.38) полезна для слияния соприкасающихся граней в единый геометрический элемент на импортированной твердотельной модели. Такая функция может быть полезна для упрощения назначения области обработки.

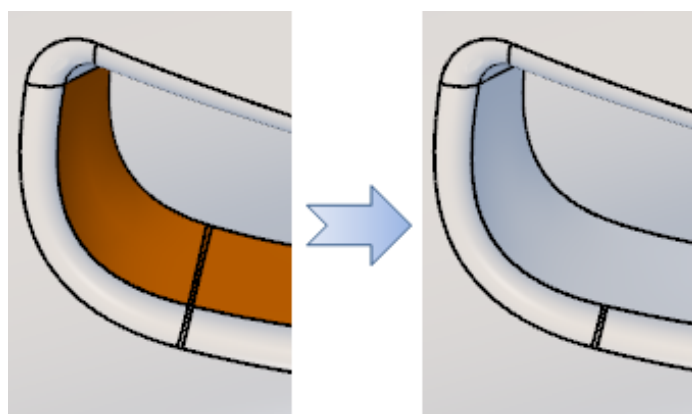


Рис. 3.38. Результат работы команды "Объединить Грани"

Команда "Покрывать" (рис. 3.39) создает поверхности над полостями твердотельной модели. Это позволит избежать создания траектории инструмента в нежелательных местах.

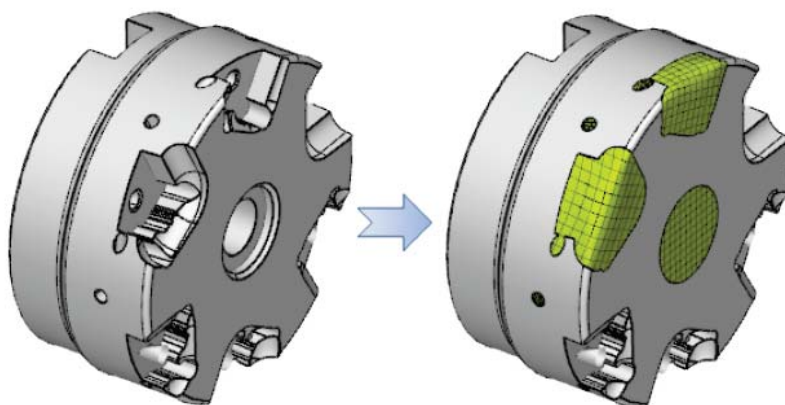


Рис. 3.39. Результат работы команды "Покрыть"

Команда "Продлить Грань" (рис. 3.40) создает поверхность или твердотельный элемент над полостями твердотельной модели.

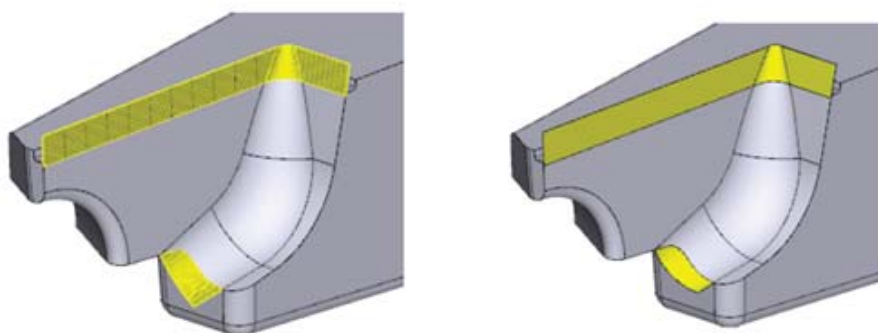


Рис. 3.40. Результат работы команды "Продлить Грань"

Данная команда полезна для слияния соприкасающихся граней в единый геометрический элемент на импортированной твердотельной модели. Опция позволяет создать единую поверхность на гранях, вместо изменения базовой геометрии. При помощи данной функции можно дополнительно продлить траекторию инструмента по краям зоны обработки.

Команда "Соединить Грани" полезна, когда возникают трудности при покрытии сложных полостей.

На рис. 3.41 противоположные кромки соединяются в оболочку. Новая грань помогает определить кромку, отсутствующую на модели. Затем, используя оболочку и грани твердотельной модели, создается покрывающая поверхность.

Как и при помощи команды "Покрыть", команда "Соединить Грани" (рис. 3.42) ограничивает или объединяет построение траектории на необходимых участках модели.

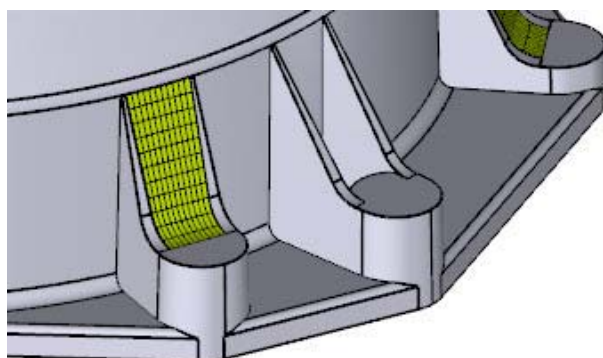


Рис. 3.41. Результат работы команды "Соединить Грани"

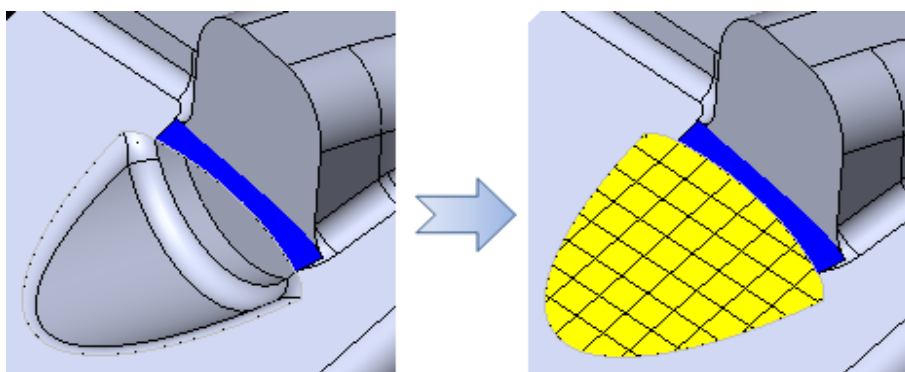


Рис. 3.42. Результат работы команды "Соединить Грани"

Автоцепочка

Команда "Автоцепочка" была усовершенствована для возможности создания цепочки из граней твердотельной модели, петель и кромок. Когда выделены соприкасающиеся кромки, цепочка создается по кромкам (рис. 3.43). Если выделена петля – цепочка будет создана по ней (рис. 3.44). Таким образом, создание элемента Цепочка стало гибче, удобнее и быстрее.

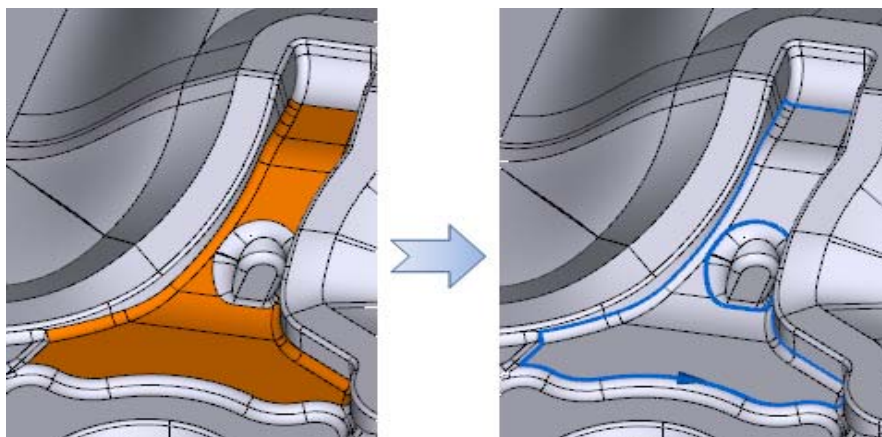


Рис. 3.43. Когда соприкасающиеся грани сгруппированы, цепочка создается вокруг внешней границы и любых открытых участков

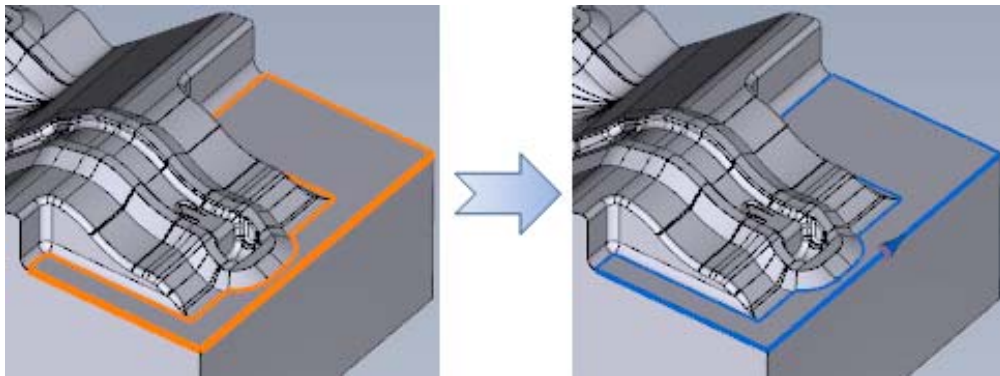


Рис. 3.44. Цепочка создается по петле или кромкам

"Автозаготовка" в операциях обработки торца, контура и кармана

Операции "Торцовая обработка", "Обработка контура", "Обработка кармана" теперь предлагают новую функцию "Автозаготовка", позволяющую производить расчет траекторий только в местах, где остался материал от предыдущих операций. Ранее подобный функционал был доступен только во фрезерных 3D-стратегиях, теперь же система научилась учитывать текущее состояние заготовки и в 2D-стратегиях, обеспечивая существенное ускорение процесса программирования обработки и гарантируя отсутствие лишних перемещений по воздуху.

"Распознавание стенок"

Команда "Распознавание стенок" – это улучшенная команда известной ранее "Профили Торца". Новая команда позволяет распознать верхний и нижний пределы вертикальных соединенных торцов на твердотельной модели и создать соответствующий элемент для последующей обработки (рис. 3.45).

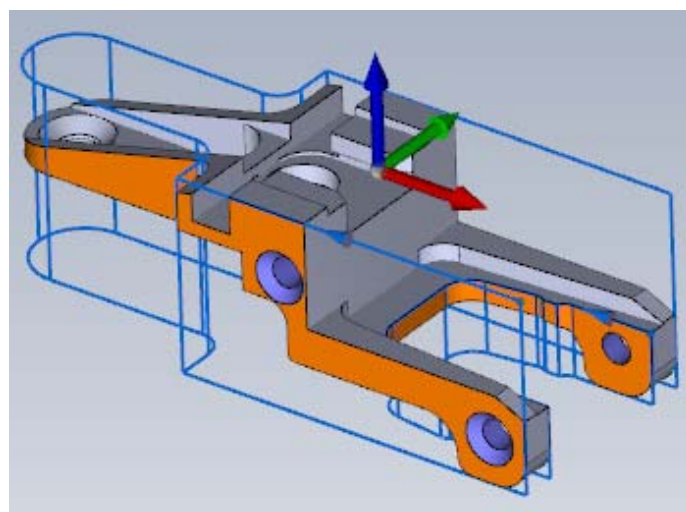


Рис. 3.45. Профиль создан с учетом верхних и нижних пределов детали

Ориентация сгруппированных торцов распознается независимо от активной рабочей плоскости. Функция значительно сокращает время на проектирование операций контурной обработки в случаях, когда контур 3D-модели неравномерен по высоте.

Улучшенная Обработка Контура на Диаметре: коническая заготовка и параллельные стенки

Два важных усовершенствования были реализованы в цикле "Обработка контура на диаметре":

- траектории могут быть сгенерированы для заготовки с переменным диаметром;
- доступна новая опция для обработки пазов с параллельными стенками.

Цикл "Обработки контура на диаметре" был улучшен, чтобы позволить фрезерование с опциями "Радиальная стенка" или "Постоянное смещение" на непостоянном диаметре (рис. 3.46). Траектория накручивается, сохраняя одну линейную ось на постоянном значении, даже на элементах с непостоянным диаметром (конические формы). Это позволяет производить обработку на станках с непрограммируемой осью Y.

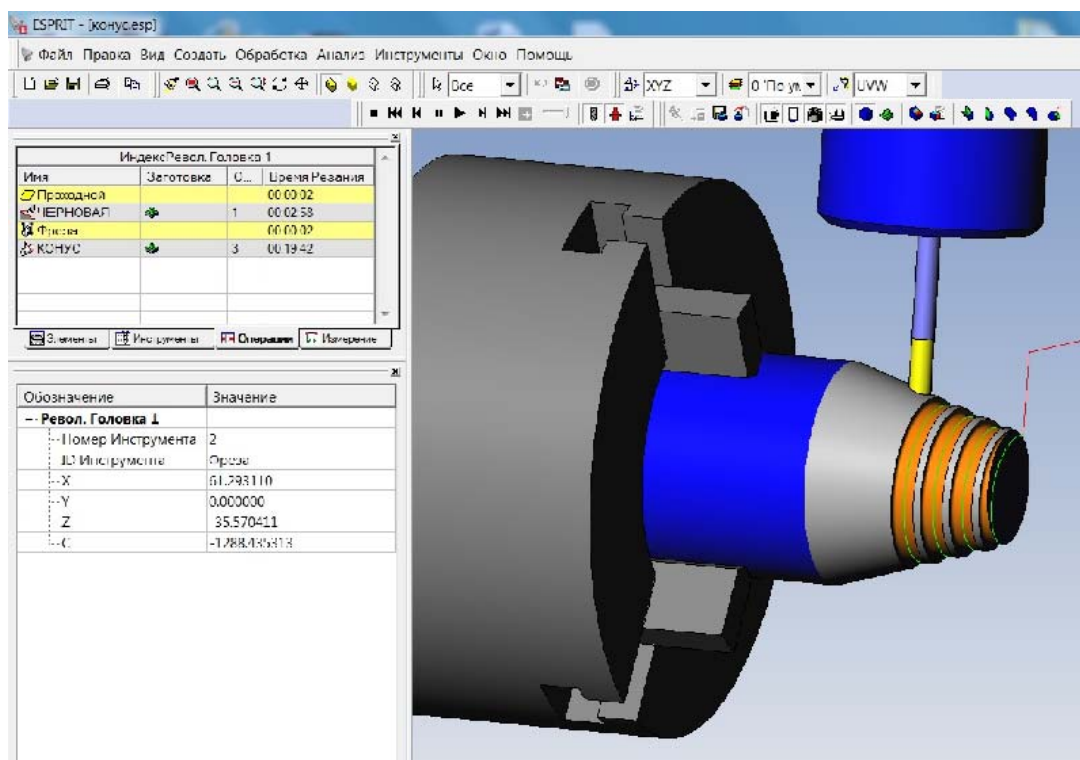


Рис. 3.46. Траектория инструмента для переменного диаметра

Используя цикл "Обработка контура на диаметре", больше нет острой необходимости использовать плагин "Monster" для обработки

контура на конической поверхности, что делает интерфейс программы ESPRIT более универсальным и удобным.

В данном случае доступна новая опция в параметрах Тип Движения. Опция "Параллельные Стенки" (рис. 3.47) предлагает быстрый и простой способ обработки пазов с параллельными стенками. Общее применение для этой опции – обработка пазов запирающего механизма. Паз имеет параллельные стенки, чтобы направлять шток, который блокируется в конце паза. Ранее, для обработки подобного паза требовалось применение 5-осевого цикла и создание дополнительной геометрии.

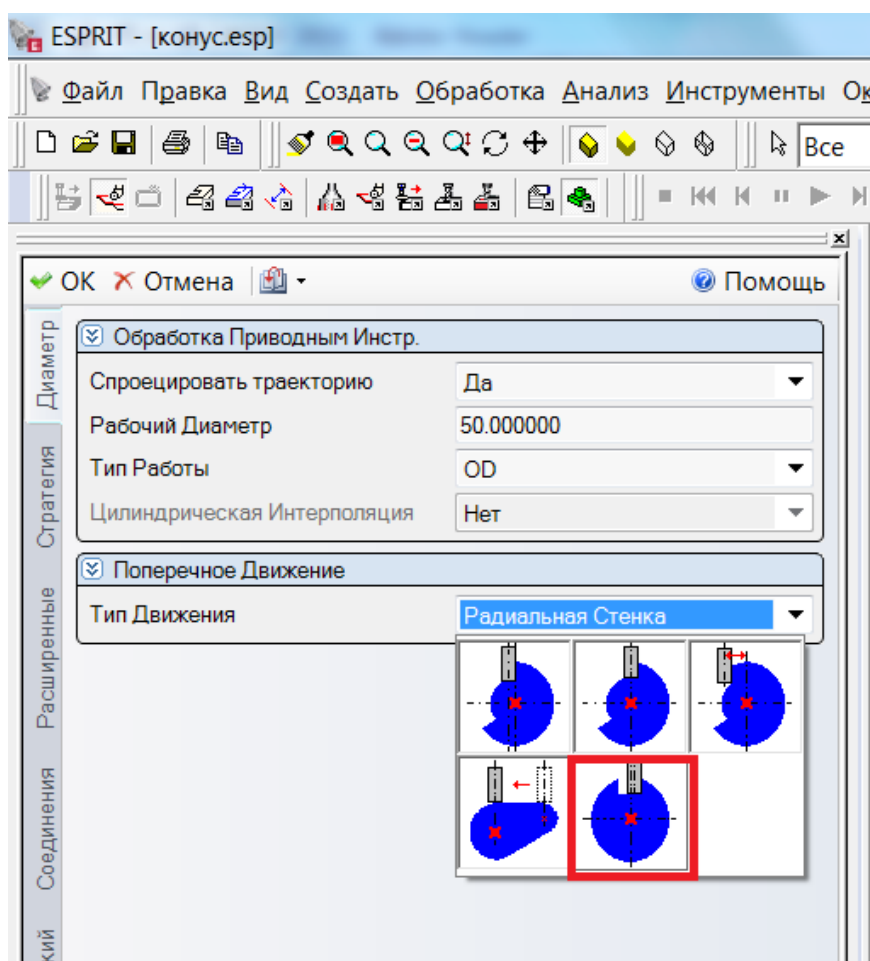


Рис. 3.47. Выбор опции "Параллельные Стенки"

Улучшения Profit Milling

Технология ProfitMilling была усовершенствована при помощи новой стратегии "Снизу–Вверх", которая позволяет произвести черновую обработку детали быстро как никогда (рис. 3.48). Улучшен контроль обработки пазов и дополнительный параметр "Максимальная Подача" в "Черновой Обработке Z уровня".

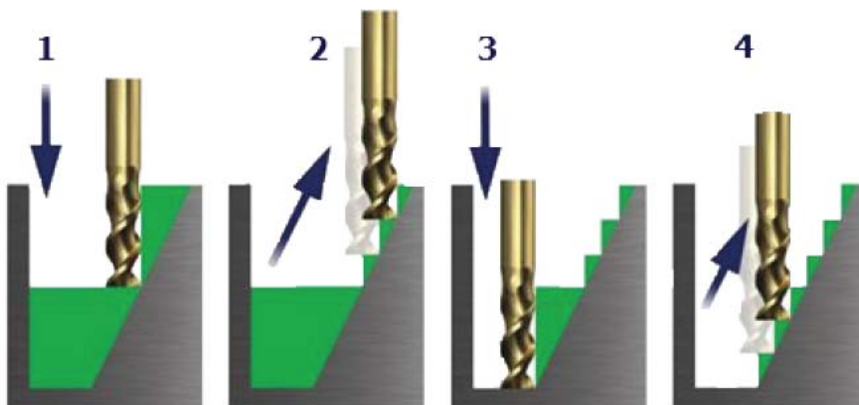
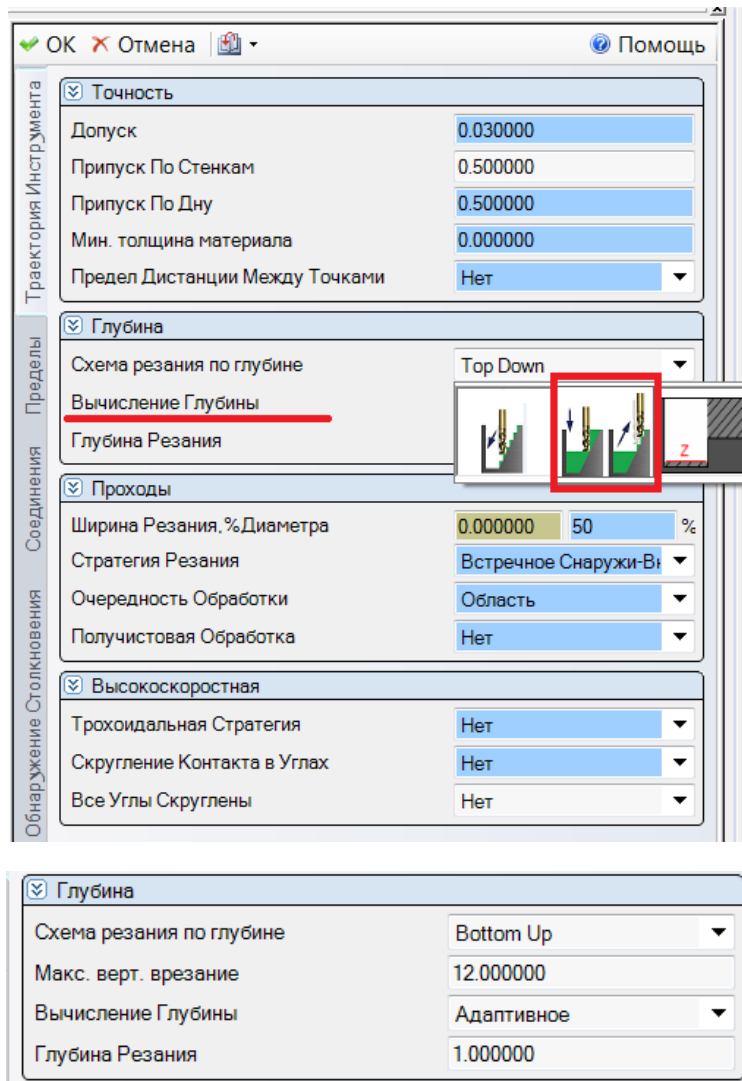


Рис. 3.48. Схема работы и параметры стратегии "Снизу–Вверх"

ProfitMilling – это высокоскоростной цикл черновой обработки, позволяющий значительно увеличить глубину обработки и скорость подачи. Революционная технология, запатентованная как ProfitMilling (Прибыльное Фрезерование) доступна в ESPRIT с 2013 года. Стратегия ProfitMilling оптимизирует угол врезания, толщину стружки, силы

резания и ускорение станка для получения оптимального результата. Данная технология контролирует не один параметр, а сразу несколько важных характеристик станка в процессе резания. Технология ProfitMilling от ESPRIT позволяет радикально сократить время цикла и время программирования, а также значительно снизить энергопотребление оборудования и увеличить срок службы инструмента, что в целом существенно увеличивает производительность и снижает затраты.

В случае применения больших шагов по глубине сверху вниз конечная заготовка будет иметь ступени большого размера (рис. 3.49). Потребуется дополнительные операции, чтобы получить требуемый вид заготовки.

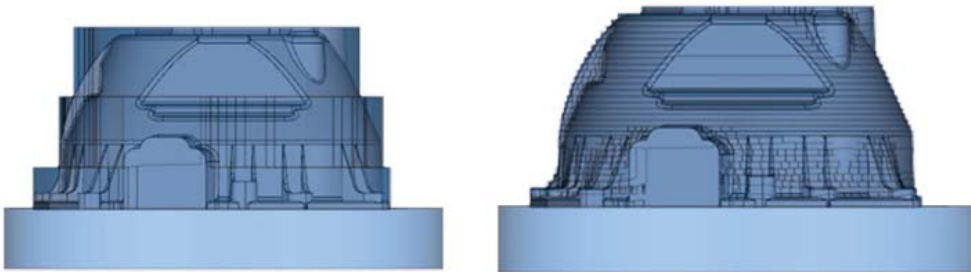


Рис. 3.49. Конечная заготовка без применения и с применением стратегии черновой обработки "Сверху–Вниз"

Обработка поднутрений в цикле "Чистовая Обработка Z уровня"

В данной версии 3-осевая операция "Чистовая Обработка Z уровня" поддерживает обработку поднутрений. Области поднутрений – это любые поверхности, которые не видны, когда деталь просматривается сверху (рис. 3.50).

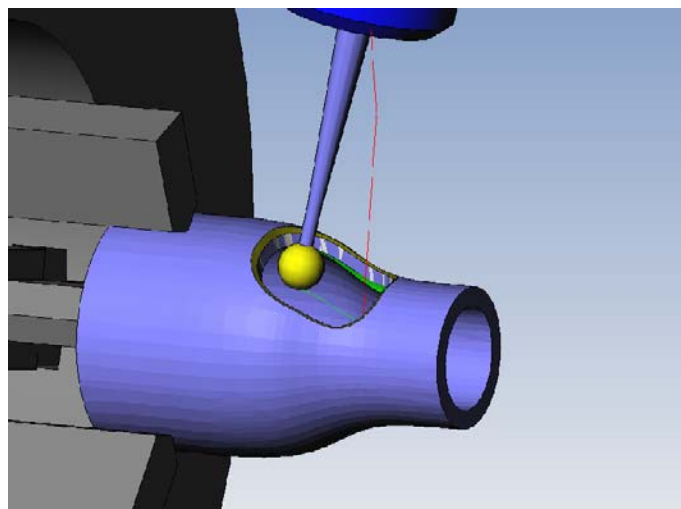


Рис. 3.50. Обработка поднутрения шаровой фрезой

Области поднутрений будут автоматически обработаны, если соблюдаются следующие условия:

1. Поверхности детали в элементе "Поверхность" имеют поднутрения.

2. Выбранный инструмент – шаровая фреза (рис. 3.50) или пазовая фреза (инструмент имеет верхнюю режущую кромку).

Улучшения в 5-осевой обработке

В ESPRIT 2015 добавлены три новых 5-осевых цикла (рис. 3.51): "Черновая обработка лопатки", "Черновая обработка полостей" и цикл "Черновая боковая обработка", который заменяет предыдущие операции: "Обработка боковой стороной инструмента" и "Обработка поверхности боковой стороной инструмента". 3-осевые циклы обработки Z-уровня получили новую 5-осевую опцию, которая заменила 5-осевой цикл черновой обработки. Кроме того, были модернизированы операции: "5-осевая обработка контура", "Обработка импеллера", "Обработка каналов".

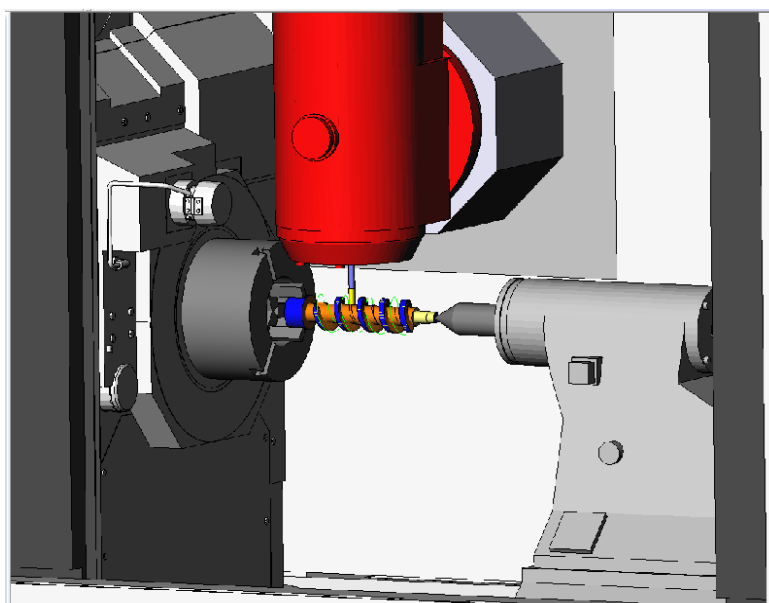
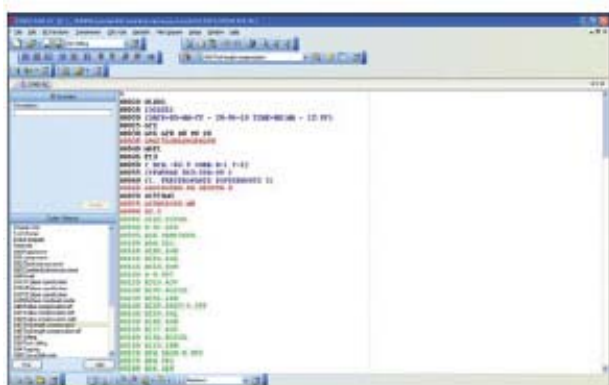


Рис. 3.51. 5-осевая черновая обработка

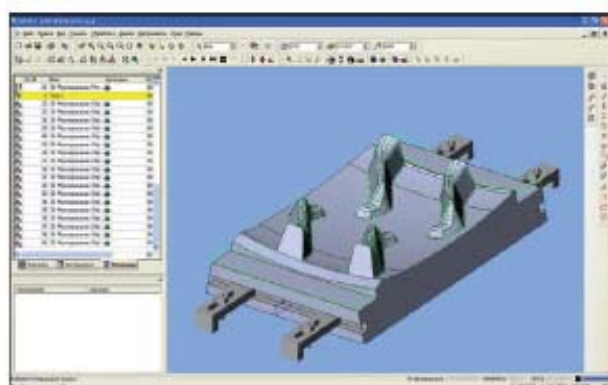
Новый цикл "Черновая обработка лопатки" призван дополнить цикл "Чистовая обработка лопатки". Теперь лопатки турбины могут быть полностью обработаны с использованием этих мощных специализированных циклов. Новый черновой цикл имеет две опции для контроля формы траектории: постоянное смещение поверхностей лопатки или адаптивная траектория, рассчитываемая с учетом внешней формы заготовки и конечной формы лопатки.

3.9. От ИТЦ "ВариУс" заказчик получает решение задачи, а не только набор оборудования

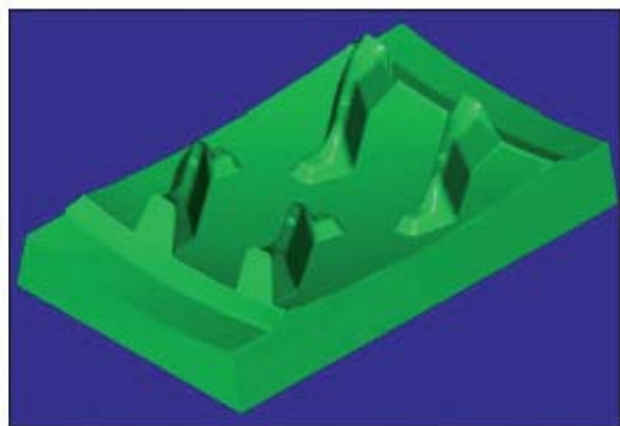
На этапе планирования закупки оборудования каждый заказчик задается вопросом: приобрести определенный станок или же заказать комплексное решение задачи вместе с технологией, оснасткой, инструментом и программным обеспечением. Группа компаний, входящих в Инженерно-Технический Центр "ВариУс", единственный в Украине Центр, обеспечивающий от одного лица комплексное решение задач, связанных с металлообработкой.



Управляющая программа



Планируемая деталь



Моделирование обработки детали



Полученная деталь

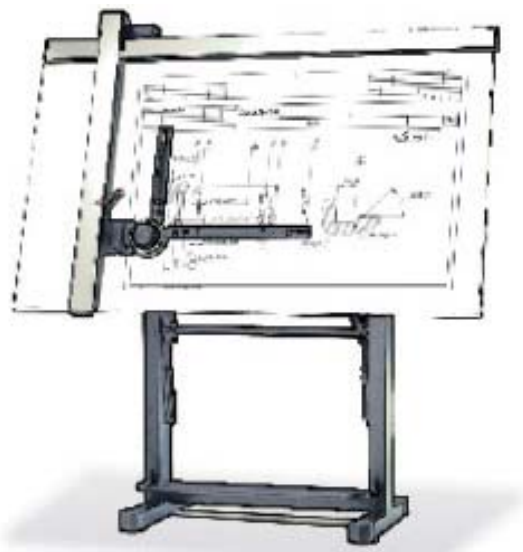
Услуги в рамках поставки инструмента

1. Технологическое сопровождение поставляемого оборудования, оснастки и инструмента.

По требованию Заказчика поддержка может включать полный цикл работ, состоящий из следующих этапов:

- формирование технического задания (от чертежа детали);
- подбор необходимого инструмента и оснастки;

- расчет времени обработки каждой отдельной детали;
- подбор необходимого станочного оборудования для выполнения производственной программы;
- подготовка технологического процесса с расчетами режимов резания;
- внедрение и отработка технологического процесса на детали;
- дальнейшая поддержка Заказчика в подборе и корректировке режимов резания.



Разработка технологических проектов

2. Написание Управляющих Программ

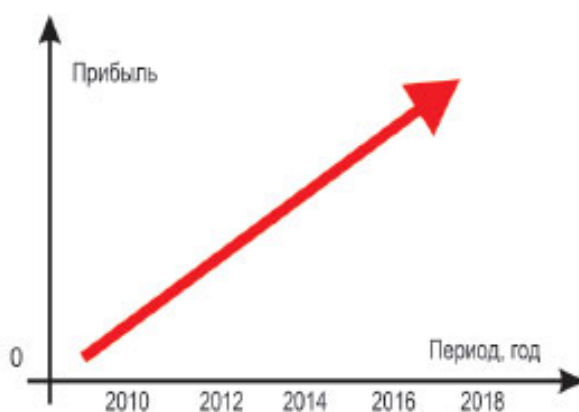
Параллельно с подбором инструмента и отработкой режимов резания предоставляем услуги по написанию управляющих программ для станочного оборудования с ЧПУ. Данные работы проводятся одновременно с внедрением современного и высокопроизводительного инструмента TaeguTec (Южная Корея), Swiss Tools (Швейцария).

Специальное предложение для наших Заказчиков:

Компания "ВариУс", в связи с отсутствием на украинском рынке достаточной информации об изменениях и разработках в применении современного инструмента, проводит технологические семинары на территории заказчика либо в своем испытательном центре в соответствии с заявленной темой в области металлообработки. Эти семинары помогают специалистам машиностроительных предприятий эффективно использовать инструментальные решения для снижения себестоимости выпускаемой продукции одновременно с повышением качества и производительности.



Формирование технического задания



Возврат инвестиций

Работа над проектами

В рамках любой комплексной задачи (Проекта) специалисты компании ИТЦ "ВариУс" могут предложить услуги по наиболее эффективному подбору оборудования, оснастки, инструмента и по отладке технологии обработки с последующим сопровождением.

В результате еще до приобретения оборудования и инструментов Заказчик точно знает сумму планируемых затрат, будущую производительность, имеет циклограмму производства каждой детали и, соответственно, себестоимость продукции. Этим специалисты компании ИТЦ "ВариУс" помогают не только заранее рассчитать себестоимость планируемой к выпуску продукции, но и доказать эффективность выбранной технологии путем выполнения экономических расчетов.

Оборудование, инструмент, оснастка и режимы подбирают таким образом, чтобы обеспечить максимальную программу выпуска деталей при минимальных инвестициях. Этим удастся избежать так называемых "узких мест" и вызванного в связи с этим простоя оборудования.

Главное: за весь процесс отвечает одна компания. Перебрасывание ответственности за несоответствие планов и результата со станочников на инструментальщиков и обратно становится невозможным.

Технико-экономическое обоснование

Расчет суммарных затрат на выполнение операции $\sum Z_{оп}$					
$\sum Z_{оп} = Z_{инстр} + Z_{оборуд} + Z_{з/п} + P_{расх}$					
Статьи расходов (показатели) (на 1 деталь, операцию, переход)	Ед. изм.	Вариант 1 (базовый) Предприятие	Вариант 2 TaeguTec	Доля статей расходов, %	
				Предприятие	TaeguTec
Трудоемкость обработки T	час.	6,9	0,8	-	-
Затраты на инструмент $Z_{инстр}$	грн.	25,60	5,36	5,14	7,24
Затраты на оборудование $Z_{оборуд}$	грн.	171,26	19,86	34,41	26,81
Затраты на заработную плату (трудоzатраты) $Z_{з/п}$	грн.	120,33	19,53	24,18	26,37
Прочие расходы $P_{расх}$ (допол- нительные накладные расхо- ды без учета расходов на оборудование и инструмент)	грн.	180,5	29,3	36,26	39,56
Суммарные затраты $\sum Z_{оп}$	грн.	497,69	74,05	100	100
Экономия затрат на 1 деталь	грн.	-	423,64	или	85,12
Эффективность применения инструментов TaeguTec					
При обработке детали на операции №					
			при программе 100 дет/год		
Сокращение затрат в		6,72 раза на		31021 грн/год	
Сокращение трудоемкости (T) в		8,625 раза на		610 н/ч в год	

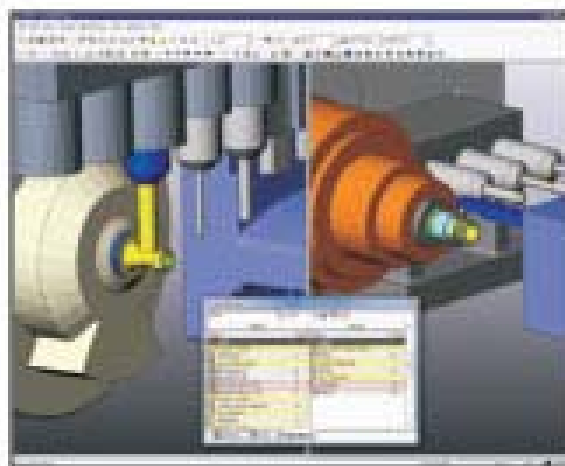
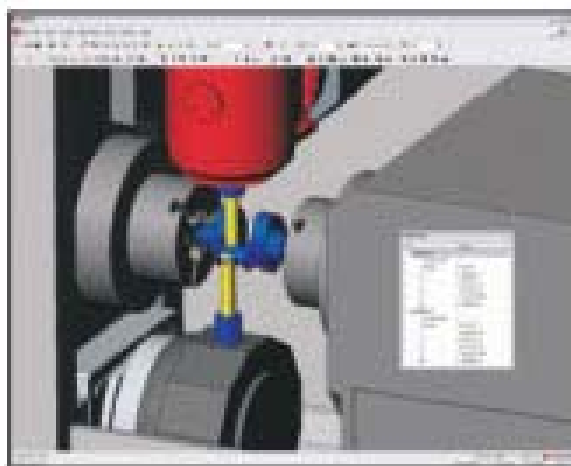
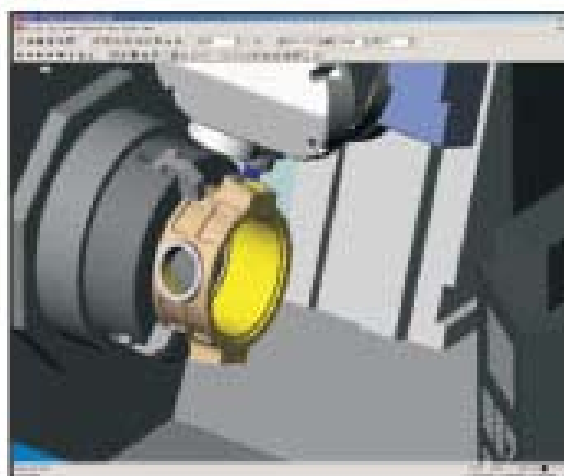
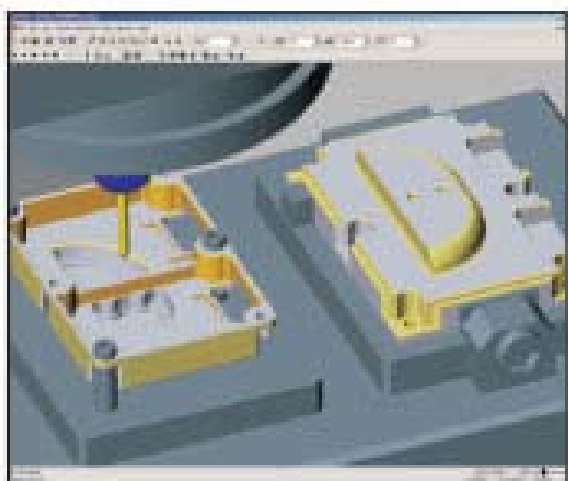
Центр Обучения и повышения квалификации программистов и операторов станков с ЧПУ

На базе сервисного Центра станков с ЧПУ компании ИТЦ "Вари-Ус" в г. Днепр создан и успешно функционирует класс для обучения специалистов промышленных предприятий Украины.

Любое предприятие Украины, приобретающее современные станки с ЧПУ либо уже эксплуатирующее такое оборудование, сталкивается с необходимостью обучения вновь прибывших сотрудников технологических отделов и операторов станков методам эффективной эксплуатации оборудования. Программисты и технологи сервисного Центра по обслуживанию станков с ЧПУ, а также отдела CAD/CAM программирования регулярно проводят обучающие семинары для своих сотрудников, а также по заявкам промышленных предприятий и

ВУЗов Украины. Для каждого предприятия составляется индивидуальная программа обучения с учетом особенностей станочного парка заказчика и существующего уровня подготовки специалистов.

В случае приобретения предприятием нового оборудования с ЧПУ, поставляемого компанией ИТЦ "ВариУс", специалисты компании проводят обучающие мероприятия на предприятии Заказчика непосредственно на вводимом в эксплуатацию оборудовании – в рамках договоров поставки оборудования.



В случае приобретения программного CAD/CAM комплекса ESPRIT, программисты компании проводят бесплатный курс обучения для специалистов Заказчика либо на его производственных мощностях, либо в специализированном классе на территории сервисного Центра ИТЦ "ВариУс". Результаты обучения возможно проверить практическим путем на современном оборудовании DOOSAN, установленном в шоу-руме компании "ВариТек", находящегося на территории сервисного Центра. Здесь же есть возможность подобрать режу-

щий инструмент TaeguTec и провести практические тестовые испытания с обработкой режимов резания.

3.10. Стратегия ESPRIT ProfitTurning™

Стратегия ProfitTurning™, в новой версии CAD/CAM-системы ESPRIT, отражает новаторские достижения компании за годы неустанного развития. ProfitTurning™ прошла серию суровых тестов и продемонстрировала высокий уровень точности, производительности, а также существенное сокращение времени цикла обработки.

ProfitTurning™ – это стратегия высокоскоростной черновой токарной обработки, разработанная компанией DP Technology, позволяющая более быстро, безопасно и эффективно изготавливать детали. Кроме того, благодаря ей можно продлить срок жизни инструмента, уменьшая его износ. По сравнению с традиционными методами обработки, ProfitTurning™ позволяет сократить время цикла и частоту смены инструмента.

Для расчета обработки ESPRIT использует новое ядро, которое лежит в основе стратегии ProfitTurning™. В то время как традиционные стратегии учитывают только геометрию будущей детали, DP Technology реализовала в новой технологии зависимость от множества факторов, влияющих на качество обработки, в том числе и особенности кинематики станка. В компании провели углубленные исследования процессов обработки деталей из различных металлов и сплавов, чтобы использовать наиболее эффективный способ. Благодаря чему были разработаны уникальные стратегии для решения сложных задач по токарной обработке.

Существующие ограничения традиционной стратегии токарной обработки

При использовании традиционных методов токарной обработки материалов повышенной твердости, инструмент может как входить, так и выходить из зоны обработки под большим углом, что влечет за собой непостоянное усилие резания и неравномерный съем материала. При этом образующаяся стружка будет непостоянной толщины (рис. 3.52). Использование традиционных методов врезной подачи для таких заготовок также может привести к неравномерному расходу материала и образованию неровностей на поверхности.

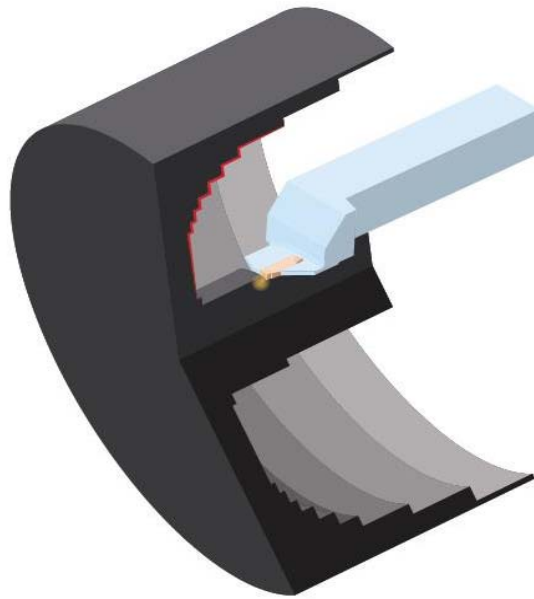


Рис. 3.52. Традиционный метод врезания инструмента в обрабатываемую деталь

Кроме того, токарная обработка традиционным методом, в некоторых случаях, может привести к неблагоприятным последствиям, таким как большая нагрузка на инструмент, высокие и неравномерные усилия резания, вибрация и плохой контроль съема (неравномерная толщина стружки) материала. Ключевыми факторами при высокоскоростной обработке твердых материалов является поддержание постоянной толщины снимаемой стружки, что является жизненно важным фактором для обработки деталей с высоким качеством, а также продления срока службы инструмента.

В частности, если толщина снимаемой стружки слишком мала или слишком велика, то возможен интенсивный износ инструмента и множество нежелательных последствий. Это может выражаться в образовании настолько больших фрагментов стружки, что они не смогут достаточно быстро удаляться с пути режущего инструмента. Например, если инструмент при резании заходит на большую глубину, то не удаленная вовремя стружка может привести к его поломке.

Еще одним негативным последствием небольшой толщины снимаемой стружки является трение, которое затрудняет ее удаление, а также приводит к нагреву инструмента и заготовки, что значительно сокращает срок службы инструмента. Таким образом, поддержание постоянной толщины снимаемой стружки имеет решающее значение в процессе высокопроизводительной токарной обработки.

Возможности ProfitTurning™

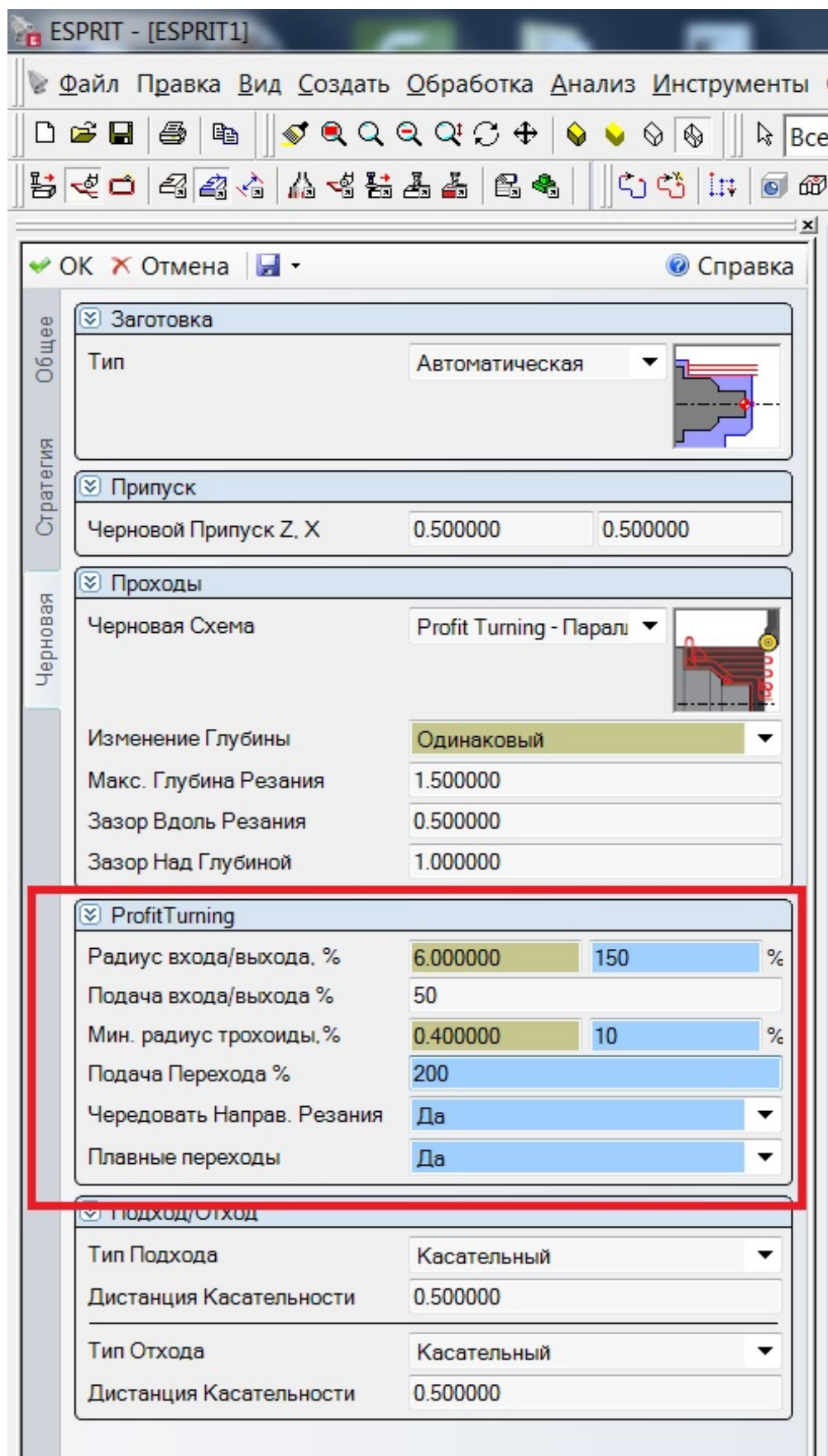


Рис. 3.53. Параметры, обеспечивающие стратегию ProfitTurning™

ESPRIT предлагает инновационную стратегию черновой обработки ProfitTurning™ на токарных станках, которая помогает устранить неблагоприятные факторы, возникающие при традиционных методах точения (рис. 3.53).

ProfitTurning™ представляет собой метод высокоскоростного резания, дополнительно используемого в существующих циклах черновой токарной обработки и обработки канавок от ESPRIT.

ProfitTurning™ является производительным и безопасным методом токарной обработки, который позволяет выполнять обработку более эффективно с постоянной толщиной съема материала и постоянным усилием резания, что обеспечивает снижения износа инструмента и сокращение времени цикла. Данные параметры достигаются с помощью алгоритма построения траектории движения инструмента на основе стратегии контроля постоянной величины съема материала, что позволяет поддерживать соответственное универсальное усилие резания и добиваться самого высокого уровня производительности.

Уменьшение подачи и поддержка равномерного съема металла в течение всего прохода

Другой способ устранения негативных последствий традиционного точения заключается в понижении подачи при врезании и уменьшении съема металла.

ProfitTurning™ разбивает обрабатываемую поверхность на участки и создает скругленную траекторию на входе и выходе из зоны обработки, чтобы контролировать постоянство контакта с обрабатываемой заготовкой (рис. 3.54).

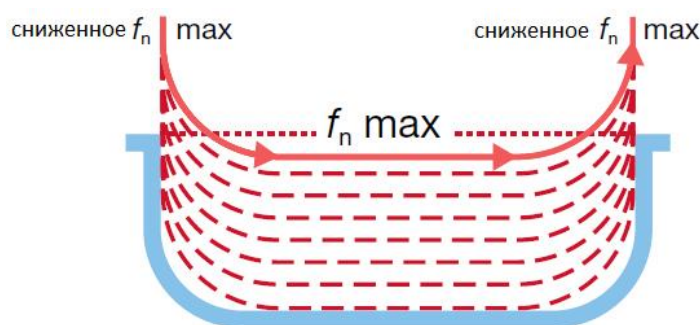


Рис. 3.54. Траектории движения инструмента при черновой обработке ProfitTurning™ на токарных станках

Благодаря плавной подаче и снижению ее скорости усилие резания при входе инструмента значительно уменьшается и поддержи-

вается на постоянном уровне. Скорость подачи достигает максимума на прямых участках, так называемых, параллельных проходах, при этом поддерживается постоянная величина снимаемого материала, которая уменьшается при выходе из участка обработки.

Простая обработка небольших, но сложных зон

Не ко всем зонам резания просто и легко добраться, например, к таким, как зона, показанная на рис. 3.55.

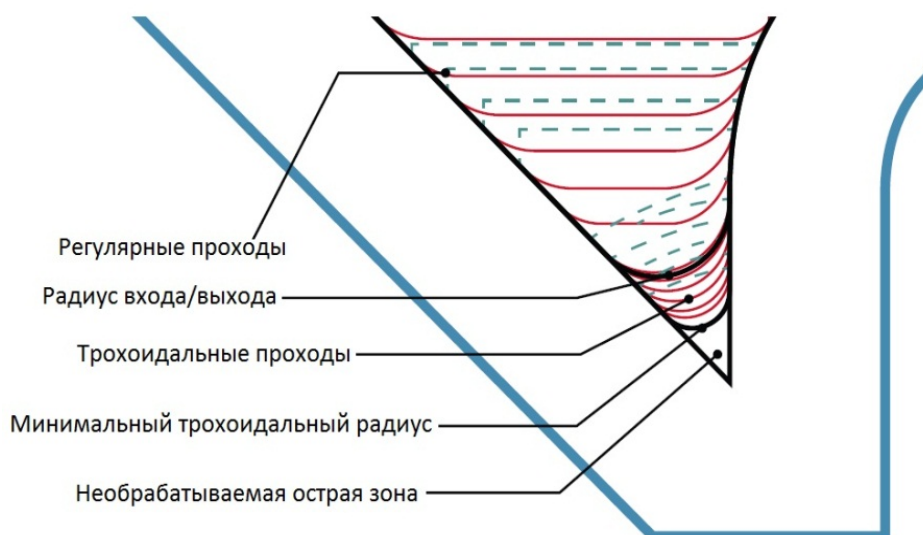


Рис. 3.55. Глубина резания инструментом ProfitTurning™ в небольших зонах существенно уменьшается

К счастью, ProfitTurning™ – это стратегия резания для любых и даже небольших и неровных зон. Они зачастую определены контуром детали, входом и выходом инструмента и минимальным радиусом трохойды. Он задается пользователями для ограничения объема трохойдальных движений в небольших углах, куда сложно добраться режущему инструменту. Еще одной проблемой в этих труднодоступных зонах является поддержание постоянства съема металла, так чтобы радиус захода инструмента был не слишком велик. Для того, чтобы справиться с этой проблемой, в ProfitTurning™ используется полное трохойдальное резание внутри этих небольших зон, пока инструмент не достигнет минимального радиуса трохойды, определенного пользователем (рис. 3.56). Таким образом, устанавливается размер зоны в острых углах, не подвергающейся механической обработке, а скорость врезания снижается для поддержания равномерности съема материала.

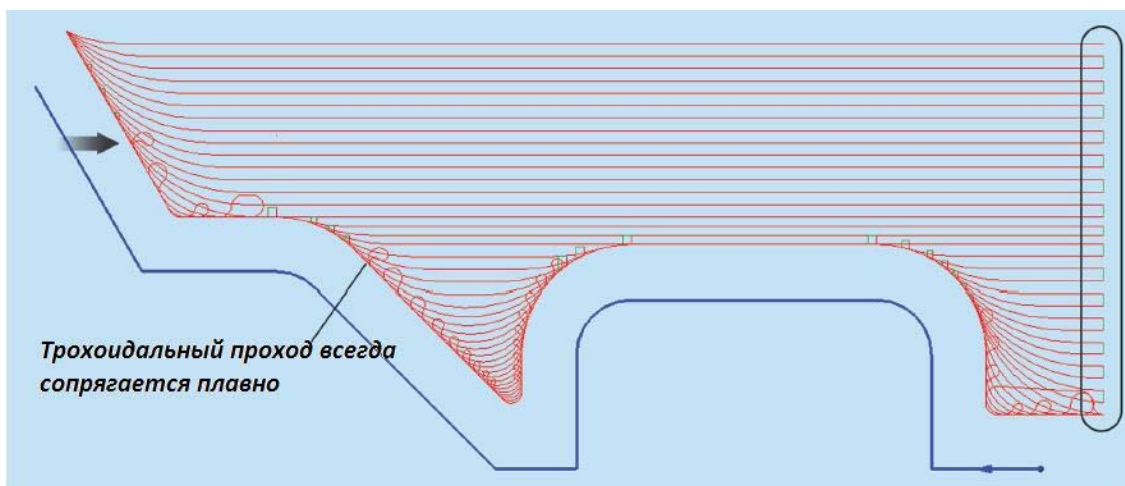


Рис. 3.56. "Резание с переменным направлением" активировано, а "плавный переход" не активирован

Резание с переменным направлением и плавные переходы ProfitTurning™ позволяет пользователям изменять направление резания, чтобы исключить обратные перемещения (рис. 3.57).

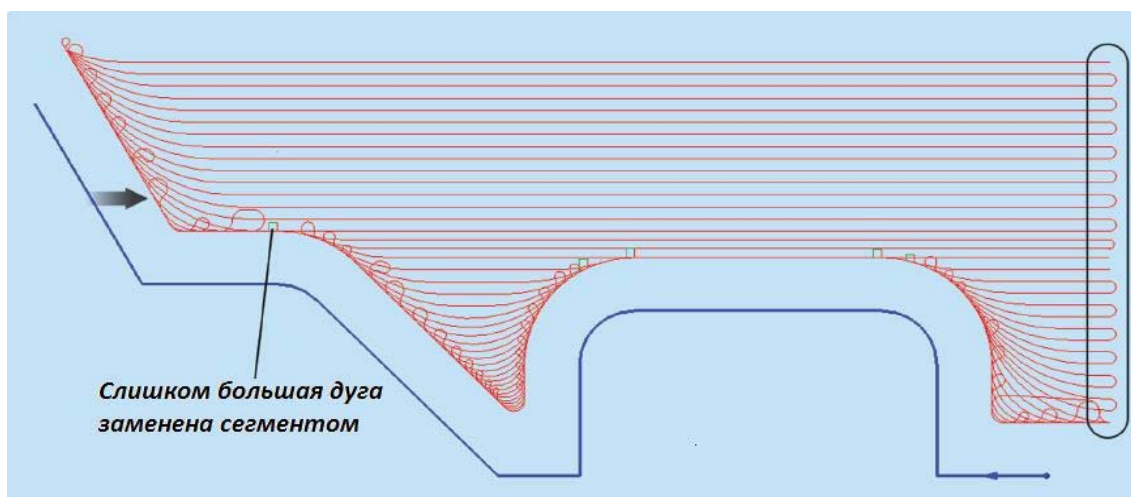


Рис. 3.57. "Резание с переменным направлением" и "Плавный переход" активированы

"Плавный переход" заменяет кривые, соединяющие отдельные участки траектории при переменном движении инструмента по гладким дугам. Слишком большие дуги в углах также можно заменить этим сегментом.

Преимущества ProfitTurning™

ProfitTurning™ использует инструмент, оснащенный пластинами круглой формы или инструмент со скругленной режущей частью для проточки канавок. Это позволяет уменьшить толщину стружки. Кроме

того, ProfitTurning™, благодаря круглой форме режущей части инструмента, обеспечивает равномерный съем материала, снижает вибрацию и выравнивает усилие резания, которые могут привести к ухудшению качества обрабатываемой поверхности и повреждению режущего инструмента. Эти возможности ProfitTurning™ являются идеальными для обработки тонкостенных деталей из твердых материалов и жаропрочных сплавов (рис. 3.58, рис. 3.59).



Рис. 3.58. На половине диаметра круглой пластины скорость подачи на пластине равна толщине стружки



Рис. 3.59. Глубина резания уменьшается, а скорость подачи увеличивается

На половине диаметра пластины (рис. 3.58) скорость подачи на пластине и толщина стружки идентичны. Это похоже на 90-градусный режущий инструмент. Но так как угол подъема режущего инструмента изменяется, а глубина резания уменьшается (рис. 3.59), скорость подачи может быть увеличена для поддержания постоянной толщины стружки. Там, где глубина резания недостаточная, пользователи могут восполнить ее увеличенной скоростью подачи, что приводит к повышению производительности.

Проверка на практике!

Специалисты ESPRIT в сотрудничестве с партнерами компании провели сравнение методов обработки ProfitTurning™ и ZigZag – традиционной стратегии токарной обработки. Результаты испытания были успешными, показав сокращение времени цикла на 25 % при использовании ProfitTurning™.

Еще одной целью испытания была оценка срока службы инструмента при использовании ESPRIT ProfitTurning™ по сравнению с традиционными стратегиями токарной обработки. Для испытания были использованы две детали с одинаковыми характеристиками. Одна деталь была обработана по традиционной методике ZigZag, а другая – по стратегии ProfitTurning™. Во время резания была использована функция адаптивного контроля нагрузки на инструмент для определения мощности шпинделя. Для той и другой стратегии сначала измерили мощность в холостом режиме, а затем – при нагрузке на каждом проходе. Эти данные затем усреднены, чтобы показать общее значение мощности.

Разница Срока Службы Инструмента на Деталь

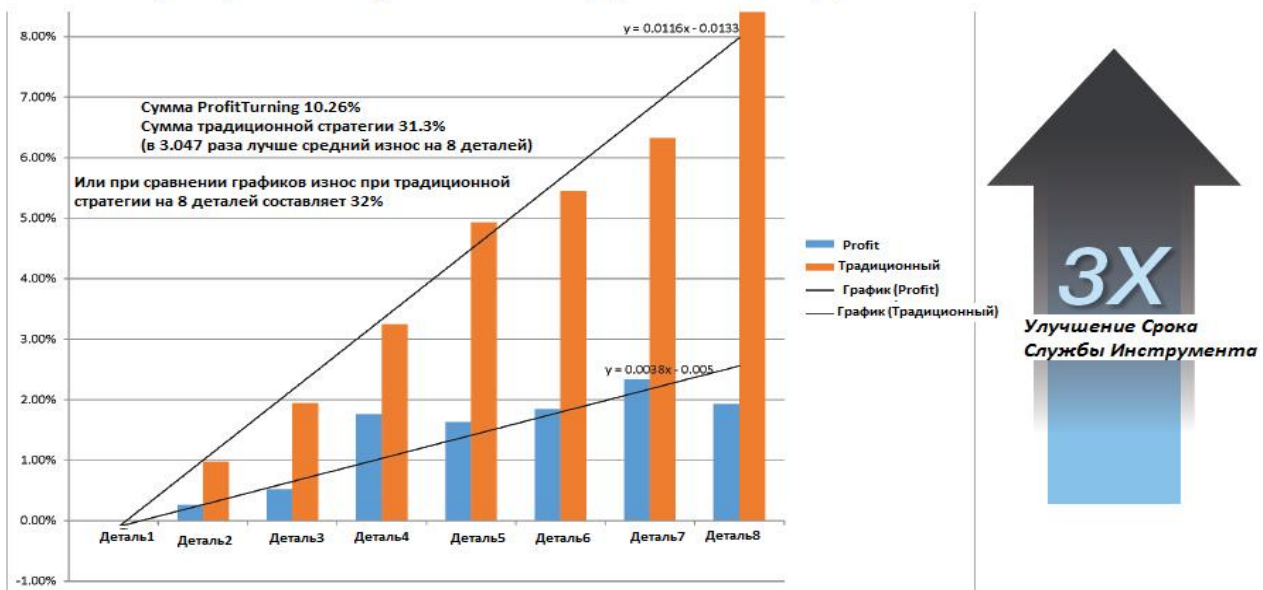


Рис. 3.60. Сравнение износа инструмента при точении согласно методике ProfitTurning™ и традиционному методу ZigZag

На рис. 3.60 оранжевая диаграмма отражает постепенное увеличение мощности при обработке каждой последующей канавки по обычной методике ZigZag (Примечание: по мере износа инструмента, чтобы выполнить резание необходимо увеличивать мощность станка).

Эту же обработку выполнили по методике ProfitTurning™ (диаграмма синего цвета).

При сравнении результатов токарной обработки восьми деталей согласно двум стратегиям установили, что при ProfitTurning™ износ инструмента составляет 10,26 %, в то время как при использовании традиционного метода ZigZag износ инструмента достигает уже 31,3 %. Диаграммы демонстрируют, что по сравнению с традиционным методом ZigZag стратегия ProfitTurning™ от ESPRIT, позволяет увеличить срок службы инструмента в три раза, благодаря чему приходится реже менять режущие пластины.

Выбор инструмента ProfitTurning™

ProfitTurning™ для проточки канавок предусматривает использование круглых пластин или цельнометаллического инструмента с режущей частью, выполненной по радиусу. При этом весь периметр режущей кромки может участвовать в точении, а направление траектории движения можно изменять, чтобы максимально использовать инструмент, повысить его эффективность, и продлить срок службы. Кроме того, круглые пластины могут также использоваться для обработки с боковой нагрузкой, в отличие от обычных квадратных пластин. Кроме того, круглые пластины хороши для обработки очень твердых материалов таких, например, как жаропрочные сплавы.

Стойкость, также является характеристикой, принимаемой во внимание при сравнении круглых и квадратных пластин. Круглые пластины прочнее, они менее склонны к вибрациям во время обработки, что обеспечивает более высокую производительность.

Преимущества круглых вставок:

- весь периметр пластины может быть использован при обработке;
- направление резания можно чередовать;
- эффективный контроль постоянства толщины стружки, благодаря скруглению траектории входа/выхода;
- более прочная режущая кромка для твердых материалов;
- более высокие скорости подачи;
- обработка при боковой нагрузке.

Применение ProfitTurning™

На рис. 3.61 показан пример применения ProfitTurning™ при проточке глубоких канавок и контурной обработке, где требуется длинный тонкий инструмент. Они выполняются в деталях из твердых материала-

лов или после сварки. При проточке канавок, как правило, возникает вибрация. Использование ProfitTurning™ позволяет оптимизировать технологию обработки с максимальной жесткостью и минимальной вибрацией для увеличения производительности. Примеры применения ProfitTurning™ показаны на рис. 3.62.

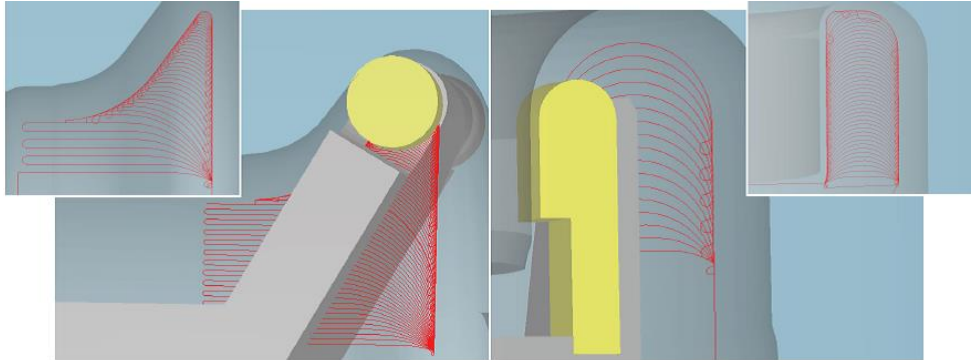


Рис. 3.61. Пример применения ProfitTurning™ –
точение глубоких канавок

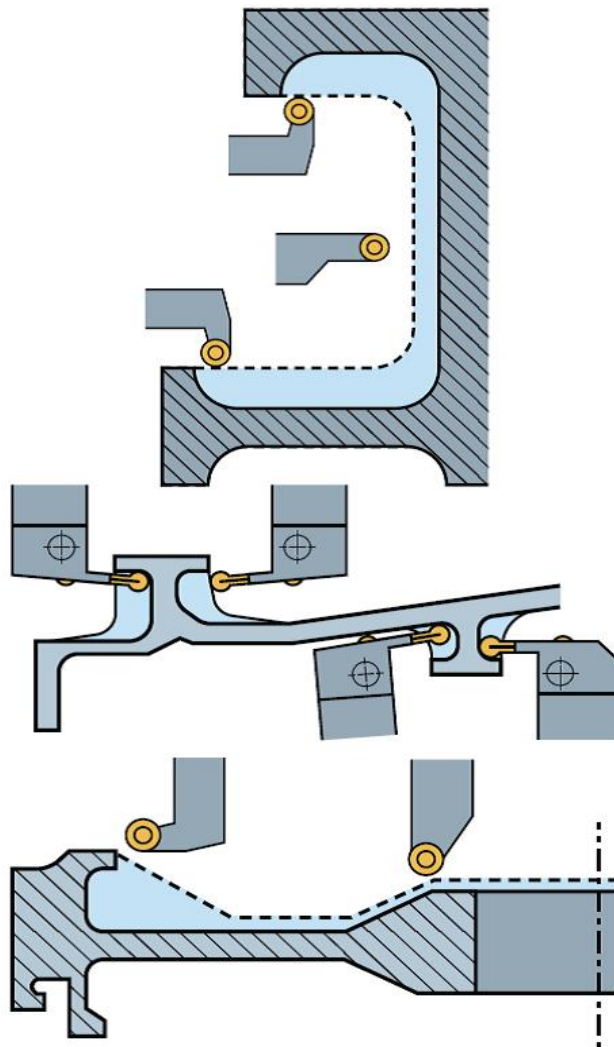


Рис. 3.62. Примеры использования стратегии ProfitTurning™

Таким образом, стратегия токарной обработки ProfitTurning™ от ESPRIT характеризуется постоянной толщиной стружки и стабильным усилием резания, что позволяет значительно увеличить скорость токарной обработки. Благодаря использованию круглых пластин, инструмент движется по траектории согласно стратегии ProfitTurning™ с меньшей вибрацией и остаточными напряжениями, что делает данный метод предпочтительным для обработки деталей с тонкими стенками из твердых материалов, таких как жаропрочные сплавы. ProfitTurning™ – это инновационная стратегия для оптимальной токарной обработки, которая позволяет существенно сократить время цикла, затраты на единицу продукции, и повысить производительность. Пример использования технологии ProfitTurning™ можно посмотреть по ссылке www.youtube.com/watch?v=GP4ft3rjqcw

3.11. Обзор возможностей САМ-системы ESPRIT 2017

Компания DP Technology подготовила в 2017 году третий релиз своего флагманского продукта – САМ-системы ESPRIT, которой успешно пользуются в военной и гражданской промышленности всего мира. Представляем вниманию машиностроителей краткий обзор наиболее интересных обновлений.

Новая версия предлагает пользователям множество нововведений, которые призваны удовлетворить потребности технологов-программистов, вывести программный продукт на новый уровень производительности и удобства использования.

Быстрое редактирование цепочек

Способ редактирования элементов в ESPRIT стал проще. Теперь можно легко удалять участки уже созданных Цепочек, Карманов, Профилей выделив их и нажав клавишу "Удалить" (рис. 3.63).

Улучшенное позиционирование инструмента в токарном цикле Обработки Контура

Эта функция обеспечивает лучшее позиционирование кромки инструмента вдоль стенки, в начале или и/или в конце режущего прохода (рис. 3.64). Наиболее эффективно "Тип Позиционирования" выгоден при обработке контура инструмента с круглыми или канавочными пластинами (рис. 3.65): положение "Горизонтально" предполагает размещение края инструмента горизонтально началу или концу Цепочки (а);

положение "Нормаль" предполагает размещение точки касания инструмента в начальной или конечной точке Цепочки (б); положение "Скругление" предполагает создание дуги касания инструмента в начале или конце Цепочки (в).

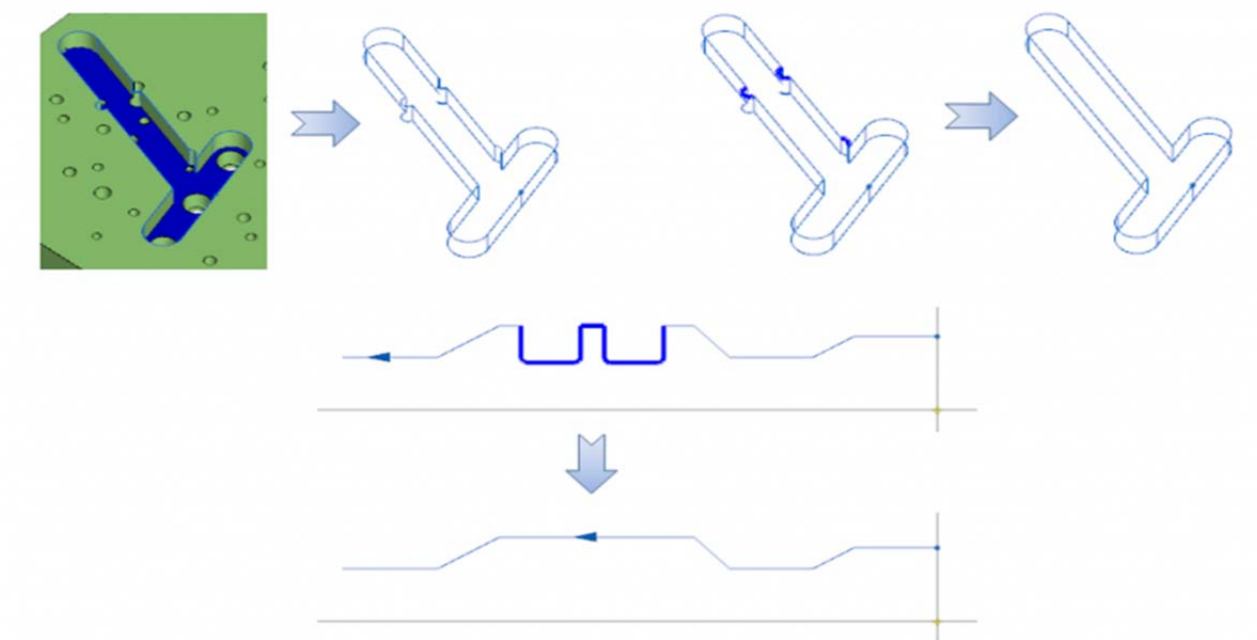


Рис. 3.63. Возможности быстрого редактирования элементов обработки

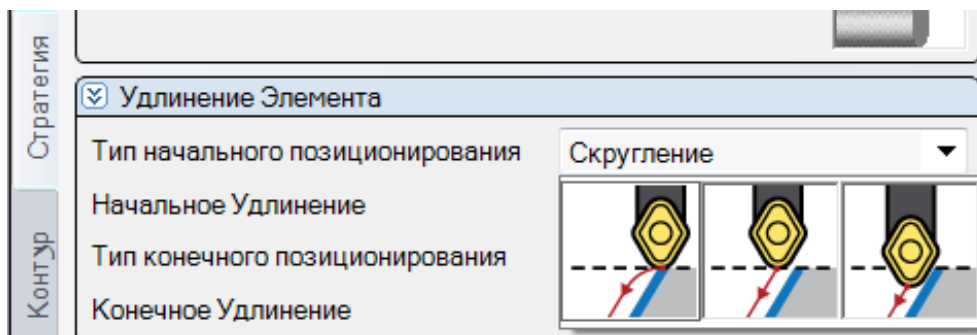


Рис. 3.64. Возможность выбора типа удлинения траектории

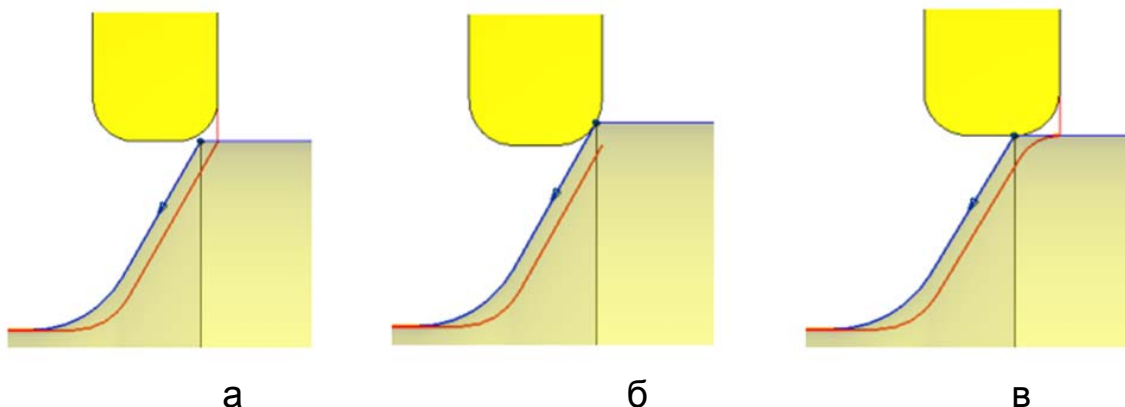


Рис. 3.65. Позиционирование инструмента

Улучшение эффективности в Profit Milling

Технология ProfitMilling – высокоскоростная обработка от ESPRIT была пересмотрена в новой версии для повышения производительности и надежности в закрытых полостях. Ключевые улучшения:

- увеличенная входная спиральная траектория. Таким образом "разбивка" зоны обработки проходит быстрее, что способствует эвакуации стружки и лучшему доступу охлаждающей жидкости (рис. 3.66);

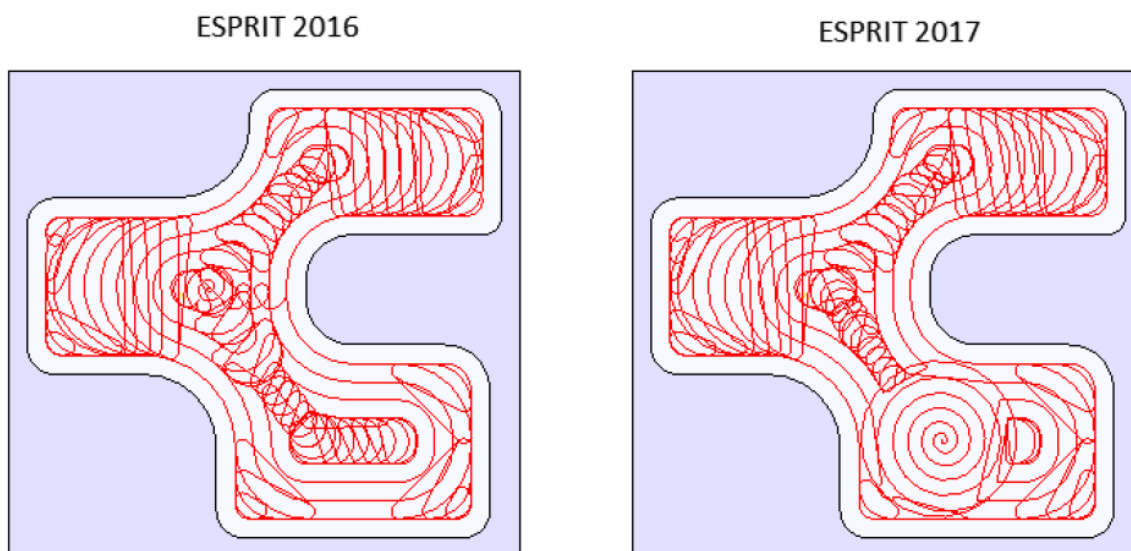


Рис. 3.66. Сравнение траектории с увеличением входной спирали

- оптимизированная начальная ширина канала для более быстрого достижения запрограммированных скоростей подачи и уменьшения времени обработки (рис. 3.67);
- меньше холостых ходов в открытых зонах.

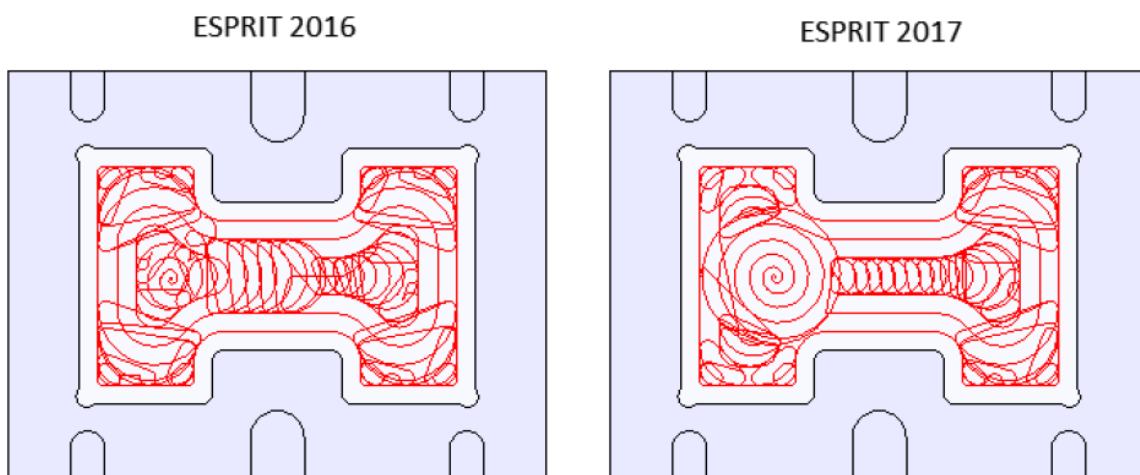


Рис. 3.67. Сравнение траектории с оптимизацией ширины канала обработки

Ускорение просчета времени траектории инструмента

Код, положенный в основу механизма "Автоматической Заготовки" (рис. 3.68) в процессах фрезерования, был реорганизован, с целью значительного сокращения времени расчета. Теперь, когда включена "Автозаготовка" в циклах Торцевая Обработка, Обработка Кармана и Обработка Контура, операции вычисляются значительно быстрее. Тот же алгоритм применяется для объемных 3х-осевых циклов Черновой Обработки.

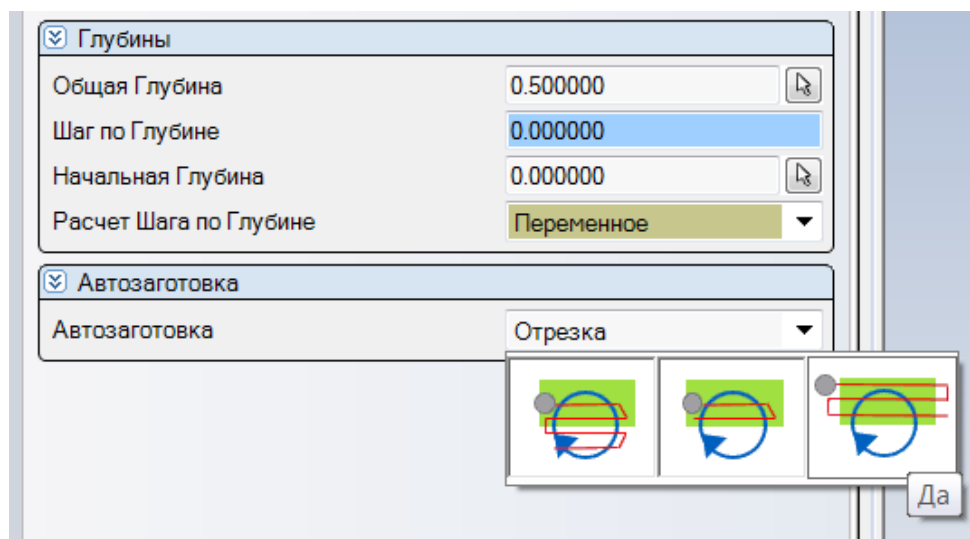


Рис. 3.68. Используется новый механизм определения Автозаготовки

Анализ прироста производительности расчета:

- обработка Кармана с включенной Автозаготовкой – до 25 раз быстрее;
- обработка Контура с включенной Автозаготовкой – в 3 раза быстрее;
- объемные 3-осевые циклы Черновой Обработки – до 12 раз быстрее.

Функция призвана сократить время расчета и оптимизации траектории инструмента.

Улучшенная поддержка наклонного инструмента

ESPRIT 2017 расширяет поддержку усложненных токарно-фрезерных станков с нижним резцедержателем. В предыдущих версиях ESPRIT текущее положение токарного инструмента для наклонной оси могло быть введено напрямую, а для фрезерного инструмента требовалось вычисление расчета ориентации и смещения инструмента. Теперь ESPRIT 2017 поддерживает ввод требуемого значения угла наклонной ориентации инструмента для обоих типов обработки.

"Режим Угла Поворота Инструмента" имеет настройки (рис. 3.69): **"Токарные инструменты"** – Значение по умолчанию. Работает так же, как и в предыдущих версиях. Угол поворота для токарного инструмента можно указывать в странице параметров инструмента.

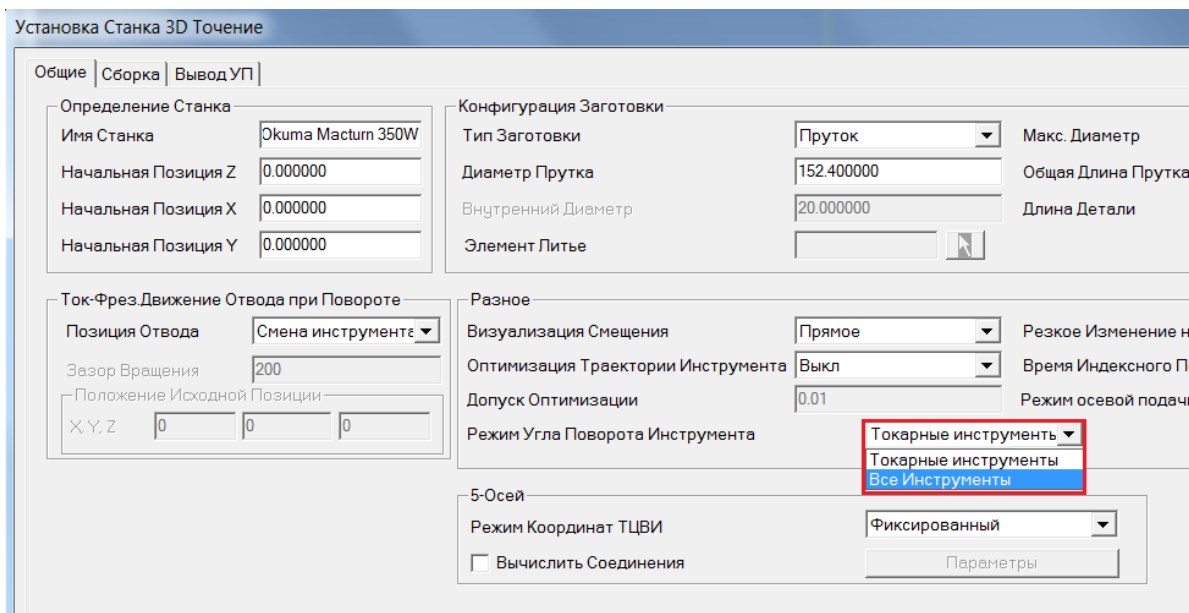


Рис. 3.69. Новый параметр "Режим Угла Поворота Инструмента" в Установках Станка поддерживает все типы режущего инструмента

Однако для фрезерного инструмента ориентация и смещение рассчитываются пользователем (рис. 3.70). Эта настройка обеспечивает поддержку ранних версий.

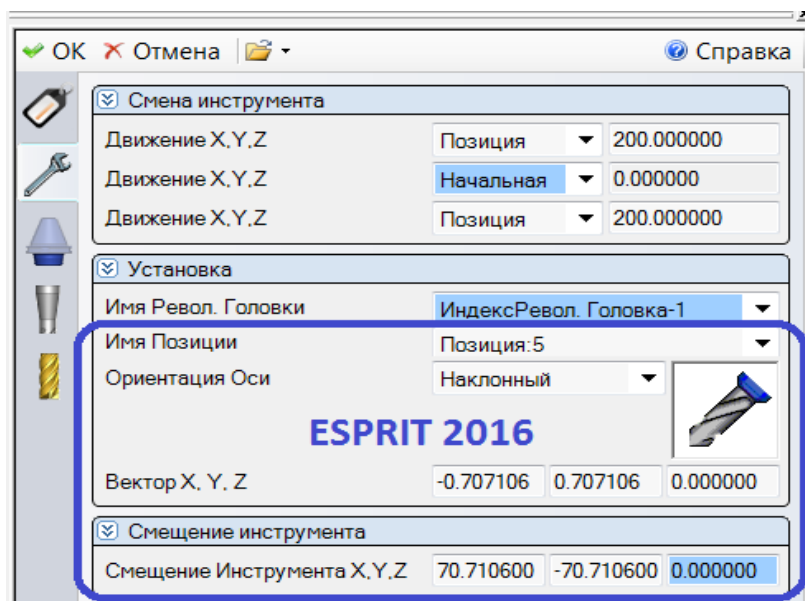


Рис. 3.70. В ESPRIT 2016 вектор и смещение для фрезерного инструмента вычислялись с помощью тригонометрических функций

"Все инструменты" – Требуемое смещение и ориентация инструмента могут быть установлены на странице инструмента для фрезерных и токарных инструментов (рис. 3.71, рис. 3.72).

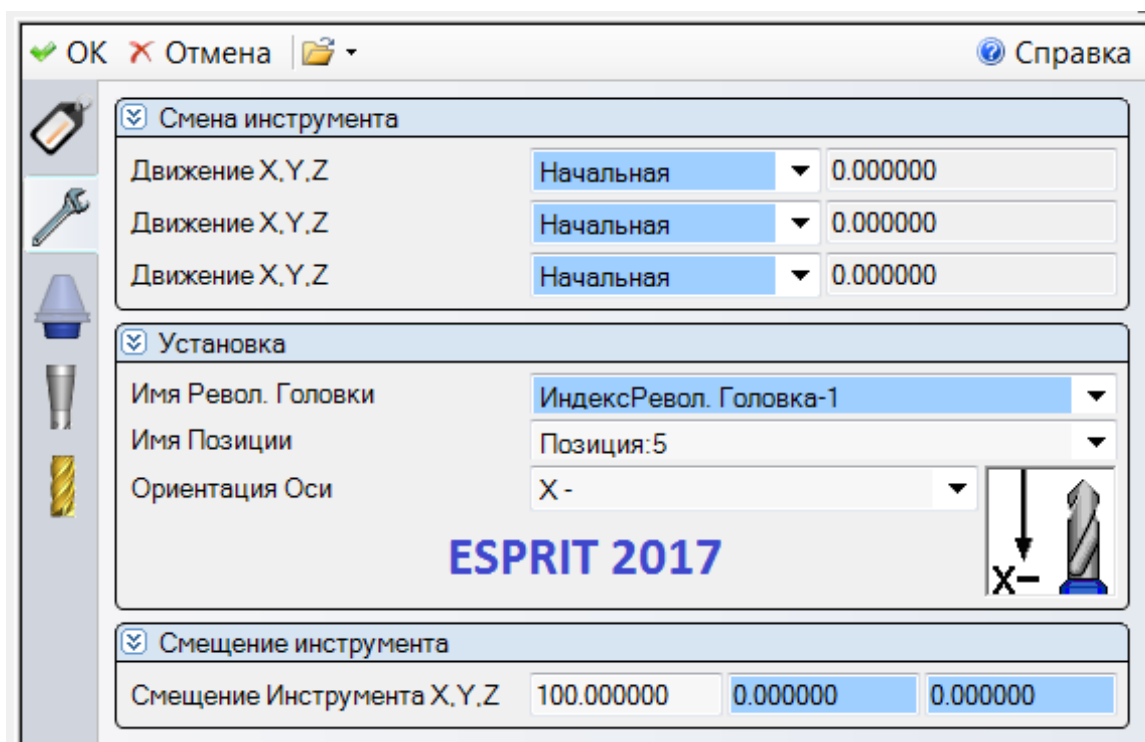


Рис. 3.71. Новая опция в ESPRIT 2017 упрощает интуитивно понятную настройку инструмента. Наклон устанавливается в настройках станка, а не в инструменте

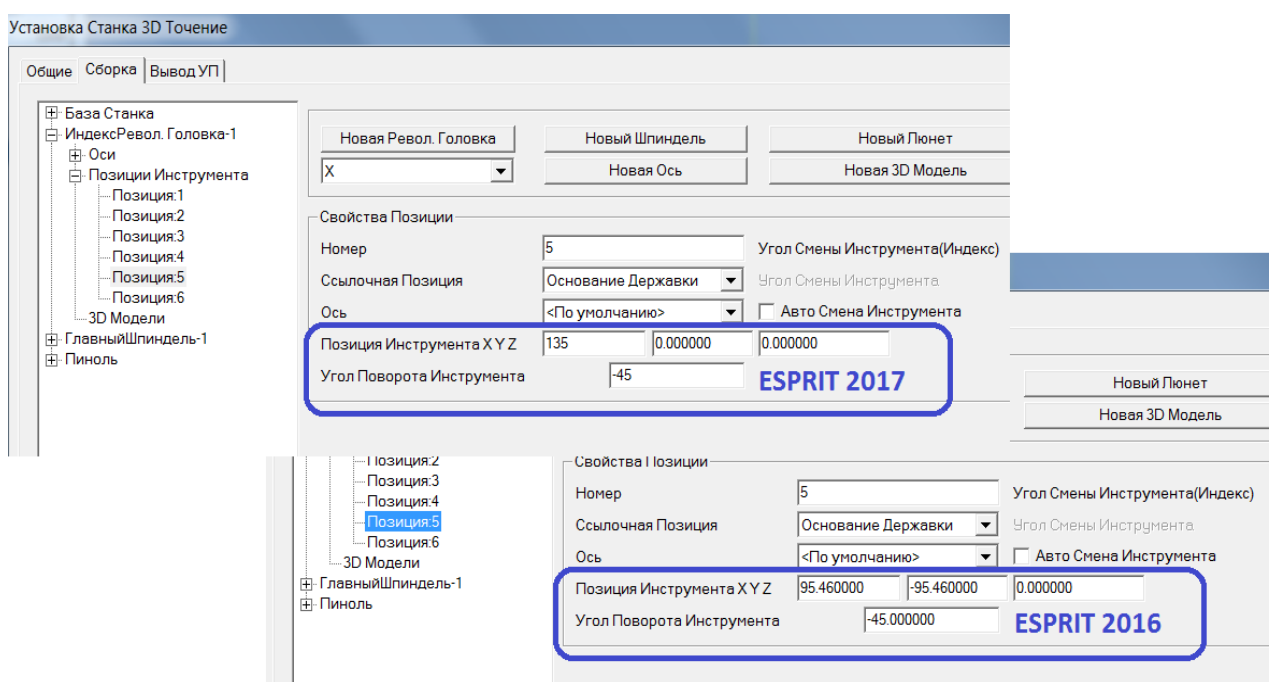


Рис. 3.72. Новая опция также упрощает настройку положения инструментальных блоков станка

Новый 3-осевой цикл Единой Чистовой Обработки (рис. 3.73)

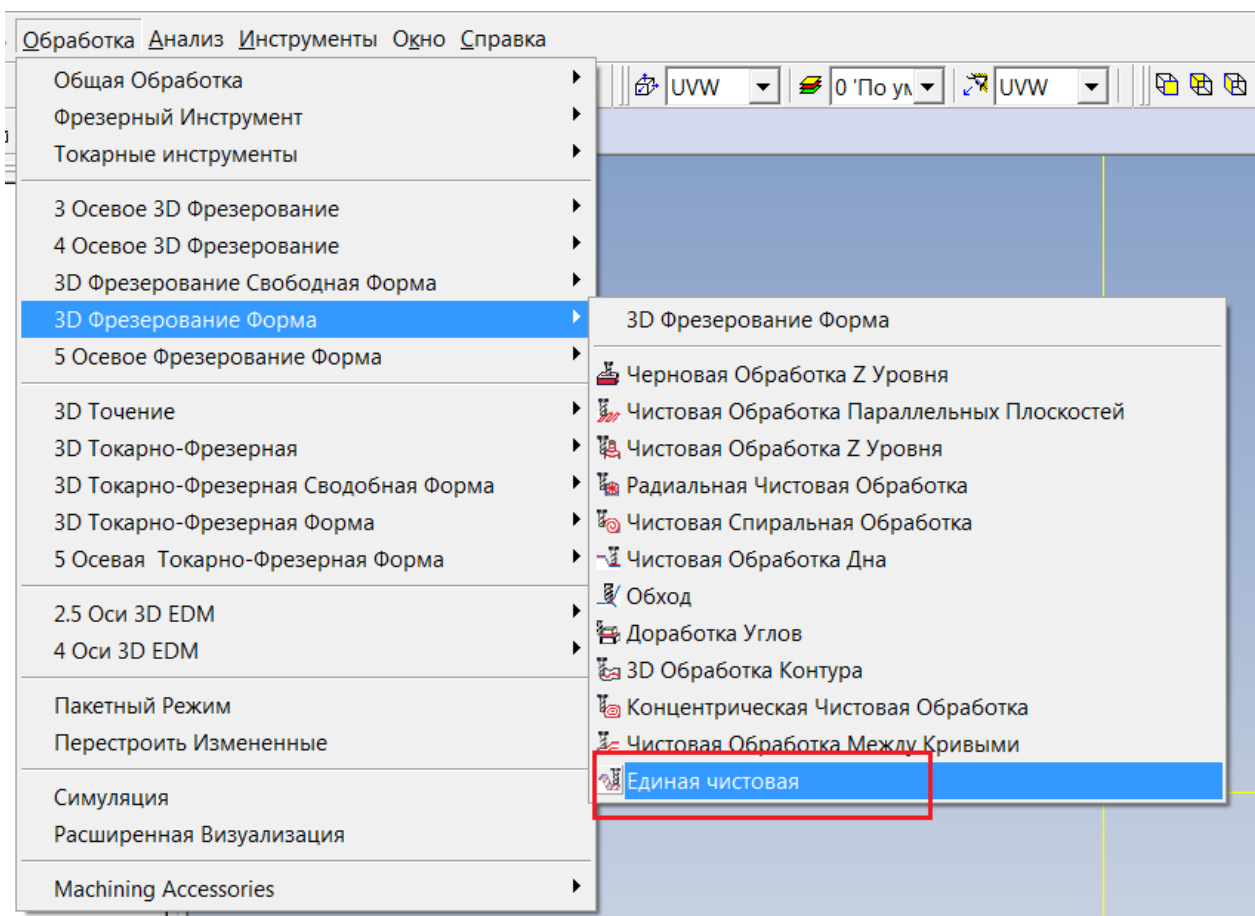


Рис. 3.73. Новый цикл Единой Чистовой Обработке в списке циклов объемной обработки

Завершить обработку всей зоны комплексной детали с крутыми и пологими участками за одну операцию можно, потратив на это меньше времени для программирования. Новый цикл "Единой Чистовой Обработки" содержит в себе лучшее из циклов ESPRIT: "Обработки Z-Уровня" и "Чистовая Обработка Дна" в одном комплексном решении. "Единая Чистовая Обработка" оптимизирует обработку сложных деталей, применяя наиболее подходящую траекторию инструмента к крутым и пологим областям детали на основе настройки "Угол Наклона" (рис. 3.74 – рис. 3.76).

Ключевые преимущества:

- оптимизированный интерфейс представляет только необходимые параметры для более быстрого программирования;
- специальный алгоритм придает приоритет непрерывности траектории инструмента между крутыми и неглубокими участками;

- оптимизированная траектория инструмента применяет проходы по Z-уровню для крутых областей, на пологих участках проходы формируются смещением;
- пользовательский угол наклона применяет соответствующую траекторию ко всем участкам обработки;
- возможность обработки открытых участков без остановки или отвода инструмента;
- возможность использования спирального режима для более гладкой обработки.

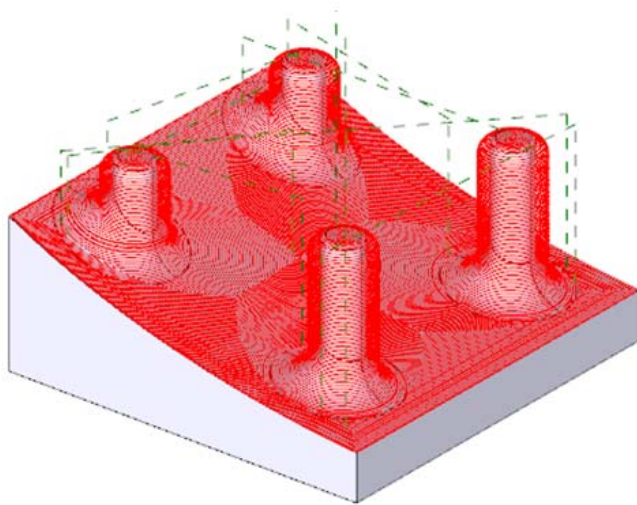


Рис. 3.74. Оптимизированная траектория для крутых и пологих участков

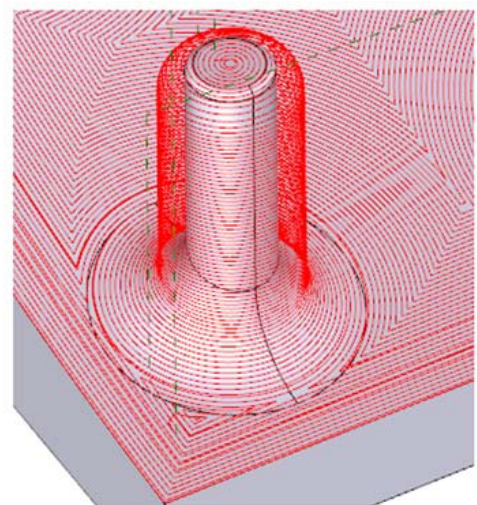


Рис. 3.75. Для крутых участков применяются проходы по Z-уровню, для пологих – смещение

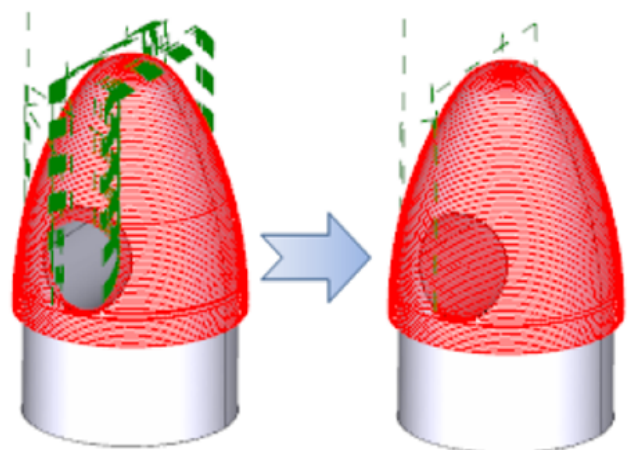
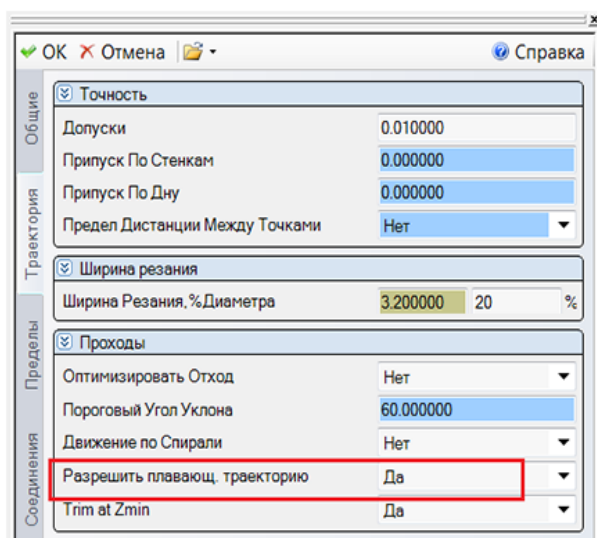


Рис. 3.76. Обработка открытых участков с использованием опции "Разрешить плавающую траекторию"

Расширенная поддержка оцифровки Z-пределов модели для циклов Свободной Формы

Появилась возможность выбора Z-пределов зоны обработки непосредственно по элементам модели. В качестве исходных данных может быть: Торец, Кромка, Вершина, Петля, любой геометрический объект (рис. 3.77).

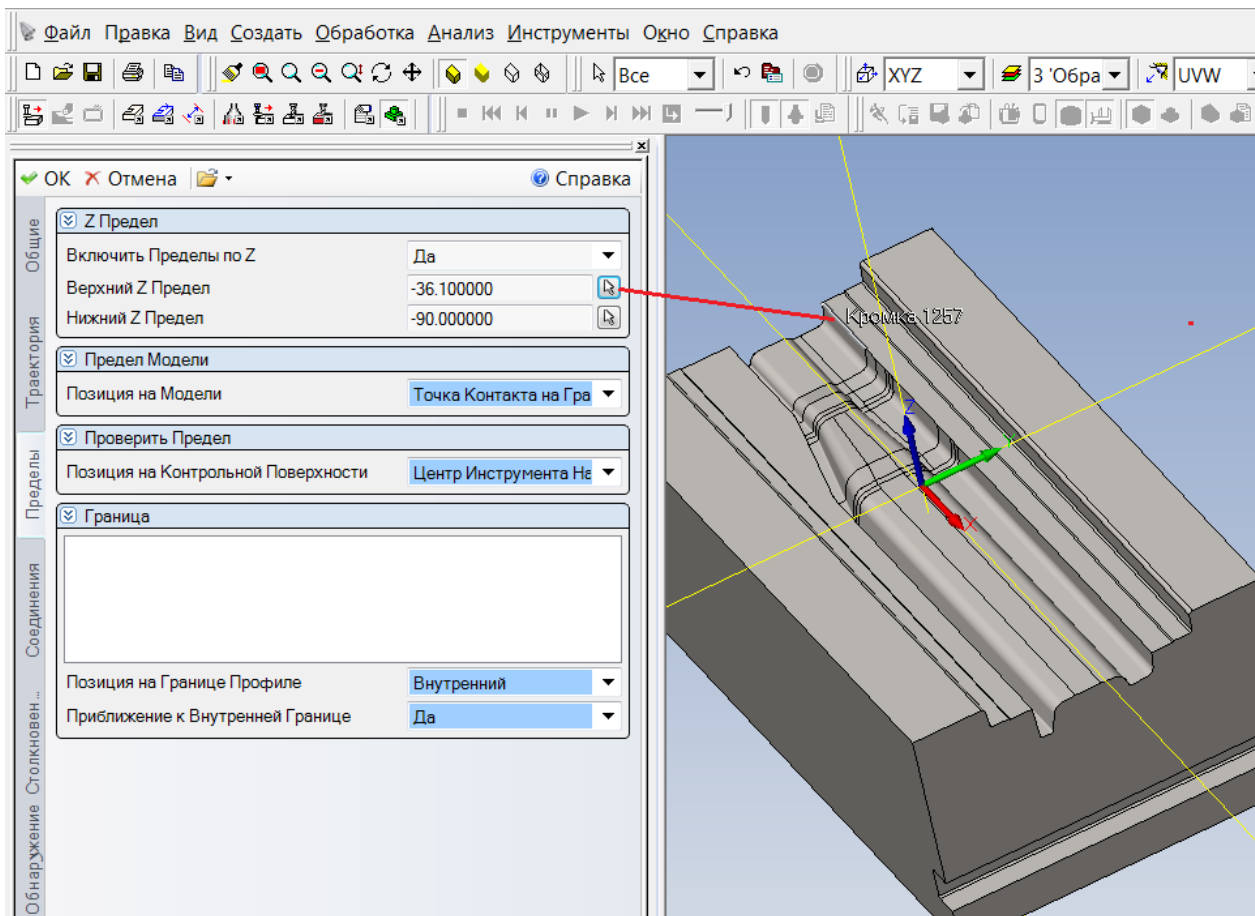


Рис. 3.77. Определение Пределов обработки теперь доступно из любого элемента модели

Отображение траектории ускоренного перемещения режущего инструмента

Траектория перемещения инструмента представлена на экране не только рабочей подачей, но и ускоренным перемещением инструмента (рис. 3.78). Такое отображение траектории на рабочем экране дает лучшее представление о перемещении инструмента до запуска симуляции. Данное усовершенствование особенно полезно для оценки быстрого движения инструмента при вращательных и многоосевых операциях механической обработки.

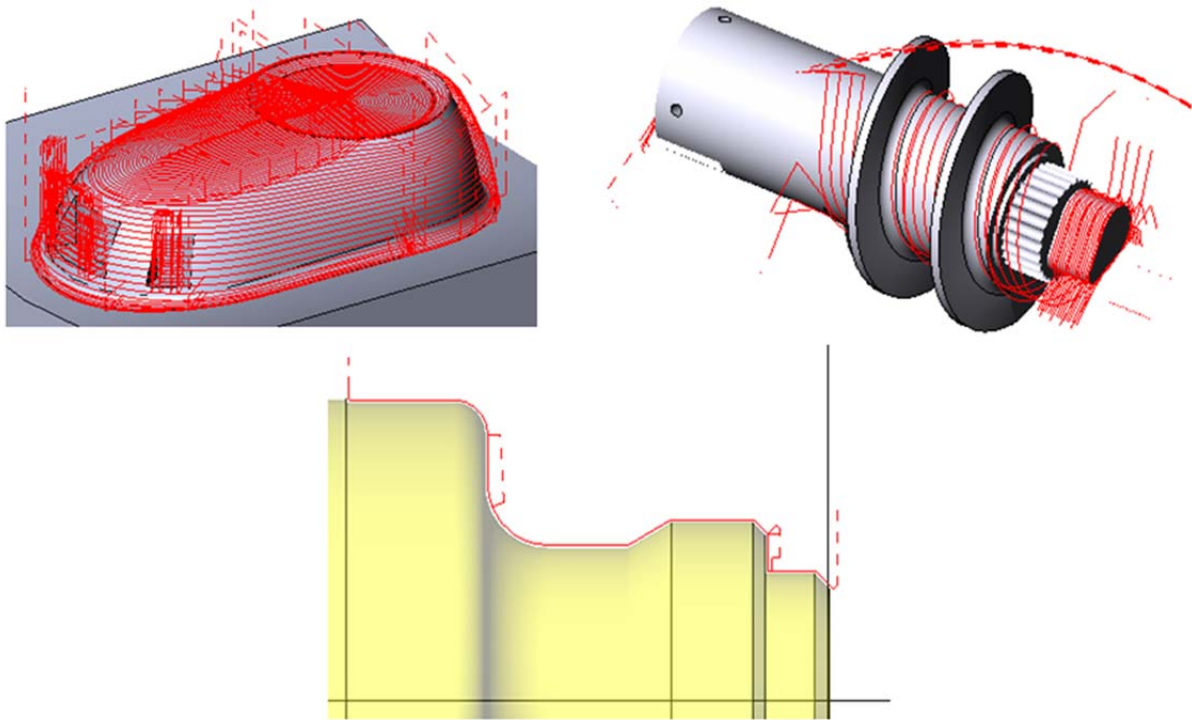


Рис. 3.78. Рабочая подача отображается сплошной, а ускоренная – пунктирной линиями

Обновленная траектория цикла 5-осевой Боковой Обработки

Команда разработчиков ESPRIT учла пожелания специалистов из аэрокосмической отрасли. Цикл ESPRIT 5-осевой Боковой Обработки теперь более восприимчив к широкому диапазону деталей с несколькими усовершенствованиями, которые улучшают вычисление траектории инструмента и автоматически компенсируют необычную геометрию детали.

Среди усовершенствований:

- автоматическая обработка открытых зон в поверхности для непрерывной траектории (рис. 3.79);
- достоверные проходы, следующие за кривизной профиля детали;
- более плавное позиционирование инструмента вдоль стенок с неровными или прерывистыми границами;
- надежное резание небольших углов с помощью больших инструментов;
- оптимизированная ориентация осей инструмента, когда траектория начинается или заканчивается на плоских гранях;
- сглаживание траекторий инструмента вокруг острых краев для уменьшения ускорения обработки.

Автоматическая обработка открытых зон в поверхности для непрерывной траектории

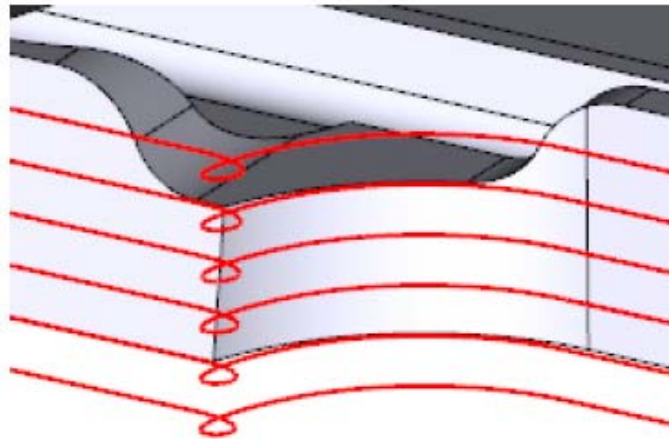


Рис. 3.79. Траектория создается без прерываний, без необходимости "закрытия" открытых зон

Цикл 5-осевой Боковой Обработки теперь может автоматически вычислять траекторию инструмента, которая плавно обрабатывает открытые зоны и неровности в геометрии детали без создания дополнительной геометрии, что может быть достаточно трудоемко.

Следование идеальной поверхности с правильными касательными проходами

Наклонные стенки могут быть полностью обработаны с помощью проходов, которые соответствуют кривизне детали. Вместо того чтобы добавлять простое удлинение к перемещению входа или выхода, что может повлиять на геометрию детали, проходы цикла Обработки Боковой Стороной основываются на анализе кривизны профиля без необходимости фактического расширения кривой (рис. 3.80).

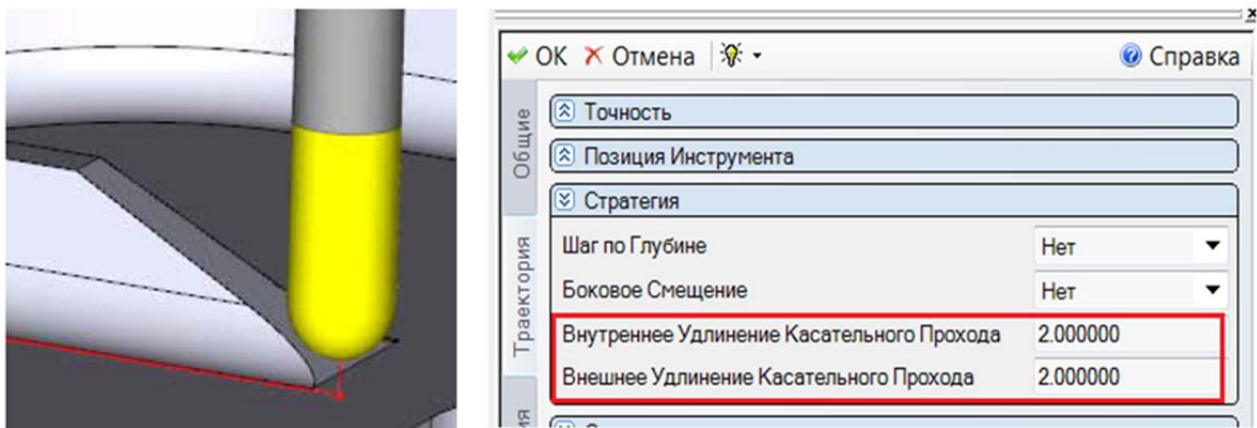


Рис. 3.80. Когда кромка стенки наклонена, правильное касательное удлинение будет следовать по идеальной поверхности

Для обработки ребер аэрокосмических деталей, правильное удлинение соединений экономят время программирования и повышают надежность траектории инструмента.

Более плавное позиционирование инструмента вдоль стенок с неровными или прерывистыми границами

У пользователя появился ряд возможностей плавно управлять режущей кромкой инструмента вдоль стенки с неровными или прерывистыми границами. Возможность управления инструментом внутри операции устраняет необходимость в ручном переопределении профиля обработки.

Пользователь может выбрать вариант, дающий наилучший результат для резания: верхний или нижний профиль, автоматическая кривая на основе усредненных геометрических данных, проекция профиля на плоскость (рис. 3.81).

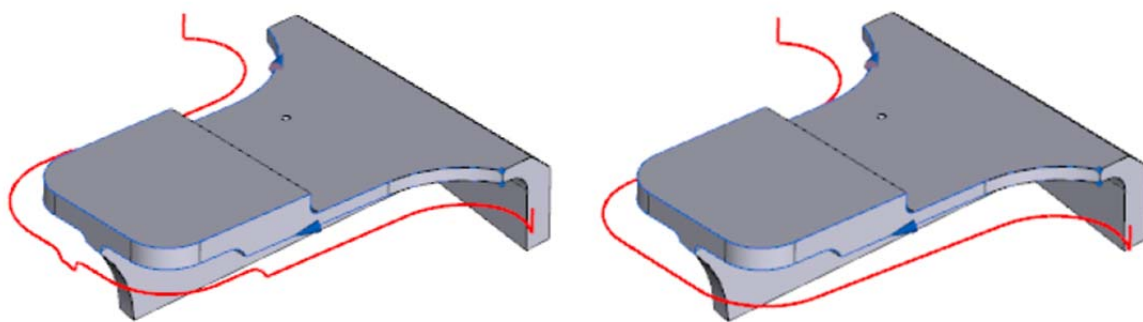


Рис. 3.81. Управление формой траектории инструмента в цикле 5-осевой Боковой Обработки

3.12. Лучшая САМ-система для управления осью В на токарно-фрезерных операциях

После приобретения и ввода в эксплуатацию многозадачных станков, оснащенных осью В, главной производственной задачей является использование дорогостоящего оборудования с максимальной эффективностью. Это значит, что необходимо в кратчайшие сроки задействовать весь технический потенциал сложного токарно-фрезерного обрабатывающего центра. Помощь в решении данного вопроса предлагает американская компания DP Technology с флагманским продуктом – САМ-системой ESPRIT (рис. 3.82), которая имеет представительство и полноценный сервис в Украине.

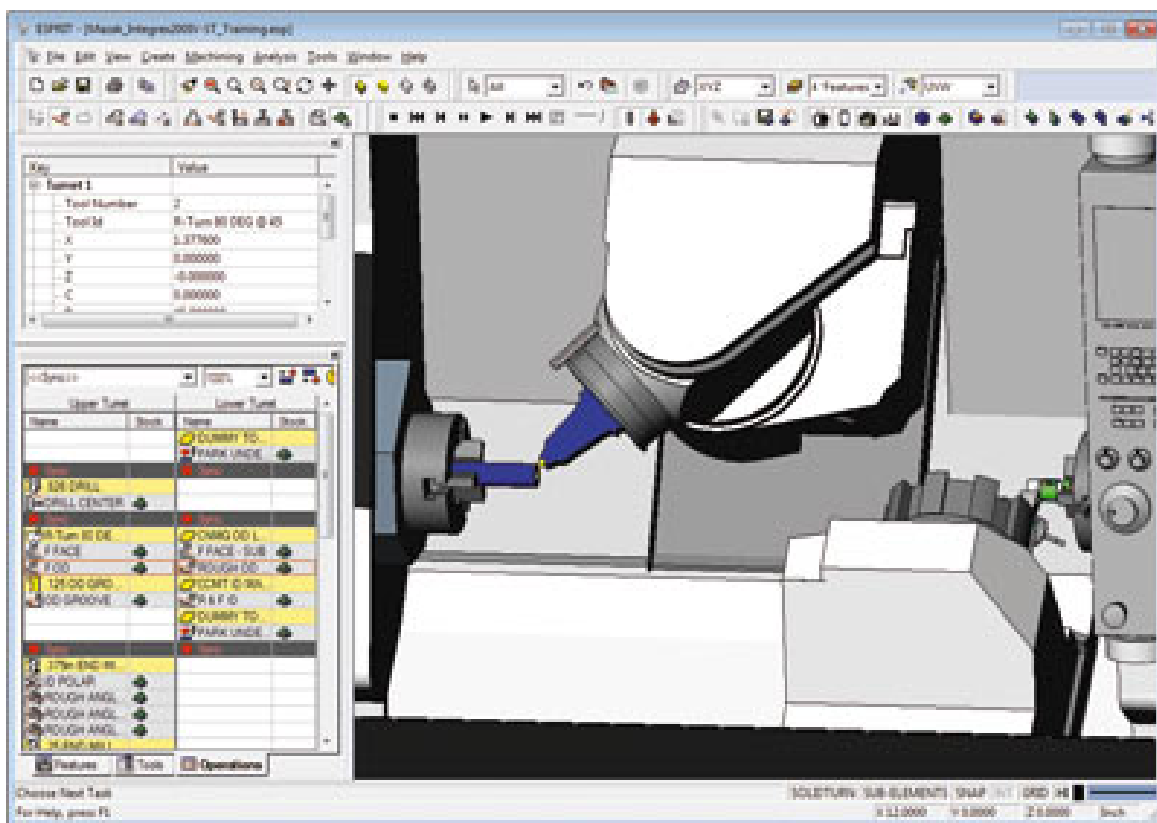


Рис. 3.82. Визуализация токарно-фрезерного оборудования в САМ-системе ESPRIT

Пятиосевые стратегии обработки в ESPRIT – это надежные и проверенные в заводских условиях решения для многозадачных станков, разработанные в тесном сотрудничестве с ведущими производителями металлорежущего оборудования. ESPRIT позволяет реализовать все преимущества такого дорогостоящего средства производства, как многозадачный обрабатывающий центр, включая использование управляемой оси В при токарно-фрезерной обработке, за счет программных решений для станков этого типа.

Полная интеграция оси В с токарно-фрезерными функциями

Так же как и традиционные токарно-фрезерные станки, оборудование, оснащенное осью В, обеспечивает контроль над осями Z и X при токарной обработке, над осью С при поворотном фрезеровании и осью Y при торцевом фрезеровании с эксцентриситетом. Однако технологические возможности, доступные при задействовании оси В, выделяют такие станки в отдельную группу среди оборудования, предназначенного для непрерывной токарно-фрезерной обработки.

Поворотная головка с осью В может быть использована не только как фрезерный шпиндель, но и как держатель для токарного или

расточного инструмента. Ось В определяется вращением вокруг оси Y, что делает возможной обработку со сложными углами наклона, изменяющимися по отношению к основной оси вращения, поддерживая обработку самых сложных поверхностей. Если такой ОЦ имеет два шпинделя, то использование оси В позволяет производить фрезерную и токарную обработку заготовки с двух сторон одновременно.

Точение плюс 5-осевое позиционирование

На станках с осью В, как правило, изготавливают детали типа тел вращения, геометрия которых содержит несколько граней и элементов, расположенных под различными углами к оси вращения. Оборудование такого класса может применяться для изготовления валов с пазами и канавками различного типа (прямыми, косыми), а также корпусов и державок режущего инструмента.

ESPRIT позволяет программировать неперпендикулярные к поверхности обработки многокоординатные перемещения инструмента, необходимые для обработки труднодоступных зон и углов перехода в медицинских компонентах, деталях сложной формы гидро- и газодинамического оборудования, каналов охлаждения режущего инструмента и т.д. Примеры работы станков с осью В представлены на рис. 3.83 – рис. 3.86.

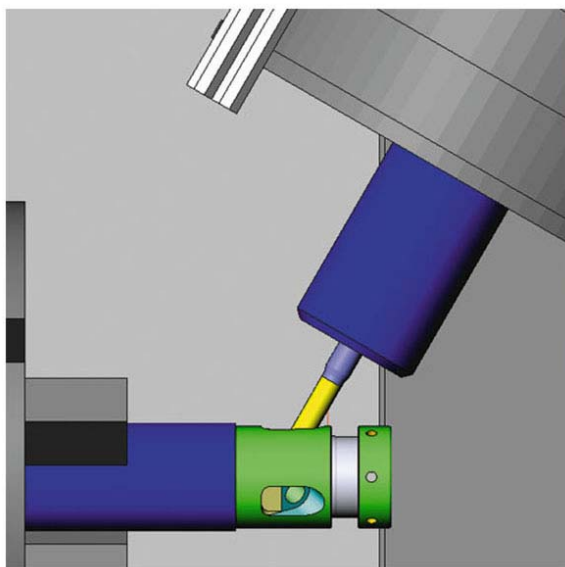


Рис. 3.83. Наклон оси В для фрезерования и сверления в зонах с углом, изменяющимся по отношению к оси вращения

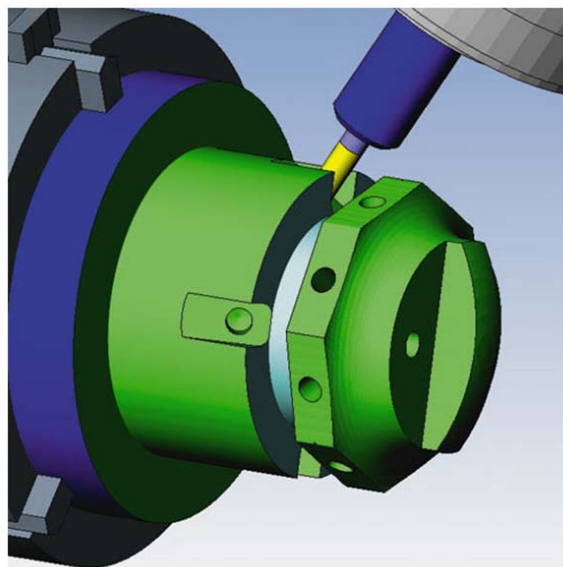


Рис. 3.84. Возможность обработки многогранных деталей несколькими способами

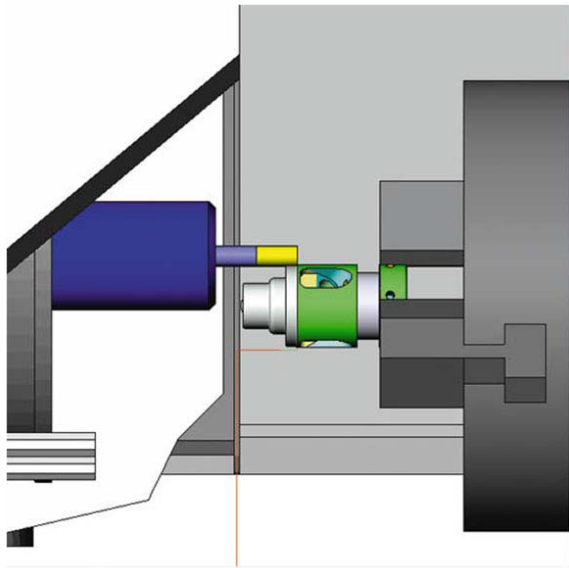


Рис. 3.85. Использование двух шпинделей при обработке передней и задней сторон заготовки

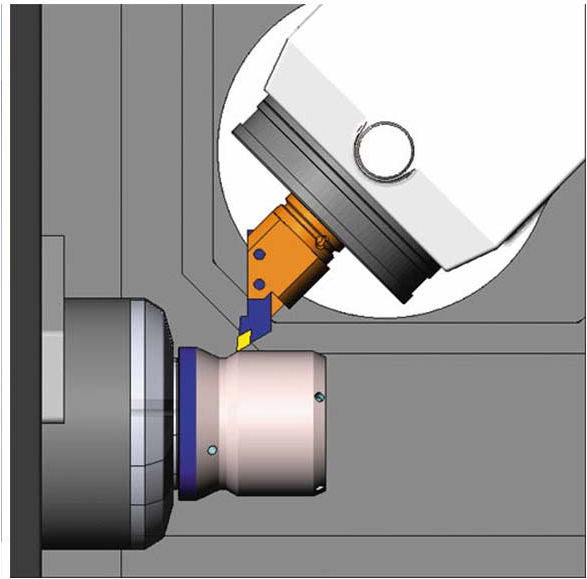


Рис. 3.86. Универсальность крепления токарного и фрезерного инструмента в голове с осью В

Точение плюс 5-осевая одновременная обработка

Вначале работа станка с осью В может выглядеть немного пугающе вследствие сложной конфигурации самого оборудования, а также неперпендикулярного к обрабатываемой поверхности перемещения инструмента с одновременным задействованием нескольких осей координат. ESPRIT обладает полностью интегрированной средой программирования токарно-фрезерных операций, позволяющей упростить процесс подготовки УП и обеспечивающей производственную гибкость, необходимую для эффективного изготовления деталей с заданными параметрами точности.

Для успешного программирования оси В в САМ системе необходимо поддерживать набор станочных циклов фрезерной обработки с одновременным использованием от двух до пяти управляемых осей координат, включая 3- и 5-осевую обработку сложных поверхностей, а также поддерживать такие циклы токарной обработки, как торцевание, расточка, обработка канавок и нарезание резьбы. ESPRIT реализует гибкость в использовании токарных и фрезерных циклов в любых комбинациях при обработке сложной заготовки за один установ – на главном шпинделе или на субшпинделе с применением верхней головки с управляемой осью В или нижней револьверной головки. Примеры методов обработки представлены на рис. 3.87 – рис. 3.90.

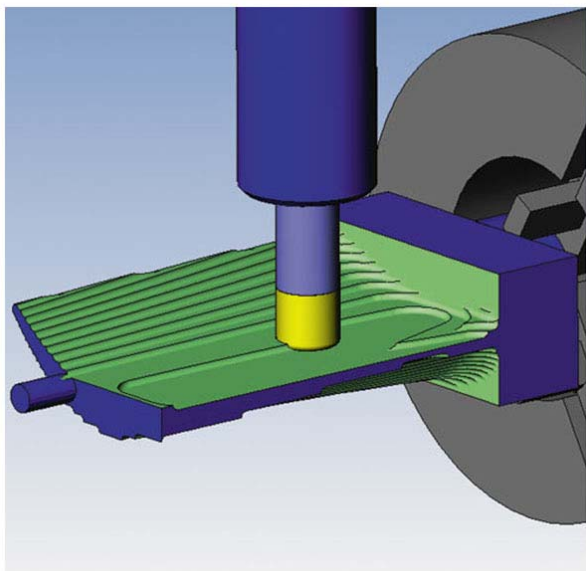


Рис. 3.87. Стратегии 3-осевой обработки постоянно отслеживают оставшийся материал для более эффективной черновой обдирки

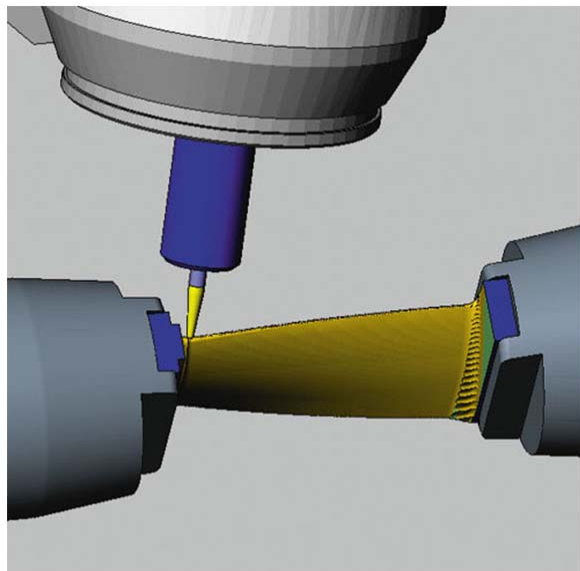


Рис. 3.88. Поддержка многоосевой ориентации инструмента во время 5-осевой обработки

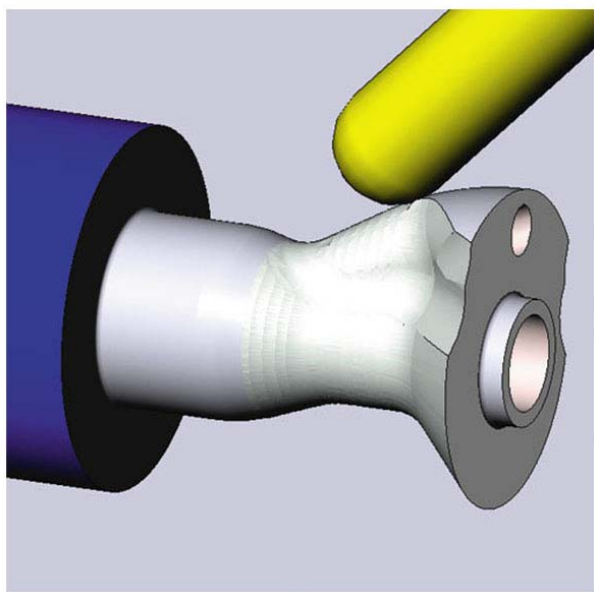


Рис. 3.89. Комбинирование токарных, фрезерных и 5-осевых операций за один установ

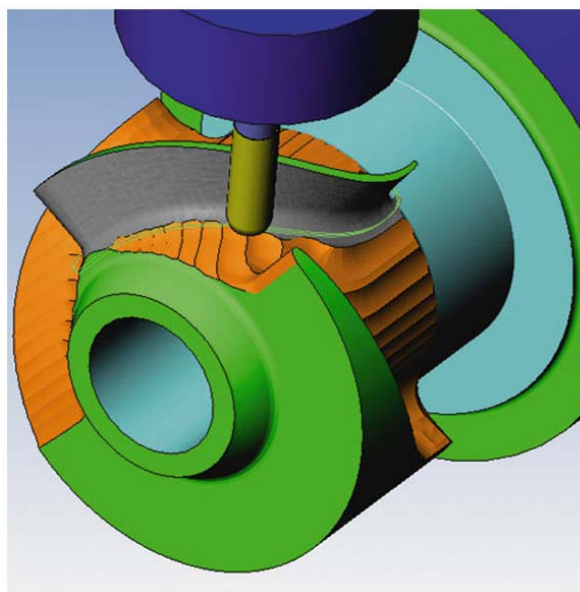


Рис. 3.90. Помимо стандартных 5-осевых функций ESPRIT поддерживает специальные стратегии обработки колес и лопаток турбин

Рабочие плоскости для позиционирования оси В

Рабочие плоскости – очень важное средство при программировании оси В. ESPRIT использует ориентацию осей UVW для контроля по-

зиционирования поворота заготовки, а также для контроля ориентации оси инструмента. Рабочие плоскости определяют ориентацию осей С и В, что позволяет легко проводить обработку зон с углом, переменным к оси вращения. Как только программист определяет обрабатываемый элемент в ESPRIT, каждая зона элемента автоматически ассоциируется с соответствующей рабочей плоскостью (рис. 3.91). При многогранном фрезеровании и сверлении автоматическое определение рабочих плоскостей сокращает сроки и упрощает процесс программирования (рис. 3.92).

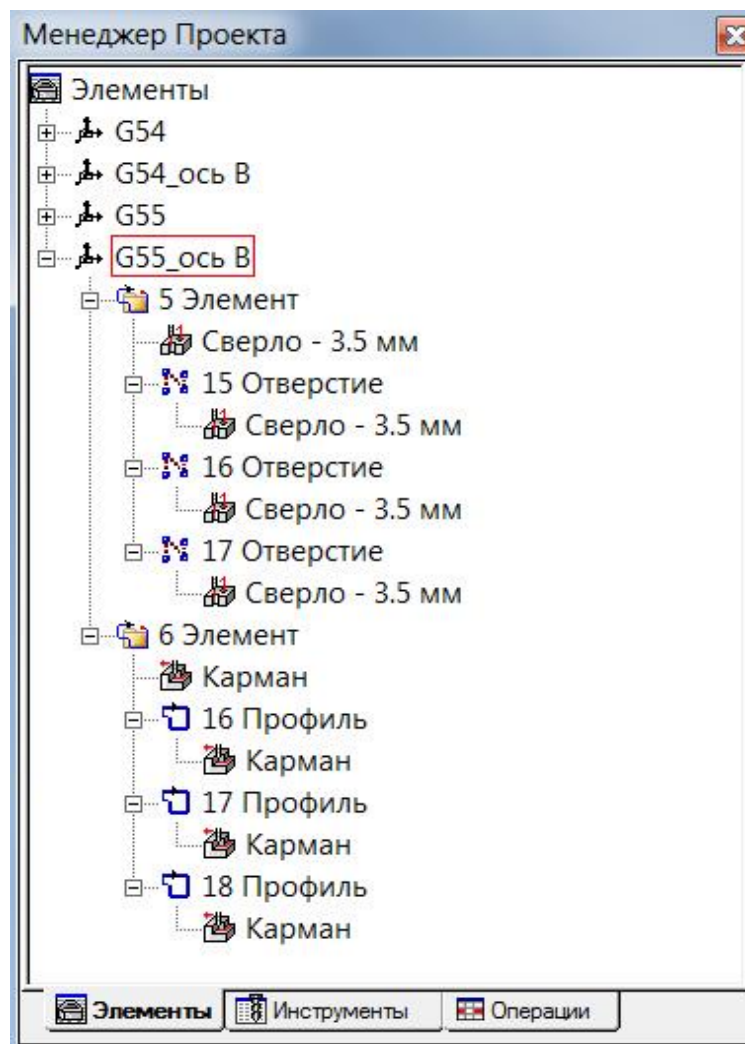


Рис. 3.91. Стратегии и элементы обработки автоматически добавляются к активной системе координат сразу после их создания

Пример: программист может применять рабочую плоскость определенного угла поворота осей С и В для обработки отверстия. Таким образом, автоматическое вращение системы координат ZX требует от программиста лишь управления осью Z.

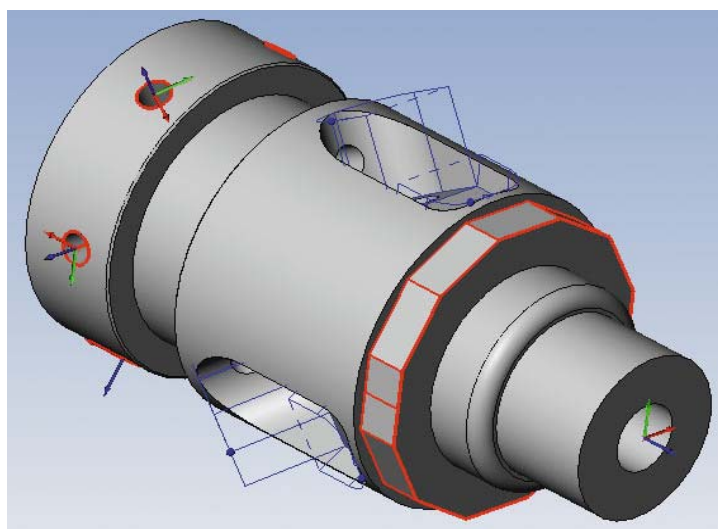


Рис. 3.92. Функция распознавания элементов обработки автоматически определяет рабочие плоскости с учетом выбранной геометрии

Непрерывное точение с осью В

Специальные токарные циклы чистовой обработки способны производить непрерывную обработку на внутреннем и внешнем диаметрах одним инструментом за один проход, исключая необходимость использования нескольких инструментов с различной геометрией.

Циклы контурной обработки с осью В применяют эффективные перемещения подвода инструмента с помощью непрерывного вращения оси В на протяжении следования инструмента по обрабатываемому контуру. Это позволяет инструменту достичь зон, которые было бы невозможно обработать из-за геометрии инструмента (рис. 3.93).



Рис. 3.93. Непрерывная финишная обработка с использованием оси В без смены инструмента

Такие циклы обработки уменьшают количество используемого инструмента и сокращают время обработки, в то время как обрабатываемая поверхность удовлетворяет заданным требованиям.

Циклы обработки с применением оси В основаны на технологиях ESPRIT для традиционной токарной обработки. Главным отличием технологий оси В является полный контроль перемещения головки вокруг оси В в течение всего цикла обработки. Кроме того, на этапе расчета траектории исключаются все столкновения между режущим инструментом и заготовкой. Программист не нуждается в создании нескольких программ, построенных по традиционным методикам. Применение одной стратегии контурной обработки с осью В позволит произвести чистовую обработку всего контура без остановов и смены инструмента. Исключение смены инструмента сохраняет драгоценные секунды машинного времени и обеспечивает отсутствие следов смены инструмента на детали в виде рисок.

Методы ориентации оси В

Пользователи могут использовать две стратегии ориентации инструмента при выполнении операции.

Первой стратегией является поддержка постоянного угла опережения между инструментом и обрабатываемой поверхностью. С помощью этой стратегии инструмент всегда сохраняет первоначальный угол опережения по отношению к обрабатываемому профилю. В дополнение к возможности ESPRIT автоматически отслеживать столкновения детали с инструментом, пользователь может ограничить наклон инструмента, задав определенный диапазон возможных углов. Подобный метод реализует оптимальные условия обработки за счет применения оптимального угла наклона между инструментом и обрабатываемой поверхностью.

Вторая стратегия ориентации оси В минимизирует количество поворотов инструмента за счет поворота головки только в тех случаях, когда это действительно необходимо. Данная стратегия сохраняет первоначальное положение инструмента до тех пор, пока он не достигнет поверхности, которая не может быть обработана с его текущим положением. Только после этого инструмент поворачивается на необходимый угол, учитывая определенный пользователем диапазон углов наклона инструмента вокруг оси В. Данная стратегия ограничивает поворот вокруг оси В только на тех участках поверхности, которые не могут быть обработаны под заданным углом наклона инструмента.

Каждая стратегия поддерживает визуальную верификацию. Пользователь может отобразить на экране вектор инструмента, чтобы

выбрать оптимальную стратегию обработки на данном участке геометрии детали.

Твердотельная верификация обработки

Настройки станка в ESPRIT включают интерфейс, позволяющий определять все необходимые параметры револьверных головок и шпинделей оборудования для гарантированного обеспечения точной верификации обработки (рис. 3.94). Настройки станка позволяют импортировать твердотельные модели любых компонентов станка в формате STL. Каждому компоненту может быть назначен вид движения (линейный или вращательный) для достоверной динамической симуляции операций обработки.

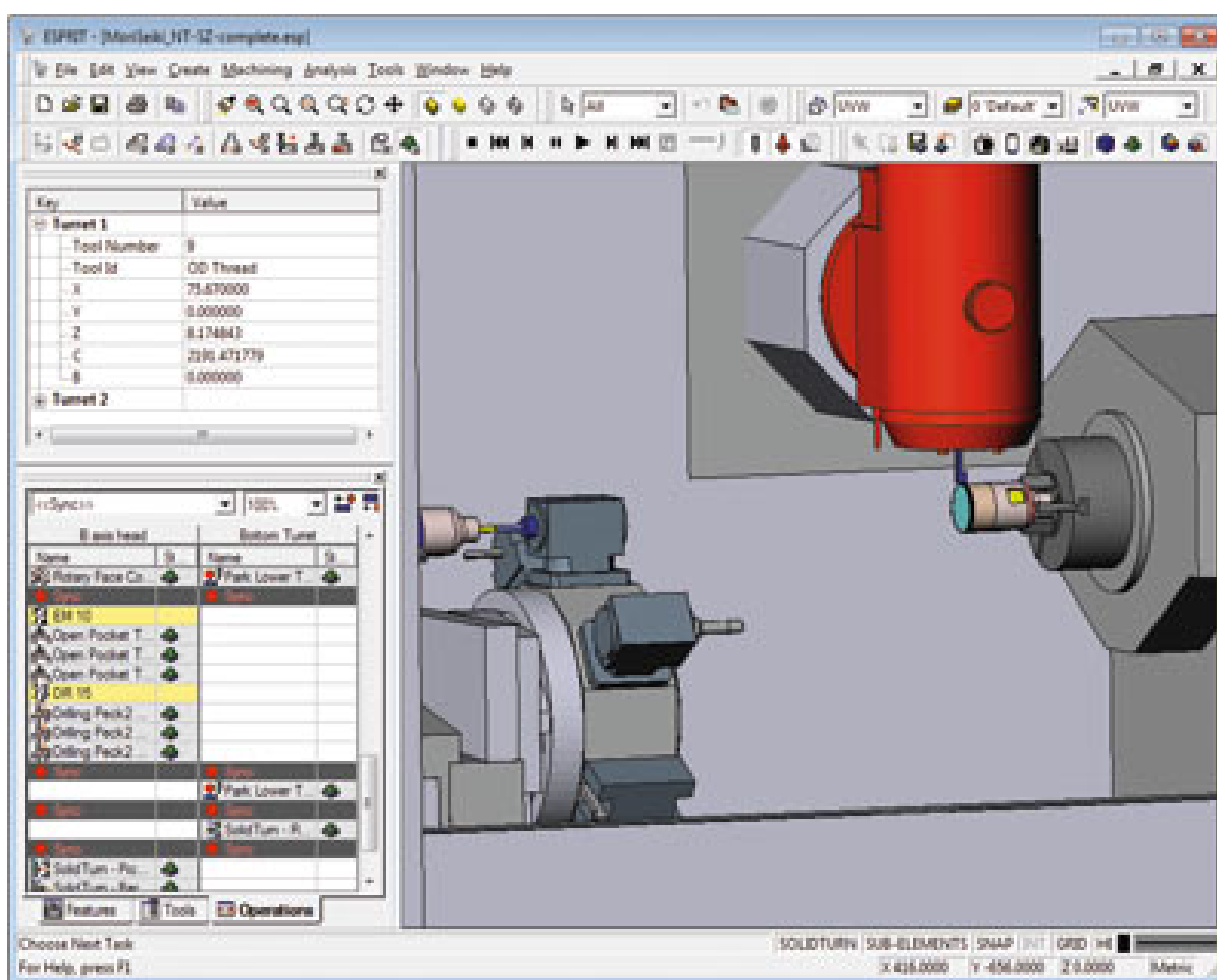


Рис. 3.94. ESPRIT показывает заготовку на экране совместно с исполнительными органами станка (шпиндели, револьверные головки, головы с осью В, инструментальные магазины), чтобы исключить потенциальные столкновения во время синхронной обработки (при использовании двух каналов) или при передаче заготовки с главного шпинделя на субшпиндель

После того как стратегия обработки создана и проверена в симуляторе, постпроцессор генерирует Gкод для всех фрезерных и токарных операций. Это дает преимущества перед САМ системами, где пользователь вынужден генерировать управляющие программы для фрезерных и токарных операций отдельно, а потом объединять их в одну программу для отправки на стойку ЧПУ.

Повышение эффективности за счет применения средств автоматизации

Известно, что ключевым фактором повышения эффективности работы является использование средств автоматизации. Автоматизированная САМ система может быть настроена либо так, чтобы выбор оптимального решения для обработки осуществлял программист, либо чтобы выбор наилучшего решения выполняла сама система. Уровень автоматизации должен быть всегда настраиваемым (гибким).

Для облегчения процесса автоматизации программирования ESPRIT реализует механическую обработку, основанную на базе знаний ESPRIT (КВМ). КВМ позволяет задействовать заранее определенные методики обработки, которые автоматически применяются и адаптируются на распознанной геометрии детали. С помощью технологии КВМ система ESPRIT предлагает необходимый инструмент и процессы обработки, основанные на заранее определенных методиках.

ESPRIT способна, проанализировав твердотельную модель, создать элемент обработки из геометрии. Далее программист может сам назначить операции обработки на этот элемент или позволить базе знаний ESPRIT назначить подходящую технологию, выбранную из уже отработанных на производстве. С течением времени программист увеличивает и оптимизирует "базу знаний" механической обработки, основанную на обратной связи с производством. Технологический опыт производства закладывается в программу и включает только лучшие решения, реализованные на производстве. Чем более автоматизирован процесс программирования, тем больше времени и внимания программист может уделить оптимизации программы и повышению эффективности обработки.

Партнерство для успеха

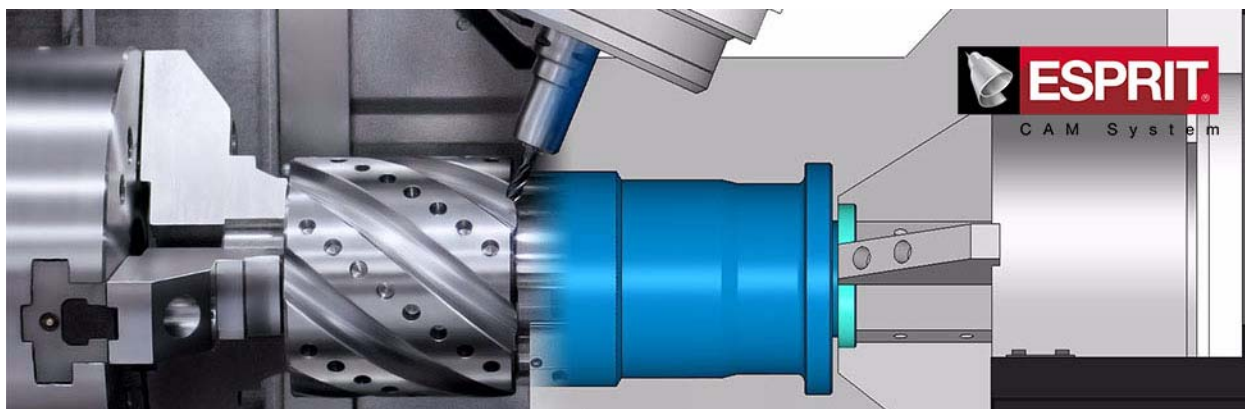
DP Technology имеет крепкие партнерские отношения с производителями токарно-фрезерного оборудования для решения любых вопросов пользователей. Данное сотрудничество между компаниями –

производителями станков и компанией-разработчиком программного обеспечения позволяет предприятиям, закупающим сложное оборудование, сократить время запуска станков в производство и начать незамедлительно применять весь доступный функционал станков.

Например, заказчик всегда будет уверен в работоспособности поставленного постпроцессора, так как он был разработан при поддержке сотрудников компании-изготовителя оборудования и протестирован на реальном образце в цехе того же производителя. Кроме того, конфигурации моделей станков, уже вышедших на рынок, определены в настройках ESPRIT и доступны для оперативного использования.

Потенциал многозадачных станков с осью В – это веская причина для любого современного предприятия инвестировать деньги в приобретение токарно-фрезерного оборудования.

3.13. ESPRIT TNG – новое поколение программного продукта



CAM система ESPRIT – популярный в мире программный продукт для автоматизации разработки управляющих программ (УП) для станков с ЧПУ. Система уверенно входит в мировую пятерку самых продаваемых CAM систем "среднего" класса, обрела много почитателей и в Украине. Большинство пользователей слышали о работе, которая проводилась, начиная с 2011 года, разработчиком продукта – американской компанией DP Technology Corp – над новым поколением программы (рабочее название – TNG). Основными причинами, побудившими "переписать" продукт, стали перегруженный кнопками интерфейс и немолодая уже платформа, не вполне соответствующая требованиям построения архитектуры передового программного обеспечения.

Кроме того, важно отметить, что несколько лет назад DP поглотила итальянскую компания Auton (создателя CAM системы для обработки пресс-форм) и немецкую Binary Spaces (разработчика ПО для симуляции УП по G-коду), тем самым добавив в свой технологический портфель пару лакомых кусков. Как известно, процесс адаптации стороннего ПО может занимать достаточно продолжительное время, и, поэтому в новом поколении ESPRIT все новые технологии, наконец, собраны воедино, реализованы и преподнесены пользователям вместе с модным интерфейсом и рядом по-настоящему передовых решений.

Далее необходимо разобраться с особенностями ESPRIT TNG.

Итак, ESPRIT TNG, в отличие от ESPRIT-20xx, построен на 64-разрядной платформе, что потенциально увеличивает скорость и производительность продукта. Первое, что заметят пользователи – размер дистрибутива для установки ESPRIT TNG "весит" чуть более 700 Мб против более чем 1,6 Гб версии ESPRIT-2018. Это связано, в первую очередь, с тем, что разработчик отказался от некоторых громоздких компонентов Microsoft, ранее необходимых для работы с SQL базой данных.

Переработан интерфейс программы: теперь он имеет ленточную структуру: закладки, аккуратно прорисованные панели инструментов и окна, которые можно перемещать и фиксировать в наиболее комфортных для пользователя положениях (рис. 3.95).

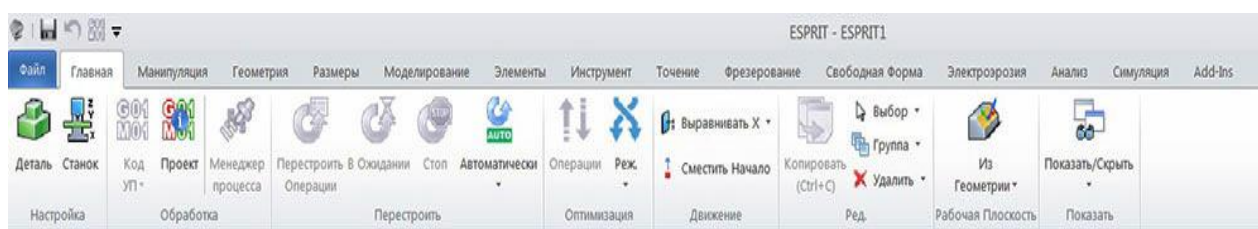


Рис. 3.95. Ленточный интерфейс меню ESPRIT TNG

Очень удобно реализована справочная система: при наведении курсора на любую из кнопок всплывает окно с достаточно подробным описанием ее действия (рис. 3.96). При этом имеется возможность использования справки из Интернет, которая располагается на портале ESPRIT и открывается в браузере.

Когда речь заходит о новом поколении программного продукта, то подразумевается, что разработчик не ограничился лишь свежим интерфейсом, исправлением ошибок или даже усилением существующе-

го функционала. Обычно изменения носят глобальный характер. Так и в случае с ESPRIT TNG – пользователи столкнутся с некоторыми изменениями в привычном им алгоритме работы, вызванным воплощением ряда по-настоящему новаторских идей.

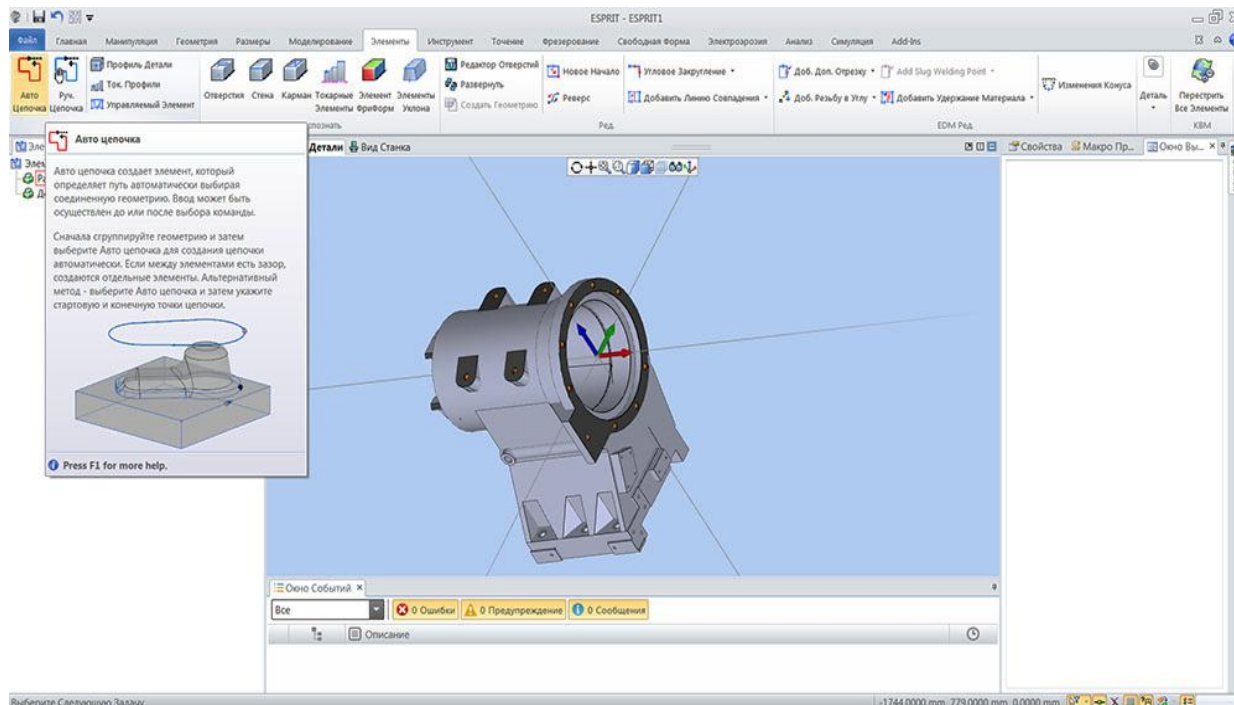


Рис. 3.96. Новый интерфейс: при наведении курсора на иконку всплывает окно с подробным описанием ее действия

Полностью перерисованы все иконки операций, стратегий, переходов, элементов и инструментов. Функции поворота, масштабирования, приближения, панорамы, закрашивания 3D-модели, управления видами и слоями удобно собраны в единой инструментальной панели. Появились новые функции (рис. 3.97):

- "Маска" позволяет в один клик высветить или погасить;
- "Фильтр" позволяет выбрать геометрические элементы определенного типа.

Графическое окно содержит две закладки: Вид Детали (рис. 3.98) и Вид Станка (рис. 3.99).

В первой, как и раньше, мы работаем с 3D-моделью детали – выбираем геометрические элементы, назначаем стратегию обработки. А во второй – получаем виртуальную модель станка, с заготовкой, режущим инструментом, крепежными приспособлениями. Причем, можно разделить графическую область пополам и одновременно работать в двух закладках.

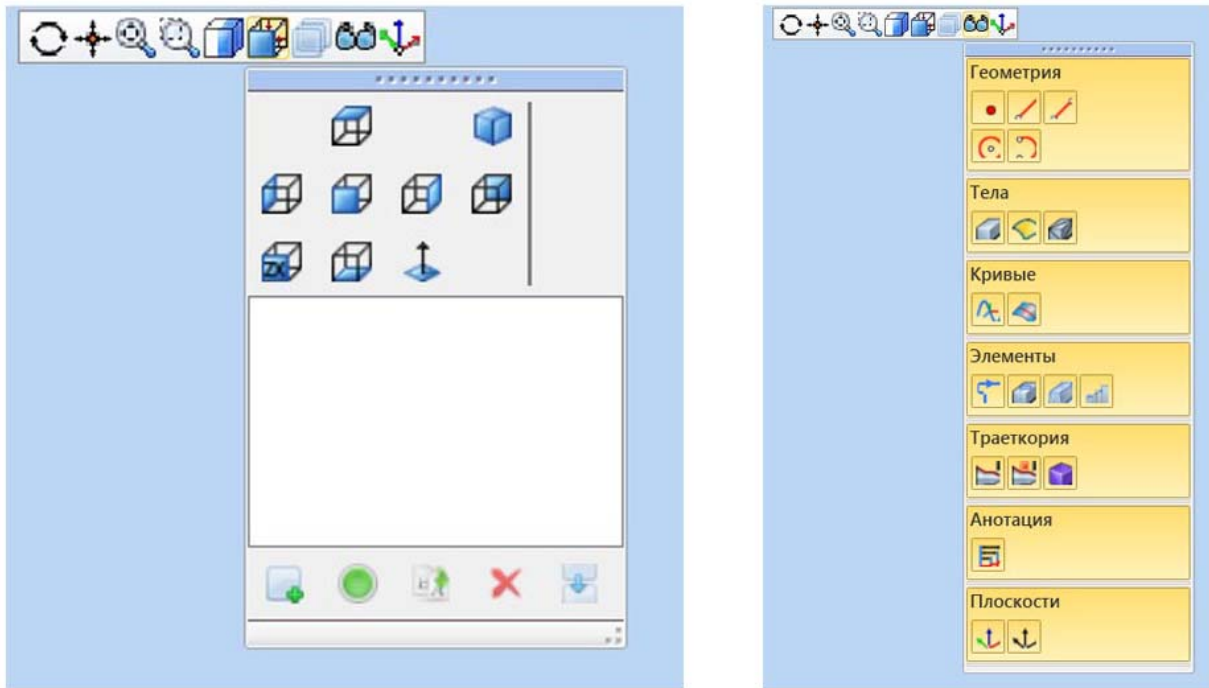


Рис. 3.97. Новая функциональная панель ESPRIT для управления объектами в графическом окне: слева – виды, справа – маски

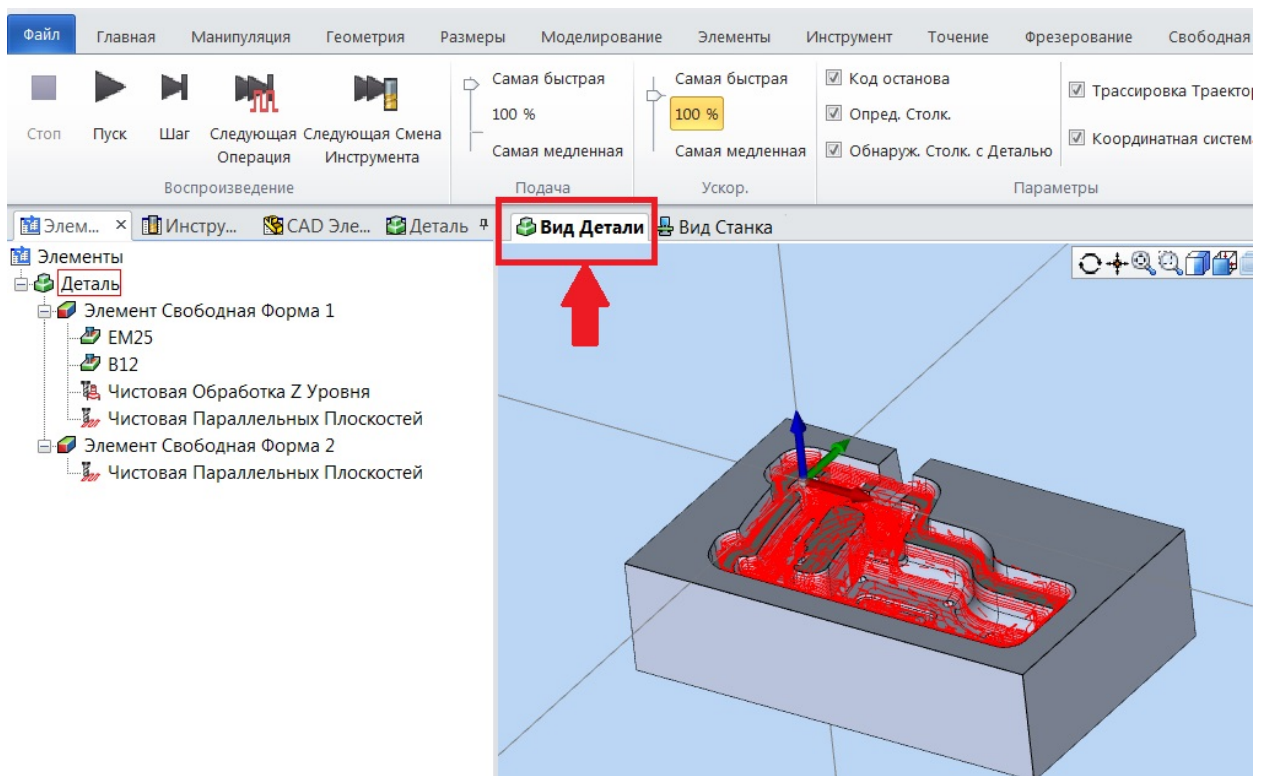


Рис. 3.98. Закладка "Вид Детали" графического окна

Обращаем ваше внимание, что речь идет не просто о симуляции обработки в отдельном окне, а об интерактивном взаимодействии режимов. При этом изменения в одном из режимов удивительным обра-

зом проявляются в другом. Например, если в режиме "Станок" вы повернете 3D-модель заготовки, то система автоматически пересчитает траектории обработки детали. Это дает возможность программисту заранее спланировать и избежать ряда известных трудностей, причем, без необходимости возврата к предыдущим этапам проектирования обработки. И это далеко не все преимущества новой концепции, которую в ESPRIT назвали "Виртуальная наладка".

Так, например, достаточно выбрать из списка необходимый режущий инструмент и он будет отображен во вкладке "Вид Станка" (рис. 3.100).

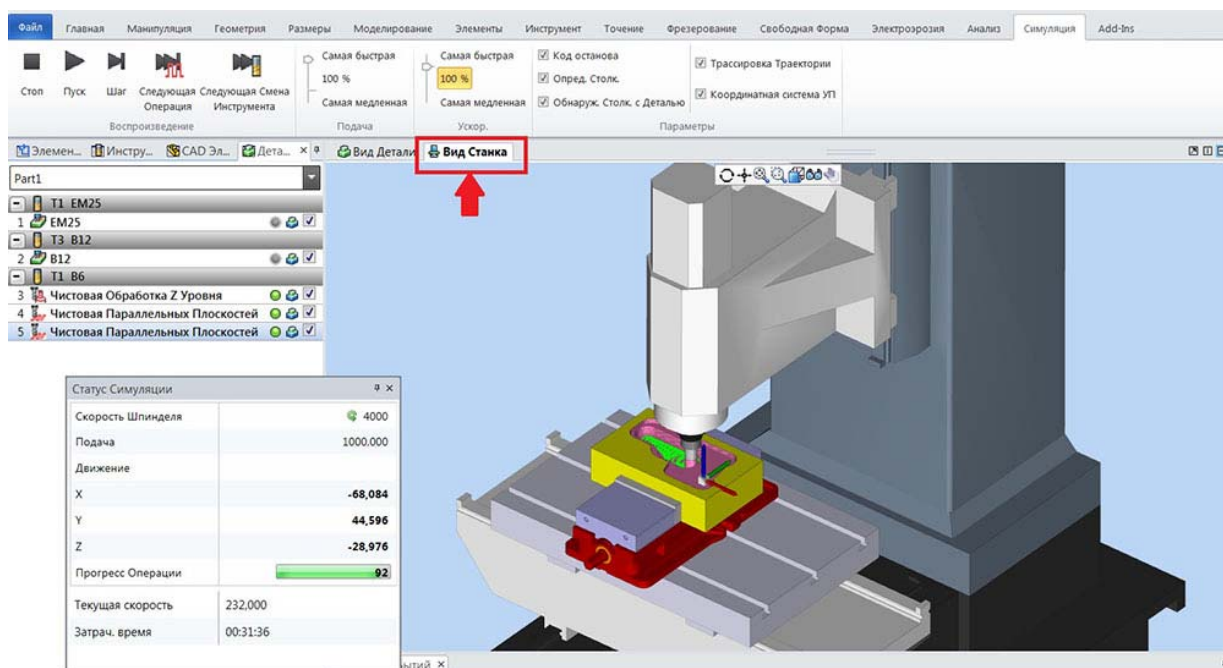


Рис. 3.99. Закладка "Вид Станка" графического окна

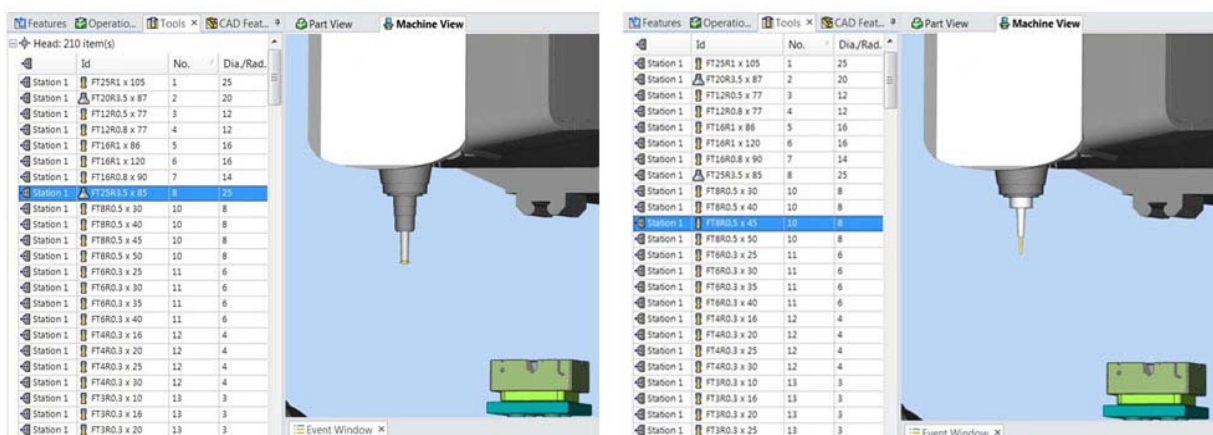


Рис. 3.100. Отображение режущего инструмента при выборе из списка

Отображение инструмента происходит и в процессе «описания»: при установке геометрических параметров, формы и используемой модели оправки или блока. Нет необходимости выполнять переход в "Визуализацию", чтобы увидеть отображение станочной среды, что значительно увеличивает производительность работы и экономит временной ресурс.

Кроме инструмента, интерактивные возможности касаются формы заготовки, детали, приспособления, их положения, системы координат и остатка материала на каждом переходе.

Верификация и симуляция в ESPRIT TNG вышли на качественно новый уровень (рис. 3.101). Не секрет, что подавляющее большинство разработчиков САМ-систем используют сторонние технологии – ядра компаний MachineWorks и ModuleWorks. В результате верификаторы запускаются как отдельные приложения и выглядят очень похожими друг на друга. Как уже отмечалось ранее, DP Technology приобрела компанию Binary Spaces, которая разрабатывает ПО для симуляции обработки на станках с ЧПУ, аналог Vericut, и полностью отказалась от компонентов MachineWorks. Пользователи нового поколения ESPRIT получили уникальную возможность программировать обработку и проверять ее тут же в "родной" среде. При этом как графика, так и степень детализации компонентов станков приятно радуют.

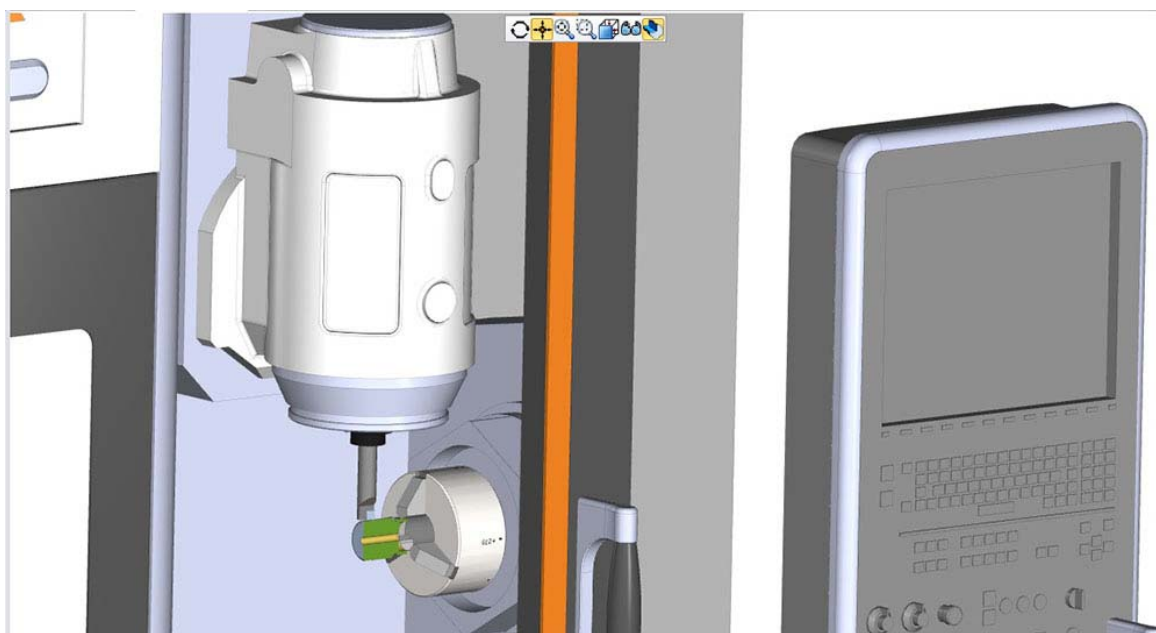


Рис. 3.101. Верификация и симуляция обработки в ESPRIT TNG превосходят по качеству графики и уровню детализации большинство конкурентов на рынке САМ-систем

Для построения станочной среды (рис. 3.102) разработано специальное приложение Machine Tool Builder (MTB), позволяющее собирать виртуальные компоненты воедино и обеспечивающее описание кинематики и динамики станка при помощи программного контроллера.

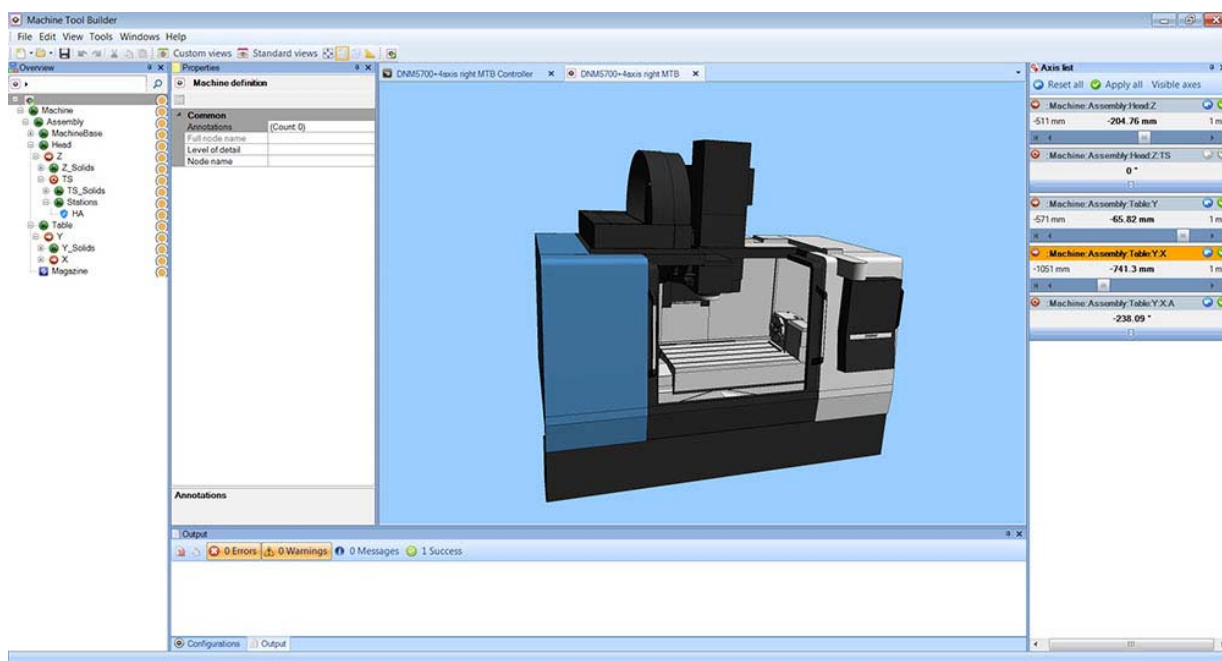


Рис. 3.102. Приложение Machine Tool Builder для построения станочной среды

Станочные компоненты и оснастка, созданные в MTB, имеют специальный формат GDML – новый стандарт, используемый в DP Technology. Данный формат файла доступен в предпросмотре даже в Проводнике Windows.

ESPRIT TNG обладает так называемой "безрежимностью", т.е. система "видит" станок и на основании описания его кинематики и характеристик предоставляет необходимый набор циклов обработки. Кроме этого, если, например, проект обработки создан для токарно-фрезерного обрабатывающего центра и по каким-то причинам его нужно использовать для вертикально-фрезерного станка, то достаточно поменять только виртуальную модель станка, и система автоматически пересчитает и даже адаптирует операции обработки к изменившимся условиям.

ESPRIT TNG использует автоматический расчет переходов между операциями, что особенно полезно при многоосевой индексной обработке. Система самостоятельно рассчитывает оптимальную величину

ну отвода от одной рабочей плоскости для безопасного перехода к другой плоскости, при этом учитывается кинематика станка, габариты и форма заготовки (рис. 3.103).

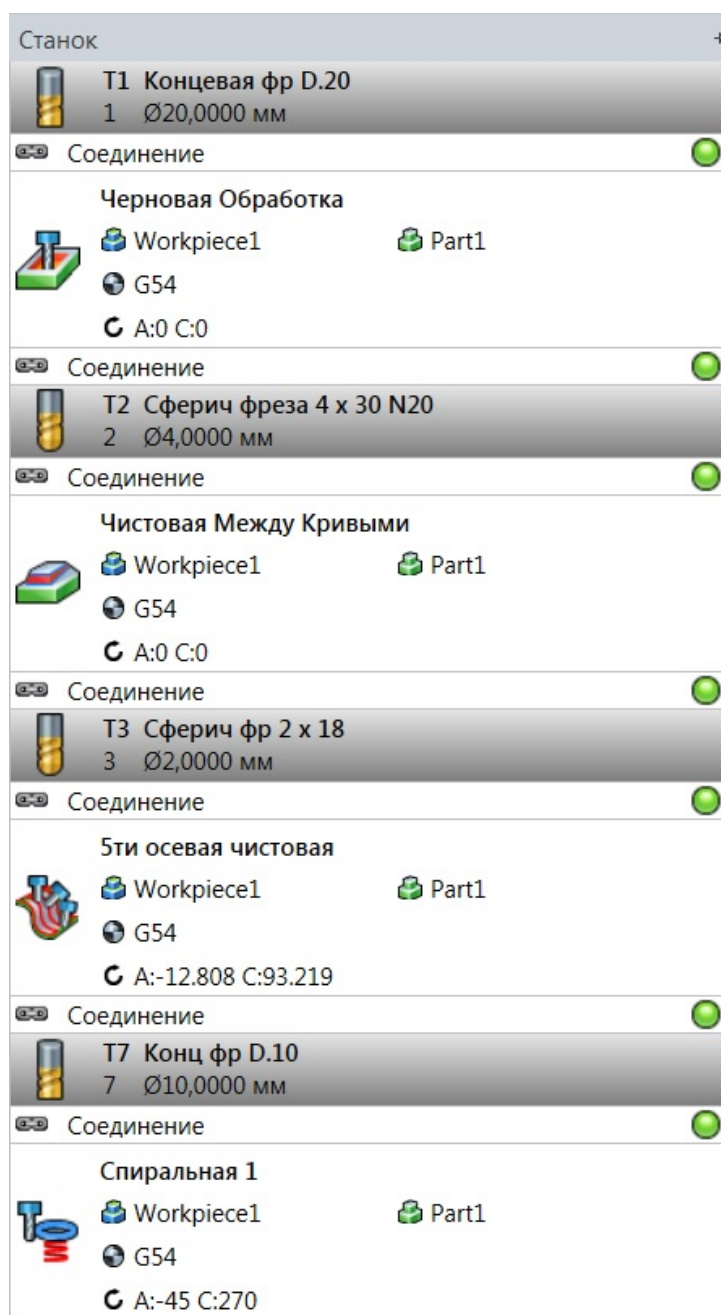
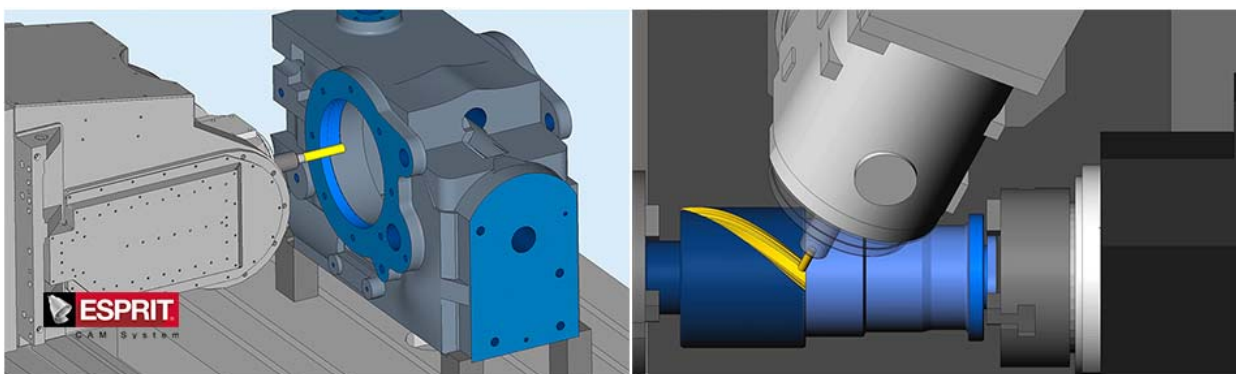


Рис. 3.103. По мере добавления переходов Калькулятор Соединений автоматически вычисляет безопасные и эффективные переходы между операциями и сменами инструмента

Разумеется, в рамках данного обзора не удалось рассказать обо всех новшествах ESPRIT TNG. В DP Technology проделали огромную работу, превратив очередное поколение своей CAM-системы в модный и инновационный программный продукт.

Отрадно, что разработчик идет собственным путем, без оглядки на конкурентов, не используя сторонние технологии для визуализации и многоосевой обработки. Добавим, что ESPRIT TNG, в отличие от своих "одноклассников", сохраняет единство платформы для различных типов обработки, а не выпускает отдельные приложения для фрезерной, токарной и токарно-фрезерной обработки.

3.14. Esprit: простое решение сложных задач

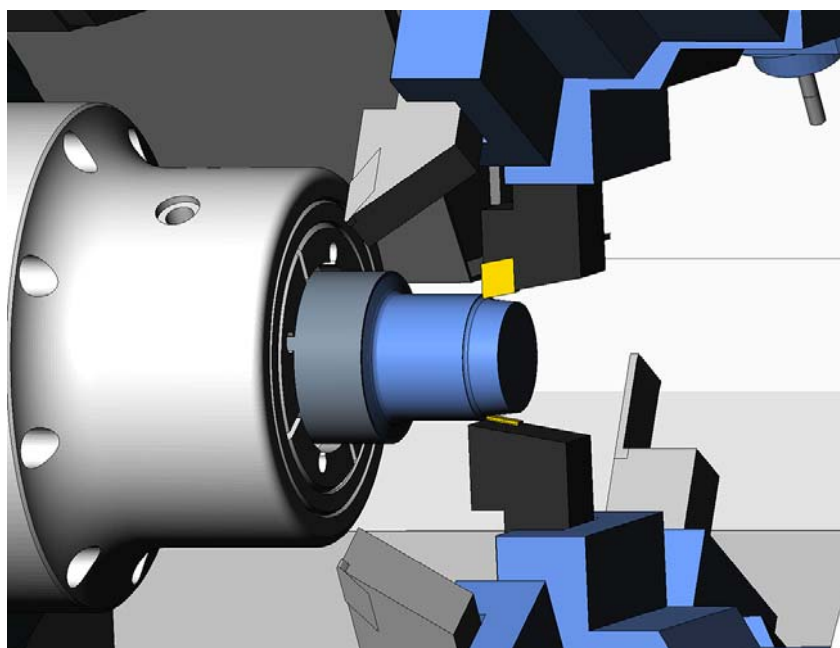


Вдохновленный видением технологического потенциала, обладающий энтузиазмом и стремящийся к совершенству

ESPRIT® – мощная, полнофункциональная САМ-система для программирования, оптимизации и симуляции обработки на станках с ЧПУ, полностью поддерживающая производственный процесс. Сертифицированные постпроцессоры обеспечивают получение оптимального G-кода, а программный интерфейс приложения открывает широкие возможности для автоматизации труда технолога-программиста. Высочайший уровень технической поддержки позволяет освоить систему быстро и использовать ее в различных отраслях промышленности. ESPRIT – это единственная САМ-система, которая Вам понадобится.

Мощная, полнофункциональная САМ-система

ESPRIT® – это высокопроизводительное программирование, оптимизация и симуляция обработки на станках с ЧПУ, поддерживающая производственный процесс в целом, начиная от САД-файла и заканчивая готовой деталью. Как показано в п. 3.1, функциональность ESPRIT® включает программирование фрезерной обработки от 2-х до 5-ти осей, токарной обработки от 2-х до 22-х осей, электроэрозию от 2-х до 5-ти осей, многозадачных токарных станков швейцарского типа, токарно-фрезерных станков и станков с осью В.



Отображение станочной среды

С помощью цифрового оборудования ESPRIT® – модели станков, эмуляторы контроллера и постпроцессоры – система обеспечивает точную симуляцию и получение оптимального G-кода. Сертифицированные постпроцессоры доступны для Ваших станков, что позволяет получить свободный для редактирования G-код, чтобы Вы могли в полной мере использовать Ваши инвестиции в оборудование.

Техническая поддержка мирового класса

Глобальные тренинги, консультации и сервис по программированию помогают быстро начать работу. Специализированные инженеры ESPRIT сделают все, чтобы Вы продолжали работать с максимальной эффективностью. Наши специалисты выходят за рамки программного обеспечения, чтобы понимать и поддерживать все Ваши процессы, а также рабочий процесс и оборудование в целом.

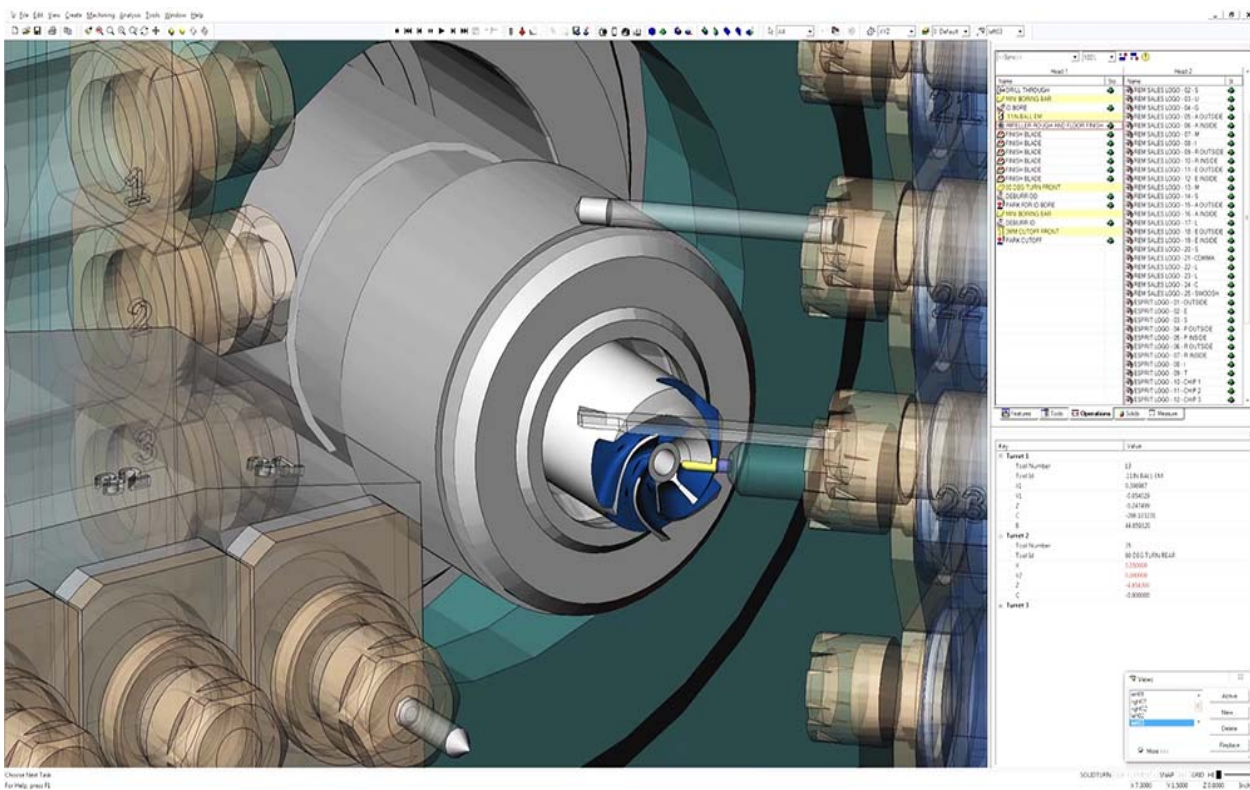
Автоматизированная платформа и инжиниринговые сервисы

ESPRIT® решает уникальные задачи с индивидуально адаптированными решениями для автоматизации и приложениями, созданными с использованием программного обеспечения API. Воспользуйтесь возможностями ESPRIT® через API, чтобы устранить повторяющиеся задачи, обеспечить более высокую степень автоматизации и облегчить поток данных в CAM систему и из нее.

"Единственный способ, который может помочь компании преуспеть в производстве, это использование передовых технологий и решений, таких как ESPRIT®, что дает нам возможность конкурировать

вать." – Кевин Рид, генеральный директор компании «Innovative Mounts».

Высокопроизводительная обработка



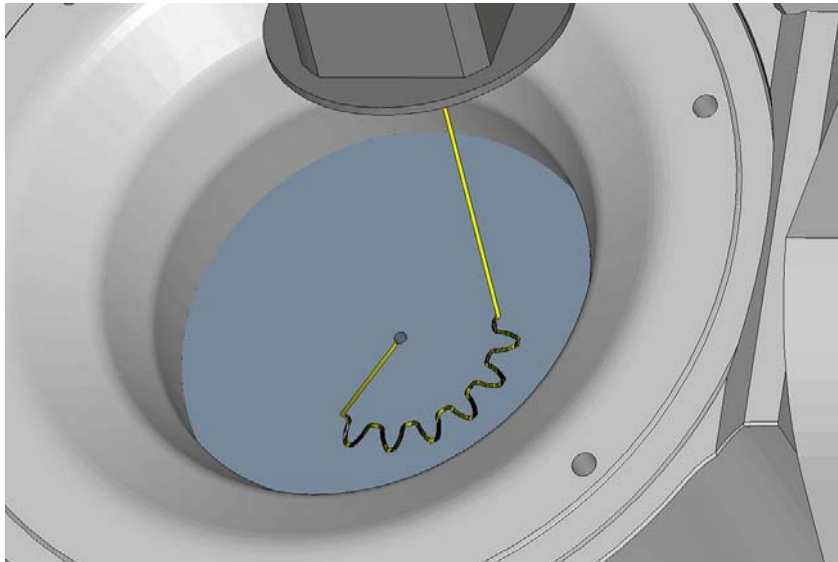
Максимальное использование станка для сложных деталей и особых требований обработки

ESPRIT® SolidMill® для программирования фрезерной обработки 2-х – 5-ти осей

ESPRIT® предлагает циклы обработки для традиционных 2.5 осей и производственного резания 3 + 2, а также программирование для высокоскоростной одновременной 3-, 4- и 5-осевой траектории свободной формы, что дает Вам необходимую мощность программирования и легкость использования, которую Вы ожидаете.

ESPRIT® SolidTurn® для программирования токарной обработки 2-х – 22-х осей

SolidTurn предлагает полный набор циклов для торцевой, черновой токарной обработки, а также для обработки канавок и отверстий. Объединив циклы обработки SolidMill и SolidTurn с обработкой заготовок, Вы можете воспользоваться преимуществами своего многозадачного станка и легко выполнять одновременно фрезерные и токарные операции на передней и задней частях детали в одной установке.

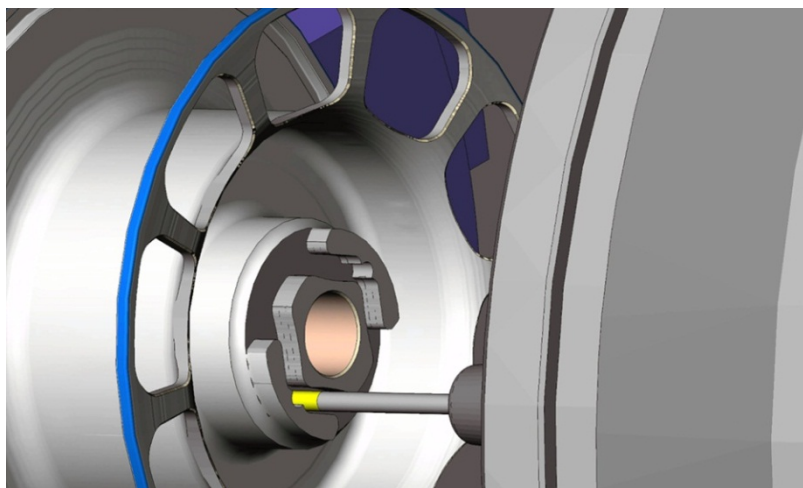


ESPRIT® SwissTurn® для обработки на станках швейцарского типа

Вся мощность обработки ESPRIT® SolidMill и SolidTurn доступна для станков швейцарского типа. ESPRIT® поддерживает уникальные требования станков подобного типа – скользящая головка, коллинеарные оси, инструментальная техника, сегментация программы и т.д., предоставляя, таким образом, гибкость программирования, точную симуляцию и оптимизированный G-код.

Адаптивные циклы обработки

Высокопроизводительные циклы, в том числе ProfitMilling® для 2 – 5-осевой высокоскоростной черновой обработки и ProfitTurning™ для токарной и торцевой обработки, а также для обработки канавок, позволяют сократить время цикла и увеличить срок службы инструмента за счет контроля нагрузки инструмента и оптимизации скорости резания.



Динамическая, управляемая инструментом, траектория

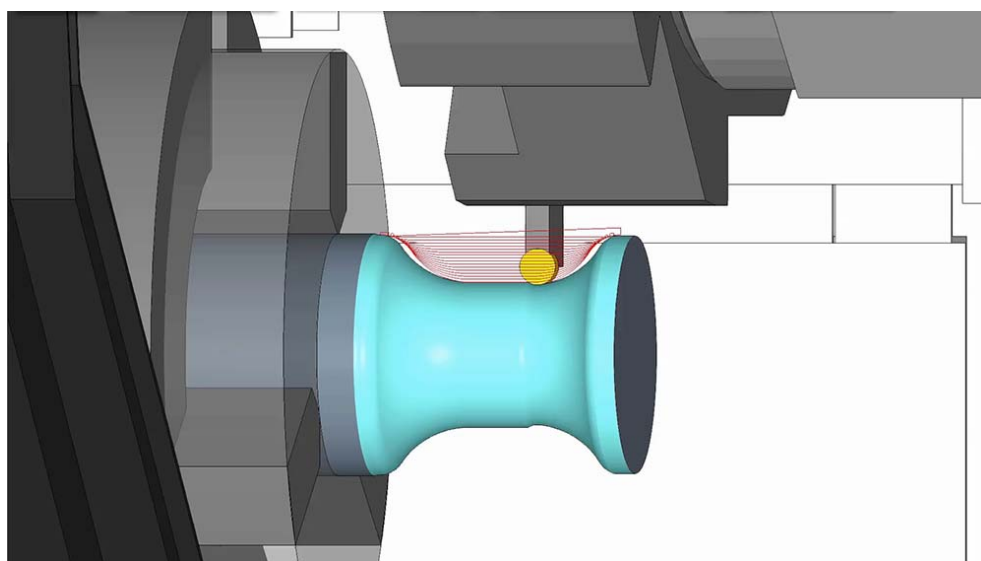
Адаптируя изменения в настройке и процессе, ESPRIT® динамически оптимизирует траектории инструмента на основе состояния заготовки, исключая холостые хода и минимизируя перепозиционирование, тем самым оптимизируя время цикла.

Автоматическая генерация соединений

Используя цифровое представление станка, ESPRIT® автоматически управляет ускоренными движениями между проходами. Линейное и поворотное положение между операциями резания, смена инструмента и обработка деталей выполняются безопасно и эффективно.

Синхронизированный и оптимизированный

Синхронная, последовательная и параллельная обработка оптимизирует время цикла для многошпиндельных, многорезимных и многоканальных станков, что позволяет использовать все возможности многозадачного оборудования.



ESPRIT® для электроэрозионных станков

ESPRIT® позволяет значительно упростить процесс программирования во время электроэрозионной обработки, увеличить точность изготовления деталей, уменьшить длину и сложность G-кода. База данных знаний ESPRIT® предлагает универсальные EDM-циклы, которые поддерживают любое количество прямых или наклонных, черновых или чистовых проходов и могут обрабатывать любые профили, формы, матрицы, стержни, полости, оптимизируя пути движения проволоки.

Выводы

1. В работе показана эффективность применения автоматизированных систем проектирования и программирования технологических процессов для станков с ЧПУ. Обоснована целесообразность использования системы САПР ESPRIT, разработанной американской компанией DP Technology и получившей широкое применение во всем мире. Для более эффективного использования САПР ESPRIT на предприятиях Украины данную систему настроили под решение конкретных задач, для чего построена и собрана математическая модель станка; разработаны необходимые постпроцессоры для станков с ЧПУ; подготовлены инструментальные блоки; дописан требуемый функционал.

2. Показано, что средствами ESPRIT эффективно программируются все виды обработки на станках с ЧПУ, которые востребованы современным машиностроительным производством. Это 2 – 5-осевая фрезерная обработка, 2 – 22-осевая токарная обработка, обработка на многофункциональных токарно-фрезерных центрах и станках с осью В, а также 2 – 5-осевая электроэрозионная обработка. Возможности программного комплекса позволяют легко и быстро разрабатывать управляющие программы, как для простых, так и для самых сложных станков с ЧПУ. Благодаря наличию обширного набора трансляторов, ESPRIT напрямую работает с 3D-моделями из любой САПР, импортируя их без каких-либо повреждений. Любой технолог-программист одним нажатием кнопки может выбрать наиболее подходящий метод обработки, исходя из особенностей новой детали. Система автоматически предлагает оптимальный процесс обработки, режущий инструмент и режимы резания. Быстрая, точная и надежная проверка обработки средствами ESPRIT позволяет не прибегать к дорогостоящей отладке управляющих программ непосредственно на станке. Визуализация процесса обработки в среде ESPRIT дает полную уверенность в его правильности, позволяя сравнить модель детали, "обработанной" в ESPRIT, с ее конструкторской версией.

3. Показано, что система ESPRIT имеет широкий набор готовых решений. В зависимости от типа программируемого оборудования, кинематики и количества осей, конкретному пользователю подбирается необходимая конфигурация программного обеспечения. Система имеет широкие возможности, как в выборе вида обработки, так и в разно-

образии используемого инструмента, карт наладки, пользовательских решений. Преимуществами системы являются: использование всего потенциала оборудования, уменьшение влияния человеческого фактора, приложение Windows, поддержка практически всех форматов CAD-систем (в том числе программы Компас), предупреждение столкновений, автоматическое распознавание геометрических фигур, наличие открытого и универсального постпроцессора с возможностью быстрого и несложного редактирования, наличие библиотеки постпроцессоров для станков ведущих производителей, наличие библиотеки режущего инструмента, а также возможность создания библиотеки исходя из собственных потребностей, верификация (просмотр) процесса обработки прямо в программе, отображение среды обработки (стол, шпиндель, приспособление), верификация любой операции с учетом отработки предыдущей, гибкий выбор типа обработки, сравнение детали и заготовки, автоматическое создание программы обработки с помощью базы знаний, синхронизация токарно-фрезерной обработки, удобный интерфейс на русском языке, быстрое реагирование на проблемы официального дилера в Украине.

4. В работе приведен анализ прогрессивной технологии ProfitMilling от ESPRIT. Суть ее состоит в том, что траектория ProfitMilling рассчитывается с учетом отслеживания толщины стружки и бокового усилия резания с сохранением постоянного угла врезания в определенном диапазоне скорости удаления материала. Благодаря этому в единицу времени удаляется существенно больше материала без снижения качества обработки. По сути, это высокоскоростной цикл черновой обработки, позволяющий значительно увеличить глубину обработки и величину подачи инструмента при оптимальной скорости. Данная технология контролирует не один параметр, а сразу несколько важных характеристик станка в процессе обработки. Для получения максимальных преимуществ обеспечивается динамическое изменение режимов резания по всей траектории движения инструмента.

5. Предложены новые стратегии обработки, повышающие стойкость инструмента и производительность технологических операций с применением обновленной версии продукта САМ-система ESPRIT. Она включает новые и обновленные команды и функции: исправление незначительных дефектов в твердом теле; сглаживание поверхности; редактирование скругления 3D-модели – удаление или редактирова-

ние значения величины скругления; упрощение механизма распознавания отверстий, расширение типов сложных отверстий. Высокоскоростная стратегия фрезерования ProfitMilling обновлена возможностью управления шириной резания, что, в свою очередь, позволяет использовать трохоидальную обработку для карманов любой формы и размера. Для программирования операций чернового точения и обработки канавок рекомендуется новая стратегия ProfitTurning, в которой данная опция высокоскоростной обработки основана на комбинации двух видов траектории инструмента – трохоидальной и линейной. Постоянные круговые движения (трохоидальная траектория) являются наиболее эффективными при обработке углов, а линейное перемещение в виде дуг обеспечивает мягкость ввода–вывода инструмента вдоль прямолинейных поверхностей заготовки. При этом стратегия ProfitTurning заменяет движение инструмента под острым углом мягким скругленным переходом, значительно увеличивая подачу и сокращая время обработки.

6. Представлены новые решения версии системы ESPRIT – 2014. Они включают распознавание токарных элементов, что позволяет программировать быстрее с использованием автоматических токарных элементов. Отчеты об обработке из ESPRIT можно экспортировать в удобном и готовом для печати формате Microsoft Excel. Предоставляется возможность экспортировать (создавать) и импортировать (объединять) пакеты данных ESPRIT (*.emp) для передачи объектов из одного проекта ESPRIT (*.esp) в другой. Значительно упрощен процесс редактирования инструментов и их параметров редактором инструмента ESPRIT, который использует единый интерфейс для корректировки параметров множества инструментов.

7. Показано, что ESPRIT и Компас-3D имеют полную совместимость. Например, если конструктор изменил размеры детали или размер отверстия в КОМПАС-3D, то нажатием одной клавиши в ESPRIT можно проверить наличие изменений, перестроить деталь, и автоматически изменить технологию ее производства. Подобная совместимость программ открывает широкие возможности, поскольку производитель может свободно, пользуясь навыками работы в CAD-программе КОМПАС-3D, работать и в CAM-системе ESPRIT.

8. Показано, что новая версия ESPRIT 2015 предлагает пользователям множество нововведений практически по всему функционалу: усовершенствованный обмен данными и усовершенствованные упро-

щения твердотельных моделей; усовершенствованную команду "Автоцепочка" для возможности создания цепочки из граней твердотельной модели, петель и кромок; предложенную новую функцию "Автозаготовка" в операциях обработки торца, контура и кармана, позволяющую производить расчет траекторий только в местах, где остался материал от предыдущих операций; предложенную улучшенную команду "Распознавание стенок" и улучшенную обработку контура на диаметре.

9. В работе обоснованы новые возможности САМ-системы ESPRIT 2017, которые включают: быстрое редактирование цепочек, улучшенное позиционирование инструмента в токарном цикле обработки контура; улучшение поддержки наклонного инструмента; новый 3-х осевой цикл единой чистовой обработки; расширенную поддержку оцифровки Z-пределов модели для циклов свободной формы; отображение траектории ускоренного перемещения инструмента; обновленную траекторию цикла 5-осевой боковой обработки; автоматическую обработку открытых зон в поверхности для непрерывной траектории; следование идеальной поверхности с правильными касательными проходами; более плавное позиционирование инструмента вдоль стенок с неровными или прерывистыми границами.

10. Показано, что САМ-система ESPRIT является лучшей САМ-системой для управления осью В на токарно-фрезерных операциях за счет программных решений для станков этого типа. Они включают: полную интеграцию оси В с токарно-фрезерными функциями; точение плюс 5-осевое позиционирование; точение плюс 5-осевую одновременную обработку; рабочие плоскости для позиционирования оси В; непрерывное точение с осью В; методы ориентации оси В; твердотельную верификацию обработки.

11. Представлено новое поколение программного продукта ESPRIT TNG, в котором переработан интерфейс программы: теперь он имеет ленточную структуру – закладки, аккуратно прорисованные панели инструментов и окна, которые можно перемещать и фиксировать в наиболее комфортных для пользователя положениях. Удобно реализована справочная система. Полностью перерисованы все иконки операций, стратегий, переходов, элементов и инструментов. Верификация и симуляция в ESPRIT TNG вышли на качественно новый уровень.

Раздел 4

Теоретические подходы к проектированию технологий высокоточной и высокопроизводительной механической обработки

4.1. Теоретический анализ условий повышения точности и производительности обработки при растачивании и внутреннем шлифовании

Повышение точности и производительности обработки является важнейшим условием совершенствования операций финишной обработки высокоточных деталей [15; 65; 69]. Данная проблема в настоящее время успешно решается применением современных металлорежущих станков и инструментов, обладающих высокими технологическими возможностями. Это относится и к лезвийной, и к абразивной обработке. Вместе с тем, при использовании новых металлорежущих станков и инструментов важно правильно производить выбор оптимальных условий обработки, в максимальной степени использующих их потенциальные возможности. В связи с этим, актуальны вопросы обоснования технологических закономерностей формирования точности и качества обрабатываемых поверхностей и повышения производительности обработки.

Несмотря на большое количество опубликованных работ, данный вопрос в полной мере не решен [48; 94], что требует разработки новых теоретических подходов к анализу технологических возможностей финишной механической обработки. Важным, но не изученным также является вопрос определения оптимального количества проходов инструмента в условиях как лезвийной, так и абразивной обработки. Поэтому в настоящем параграфе рассмотрены закономерности повышения точности и производительности механической обработки на финишных операциях.

Процессы растачивания отверстий и внутреннего шлифования характеризуются относительно низкой жесткостью технологической системы, что приводит к возникновению упругих перемещений и сни-

жению точности и производительности обработки. В связи с этим важно с единых позиций оценить технологические возможности процессов растачивания отверстий и внутреннего шлифования с учетом образования в технологической системе упругих перемещений. Для этого следует провести теоретический анализ величины упругого перемещения y , возникающего в технологической системе при растачивании и внутреннем продольном шлифовании при съеме припуска за один проход инструмента (рис. 4.1 [120]).

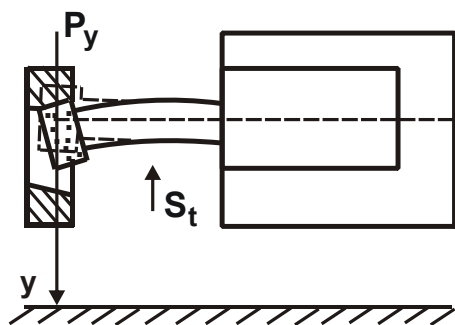


Рис. 4.1. Расчетная схема параметров внутреннего шлифования

При растачивании отверстия величина упругого перемещения y выражается зависимостью [131]:

$$y = \frac{P_y}{c} = \frac{P_z \cdot \cos \varphi}{c \cdot K_{\text{рез}}} = \frac{\sigma \cdot F \cdot \cos \varphi}{c \cdot K_{\text{рез}}}, \quad (4.1)$$

где $P_y, P_z = \sigma \cdot F$ – радиальная и тангенциальная составляющие силы резания, Н;

σ – условное напряжение резания, Н/м² (энергоемкость обработки, Дж/м³);

F – площадь поперечного сечения среза, м²;

$K_{\text{рез}} = (P_z / P_y) \cdot \cos \varphi$ – коэффициент резания;

φ – угол резца в плане;

c – жесткость технологической системы, Н/м.

При внутреннем продольном шлифовании величина упругого перемещения y описывается зависимостью [131]:

$$y = \frac{P_y}{c} = \frac{P_z}{c \cdot K_{\text{рез}}} = \frac{\sigma \cdot F}{c \cdot K_{\text{рез}}}. \quad (4.2)$$

В этом случае $K_{\text{рез}} = P_z / P_y$. При растачивании отверстия $F = Q / V$, а при продольном внутреннем шлифовании $F = Q / V_{\text{кр}}$, где

$Q = \pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot S_{\text{прод}} \cdot t$ – номинальная производительность обработки, $\text{м}^3/\text{с}$; V – скорость вращения детали (скорость резания), $\text{м}/\text{с}$; $V_{\text{кр}}$ – скорость круга, $\text{м}/\text{с}$; $D_{\text{дет}}$ – диаметр обрабатываемого отверстия в детали, м ; $S_{\text{прод}}$ – скорость продольной подачи, $\text{м}/\text{с}$; t – глубина резания (глубина шлифования), м .

После преобразований зависимости (4.1) и (4.2) для растачивания и продольного внутреннего шлифования соответственно принимают вид:

$$y = \frac{\sigma \cdot Q \cdot \cos \varphi}{c \cdot K_{\text{рез}} \cdot V}; \quad (4.3)$$

$$y = \frac{\sigma \cdot Q}{c \cdot K_{\text{рез}} \cdot V_{\text{кр}}}. \quad (4.4)$$

Сравнивая зависимости (4.3) и (4.4), видно, что добиться меньшего значения y при одинаковой производительности обработки можно в условиях внутреннего шлифования, поскольку $V_{\text{кр}} \gg V$. Как известно, при шлифовании отношение $\sigma/K_{\text{рез}}$ больше, чем при точении (растачивании). Поэтому при определенных условиях все же при растачивании можно добиться более существенного уменьшения величины y в сравнении с внутренним шлифованием, учитывая и тот факт, что $\cos \varphi \leq 1$.

В реальных условиях обработки в связи с образованием в технологической системе упругих перемещений фактическая производительность обработки $Q_{\text{ф}} = \pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot S_{\text{прод}} \cdot (t - y)$ всегда будет меньше номинальной производительности обработки Q . Поэтому в зависимостях (4.3) и (4.4) вместо Q необходимо рассматривать $Q_{\text{ф}}$. Тогда зависимости (4.3) и (4.4) опишутся:

$$y = \frac{t}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{\text{рез}} \cdot V}{\pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot \sigma \cdot S_{\text{прод}} \cdot \cos \varphi}\right)} = \frac{t}{\varepsilon_1}; \quad (4.5)$$

$$y = \frac{t}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{\text{рез}} \cdot V_{\text{кр}}}{\pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot \sigma \cdot S_{\text{прод}}}\right)} = \frac{t}{\varepsilon_2}, \quad (4.6)$$

где $\varepsilon_1 = 1 + \frac{c \cdot K_{\text{рез}} \cdot V}{\pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot \sigma \cdot S_{\text{прод}} \cdot \cos \varphi}$; $\varepsilon_2 = 1 + \frac{c \cdot K_{\text{рез}} \cdot V_{\text{кр}}}{\pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot \sigma \cdot S_{\text{прод}}}$ – уточнения на

проходе при растачивании и продольном внутреннем шлифовании [69].

Поскольку $V_{\text{кр}} \gg V$, то справедливо $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$. Следовательно, при заданной глубине резания t (глубине шлифования) величина упругого перемещения y будет меньше при шлифовании. Для удобства анализа уточнения на проходе ε_1 , ε_2 следует выразить через номинальную производительность обработки, определяемую зависимостью:

$$Q = \pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot S_{\text{прод}} \cdot t, \text{ тогда } \varepsilon_1 = 1 + \frac{c \cdot K_{\text{рез}} \cdot V \cdot t}{\sigma \cdot Q \cdot \cos \varphi}; \quad \varepsilon_2 = 1 + \frac{c \cdot K_{\text{рез}} \cdot V_{\text{кр}} \cdot t}{\sigma \cdot Q}.$$

При продольном внутреннем шлифовании для исходных данных: $c = 10^4$ Н/мм; $V_{\text{кр}} = 30$ м/с; $\sigma = 10^4$ МПа; $K_{\text{рез}} = 0,3$; $t = 0,02$ мм; $Q = 5000$ мм³/мин уточнение на проходе $\varepsilon_2 = 3,16$. При продольном растачивании с той же производительностью обработки с учетом $V_{\text{кр}} \gg V$ и $\cos \varphi = 1$ уточнение на проходе ε_1 будет меньше, незначительно отличаясь от единицы ($\varepsilon_1 \rightarrow 1$). В этом случае $y \rightarrow t$, т.е. фактически отсутствует съем материала и происходит копирование исходной погрешности обрабатываемой поверхности, что существенно снижает эффективность обработки.

Для уменьшения величины упругого перемещения y необходимо увеличить уточнение на проходе ε_1 . Это может быть достигнуто или уменьшением номинальной производительности обработки Q , или увеличением глубины резания t . Более целесообразно, очевидно, увеличивать глубину резания t при заданной номинальной производительности обработки $Q = \pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot S_{\text{прод}} \cdot t$, уменьшая скорость продольной подачи $S_{\text{прод}}$. Из этого вытекает, что при растачивании, в отличие от внутреннего шлифования, более эффективно обработку производить с большей глубиной резания. Причем, с увеличением номинальной производительности обработки Q глубина резания t должна быть больше.

Таким образом доказано, что с точки зрения повышения точности обрабатываемой поверхности при заданной производительности при шлифовании следует устанавливать относительно небольшие глубины шлифования, реализуемые при многопроходной обработке, а при рас-

тачивании – устанавливать увеличенные глубины резания и осуществлять съём припуска за один или несколько продольных ходов резца (по сути, реализуя однопроходную обработку).

Увеличение глубины резания t , с одной стороны, приводит к увеличению уточнения на проходе ε_1 и повышению эффективности обработки, а с другой стороны, – к увеличению величины упругого перемещения $y = t/\varepsilon_1$ и снижению точности обработки, поскольку уточнение ε_1 незначительно увеличивается с увеличением глубины резания t . Например, выполнение условия $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ при растачивании отверстия предполагает многократное увеличение глубины резания t , что приводит к пропорциональному увеличению величины y и, соответственно, снижению точности обработки. Поэтому с этой точки зрения процесс растачивания более эффективно использовать на операциях предварительной обработки для съема основной части припуска, а процесс внутреннего шлифования – на операциях окончательной обработки для обеспечения высоких показателей точности обрабатываемых поверхностей.

Данный вывод согласуется с теорией и практикой технологии машиностроения [61; 65]. Вместе с тем, с созданием металлорежущих станков, реализующих условия высокоскоростного резания, и новых режущих инструментов из синтетических сверхтвердых материалов (СТМ), а также из твердых сплавов и керамических материалов с износостойкими покрытиями (снижающими интенсивность трения в зоне резания), появилась возможность осуществления высокоточной обработки [30; 78; 87; 116; 126]. Это достигается, исходя из зависимостей (4.5) и (4.6), увеличением скорости резания V до значений скорости шлифовального круга $V_{кр}$ и уменьшением отношения $\sigma/K_{рез}$ за счет снижения интенсивности трения лезвийного инструмента с обрабатываемым материалом по сравнению с процессами шлифования.

Необходимо отметить, что с увеличением скорости резания V (при заданной производительности обработки Q) пропорционально уменьшается толщина среза, и, следовательно, ухудшаются условия стружкообразования при резании. Это приводит к увеличению отношения $\sigma/K_{рез}$, что в конечном итоге может нивелировать эффект увеличения уточнения на проходе ε_1 . На первый взгляд может показаться, что с целью поддержания заданной (оптимальной) толщины среза

следует одновременно с увеличением скорости резания V в такое же количество раз увеличивать скорость продольной подачи $S_{\text{прод}}$. Однако при этом происходит увеличение производительности обработки Q , что, согласно приведенным зависимостям, не приводит к увеличению уточнения на проходе ε_1 .

Таким образом показано, что увеличить уточнение ε_1 (при заданной производительности обработки Q) можно увеличением скорости резания V , однако для этого необходимо обеспечить высокую остроту режущей кромки инструмента с целью осуществления тончайших микросрезов. Этим качеством вполне обладают инструменты из синтетических сверхтвердых материалов [57; 73; 82; 96; 107; 109; 114; 122]. Поэтому основным направлением увеличения уточнения на проходе ε_1 и, соответственно, повышения точности обработки при растачивании следует рассматривать применение высокоскоростного резания инструментами из синтетических сверхтвердых материалов. В этом случае отпадает необходимость существенного увеличения глубины резания t , в результате чего величина упругого перемещения $y = t/\varepsilon_1$ может принимать такие же значения, как и при шлифовании. Эффект достигается за счет одновременного увеличения скорости резания V и уменьшения отношения $\sigma/K_{\text{рез}}$ (по сравнению с процессом шлифования), в итоге $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$.

С учетом известных соотношений $F = Q/V = t \cdot S_{\text{пр}}$ (где $S_{\text{пр}}$ – продольная подача, м/об.) зависимость для определения уточнения на проходе ε_1 может быть преобразована к виду
$$\varepsilon_1 = 1 + \frac{c \cdot K_{\text{рез}}}{\sigma \cdot S_{\text{пр}} \cdot \cos \varphi}.$$

В этом случае увеличить уточнение на проходе ε_1 можно главным образом за счет уменьшения продольной подачи $S_{\text{пр}}$ и соответственно производительности обработки Q . Поэтому, чтобы сохранить производительность обработки Q на заданном уровне, необходимо пропорционально увеличивать глубину резания t .

Увеличение уточнения на проходе ε_1 путем уменьшения отношения $\sigma/K_{\text{рез}}$ не требует увеличения глубины резания t . Этот путь более эффективен, однако реализовать его на практике сложнее, поскольку даже применение инструментов из синтетических сверхтвердых мате-

риалов не позволяет в достаточно широких пределах изменять отношение $\sigma/K_{рез}$. Поэтому гораздо проще добиться требуемого значения ε_1 за счет уменьшения продольной подачи $S_{пр}$, которая, как известно, ограничена прочностью режущего инструмента. Устанавливая предельное значение $S_{пр}$, очевидно, можно обеспечить требуемое значение ε_1 . Например, для исходных данных: $c = 10^4$ Н/мм; $\sigma = 0,5 \cdot 10^4$ Н/мм²; $K_{рез} = 2$; $S_{пр} = 0,2$ мм/об; $\cos \varphi = 1$, уточнение на проходе $\varepsilon_1 = 21$. Как видно, за счет существенного уменьшения продольной подачи $S_{пр}$ достигаются весьма большие значения ε_1 .

Заданная производительность обработки $Q = S_{пр} \cdot t \cdot V$ обеспечивается путем увеличения глубины резания t или скорости резания V . В последнем случае проще реализовать требуемую величину упругого перемещения y , определяющую точность обработки, поскольку скорость резания V не входит в зависимость для определения уточнения на проходе ε_1 . Это согласуется с практикой применения процессов точения закаленных сталей резцами из кубического нитрида бора (Гексанит-Р, Эльбор-Р) [21; 47; 109; 133]. На рис. 4.2 в обобщенном виде представлена структурная схема условий уменьшения величины упругого перемещения y при точении для заданной производительности обработки Q .

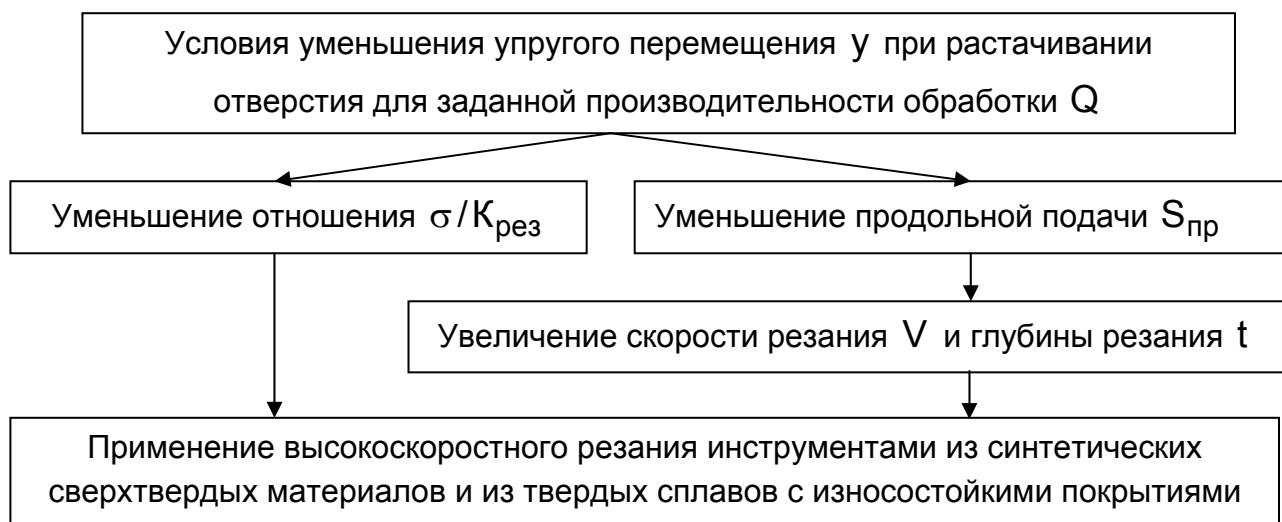


Рис. 4.2. Структурная схема условий уменьшения величины упругого перемещения y при растачивании отверстия для заданной производительности обработки Q

4.2. Расчет и анализ параметров силовой напряженности механической обработки

Обработка материалов резанием является основным методом формообразования поверхностей деталей и поэтому его исследованию, по-прежнему, уделяется большое внимание. В настоящее время сложилось достаточно полное представление о физических закономерностях процесса резания и его технологических возможностях. Разработана теория процесса резания материалов [15; 21; 63; 113], позволяющая рассчитывать, оптимизировать и проектировать технологические системы обработки материалов резанием. Вместе с тем, процесс резания чрезвычайно сложный в физическом отношении и для более глубокого понимания требует проведения дальнейших исследований, особенно с точки зрения аналитического описания его основных параметров: силы и температуры резания, параметров качества и точности обрабатываемых поверхностей. Поэтому в настоящем параграфе проведено аналитическое описание и анализ параметров силовой напряженности механической обработки на основе расчетной схемы процесса стружкообразования при резании (рис. 4.3 [77; 131; 134]), первоначально для нулевого переднего угла режущего инструмента. Как известно, при резании материала с толщиной среза a образование стружки происходит в результате периодических сдвигов элементов обрабатываемого материала вдоль условной плоскости сдвига OA , расположенной под определенным углом β к направлению движения инструмента [15]. Угол β – условный угол сдвига обрабатываемого материала, определяется из условия достижения в плоскости сдвига обрабатываемого материала наибольшего касательного напряжения τ :

$$\tau = \frac{P \cdot \cos(\beta + \psi)}{a \cdot b} \cdot \sin \beta, \quad (4.7)$$

где P – сила резания, Н;

ψ – условный угол трения обрабатываемого материала с передней поверхностью инструмента;

$\operatorname{tg} \psi = f$ – коэффициент трения обрабатываемого и инструментального материалов;

a, b – соответственно толщина и ширина среза, м.

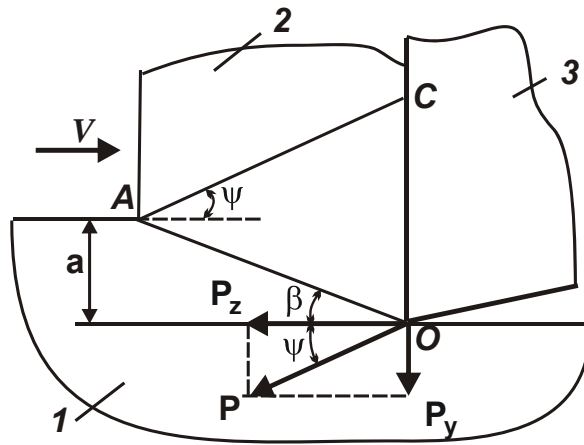


Рис. 4.3. Расчетная схема параметров стружкообразования при резании: 1 – обрабатываемый материал; 2 – образующаяся стружка; 3 – режущий инструмент

Подчиняя зависимость (4.7) необходимому условию экстремума от угла β , т.е. $\tau'_\beta = 0$, определено экстремальное значение угла β :

$$\beta = 45^\circ - \frac{\psi}{2}. \quad (4.8)$$

При условии $\psi = 0$ условный угол сдвига материала $\beta = 45^\circ$, что соответствует предельному напряженному состоянию прямолинейного образца при его одноосном сжатии силой P . С увеличением условного угла трения ψ угол сдвига материала β уменьшается и принимает значения меньше 45° . Подставляя зависимость (4.8) в (4.7) и принимая касательное напряжение τ равным пределу прочности на сдвиг обрабатываемого материала $\tau_{сдв}$, определена сила резания P , а также тангенциальная P_z и радиальная $P_y = f \cdot P_z$ составляющие силы резания:

$$P = \frac{a \cdot v \cdot \tau_{сдв}}{\sin^2 \beta} = \frac{2 \cdot a \cdot v \cdot \tau_{сдв}}{(1 - \sin \psi)}; \quad (4.9)$$

$$P_z = P \cdot \cos \psi = \frac{2 \cdot a \cdot v \cdot \tau_{сдв}}{\operatorname{tg} \beta} = \frac{2 \cdot a \cdot v \cdot \tau_{сдв}}{\operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\psi}{2} \right)}; \quad (4.10)$$

$$P_y = P \cdot \sin \psi = \frac{2 \cdot a \cdot v \cdot \tau_{сдв} \cdot \sin \psi}{(1 - \sin \psi)}. \quad (4.11)$$

Как видно, сила резания P тем меньше, чем меньше параметры a , v , $\tau_{сдв}$ и ψ (или больше условный угол сдвига обрабатываемого

материала β). Такой же закономерности подчиняются и составляющие силы резания P_z и P_y . При этом $P_z > P_y$, т.к.

$$\frac{P_z}{P_y} = \frac{1}{\operatorname{tg}\psi} > 1. \quad (4.12)$$

Используя зависимость (4.10), можно определить условное напряжение резания $\sigma = P_z / (a \cdot v)$:

$$\sigma = \frac{2 \cdot \tau_{\text{сдв}}}{\operatorname{tg}\beta} = \frac{2 \cdot \tau_{\text{сдв}}}{\operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{\psi}{2}\right)}. \quad (4.13)$$

Графически зависимость (4.13) представлена на рис. 4.4. С увеличением условного угла сдвига обрабатываемого материала β условное напряжение резания σ непрерывно уменьшается, асимптотически приближаясь к значению $\sigma_{\text{сж}} \approx 2\tau_{\text{сдв}}$, где $\sigma_{\text{сж}}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м². Следовательно, в пределе (при условии $\sigma \rightarrow \sigma_{\text{сж}}$) напряженное состояние процесса резания соответствует напряженному состоянию и условию разрушения прямолинейного образца при его одноосном сжатии.

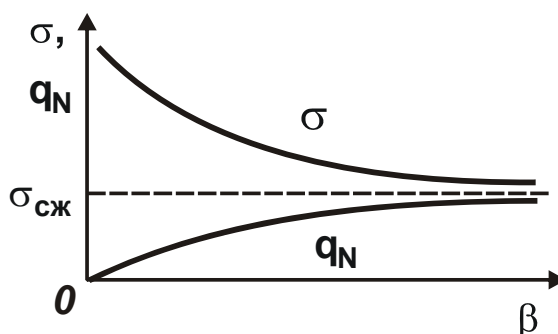


Рис. 4.4. Зависимости условного напряжения резания σ (1) и нормального контактного напряжения q_N (2), возникающего на передней поверхности инструмента, от условного угла сдвига материала обрабатываемого β

Как следует из рис. 4.4, условное напряжение резания σ всегда больше предела прочности на сжатие обрабатываемого материала $\sigma_{\text{сж}}$. С физической точки зрения это условие невыполнимо, поскольку $\sigma_{\text{сж}}$ – это наибольшее напряжение рассматриваемого материала и поэтому условное напряжение резания σ не может превышать $\sigma_{\text{сж}}$.

В связи с этим возникает вопрос: что собой представляет условное напряжение резания σ и в чем состоит его физическая сущность. Данное напряжение и названо условным, поскольку в реальной действительности оно не существует [40; 66; 87; 112; 114; 128; 131]. Превышение его над пределом прочности на сжатие обрабатываемого материала $\sigma_{сж}$ означает то, что оно должно действовать на большей площади, чем площадь поперечного сечения среза ($a \cdot v$). Очевидно, на площади контакта образующейся стружки с передней поверхностью инструмента, которая, как правило, в несколько раз превышает площадь поперечного сечения среза $a \cdot v$. Поэтому важно определить истинные напряжения, действующие на передней поверхности инструмента. Для этого на рис. 4.3 проведена линия AC, параллельная направлению действия силы резания P и очерчивающая с физической точки зрения границу контакта образующейся стружки с передней поверхностью инструмента. Исходя из такого представления процесса стружкообразования при резании, длина контакта образующейся стружки с передней поверхностью инструмента l равна длине отрезка OC, т.е.

$$l = a \cdot \frac{\operatorname{tg}\left(45^{\circ} + \frac{\psi}{2}\right)}{\cos \psi}. \quad (4.14)$$

В табл. 4.1 приведены рассчитанные по зависимости (4.14) значения l/a для различных значений условного угла трения обрабатываемого материала с передней поверхностью инструмента ψ и, соответственно, условного угла сдвига материала β .

Таблица 4.1

Расчетные значения l/a

ψ , град	0	10	20	30	40	50	60
β , град	45	40	35	30	25	20	15
l/a	1	1,21	1,52	2,0	2,8	4,3	7,4

Как видно, отношение l/a может изменяться в пределах от 1 до 7,4 при изменении условного угла трения обрабатываемого материала с передней поверхностью инструмента ψ от 0 до 60° , т.е. в диапазоне реальных значений. Чем больше угол ψ , тем больше длина контакта образующейся стружки с передней поверхностью режущего инструмента l. Полученный теоретический результат согласуется с известными экспериментальными данными [15].

Зная параметр l , несложно определить нормальное контактное напряжение q_N , возникающее на передней поверхности режущего инструмента:

$$q_N = \sigma \cdot \frac{a}{l} \approx \sigma_{сж} \cdot \cos \psi = \sigma_{сж} \cdot \sin 2\beta . \quad (4.15)$$

Из зависимости (4.15) следует, что нормальное контактное напряжение q_N меньше предела прочности на сжатие обрабатываемого материала $\sigma_{сж}$. Для сравнения на рис. 4.4 показан характер изменения параметров q_N и σ в зависимости от угла β . Как видно, параметры q_N и σ с увеличением угла β асимптотически приближаются к значению $\sigma_{сж}$. При этом условное напряжение резания σ принимает значения больше $\sigma_{сж}$, а нормальное контактное напряжение q_N , наоборот, меньше $\sigma_{сж}$.

Кроме нормального контактного напряжения q_N на передней поверхности режущего инструмента действует касательное контактное напряжение q_τ , определяемое отношением радиальной составляющей силы резания P_y к площади контакта образующейся стружки с передней поверхностью режущего инструмента. Исходя из рис. 4.3, оно может быть выражено через нормальное контактное напряжение q_N :

$$q_\tau = q_N \cdot \operatorname{tg} \psi = \sigma_{сж} \cdot \sin \psi . \quad (4.16)$$

Очевидно, $q_\tau < q_N$, поскольку $\operatorname{tg} \psi < 1$. Равнодействующая контактного напряжения q , возникающего на передней поверхности режущего инструмента, равна

$$q = \sqrt{q_N^2 + q_\tau^2} = \sigma_{сж} . \quad (4.17)$$

Следовательно, на передней поверхности режущего инструмента действует равномерно распределенная нагрузка с плотностью, равной пределу прочности на сжатие обрабатываемого материала, т.е.

$$q = \sqrt{q_N^2 + q_\tau^2} = \sigma_{сж} .$$

Приведенное теоретическое решение справедливо при резании инструментом с передним углом γ , равным нулю. В связи с этим важно получить более общее решение, охватывающее весь возможный диапазон изменения переднего угла инструмента, т.е. $\gamma < 0$, $\gamma = 0$ и $\gamma > 0$. Для этого следует рассмотреть расчетную схему, показанную на

рис. 4.5, справедливую для случая $\gamma > 0$. Нетрудно видеть, что в этом случае роль угла ψ выполняет угол $(\psi - \gamma)$. Для отрицательного переднего угла инструмента вместо угла ψ необходимо рассматривать угол $(\psi + \gamma)$.

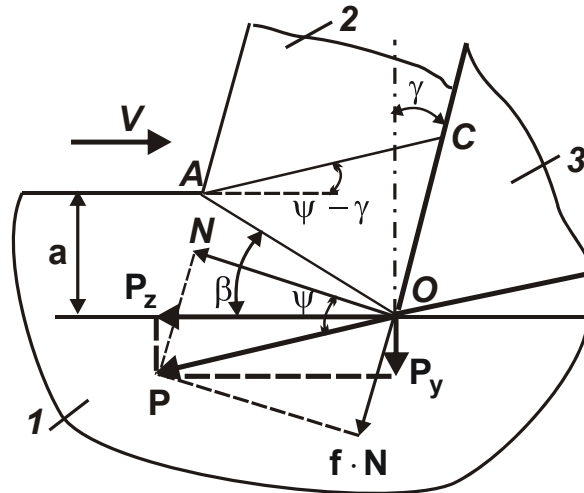


Рис. 4.5. Расчетная схема параметров стружкообразования при резании: 1 – обрабатываемый материал; 2 – образующаяся стружка; 3 – режущий инструмент

Исходя из этого, для положительного переднего угла инструмента γ во всех вышеприведенных зависимостях вместо угла ψ необходимо принять угол $(\psi - \gamma)$. Тогда зависимости (4.8) – (4.13) опишутся:

$$\beta = 45^\circ - \frac{(\psi - \gamma)}{2}; \quad (4.18)$$

$$P = \frac{a \cdot v \cdot \tau_{сдв}}{\sin^2 \beta} = \frac{2 \cdot a \cdot v \cdot \tau_{сдв}}{[1 - \sin(\psi - \gamma)]}; \quad (4.19)$$

$$P_z = P \cdot \cos(\psi - \gamma) = \frac{2 \cdot a \cdot v \cdot \tau_{сдв}}{\operatorname{tg} \beta} = \frac{2 \cdot a \cdot v \cdot \tau_{сдв}}{\operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{(\psi - \gamma)}{2}\right)}; \quad (4.20)$$

$$P_y = P \cdot \sin(\psi - \gamma) = \frac{2 \cdot a \cdot v \cdot \tau_{сдв} \cdot \sin(\psi - \gamma)}{[1 - \sin(\psi - \gamma)]}; \quad (4.21)$$

$$\frac{P_z}{P_y} = \frac{1}{\operatorname{tg}(\psi - \gamma)}; \quad (4.22)$$

$$\sigma = \frac{2 \cdot \tau_{сдв}}{\operatorname{tg} \beta} = \frac{2 \cdot \tau_{сдв}}{\operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{(\psi - \gamma)}{2}\right)}. \quad (4.23)$$

Очевидно, с увеличением положительного переднего угла инструмента γ условный угол сдвига материала β будет увеличиваться, что обеспечит уменьшение силы резания. Этим показано, что увеличение переднего угла инструмента γ как бы нивелирует отрицательное влияние условного угла трения обрабатываемого материала с передней поверхностью инструмента ψ на силовую напряженность процесса резания.

Определим длину контакта образующейся стружки с передней поверхностью инструмента l для случая $\gamma > 0$ на основе расчетной схемы, приведенной на рис. 4.5. Аналогично рис. 4.3 (для случая $\gamma = 0$), длина l равна отрезку OC . Отрезок AC должен быть параллельным линии действия силы резания P . Для расчета длины l следует рассмотреть косоугольный треугольник OAC и воспользоваться теоремой синусов:

$$\frac{OC}{\sin \angle A} = \frac{OA}{\sin \angle C}; \quad (4.24)$$

где $OA = \frac{a}{\sin \beta}$; $\angle A = 45^\circ + \frac{(\psi - \gamma)}{2}$; $\angle C = 90^\circ - \psi$.

После преобразований зависимости (4.24), имеем:

$$l = a \cdot \frac{\operatorname{tg} \left(45^\circ + \frac{(\psi - \gamma)}{2} \right)}{\cos \psi}. \quad (4.25)$$

Из зависимости (4.25) следует, что с увеличением переднего угла инструмента γ длина контакта образующейся стружки с передней поверхностью инструмента l уменьшается.

Определим нормальное q_N и касательное q_τ контактные напряжения, возникающие на передней поверхности инструмента. Для этого необходимо знать нормальную составляющую силы резания N (рис. 4.5), действующую на передней поверхности инструмента.

Между составляющими силы резания P_z , N и $f \cdot N$ существует связь:

$$P_z = N \cdot \cos \gamma + f \cdot N \cdot \sin \gamma. \quad (4.26)$$

Откуда

$$N = \frac{P_z}{\cos \gamma + f \cdot \sin \gamma}. \quad (4.27)$$

Тогда нормальное контактное напряжение $q_N = N/(b \cdot l)$, возникающее на передней поверхности режущего инструмента, с учетом соотношения $\operatorname{tg} \psi = f$ примет вид:

$$q_N = \sigma_{сж} \cdot \frac{\cos^2 \psi}{\cos(\psi - \gamma)}. \quad (4.28)$$

Соответственно касательное контактное напряжение $q_\tau = q_N \cdot \operatorname{tg} \psi$ опишется зависимостью:

$$q_N = \sigma_{сж} \cdot \frac{\cos \psi \cdot \sin \psi}{\cos(\psi - \gamma)}. \quad (4.29)$$

Равнодействующая контактного напряжения q , возникающего на передней поверхности режущего инструмента, равна

$$q = \sqrt{q_N^2 + q_\tau^2} = \sigma_{сж} \cdot \frac{\cos \psi}{\cos(\psi - \gamma)} = \frac{\sigma_{сж}}{\cos \gamma + f \cdot \sin \gamma}. \quad (4.30)$$

В табл. 4.2 приведены рассчитанные по зависимости (4.30) значения $q/\sigma_{сж}$ для случая $\psi = 30^\circ$.

Таблица 4.2

Расчетные значения $q/\sigma_{сж}$

γ , град	0	10	20	30
$q/\sigma_{сж}$	1	0,92	0,88	0,87

Из табл. 4.2 следует, что с увеличением переднего угла режущего инструмента γ отношение $q/\sigma_{сж}$ уменьшается, однако незначительно, т.е. фактически на передней поверхности инструмента действует равномерно распределенная нагрузка с плотностью, приблизительно равной пределу прочности на сжатие обрабатываемого материала, т.е.

$$q = \sqrt{q_N^2 + q_\tau^2} = \sigma_{сж}.$$

4.3. Аналитическое определение энергоемкости обработки при шлифовании

Основным недостатком процесса шлифования является его высокая энергоемкость, что приводит к значительным погрешностям обработки и возникновению температурных дефектов на обрабатываемых поверхностях [45; 67; 74; 92; 105; 147]. Существуют различные

технологические приемы снижения энергоемкости обработки при шлифовании, связанные главным образом с уменьшением интенсивности трения связки круга с обрабатываемым материалом. Они сводятся к применению импрегнированных (термообработанных), высокопористых и прерывистых абразивных кругов, использованию эффективных методов правки круга, технологических сред и т.д. [12; 56; 74; 75; 95; 103; 105; 108; 116; 117; 126; 138; 143; 145]. Вместе с тем, в настоящее время недостаточно изучены условия формирования энергетических параметров шлифования. Отсутствуют теоретические основы раздельного учета доли резания и доли трения в общем энергетическом балансе шлифования, что не позволяет научно обоснованно подойти к выработке условий снижения энергоемкости обработки [3; 18; 77; 89; 122; 134; 141]. Поэтому в настоящем параграфе аналитически определена энергоемкость обработки при шлифовании с учетом процессов резания и трения.

Как показано в работах [76; 122], энергоемкость обработки по физической сути и размерности соответствует условному напряжению резания σ , равному отношению тангенциальной составляющей силы резания к суммарной мгновенной площади поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зернами круга (при лезвийной обработке – площади поперечного сечения среза). Поэтому в работе поставлена задача аналитического определения условного напряжения резания σ при шлифовании. Для этого первоначально следует рассмотреть схему шлифования прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга с постоянной скоростью $V_{рез}$ (рис. 4.6,а), а возникающие тангенциальную P_z и радиальную P_y составляющие силы резания представить в виде:

$$P_z = P_{z_{рез}} + P_{z_{тр}}; \quad (4.31)$$

$$P_y = P_{y_{рез}} + P_{y_{тр}}; \quad (4.32)$$

$$P_z = \sigma \cdot S_{сум} = \sigma \cdot \frac{Q}{V_{кр}}; \quad (4.33)$$

$$P_{z_{рез}} = \sigma_{рез} \cdot S_{сум} = \sigma_{рез} \cdot \frac{Q}{V_{кр}}; \quad (4.34)$$

$$P_{z_{тр}} = P_{y_{тр}} \cdot f = c \cdot y_{тр} \cdot f; \quad (4.35)$$

$$P_{y_{рез}} = \frac{P_{z_{рез}}}{K_{ш_{рез}}} = c \cdot y_{рез}, \quad (4.36)$$

где $P_{z_{рез}}$, $P_{y_{рез}}$ – составляющие силы резания, обусловленные процессом резания зернами круга, Н;

$P_{z_{тр}}$, $P_{y_{тр}}$ – составляющие силы резания, обусловленные процессом трения связки круга с обрабатываемым материалом, Н;

$S_{сум} = Q/V_{кр}$ – мгновенная суммарная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зернами круга, м²;

Q – производительность обработки, м³/с;

$\sigma_{рез}$ – условное напряжение резания (учитывает процесс резания зернами круга, но не учитывает трение связки круга с обрабатываемым материалом), Н/м²;

f – коэффициент трения связки круга с материалом;

c – приведенная жесткость технологической системы, Н/м;

$y_{тр} = (V_{рез} - V_{рез_0}) \cdot \tau$ – величина упругого перемещения, возникающего в технологической системе вследствие неполного съема подвдимого в зону резания обрабатываемого материала, м;

$V_{рез_0}$ – линейная скорость съема материала, м/с;

τ – время обработки, с;

$K_{ш_{рез}} = P_{z_{рез}} / P_{y_{рез}}$;

$y_{рез}$ – величина упругого перемещения, возникающего в технологической системе вследствие внедрения режущих зерен круга в обрабатываемый материал, м.

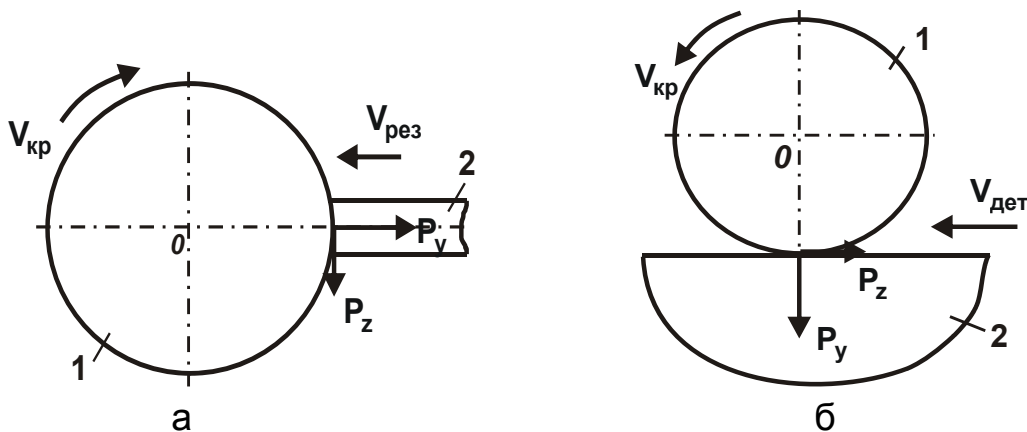


Рис. 4.6. Расчетная схема параметров шлифования прямолинейного образца (а) и плоского шлифования (б): 1 – круг; 2 – деталь

Зависимость (4.31) с учетом отношения $Q = V_{рез_0} \cdot F$ примет вид:

$$\sigma = \sigma_{рез} + \left(\frac{V_{рез}}{V_{рез_0}} - 1 \right) \cdot \frac{c \cdot f \cdot \tau \cdot V_{кр}}{F}, \quad (4.37)$$

где F – площадь поперечного сечения обрабатываемого образца, m^2 .

Из зависимости (4.37) следует, что при условии $V_{рез} = V_{рез_0}$, т.е. когда происходит полный съем подводимого в зону резания обрабатываемого материала, второе слагаемое равно нулю и условное напряжение резания σ (энергоемкость шлифования) обусловлено лишь процессом резания, трение связки круга с обрабатываемым материалом отсутствует. Если же шлифовальный круг не обеспечивает полный съем подводимого в зону резания обрабатываемого материала, то справедливо условие $V_{рез} < V_{рез_0}$ и в контакт с обрабатываемым материалом вступает связка круга. В результате второе слагаемое зависимости (4.37) принимает значение, отличное от нуля, и условное напряжение резания σ определяется суммой двух слагаемых. Причем, с течением времени обработки τ второе слагаемое увеличивается (даже при постоянной скорости $V_{рез_0}$), что приводит к увеличению условного напряжения резания σ и необходимости прекращения процесса шлифования.

Даже при небольшом отличии величин $V_{рез}$ и $V_{рез_0}$ второе слагаемое зависимости (4.37) с течением времени обработки τ будет принимать относительно большие значения, осуществить процесс шлифования при которых невозможно. Например, при значениях $V_{рез} / V_{рез_0} = 2$; $c = 10^4$ Н/мм; $\tau = 60$ с; $f = 0,5$; $V_{кр} = 30$ м/с; $F = 20$ мм² второе слагаемое зависимости (4.37) равно $15 \cdot 10^7$ Н/мм². Как видно, данная величина многократно (более чем в тысячу раз) превышает предел прочности на сжатие обрабатываемого материала и, соответственно, первое слагаемое зависимости (4.37), что свидетельствует о невозможности осуществления процесса шлифования в таких условиях. Из этого вытекает, что при шлифовании необходимо обеспечить равенство скоростей $V_{рез}$ и $V_{рез_0}$ за счет применения кругов с повышенной режущей способностью, фактически исключая интенсивный контакт связки с обрабатываемым материалом. Для этого круг должен обеспечивать увеличенное выступание режущих зерен над

уровнем связки и свободное размещение продуктов обработки в его межзеренном пространстве при шлифовании. Важно также в процессе шлифования поддерживать высокую режущую способность круга, не допуская уменьшения скорости $V_{рез_0}$ в связи с износом и затуплением режущих зерен. В противном случае отношение $V_{рез} / V_{рез_0}$ с течением времени обработки будет увеличиваться и приводить к увеличению условного напряжения резания σ .

С физической точки зрения существенное увеличение второго слагаемого зависимости (4.37) с увеличением времени обработки τ обусловлено увеличением величины упругого перемещения $u_{тр} = (V_{рез} - V_{рез_0}) \cdot \tau$. При условии $V_{рез} = V_{рез_0}$ данная величина равна нулю. В этом случае, как показано выше, условное напряжение резания σ будет зависеть от силовой напряженности процесса резания зернами круга и не зависеть от интенсивности трения связки круга с обрабатываемым материалом.

При условии $V_{рез} > V_{рез_0}$ условное напряжение резания σ будет определяться главным образом вторым слагаемым зависимости (4.37). Уменьшить его можно уменьшением параметров c , f , τ , $V_{кр}$ и увеличением F . Следовательно, с точки зрения уменьшения условного напряжения резания σ целесообразно скорость круга $V_{кр}$ уменьшать. Однако это справедливо при условии $V_{рез} > V_{рез_0}$. При условии $V_{рез} = V_{рез_0}$ из-за отсутствия второго слагаемого зависимости (4.37) скорость круга $V_{кр}$ не влияет на условное напряжение резания σ .

Необходимо отметить, что в процессе шлифования всегда возникает упругое перемещение $u_{рез}$, обусловленное вдавливанием режущих зерен в обрабатываемый материал. Однако данная величина $u_{рез}$ связана с первым слагаемым зависимости (4.37) и не оказывает влияния на второе слагаемое, т.к. в общем случае описывается:

$$u_{рез} = \frac{P_{z_{рез}}}{c \cdot K_{ш_{рез}}} = \frac{\sigma_{рез}}{c \cdot K_{ш_{рез}}} \cdot \frac{Q}{V_{кр}}. \quad (4.38)$$

Как видно, величина $u_{рез}$ определяется главным образом отношением $\sigma_{рез} / K_{ш_{рез}}$ и производительностью обработки Q : чем больше

эти параметры, тем больше $u_{рез}$. Таким образом показано, что при выполнении условия $V_{рез} = V_{рез_0}$ фактически исключается трение связки круга с обрабатываемым материалом, составляющие силы резания $P_{z_{тр}}$, $P_{y_{тр}}$ равны нулю, а условное напряжение резания σ обусловлено лишь процессом резания зернами круга, что резко снижает энергоемкость шлифования.

Традиционно считается, что увеличение составляющих силы резания P_z , P_y и σ при шлифовании вызвано в основном затуплением зерен круга. В действительности, как показано выше, это связано с невыполнением условия $V_{рез} = V_{рез_0}$ даже при работе острым кругом, в результате чего второе слагаемое зависимости (4.37) с течением времени обработки τ непрерывно увеличивается, вызывая увеличение условного напряжения резания σ и, соответственно, составляющих силы резания P_z , P_y .

Из зависимости (4.38) вытекает, что уменьшить условное напряжение резания σ и составляющие силы резания P_z , P_y можно за счет уменьшения коэффициента трения f связки круга с обрабатываемым материалом. Однако этим можно лишь уменьшить второе слагаемое зависимости (4.37), тогда как выполнением условия $V_{рез} = V_{рез_0}$ позволяет его исключить.

Важно определить условное напряжение резания σ при плоском шлифовании (рис. 4.6,б). Для этого следует воспользоваться зависимостями (4.35) и (4.36) с учетом отношений

$$Q = B \cdot V_{дет} \cdot t_{ф}; \quad (4.39)$$

$$u_{тр} = (t - t_{ф}) \cdot n, \quad (4.40)$$

где B – ширина шлифования, м;

$V_{дет}$ – скорость детали, м/с;

t , $t_{ф}$ – номинальная и фактическая глубины шлифования, м;

n – количество проходов круга.

Подставляя соотношения (4.39) и (4.40) в (4.37), имеем:

$$\sigma = \sigma_{рез} + \left(\frac{t}{t_{ф}} - 1 \right) \cdot \frac{c \cdot f \cdot n \cdot V_{кр}}{B \cdot V_{дет}}. \quad (4.41)$$

Как видно, по структуре зависимость (4.41) идентична зависимости (4.37) с тем отличием, что во втором слагаемом содержатся новые параметры: n и t/t_{ϕ} . Чем они больше, тем больше условное напряжение резания σ . Поэтому все выводы, сделанные при анализе зависимости (4.37) применительно к схеме шлифования прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга с постоянной скоростью $V_{рез}$, остаются справедливыми и применительно к схеме плоского шлифования. Исключить второе слагаемое в зависимости (4.41) и таким образом уменьшить условное напряжение резания σ можно при условии $t = t_{\phi}$. Это достигается увеличением выступания вершин зерен над уровнем связки круга и исключением контакта связки круга с обрабатываемым материалом. Следовательно, необходимым условием снижения энергоемкости шлифования следует рассматривать обеспечение увеличенного выступания вершин зерен над уровнем связки круга (рис. 4.7). Достаточным условием является своевременное удаление с рабочей поверхности круга затупившихся зерен за счет применения эффективных методов правки круга или осуществления работы круга в режиме самозатачивания [1; 12; 18; 20; 24; 26; 36; 50; 58; 67; 81; 111]. Это позволит, во-первых, поддерживать в процессе шлифования на заданном уровне величину $\sigma_{рез}$, а во-вторых, обеспечит увеличенное выступание вершин зерен над уровнем связки круга.

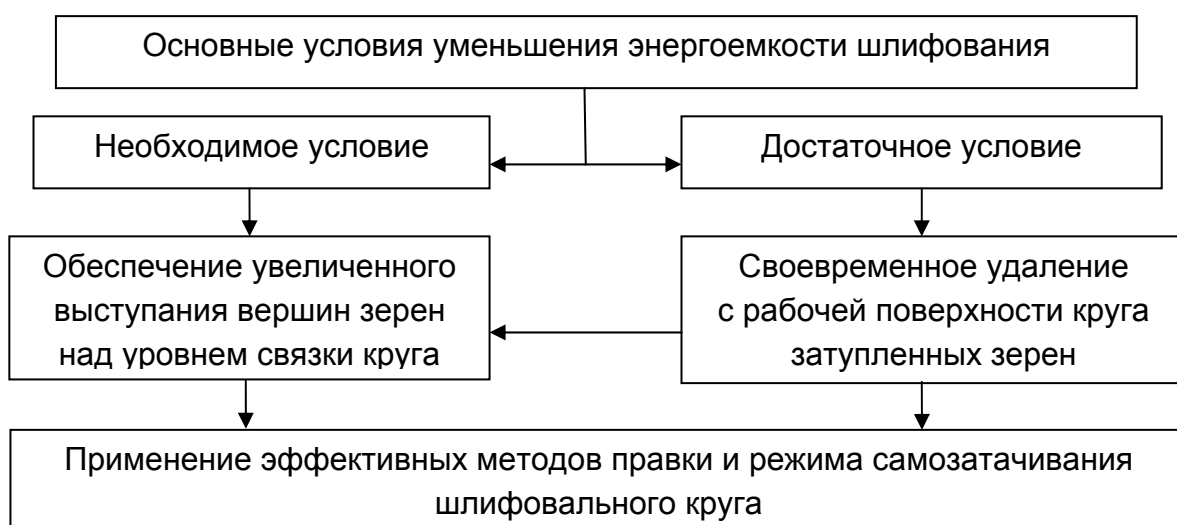


Рис. 4.7. Структурная схема условий уменьшения энергоемкости шлифования

Следует произвести количественную оценку второго слагаемого зависимости (4.41) для исходных данных: $t/t_{\phi} = 2$; $c = 10^4$ Н/мм; $\tau = 60$ с; $f = 0,5$; $V_{кр} = 30$ м/с; $B = 20$ мм; $V_{дет} = 30$ м/мин. В итоге получено $30 \cdot 10^4$ Н/мм². Как видно, это значение существенно меньше аналогичного значения ($15 \cdot 10^7$ Н/мм²), полученного для случая шлифования прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга (рис. 4.6,а). Следовательно, применение схемы плоского шлифования позволяет уменьшить условное напряжение резания σ , т.е. с точки зрения его уменьшения целесообразно от схемы шлифования, показанной на рис. 4.6,а, перейти к схеме плоского шлифования (рис. 4.6,б). Это связано с более высокой производительностью обработки, достигаемой при плоском шлифовании, и меньшими значениями величины $y_{тр}$.

4.4. Теоретический анализ возможностей повышения точности и производительности при многопроходной обработке

В п. 4.1 рассмотрены закономерности осуществления высокоэффективной обработки отверстия за один проход режущего инструмента. В реальных условиях съём припуска, как правило, производится за несколько проходов режущего инструмента [42; 43; 46; 123; 136]. Поэтому важно установить закономерности изменения величины упругого перемещения y , возникающего в технологической системе, при многопроходной обработке – при круглом наружном многопроходном шлифовании (по жесткой схеме) с учетом следующих зависимостей:

$$y = n \cdot t - \sum_{i=1}^n t_{\phi}; \quad (4.42)$$

$$y = \frac{P_y}{c} = \frac{P_z}{K_{ш} \cdot c} = \frac{\sigma \cdot F}{K_{ш} \cdot c}, \quad (4.43)$$

где n – количество проходов шлифовального круга;

t, t_{ϕ} – номинальная и фактическая глубины шлифования, м;

P_y, P_z – радиальная и тангенциальная составляющие силы резания, Н;

c – приведенная жесткость технологической системы, Н/м;

$K_{ш} = P_z / P_y$ – коэффициент шлифования;

F – площадь поперечного сечения среза, м².

Очевидно, при точении $F = S \cdot t_{ф}$, где S – подача, м/об. При шлифовании – $F = Q_{ф} / V_{кр}$, где $Q_{ф} = \pi \cdot D_{дет} \cdot t_{ф} \cdot S_{прод}$ – фактическая производительность обработки, м³/с; $D_{дет}$ – диаметр обрабатываемой детали, м; $S_{прод}$ – скорость продольной подачи, м/с; $V_{кр}$ – скорость круга, м/с. Исходя из этого и учитывая зависимость $y = B_1 \cdot t_{ф}$, установлено, что фактическая глубина шлифования $t_{ф}$ на каждом проходе шлифовального круга является членом разложения биномиального ряда:

$$t_{ф} = t \cdot \left\{ 1 - \left[1 - \frac{1}{\left(1 + B_1\right)^n} \right] \right\} = t \cdot \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{B_1}\right)^n} \right], \quad (4.44)$$

где $B_1 = \frac{\pi \cdot D_{дет} \cdot S_{прод} \cdot \sigma}{K_{ш} \cdot c \cdot V_{кр}}$ – безразмерный параметр.

Величина упругого перемещения y аналитически выражается:

$$y = B_1 \cdot t_{ф} = B_1 \cdot t \cdot \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{B_1}\right)^n} \right] = y_{уст} \cdot \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{B_1}\right)^n} \right] = B_1 \cdot t \cdot \left(1 - \varepsilon^{-n} \right), \quad (4.45)$$

где $y_{уст} = B_1 \cdot t_{ф}$ – установившееся значение упругого перемещения, м;

$\varepsilon = 1 + \frac{1}{B_1}$ – уточнение на проходе.

Характер изменения отношения $t_{ф} / t$, определяемого зависимостью (4.44), показан в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Расчетные значения отношения $t_{ф} / t$

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t_{ф} / t$ (для $B_1 = 2$)	0	0,33	0,56	0,7	0,8	0,87	0,91	0,94	0,96	0,97
$t_{ф} / t$ (для $B_1 = 4$)	0	0,2	0,36	0,49	0,59	0,67	0,74	0,79	0,83	0,87

Как видно, с увеличением количества проходов шлифовального круга n отношение t_{ϕ}/t непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к единице. При большем значении B_1 отношение t_{ϕ}/t больше.

Исходя из зависимости (4.45), по такому же закону изменяется и отношение $y/y_{уст}$, которое равно отношению t_{ϕ}/t . Величина $y_{уст} = B_1 \cdot t_{\phi}$ при этом описывается зависимостью:

$$y_{уст} = \frac{\sigma \cdot Q_{ном}}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}, \quad (4.46)$$

где $Q_{ном} = \pi \cdot D_{дет} \cdot t \cdot S_{прод}$ – номинальная производительность обработки, m^3/c .

Как следует из рис. 4.8,а, с увеличением количества проходов круга n величина упругого перемещения y увеличивается, асимптотически приближаясь к установившемуся значению, определяемому зависимостью (4.46). Через определенное время обработки технологическая система приходит в статически равновесное состояние (как бы соответствующее условию $c \rightarrow \infty$), при котором фактическая и номинальная глубины шлифования почти равны. Данное условие можно реализовать и в начальный момент обработки, создавая в технологической системе натяг, равный установившемуся значению упругого перемещения $y_{уст}$ [64; 65]. Это позволит исключить переходной процесс в технологической системе и повысить производительность обработки.

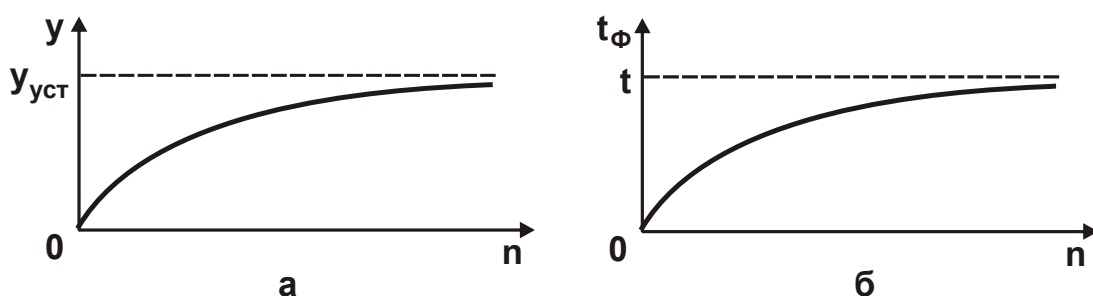


Рис. 4.8. Зависимости упругого перемещения y (а) и фактической глубины шлифования t_{ϕ} (б) от количества проходов круга n

Таким образом, по сути, предложена математическая модель определения погрешностей механической обработки с позиции баланса упругих перемещений, возникающих в технологической системе, и рабочих перемещений инструмента в процессе резания. Расчетами

установлено, что величина упругого перемещения при шлифовании по жесткой схеме математически описывается биномиальным рядом. Доказано, что существует установившееся значение упругого перемещения, определяемое равенством силы резания и силы упругости, которое достигается через определенное время обработки. В этих условиях величина упругого перемещения может многократно превышать глубину шлифования, что требует создания в технологической системе начального натяга, равного установившемуся значению упругого перемещения. Это позволит обеспечить максимально возможную производительность обработки с учетом ограничения по точности обрабатываемой поверхности. На этой основе могут быть определены оптимальные параметры шлифования с относительно низкой жесткостью технологической системы, обеспечивающие заданные значения B_1 и $y_{уст}$.

Необходимо оценить влияние количества проходов шлифовального круга n на величину упругого перемещения y при условии обеспечения одинаковой производительности обработки при съеме заданного припуска Π на основе аналитической зависимости (4.44), преобразованной с учетом $t = \Pi/n$ и $Q_{ном} = \pi \cdot D_{дет} \cdot S_{прод} \cdot t$. Тогда для обеспечения заданной производительности обработки $Q_{ном}$ скорость продольной подачи $S_{прод}$ с увеличением количества проходов шлифовального круга n должна пропорционально увеличиваться по зависимости

$$S_{прод} = \frac{Q_{ном} \cdot n}{\pi \cdot D_{дет} \cdot \Pi}, \quad (4.47)$$

а глубина шлифования t , наоборот, пропорционально уменьшаться в соответствии с зависимостью $t = \Pi/n$. С учетом сказанного, безразмерный параметр B_1 опишется:

$$B_1 = \frac{\sigma \cdot Q_{ном} \cdot n}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр} \cdot \Pi}. \quad (4.48)$$

Подставляя зависимость (4.48) в (4.44), получено:

$$y = \frac{\sigma \cdot Q_{ном}}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр} \cdot \Pi}{\sigma \cdot Q_{ном} \cdot n} \right)^n} \right]. \quad (4.49)$$

Из зависимости (4.49) вытекает неоднозначное влияние количества проходов шлифовального круга n на величину упругого перемещения y . В связи с этим следует произвести количественную оценку влияния количества проходов шлифовального круга n на величину y для заданной $Q_{\text{НОМ}}$. Для удобства расчетов необходимо представить

$V_{1_{\text{баз}}} = \frac{\sigma \cdot Q_{\text{НОМ}}}{c \cdot K_{\text{ш}} \cdot V_{\text{кр}} \cdot \Pi}$, где $V_{1_{\text{баз}}}$ – базовое значение безразмерного параметра V_1 .

Тогда зависимость (4.49) примет вид:

$$y = V_{1_{\text{баз}}} \cdot \Pi \cdot \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{V_{1_{\text{баз}}} \cdot n} \right)^n} \right]. \quad (4.50)$$

Безразмерный параметр $V_{1_{\text{баз}}}$, также как и безразмерный параметр V_1 , может изменяться в широких пределах: $0 < V_{1_{\text{баз}}} < \infty$. Поэтому следует рассмотреть три принципиальных случая: 1) $0 < V_{1_{\text{баз}}} < 1$; 2) $V_{1_{\text{баз}}} = 1$; 3) $V_{1_{\text{баз}}} > 1$. На рис. 4.9 приведены рассчитанные по зависимости (4.50) значения y/Π в зависимости от количества проходов круга n для разных значений $V_{1_{\text{баз}}}$.

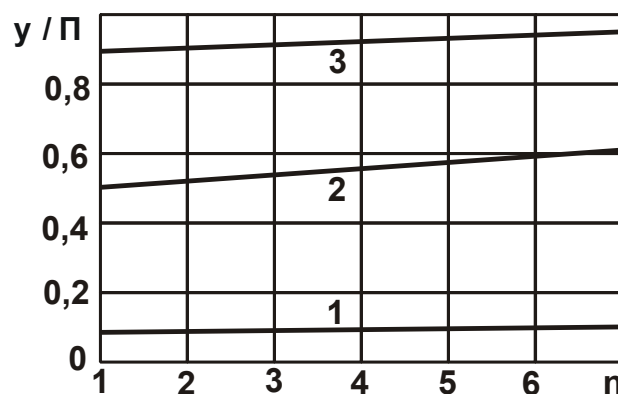


Рис. 4.9. Зависимость относительной величины y/Π от количества проходов круга n : 1 – $V_{1_{\text{баз}}} = 0,1$; 2 – $V_{1_{\text{баз}}} = 1$; 3 – $V_{1_{\text{баз}}} = 10$

Как следует из рис. 4.9, с увеличением количества проходов круга n относительная величина y/Π (независимо от безразмерного па-

раметра $B_{1_{баз}}$) увеличивается, однако незначительно. При условии $n \geq 4$ относительная величина y/P почти не изменяется. Следовательно, наименьшее значение y/P при заданной номинальной производительности обработки $Q_{ном}$ можно достичь при съеме припуска P за один проход круга ($n = 1$). Однако, фактически с одинаковой эффективностью (точностью и производительностью обработки) съем заданного припуска P можно производить и за большее количество проходов круга, т.е. схемы многопроходного и однопроходного шлифования в данном случае практически равнозначны.

Из двух входящих в зависимость (4.50) переменных параметров $B_{1_{баз}}$ и n , основное влияние на относительную величину y/P оказывает параметр $B_{1_{баз}}$. С его изменением относительная величина y/P может изменяться в широких пределах (рис. 4.9). Чем меньше безразмерный параметр $B_{1_{баз}}$, тем меньше относительная величина y/P . При условии $B_{1_{баз}} = 10$ относительная величина y/P приближается к единице, т.е. справедливо условие $y \rightarrow P$.

Учитывая эффективность съема припуска за один проход круга (с точки зрения повышения точности и производительности обработки), следует провести анализ зависимости (4.50), которая равносильна зависимости (4.44), для случая $n = 1$ с учетом $B_{1_{баз}} = B_1$:

$$y = \frac{P}{\left(1 + \frac{1}{B_1}\right)} = \frac{P}{\varepsilon} = \frac{1}{\left(\frac{1}{P} + \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot Q_{ном}}\right)} = \frac{1}{\left(\frac{1}{P} + \frac{1}{y_{уст}}\right)}, \quad (4.51)$$

где $y_{уст} = B_1 \cdot P = \frac{\sigma \cdot Q_{ном}}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}$.

На рис. 4.10 приведены рассчитанные по зависимости (4.51) значения относительной величины y/P с изменением безразмерного параметра B_1 . Как видно, с увеличением B_1 относительная величина y/P непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к единице. Это свидетельствует о том, что с увеличением B_1 уменьшается съем материала. Очевидно, начиная с определенного значения B_1 , съем материала практически прекратится. Следовательно, целесообразно обработку производить при небольших значениях $B_1 \rightarrow 0$. В этом

случае можно обеспечить требуемое значение y/P . При невыполнении данного условия необходимо уменьшить безразмерный параметр $B_1 = \frac{\sigma \cdot \pi \cdot D_{дет} \cdot S_{прод}}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}$ за счет изменения величин, входящих в зависимость для его определения.

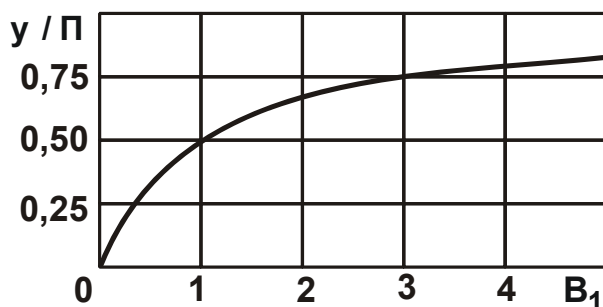


Рис. 4.10. Зависимость относительной величины y/P от безразмерного параметра B_1

Основной варьируемой величиной в данной зависимости следует рассматривать скорость продольной подачи $S_{прод}$, уменьшая которую можно всегда добиться требуемого значения B_1 и, соответственно, значения y/P , т.е. требуемую точность обработки при съеме заданного припуска P . Однако, уменьшение скорости продольной подачи $S_{прод}$ приводит к снижению номинальной производительности обработки $Q_{ном}$, что не всегда целесообразно. Поэтому в зависимости для определения безразмерного параметра B_1 необходимо в первую очередь изменять все другие параметры и, лишь в крайнем случае – уменьшать $S_{прод}$. Исходя из этого, задавая значения B_1 , важно установить характер изменения скорости продольной подачи $S_{прод}$ от основных параметров шлифования:

$$S_{прод} = \frac{B_1 \cdot c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\pi \cdot D_{дет} \cdot \sigma}. \quad (4.52)$$

Как видно, скорость продольной подачи $S_{прод}$ тем больше, чем больше параметры c , $V_{кр}$ и меньше $\sigma/K_{ш}$ и $D_{дет}$. Необходимо отметить, что уменьшение скорости продольной подачи $S_{прод}$ в связи с увеличением диаметра детали $D_{дет}$ не приводит к снижению номи-

нальной производительности обработки $Q_{\text{ном}} = \pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot S_{\text{прод}} \cdot t$. Во всех остальных случаях (связанных с уменьшением параметров s , $V_{\text{кр}}$ и увеличением отношения $\sigma/K_{\text{ш}}$) уменьшение $S_{\text{прод}}$ предполагает уменьшение $Q_{\text{ном}}$.

При съеме припуска за один проход безразмерный параметр B_1 можно представить зависимостью $B_1 = y_{\text{уст}}/\Pi$. Следовательно, уменьшение B_1 предполагает уменьшение величины $y_{\text{уст}}$. Для эффективно-го ведения процесса шлифования, как показано выше, должно выполняться условие $0 < B_1 < 1$ или $0 < y_{\text{уст}}/\Pi < 1$. Из этого вытекает, что величина $y_{\text{уст}}$ должна быть значительно меньше величины снимаемого припуска Π .

Зависимость (4.51) можно представить в виде:

$$\frac{1}{y} = \frac{1}{\Pi} + \frac{1}{y_{\text{уст}}} \quad (4.53)$$

или

$$y = y_{\text{уст}} \cdot \frac{1}{(1 + B_1)} \quad (4.54)$$

Из зависимости (4.51) вытекает, что уменьшить величину упругого перемещения y однозначно можно уменьшением параметров Π и $y_{\text{уст}}$. При этом характер изменения зависимости (4.51) определяется соотношением параметров Π и $y_{\text{уст}}$. В случае $\Pi \gg y_{\text{уст}}$ зависимость (4.51) приближенно может быть описана в виде:

$$y \approx y_{\text{уст}} \cdot \quad (4.55)$$

Тогда справедливо условие $t_{\text{ф}} \approx t = \Pi$, а также условие $B_1 \rightarrow 0$, что имеет место при высокой жесткости технологической системы и небольших значениях $\sigma/K_{\text{ш}}$ (высокой режущей способности круга).

Необходимо отметить, что полученное теоретическое решение, описываемое зависимостью (4.50), справедливо и при лезвийной обработке, т.е. и в этом случае с точки зрения повышения точности и производительности обработки целесообразно съем припуска производить за один проход инструмента. При условиях $n = 1$ и $t = \Pi$ зависимость (4.50) применительно к лезвийной обработке упрощается и описывается:

$$y = \frac{t}{\left(1 + \frac{1}{B_1}\right)} = \frac{1}{\left(\frac{1}{t} + \frac{1}{y_{уст}}\right)}, \quad (4.56)$$

где $y_{уст} = B_1 \cdot t = \frac{\sigma \cdot Q_{ном}}{c \cdot K_{рез} \cdot V}$ – установившееся значение упругого перемещения, м;

$$K_{рез} = P_z / P_y;$$

$Q_{ном} = S_{прод} \cdot t \cdot V$ – номинальная производительность обработки, м³/с;

V – скорость резания (скорость вращения детали), м/с.

Зависимость (4.56) можно также представить в виде:

$$\frac{1}{y} = \frac{1}{t} + \frac{1}{y_{уст}} \quad (4.57)$$

или

$$y = y_{уст} \cdot \frac{1}{(1 + B_1)}. \quad (4.58)$$

В общем случае безразмерный параметр B_1 может изменяться в широких пределах. В случае $B_1 < 1$, согласно зависимости $y = B_1 \cdot t_{ф}$, справедливо соотношение $y < t_{ф}$, а при $B_1 > 1$ – соотношение $y > t_{ф}$. Очевидно, для нормального протекания процесса обработки и более полного использования потенциальных возможностей режущего инструмента необходимо стремиться к реализации условия $B_1 < 1$. В этом случае, исходя из зависимости (4.58), отношение $y/y_{уст}$ может изменяться в пределах 0,5 ... 1. Причем, с уменьшением безразмерного параметра $B_1 \rightarrow 0$ будет выполняться условие $y \rightarrow y_{уст}$. Следовательно, при заданной номинальной производительности обработки $Q_{ном}$ величина упругого перемещения y фактически не будет зависеть от номинальной глубины резания t , т.е. с одинаковой эффективностью можно производить съем припуска различной величины Δ .

Из зависимости (4.56) следует, что уменьшить величину упругого перемещения y можно различными путями: уменьшением отношения $\sigma/K_{рез}$, номинальной производительности обработки $Q_{ном}$ и увеличением параметров c и V . Несомненно, более эффективным путем яв-

ляется уменьшение отношения $\sigma/K_{рез}$ и увеличение параметров c и V . Уменьшать $Q_{ном}$ следует в том случае, когда все резервы, связанные с уменьшением отношения $\sigma/K_{рез}$ и увеличением параметров c и V , исчерпаны.

Полученное теоретическое решение имеет исключительно важное значение для понимания физической сути процессов механической обработки. Это связано с тем, что, несмотря на многообразие методов механической обработки и конструкций режущих инструментов, за счет уменьшения скорости продольной подачи $S_{прод}$ практически во всех случаях можно уменьшить безразмерный параметр B_1 до необходимого значения и обеспечить требуемое значение y/Π . Иными словами, какой бы несовершенной была конструкция режущего инструмента с точки зрения его режущей способности (определяемой высокими значениями $\sigma/K_{рез}$), уменьшая $S_{прод}$, уменьшается безразмерный параметр B_1 до необходимого значения. Точно также недостаток жесткости технологической системы можно с избытком компенсировать уменьшением $S_{прод}$. Именно этим можно объяснить возможность реализации на практике режущих свойств различных лезвийных и абразивных инструментов.

Рассмотрим закономерности формирования погрешностей при механической обработке отверстия. Первоначально проанализируем процесс растачивания отверстия при съеме припуска за один проход инструмента (рис. 4.11 [123]).

Величина упругого перемещения y , как и в предыдущих случаях, определяется зависимостью $y = P_y / c$, где $P_y = P \cdot \cos \varphi$ – радиальная составляющая силы резания, Н; P – сила резания, возникающая в плоскости резания, Н; φ – угол резца в плане.

Увеличение угла резца в плане φ приводит к увеличению осевой составляющей силы резания $P_x = P \cdot \sin \varphi$ (рис. 4.11), т.е. имеет место перераспределение составляющих силы резания P_y и P_x . Уменьшая P_y за счет увеличения угла резца в плане φ , увеличивается P_x , поскольку суммарная сила резания P , возникающая в плоскости резания, остается постоянной.

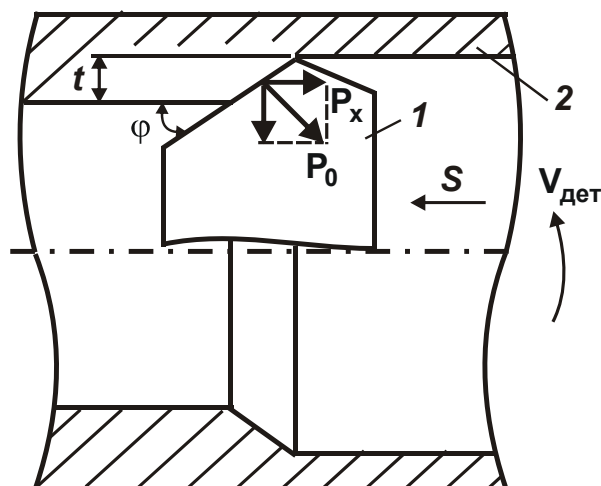


Рис. 4.11. Расчетная схема параметров процесса растачивания отверстия: 1 – резец; 2 – обрабатываемая деталь

При условии $B_1 < 1$ зависимость (4.58), описывающая величину упругого перемещения y при однопроходной обработке, упрощается и принимает вид:

$$y \approx y_{уст} = \frac{\sigma \cdot Q_{ном}}{c \cdot K_{рез} \cdot V} \quad (4.59)$$

Соответствующая этой величине упругого перемещения y сила резания P выразится:

$$P = \frac{\sigma \cdot Q_{ном}}{K_{рез} \cdot V} \quad (4.60)$$

Тогда радиальная составляющая силы резания P_y и величина упругого перемещения y опишутся:

$$P_y = \frac{\sigma \cdot Q_{ном} \cdot \cos \varphi}{K_{рез} \cdot V} \quad (4.61)$$

$$y = \frac{\sigma \cdot Q_{ном} \cdot \cos \varphi}{c \cdot K_{рез} \cdot V} \quad (4.62)$$

Полученная зависимость (4.62) согласуется с аналогичной зависимостью для определения величины упругого перемещения y , установленной в работе [131] другим методом расчета.

В зависимость (4.62), в отличие от зависимости (4.58), входит угол резца в плане φ , с увеличением которого ($\varphi \rightarrow 90^\circ$) величина упругого перемещения y существенно уменьшается, повышая тем са-

мым точность обработки. Следовательно, угол резца в плане φ является дополнительным фактором повышения точности и производительности обработки при окончательном растачивании отверстий.

При предварительной обработке угол резца в плане φ , наоборот, необходимо уменьшать с целью увеличения ширины среза b и уменьшения толщины среза a при заданной производительности обработки $Q_{\text{ном}} = a \cdot b \cdot V$. Это позволит уменьшить интенсивность износа режущего инструмента и, соответственно, повысить его стойкость. Уменьшение интенсивности износа режущего инструмента важно также и при окончательной обработке отверстий, например, при их зенкеровании и развертывании. Этим можно объяснить то, что угол φ (угол заборной части) у зенкеров и разверток устанавливается небольшим.

Необходимо отметить, что обработка отверстия производится несколькими лезвиями режущего инструмента и технологическая система в радиальном направлении уравнивается двумя одинаковыми по величине, но разными по знаку силами P_y (рис. 4.11). Поэтому результирующая сила ΔP_y , также как и величина упругого перемещения y , равна нулю и погрешности обработки, связанные с упругими перемещениями в технологической системе, не образуются. Угол φ , согласно зависимости (4.62), не будет влиять на величину y . Этим объясняется возможность уменьшения угла φ у зенкеров и разверток.

В случае обработки отверстия со съемом неравномерного припуска результирующая сила ΔP_y и, соответственно, величина y отличны от нуля. Это приведет к образованию погрешностей обработки отверстия (в виде эллипсности и конусности). Величина y , определяемая зависимостью (4.62), примет вид:

$$y = \frac{\sigma \cdot (Q_{\text{ном1}} - Q_{\text{ном2}}) \cdot \cos \varphi}{c \cdot K_{\text{рез}} \cdot V} = \frac{\sigma \cdot S_{\text{прод}} \cdot (t_1 - t_2) \cdot \cos \varphi}{c \cdot K_{\text{рез}}}, \quad (4.63)$$

где $Q_{\text{ном1}} = S_{\text{прод}} \cdot t_1 \cdot V$;

$Q_{\text{ном2}} = S_{\text{прод}} \cdot t_2 \cdot V$;

t_1, t_2 – наибольшая и наименьшая глубины резания, м.

Как видно, величина упругого перемещения y тем больше, чем больше разность глубин резания $t_1 - t_2$, т.е. чем больше неравномер-

ность снимаемого припуска. В этом случае уменьшение угла φ приводит к увеличению величины упругого перемещения y . Поэтому основным условием ее уменьшения является увеличение количества лезвий инструмента и, соответственно, уменьшение разности глубин резания $t_1 - t_2$ и сил резания, действующих на каждое лезвие режущего инструмента.

Данная закономерность справедлива и при рассверливании отверстия (рис. 4.11). При условии $t_1 = t_2$ (т.е. при съеме равномерного припуска) величина упругого перемещения $y = 0$, и может быть достигнута высокая точность обработки отверстия. При условии $t_1 > t_2$ (т.е. при съеме неравномерного припуска) величина упругого перемещения $y > 0$, что приводит к образованию погрешностей обработки отверстия. В отличие от зенкера и развертки, сверло, как правило, имеет два лезвия. Поэтому уменьшить величину упругого перемещения y в этом случае можно увеличением угла сверла в плане 2φ , который, как показывает практика, может быть равен 60° и более, т.е. значительно превышает угол φ у зенкеров и разверток.

Представляет интерес сравнение значений величин упругого перемещения y , возникающих в технологической системе при растачивании и рассверливании отверстия и описываемых зависимостями (4.62) и (4.63). Очевидно, при рассверливании разность глубин резания $t_1 - t_2$ меньше глубины резания t при растачивании отверстия. Поэтому, на первый взгляд, может показаться, что величина упругого перемещения y при рассверливании меньше. Однако следует учитывать, что условное напряжение резания σ (энергоёмкость обработки) при рассверливании больше в связи с худшими условиями стружкообразования при резании.

Кроме того, при рассверливании скорость резания V значительно меньше. В связи с этим при заданной производительности обработки величина упругого перемещения y при рассверливании будет больше, чем при растачивании отверстия, что, собственно, и предопределяет широкое применение процесса растачивания на практике на операциях финишной обработки отверстий [61]. С этих позиций рассверливание эффективно использовать как предварительную обработку отверстий.

4.5. Оптимизация структуры технологического процесса съема припуска по критерию наименьшего основного времени обработки с учетом ограничения по точности обработки

При исследовании закономерностей механической обработки большое внимание уделяется оптимизации параметров режимов резания и в меньшей мере оптимизации структуры процесса съема припуска по критерию наименьшего основного времени обработки с учетом ограничения по точности обработки. В научно-технической литературе фактически отсутствуют теоретические решения об изменении скорости съема припуска по его толщине, которые чрезвычайно важны для научно-обоснованного выбора количества технологических операций и переходов с целью обеспечения требуемых параметров качества и точности обработки конкретных поверхностей деталей при достижении максимально возможной производительности.

В работах [91; 122; 131; 134] предложены теоретические подходы для решения данных задач. Поэтому в настоящем параграфе на их основе получены новые теоретические решения по определению оптимальной структуры съема припуска (по его толщине) при механической обработке. Для этого определен наиболее производительный вариант обработки прямолинейного образца по схеме врезного шлифования торцом круга с учетом ограничения по точности обработки y , обусловленной упругими перемещениями, возникающими в технологической системе.

Принято, что величина упругого перемещения y упрощенно выражается зависимостью

$$y = B \cdot V_0, \quad (4.64)$$

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

B – размерный коэффициент, учитывающий характеристики круга и обрабатываемого материала, параметры режима резания.

При обработке в один переход основное время обработки τ равно:

$$\tau = \frac{\Pi}{V_0} = B \cdot \frac{\Pi}{y}. \quad (4.65)$$

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 определяется суммой двух слагаемых

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = \frac{\Pi_1}{V_1} + \frac{\Pi_2 + y_1 - y_2}{V_2}, \quad (4.66)$$

где Π_1, Π_2 – величины снимаемых припусков на первом и втором переходах, м;

V_1, V_2 – скорости радиальной подачи на первом и втором переходах, м/с;

$y = B \cdot V_0$ – величина упругого перемещения, возникающего на первом переходе, который затем удаляется на втором переходе;

$y_2 = B \cdot V_2$ – величина упругого перемещения, возникающего на втором переходе, который определяет погрешность обработки.

Зависимость (4.66) с учетом $\Pi_2 = \Pi - \Pi_1$, выражая скорости V_1 и V_2 через величины y_1 и y_2 , преобразуется к виду:

$$\tau = B \cdot \left[\Pi_1 \cdot \left(\frac{1}{y_1} - \frac{1}{y_2} \right) + \frac{\Pi}{y_2} + \frac{y_1}{y_2} - 1 \right], \quad (4.67)$$

где Π – суммарный снимаемый припуск, м.

В данной зависимости параметры Π, B, y_2 заданы, неизвестным параметром является величина y_1 . Очевидно, с изменением y_1 основное время обработки τ изменяется по экстремальной зависимости. Для определения точки экстремума функции τ следует приравнять первую производную τ'_{y_1} нулю:

$$\tau'_{y_1} = B \cdot \left(-\frac{\Pi_1}{y_1^2} + \frac{1}{y_2} \right) = 0. \quad (4.68)$$

Откуда

$$y_1 = \sqrt{\Pi_1 \cdot y_2}. \quad (4.69)$$

Знак второй производной функции τ в точке экстремума

$$\tau''_{y_1} = B \cdot \frac{2\Pi_1}{y_1^3} > 0 \quad (4.70)$$

положительный, поэтому функции τ принимает минимальное значение (рис. 4.12).

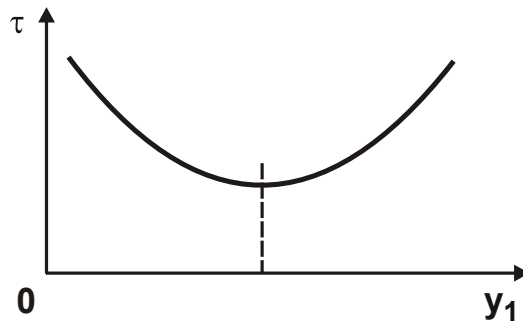


Рис. 4.12. Зависимость τ от y_1

Подставляя в (4.67) зависимость (4.70), определено минимальное основное время обработки:

$$\tau_{\min} = B \cdot \left[\sqrt{\frac{\Pi_1}{y_2}} + \sqrt{\frac{\Pi_1}{y_2}} + \frac{(\Pi - \Pi_1)}{y_2} - 1 \right]. \quad (4.71)$$

Первое слагаемое зависимости (4.71) определяет время первого перехода, а сумма второго, третьего и четвертого слагаемых – время второго перехода.

Из зависимости (4.71) следует неоднозначное влияние величины Π_1 на основное время τ_{\min} , т.е. существует экстремум функции τ_{\min} от величины Π_1 . Для определения экстремума первую производную функции τ_{\min} от величины Π_1 следует приравнять нулю [17]:

$$(\tau_{\min})'_{\Pi_1} = B \cdot \left(\sqrt{\frac{y_2}{\Pi_1}} \cdot \frac{1}{y_2} - \frac{1}{y_2} \right) = 0. \quad (4.72)$$

Откуда

$$\Pi_1 = y_2. \quad (4.73)$$

Знак второй производной функции τ_{\min} от величины Π_1 в точке экстремума:

$$(\tau_{\min})''_{\Pi_1} = -\frac{B}{2 \cdot \sqrt{\Pi_1 \cdot y_1 \cdot \Pi_1}} < 0 \quad (4.74)$$

положительный, следовательно, в точке экстремума функция τ_{\min} принимает максимальное значение (рис. 4.13). 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

$$\tau_{\min} = B \cdot \left(2 \cdot \sqrt{\frac{\Pi}{y_2}} - 1 \right). \quad (4.75)$$

При этом время второго перехода, исходя из зависимости (4.71), при $\Pi_1 = \Pi$ меньше времени первого перехода.

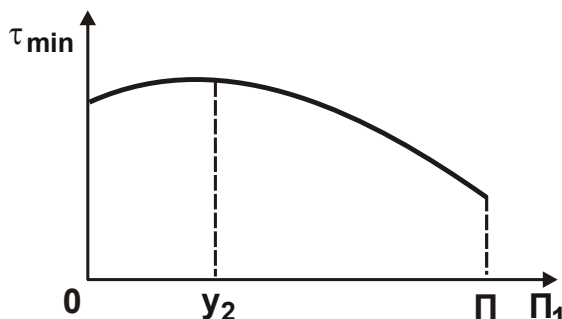


Рис. 4.13. Зависимость τ_{\min} от Π_1

Из зависимости (4.71) 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 обработки τ_{\min} с учетом ограничения по точности обработки y_2 можно при условии $\Pi_1 = \Pi$.

Важно оценить влияние количества переходов на основное время обработки τ .

При обработке в три перехода основное время τ выразится:

$$\tau = \frac{\Pi}{V_1} + \frac{(y_1 - y_2)}{V_2} + \frac{(y_2 - y_3)}{V_3}. \quad (4.76)$$

В данном случае величина упругого перемещения $y_3 = B \cdot V_3$, возникающего на третьем переходе, определяет точность обработки и она задана. Задана также и величина снимаемого припуска Π . Поэтому следует выразить в зависимости (4.76) скорость радиальной подачи на каждом переходе (V_1, V_2, V_3) через соответствующие величины упругого перемещения на каждом переходе (y_1, y_2, y_3). Тогда зависимость (4.76) примет вид:

$$\tau = B \cdot \left(\frac{\Pi}{y_1} + \frac{y_1}{y_2} + \frac{y_2}{y_3} - 2 \right). \quad (4.77)$$

Величины y_1 и y_2 неоднозначно влияют на основное время τ , т.е. существуют экстремумы функции τ от переменных y_1 и y_2 . Для их

определения необходимо вычислить первые производные функции τ от переменных y_1 , y_2 и приравнять их нулю:

$$\tau'_{y_1} = B \cdot \left(-\frac{\Pi}{y_1^2} + \frac{1}{y_2} \right) = 0; \quad (4.78)$$

$$\tau'_{y_2} = B \cdot \left(-\frac{y_1}{y_2^2} + \frac{1}{y_3} \right) = 0. \quad (7.79)$$

Очевидно, вторые производные функции τ от переменных y_1 и y_2 положительные величины. Поэтому в точках экстремума функция τ принимает минимальные значения.

Из уравнения (4.79) следует

$$y_2 = \sqrt[3]{y_3^2 \cdot \Pi}. \quad (4.80)$$

Тогда

$$y_1 = \sqrt[3]{y_3 \cdot \Pi^2}. \quad (4.81)$$

Подставляя зависимости (4.80) и (4.81) в (4.77), имеем:

$$\tau_{\min} = B \cdot \left(3 \cdot \sqrt[3]{\frac{\Pi}{y_3}} - 2 \right). \quad (4.82)$$

В итоге получена зависимость, аналогичная зависимости (4.75) для обработки в два перехода.

Основное время обработки в четыре перехода выражается:

$$\tau = \frac{\Pi}{V_1} + \frac{(y_1 - y_2)}{V_2} + \frac{(y_2 - y_3)}{V_3} + \frac{(y_3 - y_4)}{V_4}. \quad (4.83)$$

Здесь величина упругого перемещения $y_4 = B \cdot V_4$ определяет точность обработки, и она задана. Поэтому необходимо выразить в зависимости (4.83) скорости V_1 , V_2 , V_3 , V_4 через соответствующие значения величины упругого перемещения на каждом переходе y_1 , y_2 , y_3 , y_4 :

$$\tau = B \cdot \left(\frac{\Pi}{y_1} + \frac{y_1}{y_2} + \frac{y_2}{y_3} + \frac{y_3}{y_4} - 3 \right). \quad (4.84)$$

Как и в предыдущих случаях, величины y_1 , y_2 и y_3 неоднозначно влияют на основное время обработки τ , т.е. существует экстремум функции τ от величин y_1 , y_2 и y_3 . Подчиняя функцию τ необходимому условию экстремума, получено:

$$\tau'_{y_1} = B \cdot \left(-\frac{\Pi}{y_1^2} + \frac{1}{y_2} \right) = 0; \quad (4.85)$$

$$\tau'_{y_2} = B \cdot \left(-\frac{y_1}{y_2^2} + \frac{1}{y_3} \right) = 0; \quad (4.86)$$

$$\tau'_{y_3} = B \cdot \left(-\frac{y_2}{y_3^2} + \frac{1}{y_4} \right) = 0. \quad (4.87)$$

Очевидно, вторые производные функции τ от переменных y_1 , y_2 и y_3 положительные величины. Поэтому функция τ в точках экстремума принимает минимальные значения.

Разрешая уравнения (4.85), (4.86) и (4.87) относительно переменных y_1 , y_2 и y_3 , имеем:

$$y_1 = \sqrt[4]{\Pi^3 \cdot y_4}; \quad (4.88)$$

$$y_2 = \sqrt[4]{\Pi^2 \cdot y_4^2}; \quad (4.89)$$

$$y_3 = \sqrt[4]{\Pi \cdot y_4^3}. \quad (4.90)$$

Подставляя выражения (4.88), (4.89), (4.90) в зависимость (4.84), определено минимальное основное время обработки τ_{\min} :

$$\tau_{\min} = B \cdot \left(4 \cdot \sqrt[4]{\frac{\Pi}{y_4}} - 3 \right). \quad (4.91)$$

Из зависимости (4.91) вытекает, что по длительности все переходы (за исключением первого) одинаковы. Исходя из зависимости (4.84) это означает, что отношение величин упругих перемещений, возникающих на предшествующем и последующем переходах, одинаково и

равно: $\left(\sqrt[4]{\frac{\Pi}{y_4}} - 1 \right)$.

Следовательно, с каждым последующим переходом величина упругого перехода убывает по геометрической прогрессии [49]. Знаменателем убывающей прогрессии является приведенное выше отношение величин упругих перемещений, возникающих на предшествующем и последующем переходах.

Полученные зависимости (4.75), (4.82) и (4.91) позволяют установить общую закономерность изменения минимального основного времени обработки τ_{\min} с большим количеством переходов n :

$$\tau_{\min} = B \cdot \left[n \cdot \left(\frac{\Pi}{y_n} \right)^{\frac{1}{n}} - (n-1) \right] = B \cdot \left\{ n \cdot \left[\left(\frac{\Pi}{y_n} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] + 1 \right\}. \quad (4.92)$$

В табл. 4.1 приведены расчетные значения τ_{\min} для $B=1$ с и $z = \frac{\Pi}{y_n} = 100$.

Таблица 4.1

Расчетные значения τ_{\min}

n	1	2	3	4	5	6	10	20
τ_{\min}	100,0	19,0	11,8	9,6	8,5	7,9	7,0	6,4

Как видно, с увеличением количества переходов n минимальное основное время обработки τ_{\min} непрерывно уменьшается. При этом наибольшее уменьшение τ_{\min} достигается при изменении n от 1 до 3 – 4, т.е. эффективно обработку производить в 3 – 4 перехода (для технологической операции) или в такое же количество операций (для технологического процесса) [69].

Важно установить закономерности фактического съема материала припуска на каждом переходе при обработке в n переходов. Для этого следует обратиться к решению, полученному при обработке в 4 перехода и описываемому зависимостями (4.88) – (4.90).

Текущее значение снимаемого припуска $\Pi_{\text{тек}}$ можно представить зависимостью:

$$\Pi_{\text{тек}} = \Pi_1 + \Pi_2 + \Pi_3 + \Pi_4 = (\Pi - y_1) + (y_1 - y_2) + (y_2 - y_3) + (y_3 - y_4), \quad (4.93)$$

где $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4$ – значения припусков, удаляемых на переходах, м;

$$\Pi_1 = \Pi - \sqrt[4]{\Pi^3 \cdot y_4}; \quad \Pi_2 = \sqrt[4]{\Pi^3 \cdot y_4} - \sqrt[4]{\Pi^2 \cdot y_4^2}; \quad \Pi_3 = \sqrt[4]{\Pi^2 \cdot y_4^2} - \sqrt[4]{\Pi \cdot y_4^3};$$

$$\Pi_4 = \sqrt[4]{\Pi \cdot y_4^3} - y_4.$$

Рассмотрим относительную величину

$$\frac{\Pi_{\text{тек}}}{\Pi} = \left[1 - \left(\frac{1}{z} \right)^{\frac{1}{4}} \right] + \left[\left(\frac{1}{z} \right)^{\frac{1}{4}} - \left(\frac{1}{z} \right)^{\frac{2}{4}} \right] + \left[\left(\frac{1}{z} \right)^{\frac{2}{4}} - \left(\frac{1}{z} \right)^{\frac{3}{4}} \right] + \left[\left(\frac{1}{z} \right)^{\frac{3}{4}} - \left(\frac{1}{z} \right)^{\frac{4}{4}} \right], \quad (4.94)$$

где $z = \frac{\Pi}{y_4} > 1$.

Пример расчета. Примем $z = 49$.

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

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

Как видно, 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

$$y = y_1 + y_2 + y_3 + y_4 = \sqrt[4]{\Pi^3 \cdot y_4} + \sqrt[4]{\Pi^2 \cdot y_4^2} + \sqrt[4]{\Pi \cdot y_4^3} + y_4. \quad (4.95)$$

Относительная величина y/Π равна

$$\frac{y}{\Pi} = \sqrt[4]{\frac{y_4}{\Pi}} + \sqrt[4]{\left(\frac{y_4}{\Pi}\right)^2} + \sqrt[4]{\left(\frac{y_4}{\Pi}\right)^3} + \sqrt[4]{\left(\frac{y_4}{\Pi}\right)^4} = \left(\frac{1}{z}\right)^{\frac{1}{4}} + \left(\frac{1}{z}\right)^{\frac{2}{4}} + \left(\frac{1}{z}\right)^{\frac{3}{4}} + \left(\frac{1}{z}\right)^{\frac{4}{4}}. \quad (4.96)$$

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

$$\left(1 - \frac{y}{\Pi}\right) = 1 - \left(\frac{1}{z}\right)^{\frac{1}{4}} - \left(\frac{1}{z}\right)^{\frac{2}{4}} - \left(\frac{1}{z}\right)^{\frac{3}{4}} - \left(\frac{1}{z}\right)^{\frac{4}{4}}. \quad (4.97)$$

Приведенные решения (4.96), (4.97) можно распространить для анализа обработки в n переходов (рис. 4.14):

$$\frac{y}{\Pi} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{z}\right)^{\frac{i}{4}}. \quad (4.98)$$

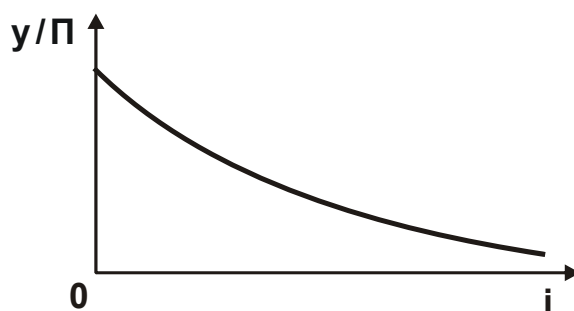


Рис. 4.14. Зависимость y/Π от текущего количества переходов i

Как видно, по мере увеличения количества переходов i (при обработке в n переходов) слагаемые ряда (4.98) уменьшаются. Это соответствует приблизительно экспоненциальному закону изменения величины упругого перемещения, что согласуется с полученными теоретическими результатами, приведенными в работах [122; 131; 134]. Суть их сводится к тому, что наибольшую производительность с учетом ограничения по точности обработки можно достичь при съеме припуска в одну технологическую операцию, осуществляя схему выхаживания, т.е. схему обработки с отключенной радиальной подачей и с начальным натягом в технологической системе, равным величине снимаемого припуска.

4.6. Оптимизация структуры и параметров операций круглого наружного шлифования валов приводов шахтных конвейеров

На машиностроительных предприятиях параметры точности и качества обработки деталей машин традиционно формируются на операциях окончательного шлифования. Поэтому совершенствование данных операций имеет большое научное и практическое значение. В особой мере это относится к шлифованию ответственных деталей типа вал (ступенчатых валов, валов-шестерней и т.д.) приводов шахтных конвейеров – планетарных редукторов мощностью более 200 кВт, изготавливаемых из низкоуглеродистых легированных сталей, закаленных до твердости HRC 62 – 65. Данные детали работают в условиях больших нагрузок и к ним предъявляются высокие требования по точности и качеству обрабатываемых поверхностей. Например, точность размера ступени вала диаметром 200 мм – в пределах 0,002 ... 0,008 мм, а шероховатость обработки – $R_a = 0,2$ мкм. Это вызывает значительные трудности их обработки с точки зрения как стабильного обеспечения заданной точности и шероховатости, так и увеличения производительности обработки, поскольку применяемые операции круглого врезного и продольного шлифования характеризуются достаточно высокой трудоемкостью в связи с возникновением в технологической системе значительных упругих перемещений. В настоящее время благодаря усилиям многих ученых в научно-технической лите-

ратуре [65; 136] сложилось достаточно полное представление о закономерностях формирования параметров точности и шероховатости обработки при шлифовании, разработаны эффективные автоматизированные высокопроизводительные циклы круглого наружного шлифования, позволяющие уменьшить отрицательную роль упругих перемещений в процессе обработки. Вместе с тем, отсутствуют аналитические решения об оптимальных структурах технологических операций (или циклов) шлифования, учитывающие упругие свойства технологической системы, что не позволяет выявить, обосновать и реализовать их потенциальные возможности. Это требует проведения комплекса исследований по выбору оптимальной структуры и параметров операций круглого наружного шлифования валов приводов шахтных конвейеров. В связи с этим, на основе решений [44; 86] разработан теоретический подход к оптимизации структуры и параметров операций круглого врезного шлифования по критерию наименьшего основного времени обработки с учетом ограничения по точности размера обрабатываемой поверхности. Для этого рассмотрены три принципиальные схемы круглого врезного шлифования (рис. 4.15): с дискретно изменяющейся во времени скоростью радиальной подачи и с дискретным характером контакта круга с обрабатываемой деталью; с непрерывно изменяющейся во времени скоростью радиальной подачи и с постоянным контактом круга с обрабатываемой деталью; с дискретно изменяющейся во времени скоростью радиальной подачи и с постоянным контактом круга с деталью. Установлено, что в первом случае при шлифовании в n переходов основное время обработки τ определяется:

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \dots + \tau_n = \frac{\Pi_1}{V_1} + \frac{\Pi_2 + y_1}{V_2} + \frac{\Pi_3 + y_2}{V_3} + \dots + \frac{\Pi_n + y_{n-1}}{V_n} = \\ &= B \cdot \left(\frac{\Pi_1}{y_1} + \frac{\Pi_2 + y_1}{y_2} + \frac{\Pi_3 + y_2}{y_3} + \dots + \frac{\Pi_n + y_{n-1}}{y_n} \right), \end{aligned} \quad (4.99)$$

где τ_n , Π_n , V_n , $y_n = B \cdot V_n$ – основное время обработки, снимаемый припуск, скорость радиальной подачи и величина упругого перемещения, возникающего в технологической системе на n -ом переходе;

$\Pi_1 + \Pi_2 + \Pi_3 + \dots + \Pi_n = \Pi$ – суммарный снимаемый припуск, м;

$B = \frac{\sigma \cdot F}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}$ – постоянная времени образования упругого перемещения в технологической системе, с;

$F = \pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot H$ – площадь обрабатываемой поверхности, м^2 ;

$D_{\text{дет}}$, H – диаметр детали и высота круга, м .

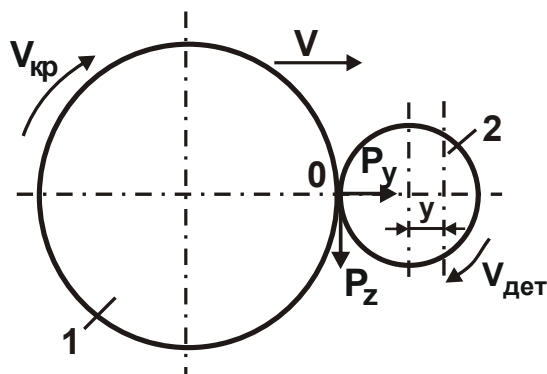


Рис. 4.15. Расчетная схема круглого врезного шлифования:

1 – круг; 2 – деталь

Из зависимости (4.99) следует бесконечное множество экстремумов (минимумов) основного времени обработки τ от величин упругих перемещений $y_1, y_2, y_3, \dots, y_{n-1}$, возникающих в технологической системе на каждом переходе, а также то, что наименьшее значение τ достигается при условии $\Pi_1 = \Pi$; $\Pi_2 = \Pi_3 = \dots = \Pi_n = 0$. Подчиняя функцию τ необходимому условию экстремума, т.е. $\tau'_{y_1} = 0$, установлено, например, что при шлифовании в два перехода экстремальные значения основного времени обработки τ_{\min} и упругого перемещения на первом переходе y_1 (рис. 4.16,а) определяются зависимостями:

$$\tau_{\min} = B \cdot \left[\sqrt{\frac{\Pi_1}{y_2}} + \sqrt{\frac{\Pi_1}{y_2} + \frac{(\Pi - \Pi_1)}{y_2}} \right]; \quad (4.100)$$

$$y_1 = \sqrt{\Pi_1 \cdot y_2}. \quad (4.101)$$

При этом наибольшее и наименьшее значения основного времени обработки отличаются в 5 раз (рис. 4.16,б), что свидетельствует о важности исследования функции τ на экстремум и определения экстремальных значений параметров шлифования.

При шлифовании в n переходов экстремальное (минимальное) значение τ_{\min} равно:

$$\tau_{\min} = B \cdot n \cdot \varepsilon_{\text{сум}}^{1/n}, \quad (4.102)$$

где $\varepsilon_{\text{сум}} = \Pi / y_n$ – суммарное уточнение на размер обрабатываемой поверхности.

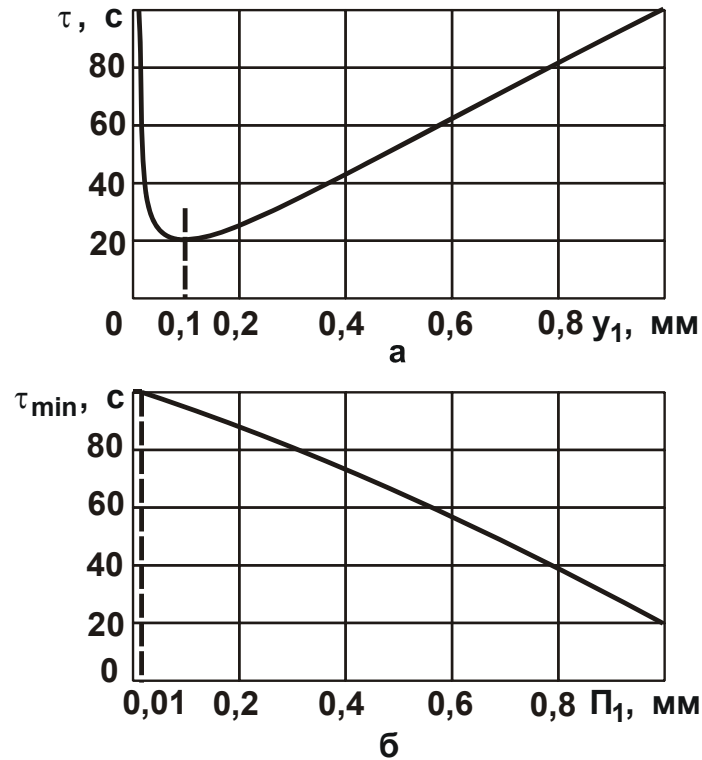


Рис. 4.16. Зависимость τ от y_1 для $V = 1$ с; $\Pi_1 = \Pi = 1$ мм; $y_2 = 0,01$ мм (а) и зависимость τ_{\min} от Π_1 для $V = 1$ с; $\Pi = 1$ мм; $y_2 = 0,01$ (б)

При этом доказано, что по длительности все переходы одинаковы: $\tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_n = V \cdot \varepsilon_{\text{сум}}^{1/n}$. Следовательно, отношение величин упругих перемещений, возникающих на предшествующем и последующем переходах и определяющее уточнение на размер обрабатываемой поверхности ε_n [69], одинаково для каждого перехода и равно $\varepsilon_n = \varepsilon_{\text{сум}}^{1/n}$. Это означает, что с каждым последующим переходом величины упругого перемещения и, соответственно, скорости радиальной подачи убывают по геометрической прогрессии со знаменателем, обратно пропорциональным уточнению ε_n :

$$\varepsilon_n = \frac{y_1}{y_2} = \frac{y_2}{y_3} = \dots = \frac{y_{n-1}}{y_n} = \varepsilon_{\text{сум}}^{1/n}; \quad (4.103)$$

$$\varepsilon_n = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_2}{V_3} = \dots = \frac{V_{n-1}}{V_n} = \varepsilon_{\text{сум}}^{1/n}. \quad (4.104)$$

Исходя из зависимости (4.102) установлено, что функция τ_{\min} (рис. 4.17) от числа переходов n имеет экстремум (минимум), который достигается при условии:

$$n = \ln \varepsilon_{\text{сум}} \quad \text{или} \quad \varepsilon_{\text{сум}} = e^n. \quad (4.105)$$

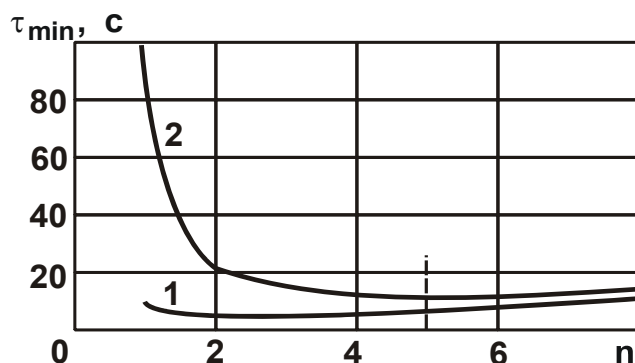


Рис. 4.17. Зависимость τ_{\min} от n для разных значений $\varepsilon_{\text{сум}}$:
 1 – $\varepsilon_{\text{сум}} = 10$; 2 – $\varepsilon_{\text{сум}} = 100$ ($B = 1$ с)

Как видно, экстремальное (оптимальное) число переходов n определяется лишь суммарным уточнением $\varepsilon_{\text{сум}}$, а на каждом переходе реализуется оптимальное уточнение ε_n , равное числу $e \approx 2,72$. Следовательно, знаменателем убывающей геометрической прогрессии является величина $1/e \approx 0,36$ и справедливы соотношения, вытекающие из зависимостей (4.104):

$$\frac{y_1}{y_2} = \frac{y_2}{y_3} = \dots = \frac{y_{n-1}}{y_n} = e; \quad (4.106)$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{V_2}{V_3} = \dots = \frac{V_{n-1}}{V_n} = e. \quad (4.107)$$

Наименьшее основное время обработки при этом равно:

$$(\tau_{\min})_{\min} = B \cdot \ln \varepsilon_{\text{сум}} \cdot e. \quad (4.108)$$

Очевидно, уменьшить $(\tau_{\min})_{\min}$ можно за счет уменьшения параметра B .

Таблица 4.4

Расчетные значения $\varepsilon_{\text{сум}}$ и $(\tau_{\min})_{\min}$
 в зависимости от числа переходов n (для $B = 1$ с)

n	1	2	3	4	5	6	7	8
$\varepsilon_{\text{сум}}$	2,72	7,4	20,1	54,7	148,9	405	1101	3000
$(\tau_{\min})_{\min}$	2,72	5,4	8,1	10,8	13,6	16,3	19,0	21,7

Как следует из табл. 4.4, с увеличением суммарного уточнения $\varepsilon_{\text{сум}}$ количество переходов n увеличивается, однако незначительно. Например, в диапазоне изменения $\varepsilon_{\text{сум}} = 2,72 \dots 54,7$ (что имеет место

на практике) количество переходов n изменяется в диапазоне 1 ... 4. Данный вывод справедлив и в случае, если рассматривать вместо переходов технологические операции.

Полученная выше аналитическая зависимость $n = \ln \varepsilon_{\text{сум}}$ согласуется с известной и широко применяемой на практике аналогичной эмпирической зависимостью для определения количества операций или переходов при обработке конкретной поверхности:

$$k_j = \frac{\lg \varepsilon_{d_0}}{a} \quad \text{или} \quad \varepsilon_{d_0} = 10^{a \cdot k_j} \approx 3,1^{k_j}, \quad (4.109)$$

где a – коэффициент ($a = 0,45 \dots 0,5$);

$\varepsilon_{d_0} = Td_{\text{заг}} / Td_{\text{дет}}$ – суммарное уточнение;

$Td_{\text{заг}}$, $Td_{\text{дет}}$ – допуски на размер заготовки и готовой детали.

Из зависимости (4.99) вытекает, что уменьшить основное время обработки τ можно также за счет исключения величин $y_1, y_2, y_3, \dots, y_{n-1}$ из числителей всех слагаемых. Это достигается применением схемы круглого наружного врезного шлифования с постоянным во времени контактом круга с обрабатываемой деталью и с непрерывно изменяющейся скоростью радиальной подачи, описываемой дифференциальным уравнением:

$$-\frac{d\tau}{B} = \frac{dV}{V}, \quad (4.110)$$

где V – средняя скорость радиальной подачи на "условном" переходе;

$d\tau$ – время "условного" перехода.

Решение дифференциального уравнения (4.110) с учетом начального условия $y(\tau = 0) = y_1$:

$$V = \frac{y_1}{B} \cdot e^{-\frac{\tau}{B}}; \quad (4.111)$$

$$y = y_1 \cdot e^{-\frac{\tau}{B}}, \quad (4.112)$$

где y_1 – начальный натяг в технологической системе, м.

В отличие от шлифования с дискретно изменяющейся во времени скоростью радиальной подачи, когда упругое перемещение и скорость радиальной подачи подчиняются закону убывающей геометрической прогрессии, при шлифовании с непрерывно изменяющейся во времени скоростью радиальной подачи эти величины подчиняются

экспоненциальному закону. При этом установлено, что минимум основного времени обработки τ_{\min} достигается при условии создания в технологической системе начального натяга, равного величине снимаемого припуска $y_1 = \Pi$:

$$\tau_{\min} = B \cdot \ln \varepsilon_{\text{сум}}. \quad (4.113)$$

Сравнивая зависимости (4.108) и (4.113) для определения минимума основного времени обработки τ_{\min} , видно, что они отличаются лишь числом e , т.е. при шлифовании с непрерывно изменяющейся во времени скоростью радиальной подачи производительность обработки больше в 2,72 раза. Если в технологической системе нельзя создать начальный натяг y_1 , равный величине снимаемого припуска Π , то круглое врезное шлифование следует выполнить в два перехода: первый переход – с постоянной скоростью радиальной подачи $V_1 = B \cdot y_1$, а второй переход – с переменной скоростью V , определяемой зависимостью (4.112). Тогда основное время обработки τ выразится:

$$\tau = \frac{\Pi}{V_1} - B \cdot \ln \frac{y}{y_1} = B \cdot \left(\tau - \ln m + \ln \frac{\Pi}{y} \right). \quad (4.114)$$

Таблица 4.5

Расчетные значения τ (в секундах) для $B = 1$ с

m	e^0	e^1	e^2	e^3	e^4	e^5	e^6	e^7
$\tau(\Pi/y = e^2)$	3,0	3,72	7,4	19,2	52,7	145,9	341	1097
$\tau(\Pi/y = e^4)$	5,0	5,72	9,4	21,2	54,7	147,9	343	1099
$\tau(\Pi/y = e^6)$	7,0	7,72	11,4	23,2	56,7	149,9	345	1101

В данном случае величина упругого перемещения y определяет точность размера обрабатываемой поверхности, и она задана, а $m = \Pi/y_1$ – переменная величина, изменяющаяся в пределах $1 \dots \infty$.

Из зависимости (4.114) следует, что уменьшить основное время обработки τ можно за счет уменьшения $m \rightarrow 1$ (табл. 4.5). Отношение установленного значения m к значению $m = 1$ позволяет количественно оценить во сколько раз основное время обработки τ больше минимально возможного значения τ_{\min} , т.е. насколько эффективна применяемая схема круглого врезного шлифования в два перехода. Напри-

мер, для $\Pi = 0,5$ мм; $y = 0,008$ мм; $y_1 = 0,02$ мм, имеем $\Pi/y = e^4$, $\tau = \Pi/y_1 \approx e^3$. Исходя из табл. 3.5, в этом случае основное время обработки τ равно 21,2 с, а минимальное основное время обработки τ_{\min} (при $m = e^0 = 1$) равно 5 с. Соответственно их отношение равно 4. Этим показано, что для данной технологической системы наиболее эффективной схемой круглого врезного шлифования является схема, включающая переходы черного шлифования и выхаживания. По сравнению с оптимальной схемой обработки, реализующей лишь переход выхаживания и обеспечивающей минимум основного времени обработки, данная схема в 4 раза менее производительна. Это обусловлено достаточно большими значениями Π/y и $m = \Pi/y_1$.

Полученные теоретические решения согласуются с экспериментальными данными, приведенными на рис. 4.18. Так экспериментально установлено, что параметр $B = y/V$ не зависит от скорости радиальной подачи V при круглом врезном шлифровании и изменяется в пределах 1,2 ... 1,28 с, т.е. в первом приближении параметр B можно рассматривать постоянной величиной. Установлено также, что с увеличением скорости радиальной подачи V суммарное основное время обработки $\tau_{\text{сум}}$ на переходах черного шлифования и выхаживания (при заданной точности размера обработанной поверхности) уменьшается. Это связано с увеличением величины упругого перемещения в начале перехода выхаживания.

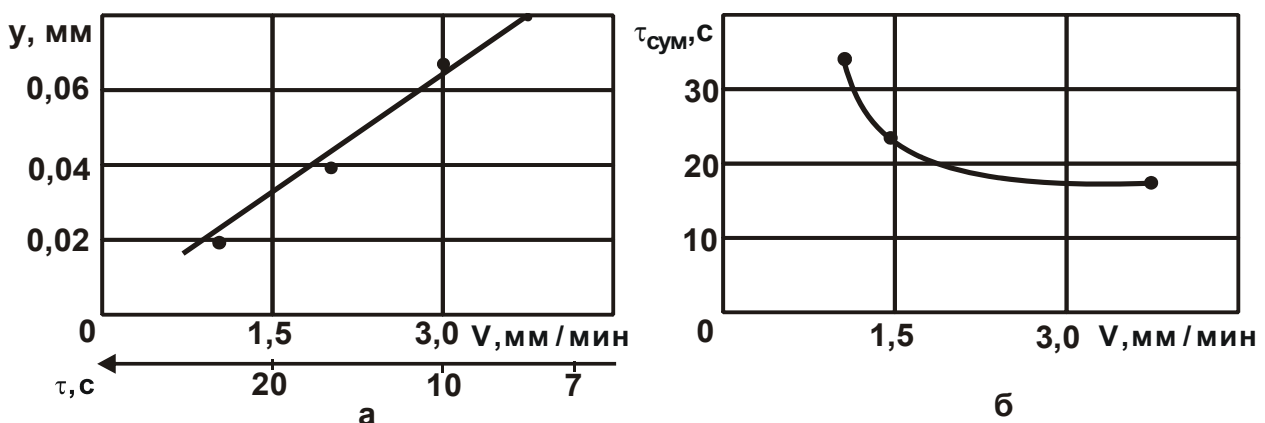


Рис. 4.18. Зависимости величины упругого перемещения y (а) и $\tau_{\text{сум}}$ (б) от скорости радиальной подачи V при круглом врезном шлифровании: круг – 1А1 400×80×203 24А 40 СМ1 К6; обрабатываемый материал – сталь 45; $V_{\text{кр}} = 35$ м/с; $V_{\text{дет}} = 13,2$ м/мин

На основе разработанного теоретического подхода к оптимизации структуры и параметров операций круглого наружного врезного и продольного шлифования произведен выбор наиболее эффективной операции. Для этого проведен анализ операции круглого врезного шлифования с дискретно изменяющейся во времени скоростью радиальной подачи и постоянным контактом круга с обрабатываемой деталью по основному времени обработки τ :

$$\tau = B \cdot \left(\frac{\Pi}{y_1} + \frac{y_1}{y_2} + \frac{y_2}{y_3} + \dots + \frac{y_{n-1}}{y_n} - n \right), \quad (4.115)$$

где $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$ – упругие перемещения, возникающие в технологической системе соответственно на первом, втором, третьем и n -ом переходах, м.

Подчиняя функцию τ условию экстремума от переменных $y_1, y_2, y_3, \dots, y_{n-1}$, получено экстремальное (минимальное) значение τ_{\min} :

$$\tau_{\min} = n \cdot B \cdot (\varepsilon_{\text{сум}}^{1/n} - 1). \quad (4.116)$$

При этом установлено, что справедливо условие:

$$\tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_n = B \cdot (\varepsilon_{\text{сум}}^{1/n} - 1). \quad (4.117)$$

Следовательно, отношение величин упругих перемещений, возникающих на предшествующем и последующем переходах и определяющее уточнение на размер обрабатываемой поверхности ε_n , одинаково для каждого перехода и равно $\varepsilon_n = \varepsilon_{\text{сум}}^{1/n}$. Поэтому, с каждым последующим переходом величины упругого перемещения и, соответственно, скорости радиальной подачи убывают по геометрической прогрессии со знаменателем, обратно пропорциональным уточнению ε_n .

Таблица 4.6

Расчетные значения τ_{\min} для $B = 1$ с и $\varepsilon_{\text{сум}} = 100$

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

Установлено, что функция τ_{\min} , в отличие от аналогичной функции $\tau_{\text{мин}}$, описываемой зависимостью (4.101), не имеет экстремума от количества переходов n (табл. 4.6). Она непрерывно уменьшается с

увеличением n (рис. 4.19), асимптотически приближаясь к значению $\tau_{\min} = B \cdot \ln \varepsilon_{\text{сум}}$, определяемому зависимостью (4.110) для схемы круглого наружного врезного шлифования с непрерывно изменяющейся во времени скоростью радиальной подачи и постоянным контактом круга с обрабатываемой деталью, т.е. при условии $n \rightarrow \infty$ схемы (II) и (III) равносильны.

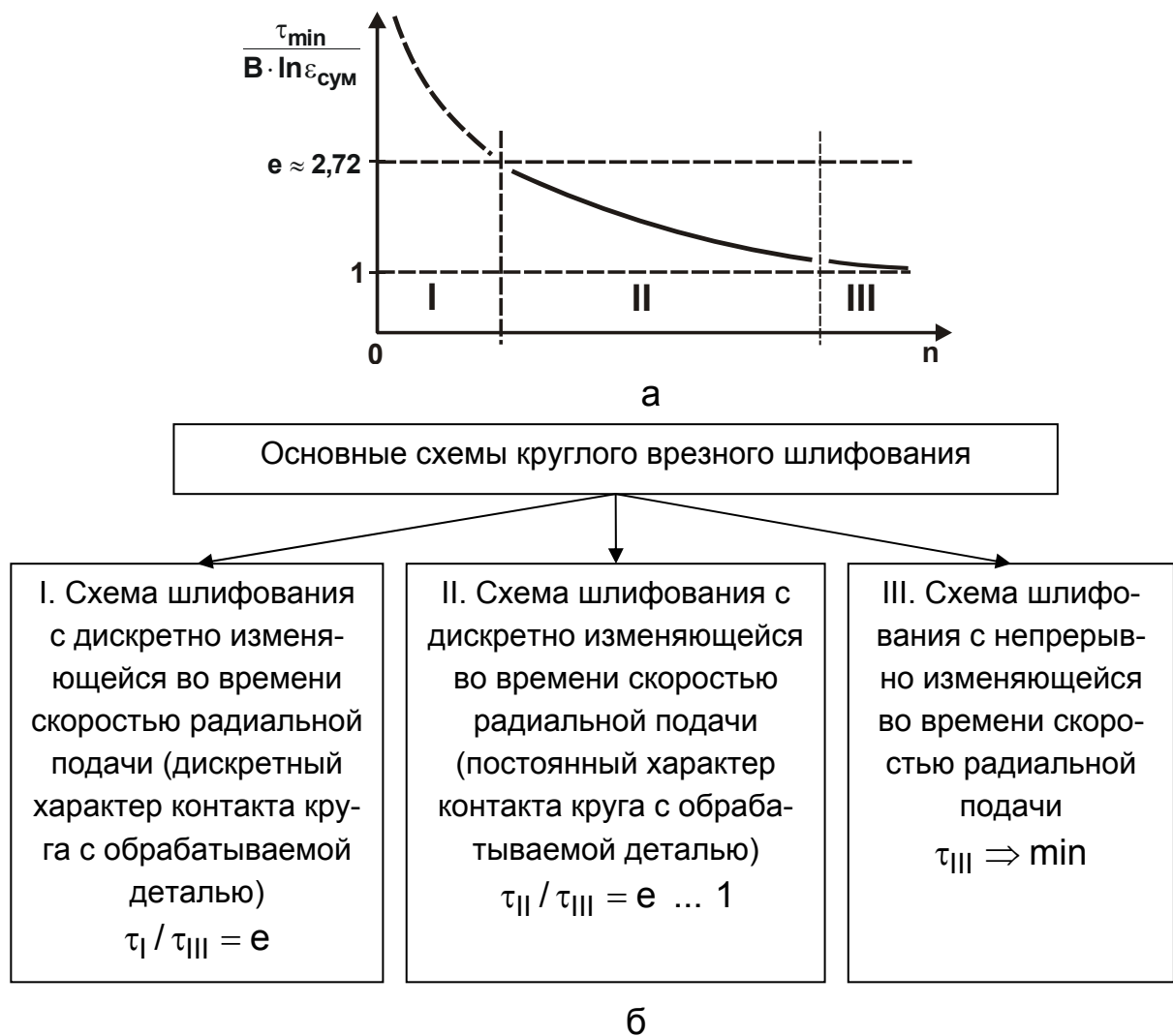


Рис. 4.19. Зависимость функции $\tau_{\min} / B \cdot \ln \varepsilon_{\text{сум}}$ от количества переходов n (а) и классификация основных схем круглого врезного шлифования (б)

При небольшом количестве переходов $n = 1 \dots 4$ зависимости (4.102) и (4.116) фактически идентичны и подчиняются зависимости (4.108). Поэтому с увеличением количества переходов n , по сути, имеет место переход от схемы (I) круглого врезного шлифования с дискретно изменяющейся во времени скоростью радиальной подачи

(и дискретным характером контакта круга с обрабатываемой деталью) к рассматриваемой выше схеме шлифования (II). Следовательно, схема (II) по продолжительности обработки занимает промежуточное положение между схемами (I) и (III), рис. 4.19,а. Функция $\tau_{\min} / V \cdot \ln \varepsilon_{\text{сум}}$ уменьшается от $e \approx 2,72$ до 1 (при $n \rightarrow \infty$), т.е. применение схемы (II) круглого врезного шлифования с дискретно изменяющейся во времени скоростью радиальной подачи и постоянным контактом круга с обрабатываемой деталью позволяет уменьшить основное время обработки. На основе сказанного, предложена классификация схем круглого наружного врезного шлифования, представленная на рис. 4.19,б.

В работе также проведена аналитическая оптимизация структуры и параметров операции круглого продольного шлифования (включающего два перехода: черновое шлифование и выхаживание) на основе полученной аналитической зависимости для определения минимального основного времени обработки τ_{\min} и значений скорости продольной подачи $S_{\text{прод}1}, \dots, S_{\text{прод}n}$ на разных проходах:

$$\tau_{\min} = n \cdot V \cdot \frac{l_{\text{дет}}}{H} \cdot (\varepsilon_{\text{сум}}^{1/n} - 1); \quad (4.118)$$

$$S_{\text{прод}1} = \dots = S_{\text{прод}n} = \frac{H}{V \cdot [\varepsilon_{\text{сум}}^{1/n} - 1]}, \quad (4.119)$$

где $l_{\text{дет}}$ – длина обрабатываемой детали, м;

H – высота круга, м.

Установлено, что минимальное основное время обработки τ_{\min} тем меньше, чем больше скорость продольной подачи и количество проходов круга при выхаживании, а также чем меньше количество проходов при черновом шлифовании. При этом доказано, что скорость продольной подачи $S_{\text{прод}}$ необходимо на всех n проходах (включая черновое шлифование и выхаживание) устанавливать одинаковой, максимально достижимой для данного станка. Это согласуется с практикой применения круглого продольного и плоского шлифования и свидетельствует о достоверности полученных теоретических результатов [37; 40; 42; 43; 68; 98; 103; 137].

На основе полученных зависимостей произведено сравнение минимального основного времени обработки τ_{\min} при круглом наружном продольном и врезном шлифовании:

$$\tau_{\min_{\text{пр}}} = m \cdot n \cdot B \cdot \frac{I_{\text{дет}}}{H} \cdot (\varepsilon_{\text{сум}}^{1/n} - 1); \quad (4.120)$$

$$\tau_{\min_{\text{вр}}} = n \cdot B \cdot \frac{I_{\text{дет}}}{H} \cdot \left[(m \cdot \varepsilon_{\text{сум}})^{1/n} - 1 \right], \quad (4.121)$$

где $m = \Pi / t_{\text{пр}}$ – количество проходов круга;

$t_{\text{пр}}$ – предельная глубина шлифования, м;

$\varepsilon_{\text{сум}} = t_{\text{пр}} / y_n$.

Установлено, что при одинаковой заданной точности размера обрабатываемой поверхности, определяемой величиной y_n , применение схемы круглого наружного врезного шлифования позволяет уменьшить основное время обработки (рис. 4.20,а). Следовательно, при обработке деталей типа вал следует использовать шлифование последовательными врезаниями – с радиальной подачей уступами [43], как наиболее производительную схему. Это хорошо согласуется с полученными экспериментальными данными, приведенными на рис. 4.20,б.

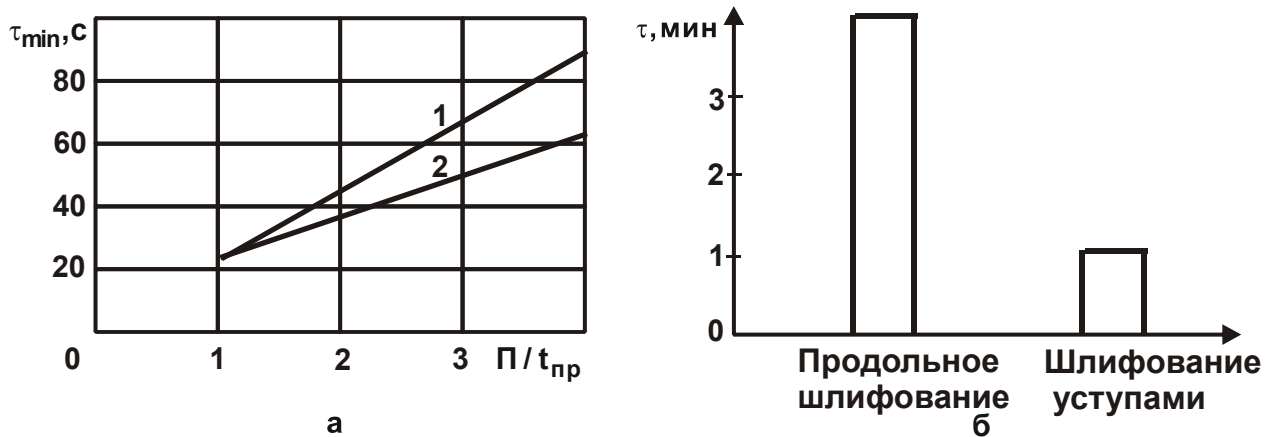


Рис. 4.20. Зависимости τ_{\min} от $\Pi / t_{\text{пр}}$ для круглого продольного (1) и врезного (2) шлифования (а) и диаграмма распределения основного времени обработки τ для круглого продольного шлифования и шлифования последовательными врезаниями – с радиальной подачей уступами (б): круг – 1А1 400×80×203 24А 40 СМ1 К6; обрабатываемый материал – сталь 45; $V_{\text{кр}} = 35$ м/с; $V_{\text{дет}} = 13,2$ м/мин

На основе полученных теоретических решений разработана математическая модель определения параметров точности обработки на операции круглого врезного шлифования на основе учета баланса пе-

ремещений в технологической системе. Для этого составлены уравнения баланса перемещений в технологической системе соответственно на переходах черного шлифования и выхаживания:

$$\frac{dV(\tau)}{d\tau} + \frac{1}{B} \cdot V(\tau) = \frac{1}{B} \cdot V_0; \quad (4.122)$$

$$\frac{dV(\tau)}{d\tau} + \frac{1}{B} \cdot V(\tau) = 0, \quad (4.123)$$

где τ – время обработки, с;

$V(\tau)$ – линейная скорость съема припуска, м/с;

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

$B = \frac{\sigma}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot F$ – постоянная времени образования упругого пе-

ремещения в технологической системе, с;

$F = \pi \cdot D_{дет} \cdot H$ – площадь обрабатываемой поверхности, м²;

$D_{дет}$, H – диаметр и длина обрабатываемой детали, м.

Решение дифференциального уравнения (4.122):

$$V(\tau) = V_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{B} \cdot \tau} \right); \quad (4.124)$$

$$y(\tau) = B \cdot V_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{B} \cdot \tau} \right) = y_{уст} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Pi}{y_{уст}}} \right), \quad (4.125)$$

где $y(\tau)$ – величина упругого перемещения, возникающего в технологической системе, м;

$y_{уст} = B \cdot V_0$ – величина упругого перемещения, возникающего в технологической системе в установившемся во времени процессе шлифования, м;

$\Pi = V_0 \cdot \tau$ – текущее значение снимаемого припуска, м.

Решение дифференциального уравнения (4.123):

$$V(\tau) = \frac{y_1}{B} \cdot e^{-\frac{1}{B} \cdot \tau}; \quad (4.126)$$

$$y(\tau) = y_1 \cdot e^{-\frac{1}{B} \cdot \tau}, \quad (4.127)$$

где y_1 – натяг в системе в начале перехода выхаживания, м.

Величина упругого перемещения $y(\tau)$ определяет точность размера обрабатываемой поверхности. Как видно, на переходе черного шлифования величина $y(\tau)$ увеличивается, а на переходе выхаживания – уменьшается с течением времени обработки τ . Это свидетельствует о том, что осуществление операции круглого наружного шлифования в два перехода (черновое шлифование и выхаживание) обеспечивает заданную точность размера обрабатываемой поверхности. При этом доказано, что при выполнении условия $y_1/\Pi = 0,05 \dots 1,0$ реализуется максимально возможная производительность обработки с учетом ограничения по точности размера обрабатываемой поверхности (где Π – величина снимаемого припуска, м).

Получены аналитические зависимости для установления величины $y_1 - y_2$, определяющей погрешность формы обрабатываемой детали, соответственно на переходах черного шлифования и выхаживания:

$$y_1 - y_2 = B \cdot V_0 \cdot e^{-\frac{1}{B} \cdot \tau} \cdot \left(e^{\frac{1}{B} \cdot \tau_{\text{ф}}} - 1 \right); \quad (4.128)$$

$$y_1 - y_2 = (y_{1\text{нач}} - y_{2\text{нач}}) \cdot e^{-\frac{1}{B} \cdot \tau}, \quad (4.129)$$

где $\tau_{\text{ф}}$ – время съема припуска, равного исходной погрешности формы обрабатываемой детали на переходе черного шлифования, с;

$(y_{1\text{нач}} - y_{2\text{нач}})$ – исходная погрешность формы обрабатываемой детали на переходе выхаживания, м.

Как видно, с течением времени обработки τ величина $y_1 - y_2$ на двух переходах уменьшается, причем, более интенсивно на переходе выхаживания.

Получены также аналитические зависимости для определения суммарного уточнения $\varepsilon_{\text{сум}}$ соответственно на переходах черного шлифования и выхаживания:

$$\varepsilon = \frac{y_1(\tau_{\text{ф}})}{(y_1 - y_2)} = e^{\frac{1}{B}(\tau - \tau_{\text{ф}})}; \quad (4.130)$$

$$\varepsilon = \frac{(y_{1\text{нач}} - y_{\text{нач}})}{(y_1 - y_2)} = e^{\frac{1}{B} \cdot \tau}. \quad (4.131)$$

Из полученных зависимостей вытекает, что за счет увеличения времени обработки τ или $(\tau - \tau_{\text{ф}})$ до значений, превышающих в несколько раз параметр B , можно реализовать значительные величины суммарного уточнения $\varepsilon_{\text{сум}}$ (рис. 4.21). Из этого сделан вывод о необходимости уменьшения параметра B с целью уменьшения припуска, оставляемого для исправления погрешности формы обрабатываемой детали, и снижения основного времени обработки.

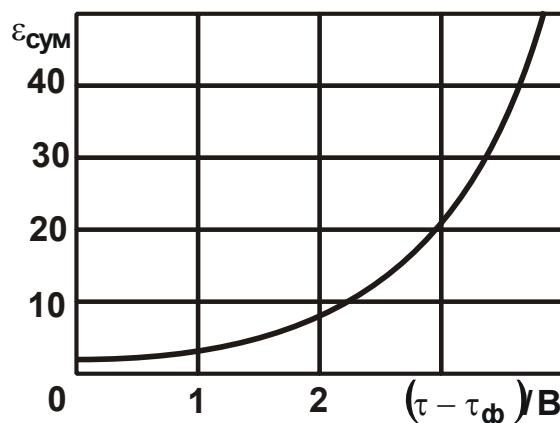


Рис. 4.21. Зависимость $\varepsilon_{\text{сум}}$ от $(\tau - \tau_{\text{ф}})/B$.

Теоретически показано, что аналитические зависимости, полученные для определения суммарного уточнения $\varepsilon_{\text{сум}}$, справедливы как для шлифования, так и для других методов механической обработки, в частности, точения. Их отличие состоит лишь в том, что при шлифовании параметр B определяется скоростью круга, а при точении – скоростью детали. В связи с этим, обоснованы пути уменьшения параметра B при шлифовании и точении, а также определены условия, при которых при точении параметр B может быть меньше, чем при шлифовании. Они состоят в уменьшении силовой напряженности процесса обработки и увеличении скорости детали до значений, соизмеримых со скоростью круга при шлифовании.

Проведены также теоретические и экспериментальные исследования шероховатости поверхности при круглом наружном шлифовании. Теоретически установлено, что одним из основных условий уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании является увеличение числа одновременно работающих зерен круга. Это достигается применением абразивных или алмазно-абразивных инструментов с примерно одновысотным выступанием зерен над уровнем связки,

например, шлифовальных кругов, обеспечивающих "утопание" режущих зерен в связку при шлифовании, и созданием площадок на вершинах режущих зерен кругов (созданием плосковершинных зерен). В связи с этим разработана математическая модель формирования площадок на режущих зернах круга под воздействием механической нагрузки. На основе фундаментального решения теории упругости определены напряжения, возникающие в режущем зерне, имеющем форму клина, и показан характер разрушения зерна. С использованием методов сопротивления материалов получено упрощенное решение для определения размера площадки на зерне от действия сосредоточенной силы, равной силе резания. Установлено, что на зерне образуется площадка, наклоненная под небольшим углом к направлению действия тангенциальной составляющей силы резания, а режущая часть зерна принимает форму, близкую к симметричной.

Экспериментально установлено, что при круглом продольном шлифовании шероховатость поверхности меньше, чем при круглом врезном шлифовании (рис. 4.22).

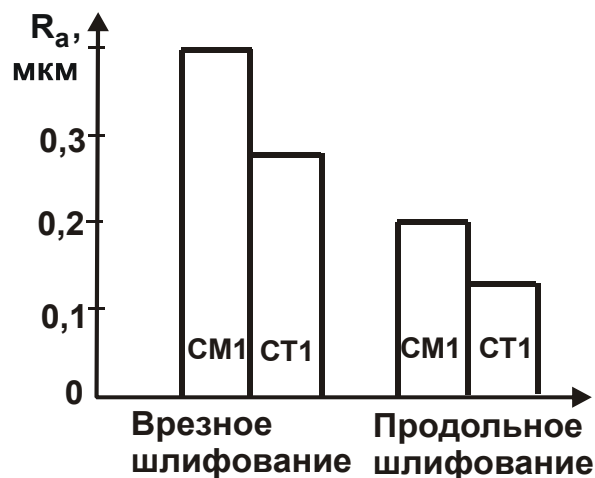


Рис. 4.22. Диаграмма распределения значений параметра шероховатости обработки R_a при круглом наружном врезном и продольном шлифовании абразивными кругами твердостью CM1 и CT1

Применение абразивного круга более высокой твердости (CT1) по сравнению с кругом твердостью CM1 позволяет уменьшить шероховатость поверхности, что связано с образованием на режущих зернах в процессе правки больших площадок. Однако, данный абразивный круг достаточно быстро теряет режущую способность вследствие засаливания и его необходимо часто править, что существенно повышает

ет трудоемкость обработки и расход круга. Поэтому для осуществления операций круглого наружного шлифования валов эффективнее использовать абразивный круг твердостью СМ1, работающий в режиме самозатачивания. Он обеспечивает повышение производительности обработки при одновременном выполнении требований по точности и шероховатости обрабатываемых поверхностей валов.

В работе [99] предложен эффективный метод шлифования внутренних цилиндрических поверхностей, обеспечивающий существенное уменьшение микронеровностей на обработанной поверхности.

Обоснованы также условия практического использования полученных результатов исследований на операциях круглого наружного шлифования валов приводов шахтных конвейеров в основном производстве ОАО Харьковский машиностроительный завод "Свет шахтера". Установлено, что применение схемы шлифования последовательными врезаниями – с радиальной подачей уступами и реализующих ее оптимальных параметров обработки (полученных из условия $u_1/\Pi = 0,05 \dots 1,0$) на операциях круглого наружного шлифования взамен традиционно применявшейся схемы круглого продольного шлифования позволило более чем в два раза повысить производительность обработки при гарантированном обеспечении требуемых высоких показателей точности и шероховатости обрабатываемых поверхностей. При этом исключаются прижоги и другие температурные дефекты, твердость обработанных поверхностей валов соответствует их твердости до обработки, что свидетельствует о незначительном влиянии температурного фактора. Применение разработанных операций круглого наружного шлифования позволило уменьшить процент исправимого брака обработанных валов приводов шахтных конвейеров и на 25 % снизить расход абразивных кругов.

4.7. Оптимизация структуры и параметров процесса съема припуска при плоском шлифовании

Обеспечение высоких показателей точности обработки при шлифовании требует достаточно длительного времени, что повышает трудоемкость обработки [65; 107; 131]. Поэтому важно изыскать пути уменьшения основного времени обработки на операциях шлифования

и, в особенности, на этапе выхаживания. В связи с этим в параграфе проведена оптимизация структуры и параметров процесса съема припуска при плоском шлифовании, включающем лишь этап выхаживания.

Принимая, что съем припуска при плоском шлифовании (рис. 4.23) осуществляется за один проход круга с последующим этапом выхаживания (с отключенной радиальной подачей станка), величина упругого перемещения, возникающего на первом проходе, определится:

$$y_1 = \frac{P_y}{c} = \frac{P_z}{c \cdot K_{ш}} = \frac{\sigma \cdot S_{сум}}{c \cdot K_{ш}} = \frac{\sigma}{c \cdot K_{ш}} \cdot \frac{Q_{ф}}{V_{кр}} = \frac{\sigma}{c \cdot K_{ш}} \cdot \frac{H \cdot (t - y_1) \cdot V_{дет}}{V_{кр}}, \quad (4.132)$$

где $Q_{ф} = H \cdot (t - y_1) \cdot V_{дет}$ – фактическая производительность обработки, м³/с;

$V_{дет}$ – скорость детали, м/с;

H – ширина шлифования (ширина круга), м;

t – глубина шлифования (равна величине снимаемого припуска), м.

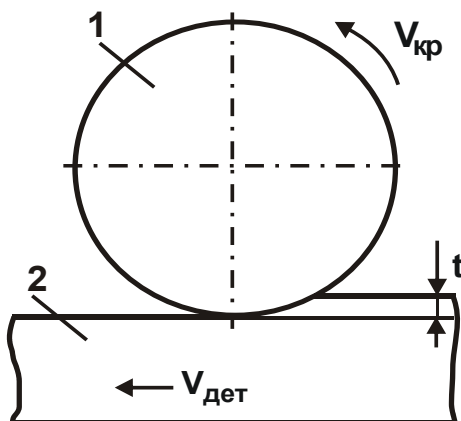


Рис. 4.23. Расчетная схема плоского шлифования: 1 – круг; 2 – деталь

Разрешая уравнение (4.132) относительно величины упругого перемещения y_1 , возникающего на первом проходе круга, получено:

$$y_1 = \frac{t}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot H \cdot V_{дет}}\right)}. \quad (4.133)$$

Уменьшить величину y_1 можно увеличением параметров c , $K_{ш}$, $V_{кр}$ и уменьшением σ , H , $V_{дет}$. Учитывая, что уменьшение параметров H и $V_{дет}$ связано с уменьшением производительности обработки, более эффективно добиваться увеличения $K_{ш}$ и уменьшения σ , т.е. повышать режущую способность шлифовального круга.

Отношение t/y_1 равно уточнению на размер:

$$\varepsilon_1 = \frac{t}{y_1} = 1 + \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot H \cdot V_{дет}}. \quad (4.134)$$

По абсолютной величине уточнение ε_1 больше единицы, т.е. $\varepsilon_1 > 1$. Как следует из зависимости (4.134), с увеличением параметров c , $K_{ш}$, $V_{кр}$ и уменьшением σ , H , $V_{дет}$ уточнение ε_1 увеличивается.

Этап выхаживания осуществляется под действием лишь упруго-восстанавливающей силы, возникающей в технологической системе. Упругое перемещение y_1 является начальной глубиной шлифования этапа выхаживания. Тогда упругое перемещение y_2 , возникающее на первом проходе этапа выхаживания, и уточнение ε_2 определяются:

$$y_2 = \frac{\sigma}{c \cdot K_{ш}} \cdot \frac{H \cdot (y_1 - y_2)}{V_{кр}} \cdot V_{дет}; \quad (4.135)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{y_2}{y_1} = 1 + \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot H \cdot V_{дет}}. \quad (4.136)$$

В результате получена зависимость, идентичная зависимости (4.134). Следовательно, уточнение для каждого последующего прохода круга остается одинаковым. Поэтому суммарное уточнение $\varepsilon_{сум}$, равное произведению уточнений для каждого прохода, определится:

$$\varepsilon_{сум} = \prod_{i=1}^n \varepsilon_i = n \cdot \varepsilon_i, \quad (4.137)$$

где n – количество проходов круга;

ε_i – уточнение для i -го прохода ($\varepsilon_i = \varepsilon_1 = \varepsilon_2 \dots$).

С другой стороны, суммарное уточнение $\varepsilon_{сум}$ определяется зависимостью $\varepsilon_{сум} = t/y$, где y – упругое перемещение, определяющее точность размера обработки, м. Это позволяет установить необходимое количество проходов круга n на этапе выхаживания:

$$n = \frac{\varepsilon_{сум}}{\varepsilon_1} = \frac{t}{y} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot H \cdot V_{дет}}\right)}. \quad (4.138)$$

Суммарное основное время обработки $\tau = n \cdot \tau_1$ равно:

$$\tau = \frac{t}{y} \cdot \frac{L}{\left(V_{дет} + \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot H}\right)}, \quad (4.139)$$

где $\tau_1 = L/V_{\text{дет}}$ – длительность одного прохода, с;

L – длина хода стола станка, м.

Как видно, для заданного суммарного уточнения $\varepsilon_{\text{сум}} = t/y$ и длины хода стола станка L , уменьшить суммарное основное время обработки τ можно увеличением параметров $V_{\text{дет}}$, $V_{\text{кр}}$, c , $K_{\text{ш}}$ и уменьшением σ , H . Полученная зависимость (4.139) позволяет объяснить, почему на практике при плоском шлифовании реализуются относительно большие значения $V_{\text{дет}}$ (т.е. значения скорости стола станка).

Необходимо решить задачу, рассмотренную выше, с учетом того, что каждый проход круга при выхаживании осуществляется с различной скоростью продольной подачи (скоростью детали $V_{\text{дет}}$). Например, первый проход – со скоростью V_1 , второй проход – со скоростью V_2 . Тогда суммарное основное время обработки равно:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = \frac{L}{V_1} + \frac{L}{V_2} . \quad (4.140)$$

Разрешая (4.134) относительно скорости $V_{\text{дет}} = V_1$, имеем:

$$V_1 = \frac{c \cdot K_{\text{ш}} \cdot V_{\text{кр}}}{\sigma \cdot H} \cdot \frac{1}{\left(\frac{t}{y_1} - 1\right)} ; \quad (4.141)$$

$$V_2 = \frac{c \cdot K_{\text{ш}} \cdot V_{\text{кр}}}{\sigma \cdot H} \cdot \frac{1}{\left(\frac{y_1}{y_2} - 1\right)} . \quad (4.142)$$

Подставляя (4.141) и (4.142) в зависимость (4.140), получено:

$$\tau = A \cdot \left(\frac{t}{y_1} + \frac{y_1}{y_2} - 2 \right) , \quad (4.143)$$

где $A = \frac{L \cdot \sigma \cdot H}{c \cdot K_{\text{ш}} \cdot V_{\text{кр}}} .$

В зависимости (4.143) параметры t , A , y_2 заданы, неизвестным параметром является величина y_1 (параметр $y_2 = y$ определяет точность размера обработки). Очевидно, с изменением величины y_1 время обработки τ изменяется по экстремальной зависимости. Для определения точки экстремума функции τ следует приравнять первую производную τ'_{y_1} нулю, тогда $y_1 = \sqrt{t \cdot y_2}$. Знак второй производной

функции τ в точке экстремума положительный. Следовательно, в точке экстремума функция τ принимает минимальное значение.

Подставляя в (4.143) полученную зависимость $y_1 = \sqrt{t \cdot y_2}$, определено минимальное основное время обработки:

$$\tau_{\min} = A \cdot \left[\left(\sqrt{\frac{t}{y_2}} - 1 \right) + \left(\sqrt{\frac{t}{y_2}} - 1 \right) \right] = 2 \cdot A \cdot \left(\sqrt{\frac{t}{y_2}} - 1 \right). \quad (4.144)$$

Первое слагаемое зависимости (4.144) определяет время первого прохода, а второе слагаемое – второго прохода. Первое и второе слагаемые равны между собой. Поэтому скорости V_1 и V_2 равны между собой и определяются преобразованной зависимостью (4.141):

$$V_1 = V_2 = \frac{c \cdot K_{\text{ш}} \cdot V_{\text{кр}}}{\sigma \cdot H} \cdot \frac{1}{\left(\sqrt{\frac{t}{y_2}} - 1 \right)}. \quad (4.145)$$

Таким образом доказано, что наименьшее основное время обработки достигается при одинаковых скоростях на обоих проходах. Это соответствует решению, приведенному в работе [85].

При съеме припуска за три прохода суммарное основное время τ по аналогии с зависимостью (4.143) выразится:

$$\tau = A \cdot \left(\frac{t}{y_1} + \frac{y_1}{y_2} + \frac{y_2}{y_3} - 3 \right). \quad (4.146)$$

В данном случае величина упругого перемещения y_3 , возникающего на третьем проходе, определяет точность обработки и она задана. Величины y_1 и y_2 неоднозначно влияют на основное время обработки τ , т.е. существуют экстремумы функции τ от переменных y_1 и y_2 . Для их определения следует вычислить первые производные функции τ от переменных y_1 , y_2 и приравнять их нулю:

$$y_1 = \sqrt[3]{y_3 \cdot t^2}; \quad (4.147)$$

$$y_2 = \sqrt[3]{y_3^2 \cdot t}; \quad (4.148)$$

$$\tau_{\min} = 3 \cdot A \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{t}{y_3}} - 1 \right). \quad (4.149)$$

Как видно, уточнения на каждом из трех проходов круга равны между собой. Соответственно равны и скорости продольной подачи V_1 , V_2 , V_3 , определяемые по преобразованной зависимости (4.145):

$$V_1 = V_2 = \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot H} \cdot \frac{1}{\left(\sqrt[3]{\frac{t}{y_3}} - 1 \right)}. \quad (4.150)$$

Суммарное основное время обработки за четыре прохода:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 = \frac{L}{V_1} + \frac{L}{V_2} + \frac{L}{V_3} + \frac{L}{V_4} = A \cdot \left(\frac{t}{y_1} + \frac{y_1}{y_2} + \frac{y_2}{y_3} + \frac{y_3}{y_4} - 4 \right). \quad (4.151)$$

Как и в случаях съема припуска за 1; 2 и 3 прохода, величины y_1 , y_2 и y_3 неоднозначно влияют на суммарное основное время обработки τ , т.е. существует экстремум функции τ от величин y_1 , y_2 и y_3 . Подчиняя функцию τ необходимому условию экстремума, получено:

$$\tau'_{y_1} = A \cdot \left(-\frac{t}{y_1^2} + \frac{1}{y_2} \right) = 0; \quad (4.152)$$

$$\tau'_{y_2} = A \cdot \left(-\frac{y_1}{y_2^2} + \frac{1}{y_3} \right) = 0; \quad (4.153)$$

$$\tau'_{y_3} = A \cdot \left(-\frac{y_2}{y_3^2} + \frac{1}{y_4} \right) = 0. \quad (4.154)$$

Очевидно, вторые производные функции τ от переменных y_1 , y_2 и y_3 положительные величины. Поэтому функция τ в точках экстремума принимает минимальные значения.

Разрешая уравнения (4.154) относительно y_1 , y_2 и y_3 , имеем:

$$y_1 = \sqrt[4]{y_4 \cdot t^3}; \quad (4.155)$$

$$y_2 = \sqrt[4]{y_4^2 \cdot t^2}; \quad (4.156)$$

$$y_3 = \sqrt[4]{y_4^3 \cdot t}. \quad (4.157)$$

Подставляя зависимость (4.157) в (4.151), определено минимальное основное время обработки τ_{\min} :

$$\tau_{\min} = 4 \cdot A \cdot \left(\sqrt[4]{\frac{t}{y_4}} - 1 \right). \quad (4.158)$$

Из зависимости (4.158) вытекает, что по длительности все переходы одинаковы. Это означает, что уточнение – отношение величин упругих перемещений, возникающих на предшествующем и последующем переходах, одинаково. Поэтому с каждым последующим перехо-

дом величина упругого перемещения убывает по геометрической прогрессии. Знаменателем убывающей прогрессии является уточнение.

Полученные решения позволяют установить закономерности изменения τ_{\min} при обработке с большим количеством проходов круга n :

$$\tau_{\min} = n \cdot A \cdot \left[\left(\frac{t}{y_n} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] = n \cdot A \cdot \left(\varepsilon_{\text{сум}}^{\frac{1}{n}} - 1 \right), \quad (4.159)$$

где $\varepsilon_{\text{сум}} = t/y_n > 1$ – суммарное уточнение;

y_n – упругое перемещение, возникающее на n -ом проходе круга, и определяющее точность размера обработки.

Таблица 4.7

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

В итоге получено решение, идентичное решению, приведенному в работе [85], но полученному на основе другой расчетной схемы.

В табл. 4.7 приведены расчетные значения τ_{\min} для значений $A = 1$ и $\varepsilon_{\text{сум}} = t/y_n = 100$. Как видно, с увеличением количества проходов круга n минимальное основное время обработки τ_{\min} непрерывно уменьшается. При этом наибольшее уменьшение функции τ_{\min} достигается при изменении n в пределах от 1 до 4, т.е. съём припуска на этапе выхаживания при плоском шлифовании с учетом точности обработки эффективно производить приблизительно за 4 прохода, что подтверждается экспериментальными полученными результатами.

Выводы

1. В работе приведены оптимальные решения проектирования высокоэффективных технологий машиностроения по критериям точности и производительности механической обработки. Установлено, что с точки зрения повышения точности обрабатываемой поверхности при заданной производительности в условиях шлифования следует устанавливать относительно небольшие глубины шлифования, реализуемые при многопроходной обработке, а в условиях растачивания –

устанавливать увеличенные глубины резания и осуществлять съем припуска за один или несколько продольных ходов резца.

2. Предложена расчетная схема стружкообразования при резании материалов и на ее основе аналитически определены основные параметры силовой напряженности процесса: составляющие силы резания, условное напряжение резания, длина контакта образующейся стружки с передней поверхностью инструмента и составляющие контактного напряжения, действующего на передней поверхности инструмента. Обоснованы условия снижения силовой напряженности процесса резания, состоящие главным образом в увеличении условного угла сдвига материала за счет уменьшения условного угла трения обрабатываемого материала с передней поверхностью инструмента (коэффициента трения обрабатываемого и инструментального материалов) и увеличения переднего угла инструмента.

3. Разработана математическая модель определения энергоемкости обработки при шлифовании. Расчетами установлена определяющая роль процесса трения связки круга с материалом в общем энергетическом балансе при шлифовании и сформулированы необходимые и достаточные условия уменьшения энергоемкости обработки. Они состоят в обеспечении высокой режущей способности шлифовального круга. Теоретически установлено, что при шлифовании прямолинейного образца, движущегося по нормали к кругу, энергоемкость обработки во много раз больше, чем при плоском шлифовании. Следовательно, эффективно подачу при шлифовании осуществлять не по нормали к кругу, а по касательной к ней. Это позволяет уменьшить упругое перемещение в технологической системе, интенсивность трения связки круга с материалом, энергоемкость обработки, температуру резания и повысить производительность обработки.

4. Проведен теоретический анализ возможностей повышения точности и производительности при многопроходной обработке. Установлено, что с увеличением количества проходов круга при шлифовании величина упругого перемещения увеличивается, асимптотически приближаясь к установившемуся значению. Данное условие можно реализовать в начальный момент обработки, создавая в технологической системе натяг, равный установившемуся значению упругого перемещения. Это позволит исключить переходной процесс в технологической системе и повысить точность и производительность обработки.

5. Произведена оптимизация структуры технологического процесса съема припуска по критерию наименьшего основного времени обработки с учетом ограничения по точности обработки. Расчетами установлено, что при съеме припуска за несколько переходов основное время обработки принимает экстремальное (минимальное) значение, которое с увеличением количества переходов уменьшается. Наименьшее основное время обработки достигается при изменении количества переходов от 1 до 3 – 4. Расчетами установлено, что по длительности все переходы одинаковы, также как и отношения величин упругих перемещений, возникающих на предшествующем и последующем переходах. Следовательно, с каждым последующим переходом величина упругого перехода убывает по геометрической прогрессии, повышая тем самым точность обработки.

6. Произведена оптимизация структуры и параметров операций круглого наружного шлифования валов приводов шахтных конвейеров по критерию наименьшего основного времени обработки с учетом ограничения по точности обработки. Установлено, что для обеспечения суммарного уточнения в пределах 2,72 ... 55 (реализуемых на практике) оптимальная по структуре операция круглого наружного врезного шлифования должна включать 1 ... 4 перехода. Полученное решение справедливо и в случае, если рассматривать вместо переходов технологические операции. Этим объясняется то, что на практике технологический процесс механической обработки конкретной поверхности детали включает, как правило, до 4 – 5 операций.

7. Проведена оптимизация структуры и параметров операции круглого продольного шлифования по критерию наименьшего основного времени обработки с учетом ограничения по точности размера обрабатываемой поверхности, обусловленной упругими перемещениями в технологической системе. Доказано, что ее целесообразно выполнять в два перехода (черновое шлифование и выхаживание) с одинаковой на каждом проходе круга, максимально достижимой на станке скоростью продольной подачи. Первый переход целесообразно осуществлять за один проход круга с глубиной шлифования, равной величине снимаемого припуска. Установлено, что наиболее высокопроизводительной операцией шлифования цилиндрических поверхностей, обеспечивающей высокую точность обработки является шлифование последовательными врезаниями – с радиальной подачей уступами.

Раздел 5

Управление интенсивностью автоколебаний и вынужденных колебаний при механической обработке

5.1. Условия возбуждения автоколебаний при механической обработке

При резании материалов в результате интенсивного механического взаимодействия режущего инструмента с обрабатываемой деталью происходят различного рода динамические процессы (автоколебания, вынужденные колебания и т.д.), которые вызывают снижение точности, качества и производительности обработки, приводят к преждевременному выходу из строя инструмента. Этим объясняются многочисленные исследования, посвященные проблеме динамики резания материалов [4; 28; 39; 41; 51; 55; 72; 97; 101; 102; 112; 119; 120]. Однако, многие важные задачи динамики резания материалов до настоящего времени не решены. Например, отсутствует единая точка зрения относительно причин возникновения автоколебаний при резании. Окончательно не изучены причины пониженной стойкости режущего инструмента при его ударном взаимодействии с обрабатываемым материалом в условиях прерывистого резания и т.д. Все это свидетельствует об актуальности дальнейших исследований динамики процесса резания материалов.

В теории резания материалов принято считать, что самовозбуждение высокочастотных колебаний (автоколебаний) происходит в связи с падающей характеристикой силы резания-трения от скорости или отставанием роста силы резания во времени от роста толщины среза. Для анализа причин возбуждения автоколебаний следует рассмотреть динамическую модель, приведенную в работе [97].

Модель состоит из двух вращающихся с одинаковыми угловыми скоростями ω барабанов, приводящих в движение бесконечную ленту (рис. 5.1,а). Скорость ее движения V_0 следует считать неизменной. На ленте лежит груз массой m , движение которого ограничено пружиной жесткостью c . Под действием силы трения груз смещается вправо и вызывает некоторое удлинение пружины. Предполагая, что в положе-

нии равновесия груза сила трения равна R_0 , статистическое смещение груза определяется зависимостью:

$$x_0 = \frac{R_0}{c}. \quad (5.1)$$

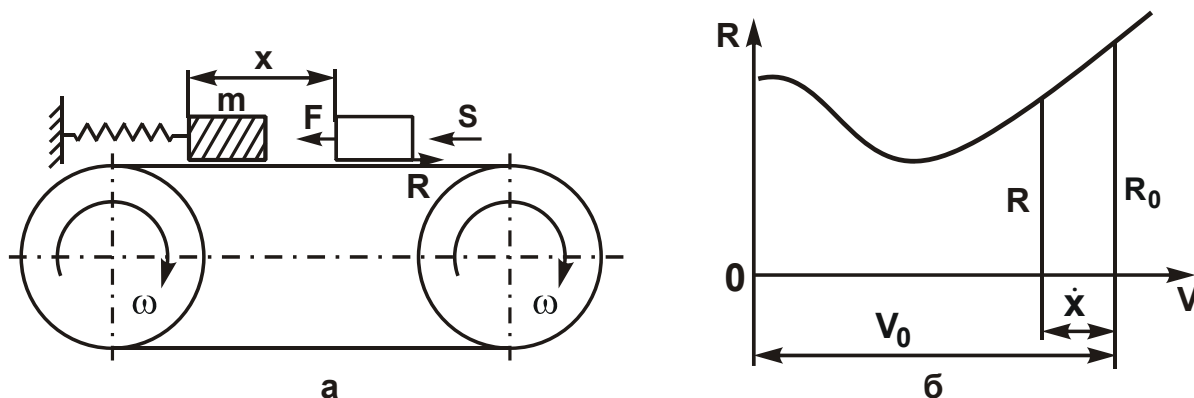


Рис. 5.1. Расчетные схемы параметров автоколебаний

В общем случае сила трения R_0 зависит от относительной скорости движения V . Характеристика трения показана на рис. 5.1,б (значения V_0 и R_0 соответствуют состоянию равновесия груза).

Принимая, что вследствие какого-то возмущения в мгновение $\tau = 0$ груз выведен из состояния покоя, в произвольное мгновение $\tau > 0$ дополнительное смещение груза будет равно x . Тогда абсолютная скорость равна \dot{x} , а скорость скольжения груза относительно ленты $V = V_0 - \dot{x}$.

В процессе движения на груз действуют три силы: реакция пружины $-c \cdot (x + x_0)$, сила трения $+R$ и внешнее сопротивление $-k_1 \cdot \dot{x}$, которое можно считать пропорциональным абсолютной скорости. Дифференциальное уравнение движения груза m имеет вид:

$$-c \cdot (x + x_0) - k_1 \cdot \dot{x} + R = m \cdot \ddot{x}. \quad (5.2)$$

Значение входящей в дифференциальное уравнение силы трения R отличается от равновесного значения силы трения R_0 , поскольку скорость относительного движения отличается от скорости V_0 . При малых значениях относительной скорости логично воспользоваться линейным выражением:

$$R = R_0 - R'_0 \cdot \dot{x}, \quad (5.3)$$

где R'_0 – тангенс угла наклона характеристики трения в точке с координатами x_0, R_0 .

С учетом выражения (5.3) дифференциальное уравнение (5.2) примет вид:

$$m\ddot{x} + (R'_0 + k_1) \cdot \dot{x} + cx = 0. \quad (5.4)$$

Здесь сумма $(R'_0 + k_1)$ играет роль эффективного коэффициента вязкого трения. Если эта сумма положительна, то с течением времени колебания постепенно затухают. Данная закономерность имеет место, если точка (x_0, R_0) расположена на восходящем участке характеристики трения, где $R'_0 > 0$.

На падающем участке характеристики трения (при небольших значениях V_0) величина R'_0 становится отрицательной (рис. 5.1,б) и если сумма $(R'_0 + k_1)$ обращается в нуль, то в дифференциальном уравнении (5.4) исчезает составляющая, определяющая процесс затухание. Возмущенное движение представляет собой гармонические колебания. Если же сумма $(R'_0 + k_1)$ окажется отрицательной, то колебания около положения равновесия с течением времени будут увеличиваться, как это показано на рис. 5.2. В этом случае система обладает как бы отрицательным затуханием.

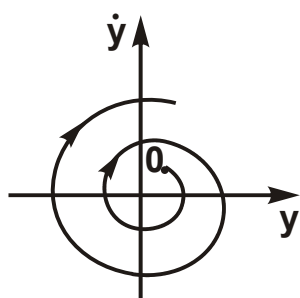


Рис. 5.2. Зависимость \dot{y} от y

Природу отрицательного затухания на падающей характеристике трения можно объяснить следующим образом. Когда груз движется вправо, т.е. в сторону движения ленты, то относительная скорость движения уменьшается. Вместе с этим, сила трения увеличивается и ее приращение направлено вправо, т.е. в сторону движения. В другом интервале движения, когда груз движется влево, приращение силы трения направлено также влево, т.е. в сторону движения. Такой характер изменения силы трения и является причиной возрастания колебаний.

Итак, для устойчивости состояния равновесия груза на ленте необходимо выполнение условия $R'_0 + k_1 > 0$. Обычно при слишком малых значениях скорости V_0 это условие выполняется.

Применим известное в теории колебаний решение для анализа причин возбуждения автоколебаний. При резании металла со стороны обрабатываемой детали на резец действует сила резания P , которая может быть разложена на две составляющие P_y и P_z (рис. 5.3). По-

сколькx резец упруго закреплен, то его вершина может совершать колебания как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях.

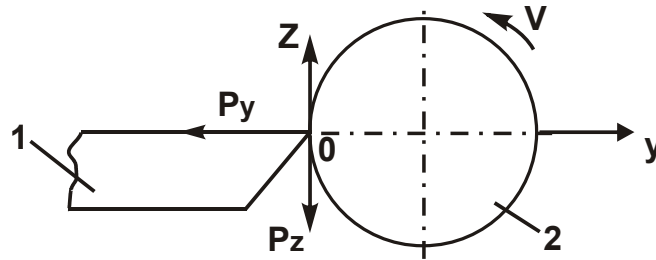


Рис. 5.3. Расчетная схема процесса резания металла:
1 – резец; 2 – обрабатываемая деталь

Важно рассмотреть колебания в направлении оси $y = y(\tau)$, учитывая, что радиальная составляющая силы резания P_y зависит от скорости колебаний резца y (рис. 4.4). Таким образом, на резец действуют три силы: сила упругости $-c \cdot y$ системы резец – суппорт, радиальная составляющая силы резания $-P_y(y)$ и сумма различных неупругих сопротивлений, которая может быть объединена в одно слагаемое вида $-k_1 \cdot \dot{y}$. Тогда дифференциальное уравнение системы резец – суппорт имеет вид:

$$-P_y(\dot{y}) - c \cdot y - k_1 \cdot \dot{y} = m \cdot \ddot{y}, \quad (5.5)$$

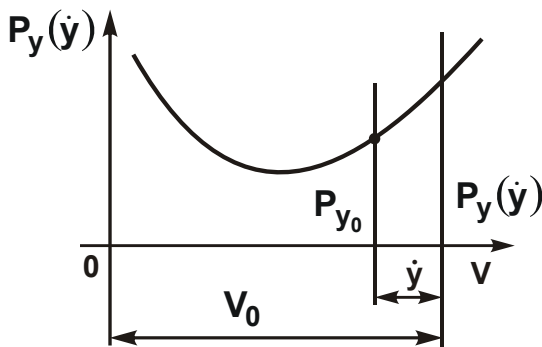


Рис. 5.4. Зависимость $P_y(\dot{y})$ от скорости движения V

где m – приведенная масса системы резец – суппорт.

Для выполнения расчетов принято, что скорость движения сходящей стружки по передней поверхности резца равна V_0 , а абсолютная скорость колебания резца $-\dot{y}$. Тогда скорость скольжения резца относительно стружки равна $V = V_0 + \dot{y}$ (при движении резца в положительном направлении оси y) и $V = V_0 - \dot{y}$ (при движении резца в отрицательном направлении оси y).

Исходя из рис. 5.4, радиальную составляющую силы резания $P_y(y)$ можно представить линейным выражением:

$$P_y(\dot{y}) = P_{y_0} + P'_{y_0} \cdot \dot{y}, \quad (5.6)$$

где P_{y_0} – значение силы $P_y(\dot{y})$, соответствующее состоянию равновесия резца при скорости V_0 ;

P'_{y_0} – тангенс угла наклона характеристики трения в точке с координатами P_{y_0} и y_0 ;

y_0 – статистическое смещение резца, м.

С учетом величины y_0 силу упругости $-c \cdot y$ в дифференциальном уравнении (5.5) следует представить в виде $-c(y - y_0)$. Подставляя выражение (5.6) в дифференциальное уравнение (5.5), с учетом $P_{y_0} = c \cdot y_0$, имеем:

$$m \cdot \ddot{y} + (P'_{y_0} + k_1) \cdot \dot{y} + c \cdot y = 0. \quad (5.7)$$

В результате получено дифференциальное уравнение, идентичное дифференциальному уравнению (5.4). Неустойчивость системы имеет место при $P'_{y_0} + k_1 < 0$, т.е. при отрицательном значении P'_{y_0} (на падающем участке характеристики трения, рис. 5.4).

Радиальную составляющую силы резания P_y можно представить:

$$P_y = \frac{P_z}{K_{рез}}, \quad (5.8)$$

где $K_{рез}$ – коэффициент резания (для резца с передним углом $\gamma = 0^\circ$ $K_{рез} = 1/f$);

f – коэффициент трения образующейся стружки с передней поверхностью резца).

Соответственно тангенциальную составляющую силы резания P_z можно представить зависимостью [131]:

$$P_z = \sigma \cdot F, \quad (5.9)$$

где $\sigma = 2 \cdot \sigma_{сж} / K_{рез}$ – условное напряжение резания, Н/м^2 ;

$\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м^2 ;

F – площадь поперечного сечения среза, м^2 .

С учетом (5.9) зависимость (5.8) примет вид:

$$P_y = 2 \cdot \sigma_{сж} \cdot f^2 \cdot F. \quad (5.10)$$

Предположим, коэффициент трения f в зависимости от скорости V изменяется по закону, показанному на рис. 5.4. На падающем участке характеристики трения коэффициент f можно представить линейным выражением:

$$f = f_0 - f'_0 \cdot \dot{y}, \quad (5.11)$$

тогда

$$P_y(\dot{y}) = 2 \cdot \sigma_{сж} \cdot F \cdot (f_0 - f'_0 \cdot \dot{y})^2, \quad (5.12)$$

где f_0 – значение коэффициента трения f , соответствующее состоянию равновесия резца при скорости V_0 ;

f'_0 – тангенс угла наклона характеристики трения в точке с координатами f_0 и y_0 .

Подставляя зависимость (5.12) в дифференциальное уравнение (5.5) и рассматривая вместо $-c \cdot y$ слагаемое $-c \cdot (y - y_0)$, имеем:

$$m \cdot \ddot{y} + (-4 \cdot \sigma_{сж} \cdot F \cdot f'_0 + k_1) \cdot \dot{y} + 2 \cdot \sigma_{сж} \cdot F \cdot f_0'^2 \cdot \dot{y}^2 + c \cdot y = 0. \quad (5.13)$$

Как видно, при условии $(-4 \cdot \sigma_{сж} \cdot F \cdot f'_0 + k_1) < 0$ имеет место неустойчивость системы. Система будет совершать незатухающие колебания. Для того чтобы их устранить, необходимо или увеличить второе слагаемое $-k_1$, или уменьшить первое слагаемое $-4 \cdot \sigma_{сж} \cdot F \cdot f'_0$ путем уменьшения параметров F и f'_0 . В общем случае $F = a \cdot b$, где a и b соответственно толщина и ширина среза, м.

Дифференциальное уравнение (5.13) является нелинейным дифференциальным уравнением, описывающим автоколебания системы. Амплитуду колебаний A можно определить методом энергетического баланса, предполагая, что стационарные автоколебания можно приближенно описать гармоническим законом:

$$y = A \cdot \sin k\tau, \quad (5.14)$$

где $k = \sqrt{c/m}$ – собственная частота системы, c^{-1} ;

τ – время, с.

Примем, что сумма слагаемых, входящих в дифференциальное уравнение (5.13) и зависящих от скорости \dot{y} , равна нулю, т.е.

$$(-4 \cdot \sigma_{сж} \cdot F \cdot f'_0 + k_1) \cdot \dot{y} + 2 \cdot \sigma_{сж} \cdot F \cdot f_0'^2 \cdot \dot{y}^2 = 0. \quad (5.15)$$

Поставляя выражение $\dot{y} = A \cdot k \cdot \cos k\tau$ в уравнение (5.15) при условии $\tau = 0$, имеем:

$$A = \frac{1}{k} \cdot \left(\frac{2}{f'_0} - \frac{k_1}{2 \cdot \sigma_{сж} \cdot F \cdot f_0'^2} \right). \quad (5.16)$$

Как видно, амплитуда установившихся колебаний A тем меньше, чем больше собственная частота системы k , коэффициент сопротивления системы k_1 и меньше площадь поперечного сечения среза F .

Величина f'_0 оказывает неоднозначное влияние на амплитуду колебаний A . Для определения экстремума следует продифференцировать амплитуду колебаний A по величине f'_0 и полученное выражение

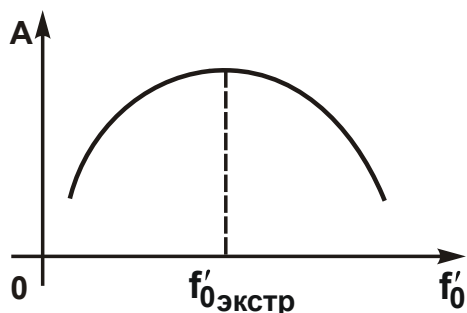


Рис. 5.5. Зависимость A от f'_0

приравнять к нулю, тогда

$$f'_{0\text{экстр}} = \frac{k_1}{2 \cdot \sigma_{\text{сж}} \cdot F}; \quad (5.17)$$

$$A_{\text{экстр}} = \frac{2 \cdot \sigma_{\text{сж}} \cdot F}{k \cdot k_1}. \quad (5.18)$$

Вторая производная от амплитуды колебаний A по величине f'_0 в точке экстремума отрицательна, следовательно, амплитуда колебаний A имеет максимум (рис. 5.5).

Уменьшить амплитуду колебаний A можно уменьшением $f'_0 \rightarrow 0$, исключая падающий участок характеристики трения (рис. 5.4). Уменьшение $A_{\text{экстр}}$, согласно зависимости (5.18), предполагает уменьшение параметров $\sigma_{\text{сж}}$, F и увеличение k и k_1 . Полученное решение следует рассматривать в качестве первого приближения, так как оно основано на линейной зависимости (5.11). В действительности функцию f необходимо рассматривать нелинейной. Параметр $F = a \cdot v$ определяется схемой процесса резания.

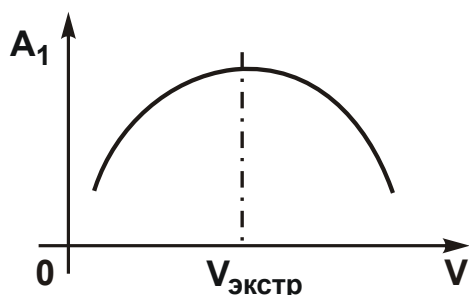


Рис. 5.6. Зависимость A_1 от V

При радиальном точении (рис. 5.6) толщина среза a определяется из соотношения:

$$\tau = \frac{a}{S_{\text{рад}}} = \frac{\pi \cdot D}{V}, \quad (5.19)$$

откуда

$$a = \pi \cdot D \cdot \frac{S_{\text{рад}}}{V}, \quad (5.20)$$

где τ – время одного вращения обрабатываемой детали, с;

D – диаметр детали, м;

V – скорость резания, м/с;

$S_{\text{рад}}$ – скорость радиальной подачи, м/с.

Подставляя зависимость (5.20) в (5.10), получено:

$$P_y = 2 \cdot \sigma_{сж} \cdot f^2 \cdot v \cdot \pi \cdot D \cdot \frac{S_{рад}}{V}. \quad (5.21)$$

Предположим, коэффициент трения f не зависит от скорости (т.е. отсутствует падающий участок характеристики трения, рис. 5.5), а фактическая скорость радиальной подачи $S_{рад}$ с учетом скорости колебаний резца \dot{y} равна $S_{рад} + \dot{y}$ (при движении резца в положительном направлении оси y , рис. 5.3). Тогда

$$P_y = 2 \cdot \sigma_{сж} \cdot f^2 \cdot v \cdot \pi \cdot D \cdot \frac{(S_{рад} + \dot{y})}{V}. \quad (5.22)$$

Подставляя зависимость (5.22) в дифференциальное уравнение (5.5), и исключая слагаемые, определяющие статическое равновесие системы, получено:

$$m \cdot \ddot{y} + \left(2 \cdot \sigma_{сж} \cdot f^2 \cdot v \cdot \pi \cdot D \cdot \frac{1}{V} + k_1 \right) \cdot \dot{y} + c \cdot y = 0. \quad (5.23)$$

В данном случае коэффициент при переменной \dot{y} положительный. Следовательно, система совершает затухающие колебания. Из этого можно сделать вывод, что изменение толщины среза за счет периодического изменения скорости радиальной подачи не является источником возбуждения незатухающих колебаний.

Из зависимости (5.21) следует, что с увеличением скорости резания V радиальная составляющая силы резания P_y уменьшается. Это, по сути, аналогично падающему участку характеристики трения (рис. 5.4), который является источником возникновения в системы автоколебаний. С учетом колебаний резца со скоростью \dot{z} в тангенциальном направлении, т.е. в направлении оси z (рис. 5.3), радиальная P_y и тангенциальная P_z составляющие силы резания опишутся:

$$P_y = 2 \cdot \sigma_{сж} \cdot f^2 \cdot v \cdot \pi \cdot D \cdot \frac{S_{рад}}{(V + \dot{z})}; \quad (5.24)$$

$$P_z = 2 \cdot \sigma_{сж} \cdot f \cdot v \cdot \pi \cdot D \cdot \frac{S_{рад}}{(V + \dot{z})}. \quad (5.25)$$

Следует оценить возможности возникновения незатухающих колебаний в направлении оси z под действием переменной силы P_z , которую представлено в виде:

$$P_z = 2 \cdot \sigma_{сж} \cdot f \cdot v \cdot \pi \cdot D \cdot \frac{S_{рад}}{V} \cdot \left[1 - \left(\frac{\dot{z}}{V} \right) + \left(\frac{\dot{z}}{V} \right)^2 - \left(\frac{\dot{z}}{V} \right)^3 + \dots \right]. \quad (5.26)$$

Характер колебаний в направлении оси z описывается дифференциальным уравнением (5.5), рассматривая в нем вместо переменной y переменную z , а вместо силы P_y – силу P_z . Исключая из дифференциального уравнения слагаемые, определяющие статическое равновесие системы, получено:

$$m \cdot \ddot{z} + \left(-\frac{P_{z_1}}{V} + k_1 \right) \cdot \dot{z} + \frac{P_{z_1}}{V^2} \cdot \dot{z}^2 - \frac{P_{z_1}}{V^3} \cdot \dot{z}^3 + c \cdot z = 0, \quad (5.27)$$

где $P_{z_1} = 2 \cdot \sigma_{сж} \cdot f \cdot v \cdot \pi \cdot D \cdot \frac{S_{рад}}{V}$.

При условии $\left(-\frac{P_{z_1}}{V} + k_1 \right) < 0$ система находится в неустойчивом

состоянии – совершает автоколебания. Это обусловлено нелинейностью дифференциального уравнения (5.27). Таким образом, изменение толщины среза может возбудить незатухающие колебания резца в тангенциальном направлении.

Определим амплитуду установившихся колебаний A_1 , используя метод энергетического баланса и предполагая, что система совершает гармонические колебания

$$z = A_1 \cdot \sin k\tau, \quad (5.28)$$

где k – собственная частота системы, c^{-1} .

Подставляя выражение $\dot{z} = A_1 \cdot k \cdot \cos k\tau$ при условии $\tau = 0$ в уравнение (5.27), получено:

$$\left(\frac{-P_{z_1}}{V} + k_1 \right) \cdot \dot{z} + \frac{P_{z_1}}{V^2} \cdot \dot{z}^2 - \frac{P_{z_1}}{V^3} \cdot \dot{z}^3 = 0. \quad (5.29)$$

Ограничиваясь первыми двумя слагаемыми в (5.29), в первом приближении, имеем:

$$A_1 = \frac{1}{k} \left(V - \frac{k_1 \cdot V^2}{P_{z_1}} \right) = \frac{1}{k} \left(V - \frac{k_1 \cdot V^3}{2 \cdot \sigma_{сж} \cdot f \cdot v \cdot \pi \cdot D \cdot S_{рад}} \right). \quad (5.30)$$

Уменьшить амплитуду колебаний A_1 можно увеличением k , k_1 и уменьшением P_{z_1} путем уменьшения параметров f , v , D , $S_{рад}$. С изменением скорости резания V амплитуда колебаний A_1 изменяется по экстремальной зависимости.

Экстремальные значения V и A_1 равны:

$$V_{\text{экстр}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \sigma_{\text{сж}} \cdot f \cdot v \cdot \pi \cdot D \cdot S_{\text{рад}}}{3 \cdot k_1}}; \quad (5.31)$$

$$A_{1\text{экстр}} = \frac{2}{3 \cdot k} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \sigma_{\text{сж}} \cdot f \cdot v \cdot \pi \cdot D \cdot S_{\text{рад}}}{3 \cdot k_1}}. \quad (5.32)$$

Вторая производная функции A_1 по V в точке экстремума $V = V_{\text{экстр}}$ отрицательна, следовательно, имеет место максимум функций A_1 (рис. 5.3).

Уменьшить амплитуду колебаний A_1 можно уменьшением ($V < V_{\text{экстр}}$) и увеличением ($V > V_{\text{экстр}}$) скорости резания V . Решение получено для переднего угла инструмента $\gamma = 0^\circ$.

Если $\gamma \neq 0^\circ$, то коэффициент резания $K_{\text{рез}}$ необходимо рассматривать в виде:

$$K_{\text{рез}} = \frac{1}{\text{tg}(\psi - \gamma)}, \quad (5.33)$$

где ψ – условный угол трения на передней поверхности инструмента ($\text{tg}\psi = f$ – коэффициент трения).

Во всех вышеприведенных зависимостях для определения радиальной P_y и тангенциальной P_z составляющих силы резания коэффициент трения f необходимо заменить выражением $\text{tg}(\psi - \gamma)$, преобразованным к виду:

$$\text{tg}(\psi - \gamma) = \frac{\text{tg}\psi - \text{tg}\gamma}{1 + \text{tg}\psi \cdot \text{tg}\gamma} = \frac{f - \text{tg}\gamma}{1 + f \cdot \text{tg}\gamma}. \quad (5.34)$$

При условии $\gamma = 0^\circ$ справедлива зависимость $\text{tg}(\psi - \gamma) = f$, что соответствует начальному выражению $K_{\text{рез}} = 1/f$ для $\gamma = 0^\circ$.

Заменяя в зависимостях (5.31) и (5.32) коэффициент трения f выражением $\text{tg}(\psi - \gamma)$, имеем:

$$V_{\text{экстр}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \sigma_{\text{сж}} \cdot \text{tg}(\psi - \gamma) \cdot v \cdot \pi \cdot D \cdot S_{\text{рад}}}{3 \cdot k_1}}; \quad (5.35)$$

$$A_{1\text{экстр}} = \frac{2}{3 \cdot k_1} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \sigma_{\text{сж}} \cdot \text{tg}(\psi - \gamma) \cdot v \cdot \pi \cdot D \cdot S_{\text{рад}}}{3 \cdot k_1}}. \quad (5.36)$$

Как видно, чем больше угол ψ и меньше угол γ , тем больше скорость резания $V_{\text{экстр}}$ и амплитуда колебаний $A_{1\text{экстр}}$. При увеличении отрицательного переднего угла γ режущего инструмента параметры $V_{\text{экстр}}$ и $A_{1\text{экстр}}$ неограниченно увеличиваются, поскольку $\text{tg}(\psi + \gamma) \rightarrow \infty$ согласно зависимости (5.34). Следовательно при резании необходимо уменьшать угол $(\psi - \gamma)$ путем уменьшения коэффициента трения на передней поверхности режущего инструмента f (угла трения ψ) и увеличения положительного переднего угла режущего инструмента γ (в том числе регулируя степень затупления лезвия инструмента).

Рассмотрим условия возникновения колебаний при шлифовании. Тангенциальная составляющая силы резания P_z с учетом зависимости (5.9) определяется:

$$P_z = \sigma \cdot S_{\text{сум}} = \frac{2 \cdot \sigma_{\text{сж}}}{K_{\text{рез}}} \cdot \frac{Q}{V_{\text{кр}}}, \quad (5.37)$$

где $S_{\text{сум}} = Q / V_{\text{кр}}$ – суммарная мгновенная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зернами шлифовального круга, м;

Q – производительность обработки, м³/с;

$V_{\text{кр}}$ – скорость круга, м/с.

При круглом шлифовании периферией круга производительность обработки Q равна

$$Q = S_0 \cdot V_{\text{дет}} \cdot t, \quad (5.38)$$

где S_0 – продольная подача, м/об. (ширина шлифования, м);

$V_{\text{дет}}$ – скорость детали, м/с;

t – глубина шлифования, м.

При условии возникновения колебаний в тангенциальном направлении со скоростью \dot{z} могут измениться фактические значения скоростей детали $(V_{\text{дет}} + \dot{z})$ и круга $(V_{\text{кр}} + \dot{z})$. В этом случае зависимость (5.37) примет вид:

$$P_z = \frac{2 \cdot \sigma_{\text{сж}}}{K_{\text{рез}}} \cdot \frac{S_0 \cdot t \cdot (V_{\text{дет}} + \dot{z})}{(V_{\text{кр}} + \dot{z})}. \quad (5.39)$$

Как показано выше, изменение скорости детали $V_{\text{дет}}$, стоящей в числителе зависимости, не приведет к возбуждению незатухающих

колебаний. Колебания могут возникнуть в связи с изменением знаменателя зависимости ($V_{кр} + \dot{z}$). По аналогии с полученным решением, описываемым зависимостями (5.26) – (5.32), экстремальные значения скорости круга $V_{кр.экстр}$ и амплитуды автоколебаний $A_{1экстр}$ опишутся:

$$V_{кр.экстр} = \sqrt{\frac{2 \cdot \sigma_{сж} \cdot S_0 \cdot t \cdot V_{дет}}{K_{рез} \cdot 3 \cdot k_1}}; \quad (5.40)$$

$$A_{1экстр} = \frac{2}{3 \cdot k} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \sigma_{сж} \cdot S_0 \cdot t \cdot V_{дет}}{K_{рез} \cdot 3 \cdot k_1}}. \quad (5.41)$$

Уменьшить амплитуду колебаний $A_{1экстр}$ можно увеличением собственной частоты системы k , коэффициента сопротивления k_1 , коэффициента резания $K_{рез}$ и уменьшением производительности обработки $Q = S_0 \cdot V_{дет} \cdot t$.

Коэффициент резания $K_{рез}$ при шлифовании описывается [51]:

$$K_{рез} = \sqrt[3]{2 \cdot \frac{a}{\rho} \cdot \frac{\tau_{сдв}}{HV}}, \quad (5.42)$$

где a – толщина среза отдельным зерном круга, м;

ρ – радиус округления вершины режущего зерна, м;

$\tau_{сдв}$, HV – предел прочности на сдвиг и твердость (по Виккерсу) обрабатываемого материала, Н/м².

Увеличить коэффициент резания $K_{рез}$ можно увеличением толщины среза a и уменьшением радиуса округления вершины режущего зерна ρ . Однако, увеличение толщины среза a предполагает увеличение производительности обработки, что нежелательно с точки зрения уменьшения амплитуды автоколебаний.

Следовательно, необходимо уменьшать радиус округления вершины режущего зерна ρ , например: принудительно удаляя с поверхности круга затупившиеся зерна (методом правки круга); применяя в качестве абразива синтетические сверхтвердые материалы (СТМ), обладающие высокой остротой режущих кромок, а также применяя относительно мягкие связки круга, исключая затупление режущих зерен в связи с низкой прочностью удержания их в круге, и эффективные технологические среды, обеспечивающие повышение режущей

способности круга за счет уменьшения предельных значений a/ρ , при которых начинается процесс резания.

Для сталей справедливо условие $\sigma_{сж} \approx 2 \cdot \tau_{сдв}$. Следовательно, амплитуда автоколебаний тем больше, чем больше предел прочности на сжатие $\sigma_{сж}$ и твердость HV обрабатываемого материала. Этим объясняется установленный на практике более высокий уровень колебаний (вибраций) при шлифовании труднообрабатываемых материалов, характеризующихся увеличенными значениями $\sigma_{сж}$ и HV.

5.2. Анализ колебаний, возникающий от трения задней поверхности режущего инструмента с обрабатываемым материалом

Практика обработки материалов резанием показывает, что возбуждение незатухающих колебаний происходит, как правило, по мере затупления режущего инструмента. В связи с этим важно проанализировать влияние величины площадки износа инструмента (резца) по задней поверхности на условия возникновения колебаний.

Для этого рассмотрим упрощенную динамическую модель инструмента в виде одномассовой системы, которая совершает движение под действием силы упругости системы $-c \cdot z$; силы сопротивления $-k_1 \cdot \dot{z}$; тангенциальной составляющей силы резания, действующей на передней (P_{z1}) и задней (P_{z2}) поверхностях режущего инструмента (рис. 5.7):

$$-c \cdot z - k_1 \cdot \dot{z} + P_{z1} + P_{z2} = m \cdot \ddot{z}, \quad (5.43)$$

где c, m – приведенные жесткость (Н/м) и масса системы (кг);

k_1 – коэффициент пропорциональности;

z, \dot{z}, \ddot{z} – перемещение (м), скорость (м/с) и ускорение (м/с²)

движения системы;

$P_{z2} = P_{y2} \cdot f$; $P_{y2} = F \cdot q$ – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания (сила трения), действующей на задней поверхности режущего инструмента, Н;

$F = v \cdot h$ – площадь контакта задней поверхности режущего инструмента с обрабатываемым материалом, м²;

h – величина износа инструмента по задней поверхности, м;

v – ширина среза, м;

q – радиальное давление, действующее на задней поверхности режущего инструмента, Н/м²;

HV – твердость обрабатываемого материала (по Виккерсу), Н/м²;

f – коэффициент трения задней поверхности режущего инструмента с обрабатываемым материалом.

В расчетной схеме опора режущего инструмента a неподвижна, обрабатываемая деталь движется со скоростью резания (скольжения) V .

Как известно, коэффициент трения f зависит от скорости скольжения режущего инструмента по обрабатываемому материалу и изменяется по закону, показанному на рис. 5.8. Предположим, что в окрестности состояния равновесия в слабо нелинейных системах (при определенной скорости резания V_0) коэффициент трения f можно представить суммой [97]:

$$f = f_0 - f'_0 \cdot \dot{z} + f''_0 \cdot \frac{\dot{z}^2}{2} - f'''_0 \cdot \frac{\dot{z}^3}{6} + \dots, \quad (5.44)$$

где f_0 , f'_0 , f''_0 , f'''_0 – значения функции f и ее производных по скорости резания.

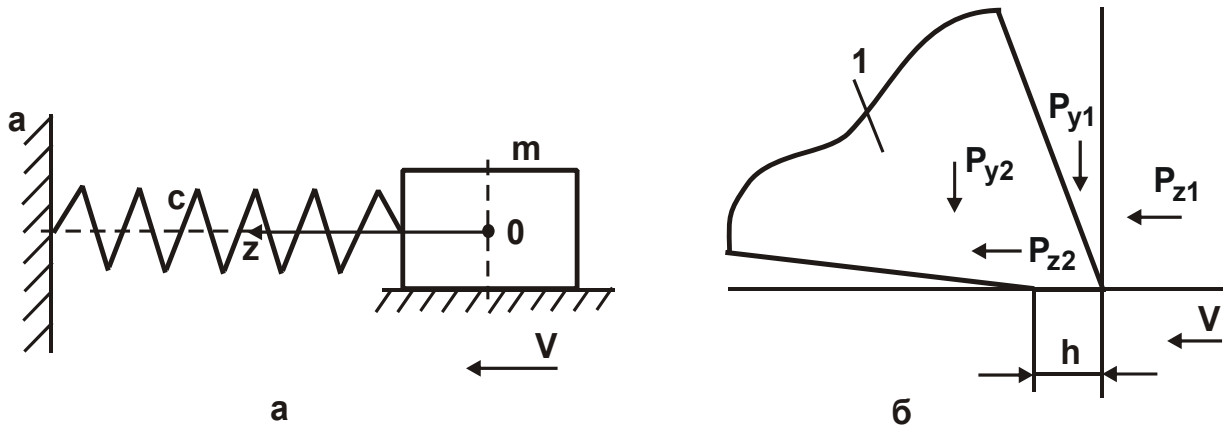


Рис. 5.7. Расчетная схема (а) и система сил, действующих на резец:
1 – резец

Подставляя выражение (5.44) в дифференциальное уравнение (5.43), с учетом $z_0 = \frac{P_{z1} + P_{z20}}{c}$ и $\bar{z} = z - z_0$, имеем:

$$m \cdot \ddot{\bar{z}} + (P'_{z20} + k_1) \cdot \dot{\bar{z}} - P''_{z20} \cdot \frac{\bar{z}^2}{2} + P'''_{z20} \cdot \frac{\bar{z}^3}{6} + c \cdot \bar{z} = 0, \quad (5.45)$$

где $P'_{z20} = P_{y2} \cdot f'_0$; $P''_{z20} = P_{y2} \cdot f''_0$; $P'''_{z20} = P_{y2} \cdot f'''_0$.

В результате получено нелинейное дифференциальное уравнение, описывающее движение массы m . Сумма $(P'_{z20} + k_1)$ играет роль

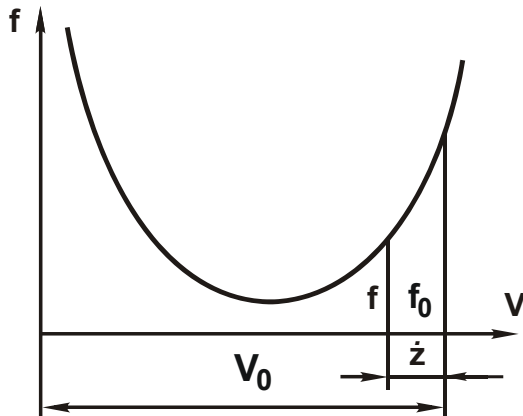


Рис. 5.8. Зависимость f от V

эффективного коэффициента вязкого трения. При положительном значении этой суммы колебания массы m с течением времени будут затухать. Положительное значение P'_{z20} достигается на правой ветви зависимости (рис. 5.8).

При условии $(P'_{z20} + k_1 < 0)$ вязкое трение в системе отсутствует и масса m совершает незатухающие колебания (автоколебания). Этот случай возможен при отрицательном значении P'_{z20} , т.е. на левой ветви зависимости (рис. 5.8).

Для решения уравнения (5.45) следует принять, что масса m совершает стационарные автоколебания по гармоническому закону $\dot{z} = A \cdot \sin kt$ с частотой свободных колебаний $k = \sqrt{c/m}$.

По методике, основанной на методе энергетического баланса и приведенной в работе [97], определена амплитуда автоколебаний:

$$A = \frac{2}{k} \cdot \sqrt{\frac{-2 \cdot (P'_{z20} + k_1)}{P'''_{z20}}}, \quad (5.46)$$

где P'''_{z20} – третья производная функции P_{z20} .

При отрицательном значении $(P'_{z20} + k_1)$, что соответствует неустойчивости системы, и при положительном значении P'''_{z20} подкоренное выражение (5.46) примет положительное значение. В этом случае система будет совершать автоколебания с амплитудой A , которая тем больше, чем больше значение $(P'_{z20} + k_1)$ и меньше собственная частота системы k . Далее необходимо проанализировать величину

$$(P'_{z20} + k_1) = (b \cdot h \cdot HV \cdot f'_0 + k_1) \quad (5.47)$$

при отрицательном значении f'_0 .

По мере износа режущего инструмента по задней поверхности (увеличении величины h) параметр P'_{z20} с течением времени увеличи-

вается. В начальный момент обработки (при относительно небольших значениях h) выполняется условие $(P'_{z20} + k_1) > 0$ и автоколебания не возбуждаются. По мере увеличения параметров h и P'_{z20} возможно выполнение условия $(P'_{z20} + k_1) < 0$ и в системе возникнут автоколебания с увеличивающейся во времени амплитудой. В конечном итоге это приведет к прекращению процесса резания или поломке режущего инструмента. Чем больше параметры b , HV , f_0 , тем быстрее во времени увеличивается амплитуда автоколебаний.

С увеличением скорости резания в связи с увеличением температуры резания интенсивность износа режущего инструмента по задней поверхности увеличивается, что приводит к увеличению параметров h , P'_{z20} и, соответственно, амплитуды колебаний A . Данная закономерность справедлива для левой ветви зависимости (рис. 5.8). При скоростях резания, реализующих правую ветвь зависимости, автоколебания отсутствуют. Следовательно, с увеличением скорости резания амплитуда автоколебаний первоначально увеличивается, затем уменьшается до нуля, проходя точку максимума.

С уменьшением переднего угла режущего инструмента, как известно, увеличиваются сила резания, действующая на задней поверхности инструмента, и скорость его износа. Это приводит к увеличению параметров h , P'_{z20} и амплитуды колебаний A , особенно при резании инструментом с отрицательным передним углом.

Величина подачи непосредственно на P'_{z20} не влияет. Однако, с увеличением подачи (за счет увеличения суммарной тангенциальной составляющей силы резания $P_z = P_{z1} + P_{z20}$ увеличивается статическое перемещение системы $z_0 = P_z / c$. Это уменьшает зазоры в стыках элементов технологической системы и увеличивает сопротивление (вязкое трения) k_1 . При достижении значений $|k_1| > |P'_{z20}|$ автоколебания в системе исчезают.

Сделанные теоретические выводы согласуются с экспериментальными данными [55], согласно которым при точении с увеличением ширины среза b и твердости обрабатываемого металла HV амплитуда автоколебаний увеличивается; с увеличением скорости резания амплитуда изменяется по экстремальной зависимости, достигая макси-

му, а с увеличением подачи – непрерывно уменьшается. Из зависимости (5.46) следует, что уменьшить величину P'_{z20} и исключить автоколебания можно уменьшением параметров $h \rightarrow 0$, $f'_0 \rightarrow 0$ (применением, например, инструментов из синтетических сверхтвердых материалов, характеризующихся высокой износостойкостью и низким коэффициентом трения, практически не зависящим от скорости скольжения). Уменьшение ширины среза в приводит к уменьшению P'_{z20} , однако это связано с уменьшением производительности обработки, что не всегда экономически целесообразно. Важными резервами устранения автоколебаний, как отмечалось выше, являются увеличение скорости резания и подачи. Увеличение собственной частоты системы k , исходя из зависимости (5.46), позволяет уменьшить амплитуду автоколебаний A , что хорошо согласуется с практикой резания.

Если коэффициент трения f изменяется по линейной зависимости от скорости резания V (рис. 5.8), то зависимость (5.44) примет вид $f = f_0 - f'_0 \cdot \dot{z}$, а дифференциальное уравнение (5.45) выразится:

$$m \cdot \ddot{z} + (P'_{z20} + k_1) \cdot \dot{z} + c \cdot z = 0 \quad (5.48)$$

или

$$\ddot{z} + 2n \cdot \dot{z} + k^2 \cdot z = 0, \quad (5.49)$$

где $2n = \frac{(P'_{z20} + k_1)}{m}$;

$k = \sqrt{c/m}$ – собственная частота системы, c^{-1} .

При условии $k^2 > n^2$ общее решение дифференциального уравнения (5.49) можно представить:

$$\bar{z} = A_1 \cdot e^{-n\tau} \cdot \sin\left(\sqrt{k^2 - n^2} \cdot \tau + \varphi\right), \quad (5.50)$$

где τ – время, с;

A_1 – амплитуда колебаний, м;

φ – угол, определяемый из начальных условий.

В зависимости от величины n возможны три решения (5.50):

- 1) при $n > 0$ масса m совершает затухающие свободные колебания;
- 2) при $n = 0$ масса m совершает незатухающие свободные колебания, так как отсутствует сила сопротивления в системе;
- 3) при $n < 0$ масса m совершает свободные колебания с возрастающей во времени амплитудой.

В третьем случае это связано с тем, что сила сопротивления направлена в сторону движения массы m и выполняет роль раскачивающей силы. Очевидно, незатухающие колебания возможны при отрицательном значении P'_{z20} и осуществляются при условии $(P'_{z20} + k_1) < 0$, т.е. на падающем участке зависимости $f - V$ (рис. 5.8).

Амплитуда колебаний A_1 и угол φ определяются из начальных условий: $\bar{z}(0) = \frac{P_{z20}}{c}$; $\dot{z}(0) = V$, тогда

$$A_1 = \sqrt{\left(\frac{P_{z20}}{c}\right)^2 + \left(\frac{V}{k}\right)^2}; \quad (5.51)$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{P_{z20} \cdot k}{c \cdot V}\right) \quad (5.52)$$

или

$$A_1 = \sqrt{\left(\frac{b \cdot h \cdot HV \cdot f_0}{c}\right)^2 + \left(\frac{V}{k}\right)^2}. \quad (5.53)$$

Амплитуда колебаний A_1 тем больше, чем больше параметры P_{z20} , V и меньше c и k .

Как видно, увеличение силы P_{z20} приводит к увеличению z , в соответствии с зависимостью (5.50), за счет увеличения двух множителей: A_1 и $e^{-n \cdot \tau}$. В принципе, характер протекания процесса незатухающих свободных колебаний, описываемый уравнением (5.49), мало чем отличается от процесса автоколебаний, описываемых уравнением (5.45). В первом и втором случаях условием возникновения неустойчивости системы является падающий участок характеристики трения, когда справедливо неравенство $(P'_{z20} + k_1) < 0$. Колебания в двух случаях описываются гармоническим законом.

Необходимо отметить, что незатухающие колебания возможны и на возрастающем участке зависимости $f - V$ (рис. 5.8), т.е. при $n > 0$. В этом случае они будут отличаться от гармонического закона. Определенную часть периода колебаний (за счет силы трения) вершина режущего инструмента будет жестко связана с обрабатываемой деталью, совершая движение со скоростью резания V . В момент времени, когда сила трения достигнет значения силы P_{z20} , режущий инструмент

(приведенная масса m , рис. 5.7) начнет совершать незатухающие ($n > 0$) колебания, описываемые зависимостью (5.50).

Следовательно, первую часть периода колебаний режущий инструмент будет двигаться с постоянной скоростью V , а вторую часть – совершать колебательное движение по закону (5.50). Такие колебания следует рассматривать как релаксационные автоколебания.

Амплитуда колебаний, исходя из (5.50), определяется произведением двух множителей A_1 и $e^{-n \cdot \tau}$. Чем больше $n > 0$, тем меньше амплитуда колебаний. Влияние отдельных параметров процесса резания на амплитуду колебаний такое же, как и для рассмотренных выше случаев. Основным условием уменьшения или устранения колебаний данного типа является существенное уменьшение силы трения P_{z2} путем уменьшения $h \rightarrow 0$, т.е. путем обеспечения в процессе резания высокой остроты режущей кромки инструмента. Наличие площадки износа на задней поверхности режущего инструмента приводит к появлению силы трения P_{z2} и возникновению колебаний системы.

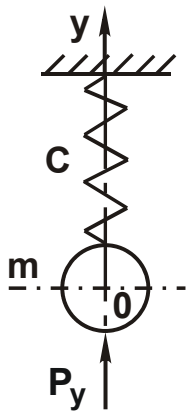
При алмазном шлифовании необходимо исключить из контакта с обрабатываемым металлом связку круга, что является основным источником трения и возбуждения автоколебаний. Затупление режущих зерен также приводит к увеличению силы трения при шлифовании, однако, в меньшей мере по сравнению с влиянием трения связки круга, особенно в условиях засаливания круга. Эффективными условиями уменьшения сил трения следует рассматривать применение методов комбинированного шлифования, совмещающего механическое резание с дополнительным электрофизикохимическим воздействием на обрабатываемый материал и алмазный круг на металлической связке.

Таким образом, теоретически обоснованы условия возникновения колебаний при резании металлов и показаны пути их устранения.

5.3. Анализ колебаний, возникающих от трения стружки с передней поверхностью режущего инструмента

Рассмотрим режущий инструмент в виде одномассовой системы (рис. 5.9), на которую действуют упруго-восстанавливающая сила $c \cdot y$, сила инерции $m \cdot \ddot{y}$, сила сопротивления $k_1 \cdot \dot{y}$ и радиальная составляющая силы резания P_y .

Уравнение равновесия указанных сил описывается дифференциальным уравнением:



$$m \cdot \ddot{y} = P_y - k_1 \cdot \dot{y} - c \cdot y, \quad (5.54)$$

где k_1 – коэффициент пропорциональности;

y , \dot{y} , \ddot{y} – упругое перемещение (м), скорость (м/с) и ускорение (м/с²) движения системы.

Рис. 5.9. Расчетная схема амплитуды колебаний

Радиальная составляющая силы резания P_y описывается аналитической зависимостью [131]:

$$P_y = 2 \cdot \tau_{\text{сдв}} \cdot F \cdot \frac{\sin(\psi - \gamma)}{1 - \sin(\psi - \gamma)} = 2 \cdot \tau_{\text{сдв}} \cdot F \cdot \frac{1}{\text{tg}\beta \cdot \text{tg}2\beta}, \quad (5.55)$$

где $\tau_{\text{сдв}}$ – предел прочности на сдвиг обрабатываемого материала, Н/м²;

F – площадь поперечного сечения среза, м²;

ψ – условный угол трения образующейся стружки с передней поверхностью режущего инструмента;

γ – положительный передний угол режущего инструмента;

$\beta = 45^\circ + (\gamma - \psi)/2$ – условный угол сдвига обрабатываемого материала [15].

С учетом зависимости (5.55) дифференциальное уравнение (5.54) примет вид:

$$\ddot{y} + 2 \cdot n \cdot \dot{y} + k^2 \cdot y = \frac{2 \cdot \tau_{\text{сдв}} \cdot F}{m} \cdot \frac{\sin(\psi - \gamma)}{1 - \sin(\psi - \gamma)}, \quad (5.56)$$

где $k = \sqrt{c/m}$ – собственная частота системы, с⁻¹;

$2 \cdot n = k_1/m$.

При условии $0 < \sin(\psi - \gamma) < 1$ справедливо разложение в ряд:

$$\frac{1}{1 - \sin(\psi - \gamma)} = 1 + \sin(\psi - \gamma) + \sin^2(\psi - \gamma) + \sin^3(\psi - \gamma) + \dots \quad (5.57)$$

Коэффициент трения $f = \text{tg}\psi$ зависит от скорости скольжения стружки по передней поверхности режущего инструмента $V = V_{\text{стр}} - \dot{y}$ (рис. 5.10 [97]). При движении массы m в положительном направлении скорость V меньше скорости стружки $V_{\text{стр}} = V_0 / \xi$ (где V_0 – скорость

резания; ξ – коэффициент усадки стружки), а при движении в отрицательном направлении, наоборот, больше $V_{\text{стр}}$.

Зависимость $\psi - V$ (которая соответствует зависимости $f - V$, рис. 5.10) на падающем участке можно аппроксимировать зависимостью:

$$\psi = \psi_0 - \alpha \cdot V = \psi_0 - \alpha \cdot (V_{\text{стр}} - \dot{y}) = (\psi_0 - \alpha \cdot V_{\text{стр}}) + \alpha \cdot \dot{y}, \quad (5.58)$$

где ψ_0, α – некоторые постоянные.

Ограничиваясь в разложении (5.57) первым слагаемым, дифференциальное уравнение (5.56) примет вид:

$$\ddot{y} + 2 \cdot n \cdot \dot{y} + k^2 \cdot y = \frac{2 \cdot \tau_{\text{сдв}} \cdot F}{m} \cdot \sin(\psi - \gamma). \quad (5.59)$$

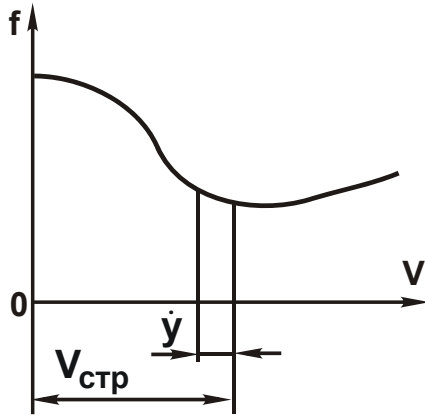


Рис. 5.10. Зависимость f от V

При таком подходе функция $W = \frac{1}{1 - \sin(\psi - \gamma)}$ не оказывает влияния на конечный результат, что может привести к неправильному решению. Поэтому следует принять, что функция не зависит от \dot{y} :

$$W = \frac{1}{1 - \sin(\psi_0 - \alpha \cdot V_{\text{стр}} - \gamma)} \quad (5.60)$$

и входит в правую часть дифференциального уравнения (5.59). Исключая из дифференциального уравнения (5.59) слагаемые, определяющие статистическое равновесие системы: $c \cdot (y - y_1) = 2 \cdot \tau_{\text{сдв}} \cdot W \cdot \sin(\psi_0 - \alpha \cdot V_{\text{стр}} - \gamma)$, получено:

$$\begin{aligned} & \ddot{y}_1 + 2 \cdot n \cdot \dot{y}_1 + k^2 \cdot y_1 = \\ & = \frac{2 \cdot \tau_{\text{сдв}} \cdot W}{m} \cdot \left\{ [(\psi_0 - \alpha \cdot V_{\text{стр}} - \gamma) + \alpha \cdot \dot{y}_1] - \sin(\psi_0 - \alpha \cdot V_{\text{стр}} - \gamma) \right\}, \quad (5.61) \end{aligned}$$

где $y_1, \dot{y}_1, \ddot{y}_1$ – новые переменные.

С учетом преобразований и обозначая $u = \psi_0 - \alpha \cdot V_{\text{стр}} - \gamma$, правая часть дифференциального уравнения (5.61) выразится:

$$\begin{aligned} & \sin(u + \alpha \cdot \dot{y}_1) - \sin u = \sin u \cdot \cos \alpha \cdot \dot{y}_1 + \cos u \cdot \sin \alpha \cdot \dot{y}_1 - \sin u = \sin u \times \\ & \times \left(-\frac{\alpha^2 \cdot \dot{y}_1^2}{2!} + \frac{\alpha^4 \cdot \dot{y}_1^4}{4!} - \dots \right) + \cos u \cdot \left(\frac{\alpha^2 \cdot \dot{y}_1}{1!} - \frac{\alpha^3 \cdot \dot{y}_1^3}{3!} + \dots \right). \quad (5.62) \end{aligned}$$

Тогда дифференциальное уравнение (5.61) примет вид:

$$\ddot{y}_1 + \dot{y}_1 \cdot \left(2 \cdot n - \frac{2 \cdot \alpha \cdot \tau_{\text{сдв}} \cdot F \cdot \cos u \cdot W}{m} \right) - \frac{2 \cdot \tau_{\text{сдв}} \cdot F \cdot W}{m} \times$$

$$\times \left[\sin u \cdot \left(-\frac{\alpha^2 \cdot \dot{y}_1^2}{2!} + \frac{\alpha^4 \cdot \dot{y}_1^4}{4!} - \dots \right) + \cos u \cdot \left(-\frac{\alpha^3 \cdot \dot{y}_1^3}{3!} + \dots \right) \right] + k^2 \cdot y_1 = 0. \quad (5.63)$$

В итоге получено нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка. При отрицательном значении коэффициента, стоящего при переменной \dot{y}_1 , имеет место неустойчивое состояние системы, т.е. возникают автоколебания [97]. Система совершает свободные колебания с собственной частотой k если выполняется условие $\ddot{y}_1 + k^2 \cdot y_1 = 0$ или, исходя из дифференциального уравнения (5.63):

$$R = -\dot{y}_1 \cdot \left(2 \cdot n - \frac{2 \cdot \alpha \cdot \tau_{\text{сдв}} \cdot F \cdot \cos u \cdot W}{m} \right) - \frac{2 \cdot \tau_{\text{сдв}} \cdot F \cdot W}{m} \times$$

$$\times \left[\sin u \cdot \left(-\frac{\alpha^2 \cdot \dot{y}_1^2}{2!} + \frac{\alpha^4 \cdot \dot{y}_1^4}{4!} - \dots \right) + \cos u \cdot \left(-\frac{\alpha^3 \cdot \dot{y}_1^3}{3!} + \dots \right) \right] + k^2 \cdot y_1 = 0. \quad (5.64)$$

Амплитуду колебаний A следует определить методом энергетического баланса, согласно которому стационарные автоколебания описываются (приближенно) гармоническим законом:

$$y_1 = A \cdot \sin k\tau \quad (5.65)$$

с частотой свободных колебаний системы k . Работа силы R за период автоколебаний $T = 2\pi/k$ равна нулю:

$$\int_0^T R \cdot \dot{y} \cdot d\tau = 0 \quad \text{или} \quad (5.66)$$

$$-\int_0^T \left\{ \left(2 \cdot n - \frac{2 \cdot \alpha \cdot \tau_{\text{сдв}} \cdot F \cdot \cos u \cdot W}{m} \right) \cdot \dot{y}_1^2 - \frac{2 \cdot \tau_{\text{сдв}} \cdot F \cdot W}{m} \times \right.$$

$$\times \left[\sin u \cdot \left(-\frac{\alpha^2 \cdot \dot{y}_1^2}{2!} + \frac{\alpha^4 \cdot \dot{y}_1^4}{4!} - \dots \right) + \cos u \cdot \left(-\frac{\alpha^3 \cdot \dot{y}_1^3}{3!} + \dots \right) \right] \left. \right\} \cdot d\tau = 0. \quad (5.67)$$

Подставляя выражение $\dot{y}_1 = A \cdot k \cdot \cos k\tau$ в (5.67), получено:

$$\int_0^T \left[\left(2 \cdot n - \frac{2 \cdot \alpha \cdot \tau_{\text{сдв}} \cdot F \cdot \cos u \cdot W}{m} \right) \cdot \cos^2 k\tau + \right.$$

$$\left. + \frac{2 \cdot \tau_{\text{сдв}} \cdot F \cdot W \cdot \cos u \cdot \alpha^3}{6 \cdot m} \cdot A^2 \cdot k^2 \cdot \cos^4 k\tau \right] \cdot d\tau = 0. \quad (5.68)$$

Откуда

$$A = \frac{1}{k} \cdot \sqrt{\frac{\int_0^T \frac{6}{\alpha^2} \cdot \left(1 - \frac{n \cdot m}{\tau_{сдв} \cdot F \cdot W \cdot \cos u \cdot \alpha}\right) \cdot \cos^2 k\tau \cdot d\tau}{\int_0^T \cos^4 k\tau \cdot d\tau}}. \quad (5.69)$$

Коэффициент α определяет тангенс угла наклона функции u в точке статического равновесия системы (рис. 5.10).

С учетом $\alpha = \operatorname{tgu}$ амплитуда колебаний A выразится:

$$A = \frac{\sqrt{8}}{k \cdot \operatorname{tgu}} \cdot \sqrt{1 - \frac{n \cdot m}{\tau_{сдв} \cdot F \cdot \sin u \cdot W}}. \quad (5.70)$$

Второе слагаемое подкоренного выражения (5.70) определяет отношение силы сопротивления к радиальной составляющей силы резания P_y . Это отношение должно быть меньше единицы, в противном случае (при отрицательном подкоренном выражении) возбуждения автоколебаний не будет. С увеличением u и уменьшением знаменателя (т.е. радиальной составляющей силы резания P_y) амплитуда колебаний A уменьшится.

С учетом зависимости (5.55) амплитуда колебаний A опишется:

$$A = \frac{\sqrt{8} \cdot \operatorname{tg} 2\beta}{k} \cdot \sqrt{1 - \frac{n \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \operatorname{tg} 2\beta \cdot m}{\tau_{сдв} \cdot F}}. \quad (5.71)$$

Условный угол сдвига обрабатываемого материала β неоднозначно влияет на амплитуду колебаний A . С его увеличением подкоренное выражение уменьшается, а множитель $\operatorname{tg} 2\beta$, стоящий перед корнем, увеличивается. Следовательно, возможна экстремальная зависимость $A - \beta$ и амплитуда колебаний A будет принимать максимальное значение.

Экспериментально установлено, что условный угол сдвига обрабатываемого материала β с увеличением скорости резания V при точении увеличивается. Исходя из зависимости (5.71), это может привести к экстремальному характеру зависимости $A - V$, что соответствует экспериментальным данным [14], согласно которым амплитуда колебаний A проходит точку максимума.

По мере затупления режущего инструмента условный угол сдвига обрабатываемого материала β уменьшается. Следовательно,

уменьшится множитель $\operatorname{tg}2\beta$ и увеличится подкоренное выражение в зависимости (5.71). Учитывая преобладающую роль подкоренного выражения, это приведет к увеличению амплитуды колебаний A , что соответствует экспериментальным данным.

Аналогичное влияние на параметры β и A оказывает коэффициент трения f (условный угол трения ψ) и противоположное влияние – передний угол режущего инструмента γ .

С увеличением площади поперечного сечения среза F амплитуда колебаний A увеличивается. При шлифовании параметр $F = S_{\text{сум}}$ определяется:

$$S_{\text{сум}} = \frac{Q}{V_{\text{кр}}} = \frac{B \cdot V_{\text{дет}} \cdot t}{V_{\text{кр}}},$$

где Q – производительность обработки;

B – ширина шлифования;

$V_{\text{дет}}$, $V_{\text{кр}}$ – скорости детали и круга, м/с;

t – глубина шлифования, м.

Амплитуда колебаний A тем больше, чем больше параметры B , $V_{\text{дет}}$, t и меньше $V_{\text{кр}}$. Теоретические результаты согласуются с экспериментальными данными, приведенными на рис. 5.11 [64; 65]. Увеличение амплитуды колебаний A с течением времени τ связано с затуплением зерен круга, уменьшением условного угла сдвига обрабатываемого материала β и увеличением подкоренного выражения в зависимости (5.71).

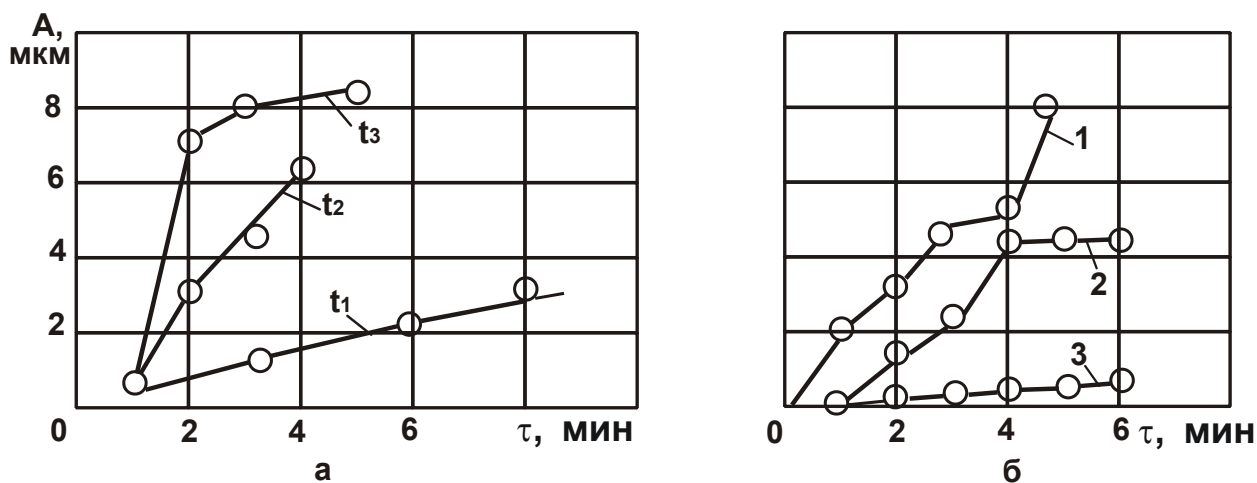


Рис. 5.11. Зависимость A от τ : а) – $t_3 > t_2 > t_1$;
б) 1 – $V_{\text{кр}} = 25$ м/с; 2 – $V_{\text{кр}} = 35$ м/с; 3 – $V_{\text{кр}} = 48$ м/с

Приблизительно к таким же результатам можно прийти, если в преобразованном уравнении (5.56) принять

$$R = \frac{2 \cdot \tau_{\text{сдв}} \cdot F}{m} \cdot \frac{\sin(\psi - \gamma)}{1 - \sin(\psi - \gamma)} - 2 \cdot n \cdot \dot{y}_1 = 0. \quad (5.72)$$

Из зависимости (5.65) вытекает: $\dot{y}_1 = A \cdot k \cdot \cos k\tau$. Максимальное значение \dot{y}_1 достигается при условии $\sin k\tau = 0$. Это соответствует наибольшему значению угла ψ . Тогда

$$A = \frac{\tau_{\text{сдв}} \cdot F}{k \cdot u \cdot m} \cdot \frac{\sin(\psi - \gamma)}{1 - \sin(\psi - \gamma)}. \quad (5.73)$$

Как видно, амплитуда колебаний A тем больше, чем больше параметры $\tau_{\text{сдв}}$, F , ψ и меньше u , γ . Для отрицательного переднего угла режущего инструмента (или режущего зерна круга):

$$A = \frac{\tau_{\text{сдв}} \cdot F}{k \cdot u \cdot m} \cdot \frac{\sin(\psi + \gamma)}{1 - \sin(\psi + \gamma)}. \quad (5.74)$$

С увеличением переднего угла режущего инструмента γ амплитуда колебаний A неограниченно увеличивается. Следовательно, по мере затупления режущего инструмента происходит увеличение амплитуды колебаний $A \rightarrow \infty$ и процесс резания прекратится.

С увеличением скорости резания V при лезвийной обработке условный угол трения ψ (коэффициент f) уменьшается. Это приводит к уменьшению амплитуды колебаний A . В случае образования нароста на передней поверхности инструмента с увеличением V передний угол γ увеличивается, а амплитуда колебаний уменьшается. По мере вырождения нароста передний угол γ уменьшается, а амплитуда колебаний увеличивается. При дальнейшем увеличении V уменьшается амплитуда колебаний A за счет уменьшения условного угла трения ψ , т.е. характер изменения A аналогичен изменению радиальной составляющей силы резания P_y . С увеличением собственной частоты системы k амплитуда колебаний пропорционально уменьшается.

5.4. Колебания при переменной жесткости системы

В связи с колебаниями амплитуды колебаний инструмента в радиальном направлении ou толщина среза изменяется во времени. Параметр F в дифференциальном уравнении (5.56) следует рассмат-

ривать в виде $v \cdot (a - y)$, где a – толщина среза, м; v – ширина среза, м; y – величина упругого перемещения, м. Тогда дифференциальное уравнение (5.56) примет вид:

$$\ddot{y} + 2 \cdot n \cdot \dot{y} + \left[k^2 + \frac{2 \cdot \tau_{\text{сдв}} \cdot B}{m} \cdot \frac{\sin(\psi - \gamma)}{1 - \sin(\psi - \gamma)} \right] \cdot y = \frac{2 \cdot \tau_{\text{сдв}} \cdot F}{m} \cdot \frac{\sin(\psi - \gamma)}{1 - \sin(\psi - \gamma)}. \quad (5.75)$$

Собственная частота колебаний системы:

$$\bar{k} = \sqrt{k^2 + \frac{2 \cdot \tau_{\text{сдв}} \cdot B}{m} \cdot \frac{\sin(\psi - \gamma)}{1 - \sin(\psi - \gamma)}} \quad (5.76)$$

увеличивается за счет второго слагаемого. Вследствие возникновения колебаний углы ψ и γ во времени изменяются. Это приведет к изменению во времени жесткости и собственной частоты системы. В результате приходим к дифференциальному уравнению (5.75) с переменными коэффициентами.

Из теории колебаний [97] известно, что переменность коэффициентов типична для систем с параметрическим возбуждением колебаний, т.е. когда система испытывает внешнее воздействие в виде изменения параметра.

Параметрические колебания не являются вынужденными, поскольку на систему не действует внешняя периодически изменяющаяся сила.

Во многих практически важных случаях дифференциальное уравнение параметрических колебаний можно привести к форме уравнения Матье:

$$\ddot{y} + (\bar{a} - 2 \cdot q \cdot \cos 2\tau) \cdot y = 0, \quad (5.77)$$

где \bar{a} , q – некоторые постоянные.

В зависимости от параметров \bar{a} и q система может находиться в устойчивом состоянии. Следовательно, в результате переменности жесткости система может совершать автоколебания.

Упростим задачу. Рассмотрим радиальную составляющую силы резания P_y в виде зависимости $P_y = 2,5 \cdot \left[(HV \cdot R)^2 \cdot \tau_{\text{сдв}} \cdot a_z \right]^{0,33}$, справедливой при резании инструментом с радиусной частью (где R – радиус округления режущей части зерна, $a_z = a$ – толщина среза; HV – твердость обрабатываемого материала). Здесь толщина среза a пе-

ременна. С учетом данной зависимости дифференциальное уравнение колебаний (5.55) примет вид:

$$\ddot{y} + 2 \cdot n \cdot \dot{y} + k^2 \cdot y = \frac{2,5 \cdot B}{m} \cdot \sqrt[3]{(HV \cdot R)^2 \cdot a \cdot \tau_{сдв}}. \quad (5.78)$$

Представляя $a = a_0 - y$, с учетом $y = a_0 - a$, $\dot{y} = -\dot{a}$; $\ddot{y} = -\ddot{a}$ получено нелинейное дифференциальное уравнение:

$$\ddot{a} + 2 \cdot n \cdot \dot{a} + k^2 \cdot a + \dot{a} + \frac{2,5 \cdot B}{m} \cdot \sqrt[3]{(HV \cdot R)^2 \cdot a \cdot \tau_{сдв}} = k^2 \cdot a_0, \quad (5.79)$$

где a_0 – заданная толщина среза, м.

В первом приближении можно пренебречь слагаемыми $2 \cdot n \cdot \dot{a}$ и $k^2 \cdot a$. Общее решение определяется из дифференциального уравнения:

$$\ddot{a} + k_0^2 \cdot a^n = 0, \quad (5.80)$$

где n – переменная величина.

Введем новую переменную $p = \frac{da}{d\tau}$, тогда $\frac{d^2a}{d^2\tau} = p \cdot \frac{dp}{da}$. Уравнение

(5.80) запишется $p \cdot \frac{dp}{da} = -k_0^2 \cdot a^n$ или $\frac{1}{k_0^2} \cdot p \cdot dp = -a^n \cdot da$.

После интегрирования $\frac{1}{k_0^2} \cdot \frac{p^2}{2} \cdot dp = -\frac{1}{1+n} \cdot a^{1+n} + C_1$, получено:

$$\frac{p}{k_0} = \sqrt{C_2^2 - \frac{2}{1+n} \cdot a^{1+n}}, \quad (5.81)$$

где $C_2^2 = 2 \cdot C_1$.

Представляя $p = \frac{da}{d\tau}$, получено дифференциальное уравнение:

$$\frac{1}{k_0} \cdot \frac{da}{d\tau} = \sqrt{C_2^2 - \frac{2}{1+n} \cdot a^{1+n}}. \quad (5.82)$$

Интегрируя его, имеем

$$\sqrt{\frac{2 \cdot a^{1+n}}{(1+n) \cdot C_2^2}} = \sin(k_0 \cdot \tau + C_3), \quad (5.83)$$

откуда

$$a = \left[\frac{(1+n) \cdot C_2^2}{2} \right]^{\frac{1}{1+n}} \cdot \sin^{\frac{2}{1+n}}(k_0 \cdot \tau + C_3). \quad (5.84)$$

При условии $n = 1/3$:

$$a = \left(\frac{2}{3}\right)^{0,75} \cdot C_2^{1,5} \cdot \sin^{1,5}(k_0 \cdot \tau + C_3). \quad (5.85)$$

Постоянные интегрирования C_2 и C_3 определяются из двух начальных условий: $a(0) = a_0$; $\dot{a}(0) = \dot{a}_0$.

При условии $n = 1$ справедливо:

$$a = C_2 \cdot \sin(k_0 \cdot \tau + C_3). \quad (5.86)$$

Подчиняя данное решение двум начальным условиям, имеем:

$$a = \sqrt{a_0^2 + \left(\frac{\dot{a}_0}{k_0}\right)^2} \cdot \sin(k_0 \cdot \tau + C_3), \quad (5.87)$$

где $C_3 = \arctg\left(\frac{k_0 \cdot a_0}{\dot{a}_0}\right)$ – постоянная интегрирования.

К аналогичному решению можно прийти, решая однородное дифференциальное уравнение

$$\ddot{a} + k_0^2 \cdot a = 0 \quad (5.88)$$

в виде $a = e^{r \cdot \tau}$. Постоянная r должна удовлетворять уравнению

$$r^2 + k_0^2 = 0, \quad (5.89)$$

которое называется *характеристическим уравнением*.

Решение уравнения (5.89):

$$r = \sqrt{-k_0^2} = \pm k_0 \cdot i, \quad (5.90)$$

где $i = \sqrt{-1}$.

Тогда $a = C_2 \cdot \sin(k_0 \cdot \tau + C_3)$, т. е. приходим к решению (5.87).

При $n = 1$ и $n = 1/3$ масса m совершает периодические колебания с собственной частотой k_0 .

При $n = 1/3$ характер изменения функции $a(\tau)$ отличается от синусоидального закона лишь показателем степени 1,5. Из этого можно заключить, что нелинейное дифференциальное уравнение (5.79) не вносит принципиальных изменений в закономерности свободных колебаний системы. Следовательно, изменение радиальной составляющей силы резания P_y , описываемой зависимостью (5.55), не является причиной возникновения автоколебаний.

5.5. Колебания при врезании режущего инструмента в обрабатываемый материал

Радиальную составляющую силы резания P_y можно аппроксимировать зависимостью (рис. 5.10):

$$P_y = P_{y_0} + \bar{\alpha} \cdot \dot{y} + \bar{\alpha} \cdot \ddot{y}, \quad (5.91)$$

где P_{y_0} – значение радиальной составляющей силы резания P_y для определенной скорости резания, Н;

$\bar{\alpha}$ – постоянная величина;

\dot{y} – скорость упругого перемещения y , м/с.

Общее решение дифференциального уравнения (5.54) с учетом зависимости (5.91) запишется:

$$y = e^{-n \cdot \tau} \cdot (B_1 \cdot \sin \bar{k}_1 \tau + B_2 \cdot \cos \bar{k}_1 \tau) + y_{\text{ст}}, \quad (5.92)$$

где $n = \frac{k_1 - \bar{\alpha}}{2 \cdot m}$;

$\bar{k}_1 = \sqrt{k_1^2 - n^2}$ – частота колебаний, с^{-1} ;

$y_{\text{ст}} = \frac{P_{y_0}}{c}$ – статическое перемещение массы m от действия силы

P_{y_0} , м.

Постоянные интегрирования B_1 и B_2 определяются из начальных условий:

$$\begin{cases} y(0) = 0; \\ \dot{y}(0) = 0. \end{cases} \quad (5.93)$$

Тогда $B_1 = -\frac{n}{\bar{k}_1} \cdot y_{\text{ст}}$; $B_2 = -y_{\text{ст}}$ и

$$y = y_{\text{ст}} \cdot \left[1 - \sqrt{\left(\frac{n}{\bar{k}_1}\right)^2 + 1} \cdot e^{-n \cdot \tau} \cdot \sin(\bar{k}_1 \cdot \tau + \bar{\psi}) \right], \quad (5.94)$$

где $\bar{\psi} = \text{arctg}\left(\frac{\bar{k}_1}{n}\right)$.

При условии $k_1 > \bar{\alpha}$ параметр n положительный, и колебания затухают во времени.

При условии $k_1 = \bar{\alpha}$ параметр $n = 0$ и система совершает установившиеся незатухающие колебания.

При условии $k_1 < \bar{\alpha}$ параметр n отрицательный и происходит "раскачка" системы во времени ($y \rightarrow \infty$).

Все три случая имеют место на практике. В первом и втором случаях процесс резания протекает устойчиво (во втором случае система совершает автоколебания), а в третьем случае – неустойчиво. Следовательно необходимо уменьшать $\bar{\alpha}$ и увеличивать k_1 , т.е. увеличивать n . За счет множителя $e^{-n \cdot \tau}$ в начальный момент времени величина упругого перемещения y принимает большие значения. При условии $e^{-n \cdot \tau} \rightarrow 1$ величина упругого перемещения y может превысить значение $2 \cdot y_{ст}$. С увеличением скорости резания, исходя из рис. 5.10, сила резания P_{y_0} и величина $y_{ст}$ уменьшаются. Это приводит к уменьшению величины упругого перемещения y и соответственно амплитуды колебаний.

При небольших скоростях резания множитель $e^{-n \cdot \tau} \rightarrow 0$ и выполняется условие $y \rightarrow y_{ст}$. При относительно высоких скоростях резания выполняются условия $e^{-n \cdot \tau} \rightarrow 1$ (поскольку $\tau \rightarrow 0$) и $y > y_{ст}$. Следовательно, с увеличением скорости резания коэффициент динамичности системы $y/y_{ст} > 1$ увеличивается, что согласуется, например, с экспериментальными данными профессора Зубаря В. П., полученными при прерывистом точении инструментами из синтетических сверхтвердых материалов (СТМ).

5.6. Динамика периодического резания

При резании многолезвийными инструментами (прерывистыми кругами), а также при обработке прерывистых поверхностей радиальная составляющая силы резания $P_y(\tau)$ периодически изменяется (рис. 5.12). В период времени $0 \dots T_1$ колебания массы m описываются дифференциальным уравнением

$$m \cdot \ddot{y}_1 + c_y \cdot y_1 = P_{y_0}, \quad (5.95)$$

а в период времени $T_1 \dots T_2$ – дифференциальным уравнением

$$m \cdot \ddot{y}_1 + c_y \cdot y_1 = 0. \quad (5.96)$$

Общие решения двух дифференциальных уравнений:

$$y_1 = A \cdot \sin k\tau + B \cdot \cos k\tau + y_{ст}; \quad (5.97)$$

$$y_2 = C \cdot \sin k\tau + D \cdot \cos k\tau, \quad (5.98)$$

где $y_{ст}$ – статическое перемещение массы m от действия силы резания P_{y0} , м.

Постоянные интегрирования A и B определяются из начальных условий:

$$\begin{cases} y_1(0) = 0, \\ y_1'(0) = 0, \end{cases} \quad (5.99)$$

а постоянные интегрирования C и D – из условий совместности:

$$\begin{cases} y_1(T_1) = y_2(T_1), \\ y_1'(T_1) = y_2'(T_1). \end{cases} \quad (5.100)$$

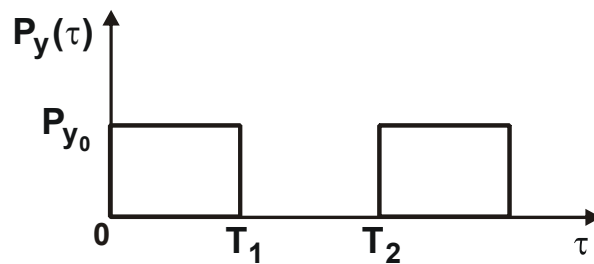


Рис. 5.12. Изменение радиальной составляющей силы резания $P_y(\tau)$ от времени обработки τ

После преобразований получено:

$$y_1 = y_{ст} \cdot (1 - \cos k\tau); \quad (5.101)$$

$$y_2 = y_{ст} \cdot [\sin kT_1 \cdot \sin k\tau + (\cos kT_1 - 1) \cdot \cos k\tau]. \quad (5.102)$$

При условии $\tau = T_2$ перемещение y_2 равно:

$$y_2 = 2 \cdot y_{ст} \cdot \sin \frac{kT_1}{2} \cdot \sin k(T_2 - \frac{T_1}{2}). \quad (5.103)$$

В зависимости от значений T_1 и T_2 величина y_2 может изменяться в пределах $-2y_{ст} \dots 2y_{ст}$. При $|y_2| > 0$ начальные условия для второго импульса силы P_{y0} не будут нулевыми. Следовательно, амплитуда колебаний с каждым последующим импульсом будет увеличиваться, приводя систему в резонансное состояние. Исключить увеличение амплитуды колебаний во времени, исходя из зависимости (5.103), можно при выполнении условия $y_2(\tau = T_2) = 0$, т.е.

$$\begin{cases} \sin \frac{kT_1}{2} = 0, \\ \sin k(T_2 - \frac{T_1}{2}) = 0, \end{cases} \quad (5.104)$$

откуда

$$\begin{cases} T_1 = \frac{2 \cdot n \cdot \pi}{k}, \\ T_2 - \frac{T_1}{2} = \frac{2 \cdot n \cdot \pi}{k}, \end{cases} \quad (5.105)$$

где n – целое число.

В этом случае масса m будет совершает периодические установившиеся во времени колебания.

Следовательно, уйти от резонансного состояния можно путем регулирования параметрами T_1 и T_2 , изменяя конструктивные параметры режущих инструментов и режимов резания.

Данное решение получено для нулевых начальных условий. В общем случае установившиеся периодические колебания массы m описываются зависимостями (5.97) и (5.98) с учетом 4-х условий совместности:

$$\begin{cases} y_1(0) = y_2(T_1), \\ \dot{y}_1(0) = \dot{y}_2(T_1), \\ y_1(T_1) = y_2(T_2), \\ \dot{y}_1(T_1) = \dot{y}_2(T_2). \end{cases} \quad (5.106)$$

Определяя постоянные интегрирования A, B, C, D с учетом условий совместности (5.106), получено:

$$y_1 = y_{ст} \cdot \left[1 + \frac{\sin \frac{k(T_2 - T_1)}{2}}{\sin \frac{kT_2}{2}} \cdot \sin(k\tau + \varphi) \right]. \quad (5.107)$$

Максимальное значение упругого перемещения y_1 достигается при условии $\sin(k\tau + \varphi) = 1$:

$$y_{1max} = y_{ст} \cdot \left[1 + \frac{\sin \frac{k(T_2 - T_1)}{2}}{\sin \frac{kT_2}{2}} \right], \quad (5.108)$$

где φ – сдвиг по фазе.

При условии $\sin \frac{kT_2}{2} = 0$ величина упругого перемещения U_{\max} принимает бесконечно большое значение, т.е. в системе наступает резонанс. Условие резонанса (с учетом $T_2 = 2\pi/\omega$) принимает вид:

$$\frac{k}{\omega} = n, \quad (5.109)$$

где ω – частота следования импульсов, c^{-1} ;
 $n = 1; 2; 3; \dots$ – целое число.

Как видно, имеет место бесконечное множество резонансов: при значениях ω , кратных собственной частоте системы k . Очевидно, при условии $\omega < k$ резонансные состояния системы не опасны в силу рассеивания энергии диссипативными силами, которые в данном решении не учитывались. Резонансы в максимальной степени проявляются при условии $\omega \rightarrow k$, т.е. при $n \rightarrow 1$. Исключить резонансы можно регулированием соотношений периодов времени T_1 и T_2 . При их кратности, т.е. при $T_1 = n_1 \cdot T_2$, где n_1 – целое число ($n_1 > 1$), выполняется условие:

$$\left| \sin \frac{k(T_2 - T_1)}{2} \right| = \left| \sin \frac{kT_2}{2} \right|, \quad (5.110)$$

которое исключает из знаменателя множитель $\sin \frac{kT_2}{2}$ и тем самым ограничивает величину U_{\max} .

Известно аналогичное теоретическое решение [97], полученное без учета колебаний массы m в момент действия кратковременного импульса силы

$$y = \frac{S}{2 \cdot m \cdot k \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot k}{\omega}\right)}, \quad (5.111)$$

где $S = \int_0^{T_1} P(\tau) d\tau$ – импульс силы.

Отношение $S/(m \cdot k)$ определяет максимальное отклонение массы m , вызванное однократным импульсом. При совпадении частот k и ω или их кратности в системе наступает резонанс. Исключить его можно лишь регулированием частот k/ω . Приведенное решение (5.108) показывает, что исключить резонанс можно также регулированием параметра T_1 . Это указывает на необходимость анализа резонансных состояний с учетом колебаний массы m в момент действия импульса силы.

5.7. Роль динамического фактора при микрорезании

Для оценки динамического фактора необходимо рассмотреть следующую математическую модель. Пусть режущее зерно с приведенной массой m_0 движется со скоростью V_0 . Момент времени $\tau_0 = 0$ соответствует началу контакта зерна с обрабатываемым материалом. На зерно действует сила резания P_0 и сила инерции $m_0\ddot{x}$, где \ddot{x} – ускорение движения зерна. Условие равновесия принимает вид:

$$m_0\ddot{x} = -P_0. \quad (5.112)$$

Из решения дифференциального уравнения (5.112) получено перемещение зерна x во времени:

$$x = -\frac{P_0}{m_0} \cdot \tau^2 + C_1 \cdot \tau + C_2, \quad (5.113)$$

где C_1, C_2 – постоянные интегрирования, определяемые из начальных условий: $x(0)=0$; $\dot{x}(0) = V_0$.

Подчиняя зависимость (5.113) этим начальным условиям, получено

$$x = -\frac{P_0}{m_0} \cdot \tau^2 + V_0 \cdot \tau. \quad (5.114)$$

Соответственно скорость движения зерна \dot{x} определяется:

$$\dot{x} = -\frac{2P_0 \cdot \tau}{m_0} + V_0. \quad (5.115)$$

Исходя из зависимости (5.115), скорость движения зерна во времени уменьшается. При условии $\tau = \frac{m_0 \cdot V_0}{2P_0}$ скорость \dot{x} равна нулю, т.е. зерно останавливается. Чтобы этого не произошло, т.е. для непрерывного движения зерна с постоянной скоростью $\dot{x} = V_0$, ему в процессе резания необходимо сообщить ускорение $a = -\ddot{x}$ и за счет этого обеспечить выполнение условия

$$a + \ddot{x} = 0. \quad (5.116)$$

С учетом дифференциального уравнения (5.112) ускорение равно:

$$a = \frac{P_0}{m_0}. \quad (5.117)$$

Следовательно, для движения зерна с постоянной скоростью $\dot{x} = V_0$, к нему, начиная с момента времени $\tau = 0$, необходимо прило-

жить силу P_0 . Если к зерну в начальный момент времени $\tau = 0$ не прикладывать силу P_0 , то за время $\tau = \frac{m_0 \cdot V_0}{2P_0}$ оно переместится на величину x и остановится. Величина x равна

$$x = \frac{m_0 \cdot V_0^2}{4P_0}. \quad (5.118)$$

Следовательно, если длина обработки меньше величины x , то резание осуществляется без сообщения ему дополнительной силы P_0 , т.е. зерно отделяет стружку за счет сил инерции.

В зависимости (5.115) разность скоростей $(\dot{x} - V_0)$ – величина положительная:

$$(\dot{x} - V_0) = -\frac{2P_0 \cdot \tau}{m_0}. \quad (5.119)$$

Для выполнения этого условия необходимо к зерну приложить силу F , превышающую силу резания P_0 ;

$$m_0 \ddot{x} = -P_0 + F. \quad (5.120)$$

С учетом (5.120) уравнение (5.119) можно представить в виде:

$$(\dot{x} - V_0) = \frac{2 \cdot (F - P_0) \cdot \tau}{m_0}. \quad (5.121)$$

Из уравнения (5.121) следует, что в случае уменьшения скорости движения зерна V_0 , оно будет испытывать динамические нагрузки, значительно превышающие статическую силу резания. Следовательно, в условиях периодического резания силовая напряженность связана с динамическим фактором, вызывающим повышенный износ и разрушение зерен.

Для сравнения можно оценить динамические нагрузки, действующие на режущий инструмент, при лезвийной обработке.

Исходя из расчетной схемы (рис. 5.13), в неподвижной системе координат движение массы m (режущего инструмента) под действием силы резания $P(x) = P_0$ описывается дифференциальным уравнением:

$$c \cdot (V_0 \cdot \tau - x) - P_0 = m \cdot \ddot{x}, \quad (5.122)$$

где c – приведенная жесткость системы инструмента по оси ox .

После преобразования дифференциальное уравнение (5.122) принимает вид:

$$m \cdot \ddot{x} + c \cdot x = c \cdot V_0 \tau - P_0. \quad (5.123)$$

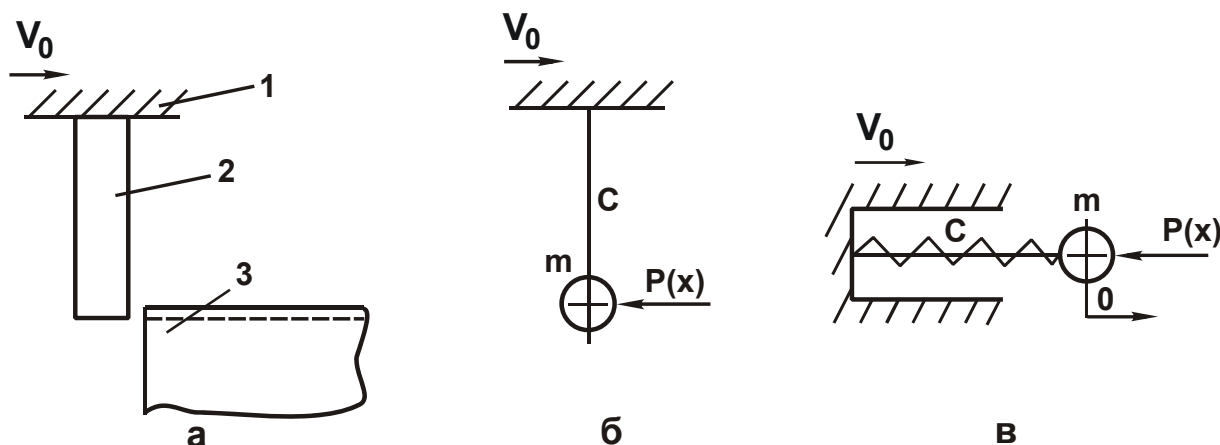


Рис. 5.13. Расчетные схемы взаимодействия инструмента с деталью: 1 – привод станка, 2 – режущий инструмент, 3 – деталь

Частное решение дифференциального уравнения:

$$x = A \cdot \tau + B, \quad (5.124)$$

где $A = V_0$;

$$B = \frac{P_0}{c} = -x_{\text{ст}}.$$

Общее решение дифференциального уравнения:

$$x = B_1 \cdot \sin k\tau + B_2 \cdot \cos k\tau + V_0 \cdot \tau - x_{\text{ст}}, \quad (5.125)$$

где $k = \sqrt{c/m}$ – собственная частота системы, с^{-1} .

Постоянные интегрирования B_1 и B_2 определяются из начальных условий:

$$\begin{cases} x(0) = 0, \\ \dot{x}(0) = V_1. \end{cases} \quad (5.126)$$

Подчиняя зависимость (5.125) начальным условиям (5.126), имеем:

$$x = \sqrt{\frac{(V_1 - V_0)^2}{k^2} + x_{\text{ст}}^2} \cdot \sin(k\tau - \varphi) + V_0 \cdot \tau - x_{\text{ст}}, \quad (5.127)$$

где φ – сдвиг по фазе.

Следует перейти к подвижной системе координат, используя новую переменную $x' = V_0 \cdot \tau - x$:

$$x' = x_{\text{ст}} - \sqrt{\frac{(V_1 - V_0)^2}{k^2} + x_{\text{ст}}^2} \cdot \sin(k\tau - \varphi). \quad (5.128)$$

Максимальное значение x' достигается при условии:

$$\sin(k\tau - \varphi) = -1.$$

Тогда

$$x'_{\max} = x_{\text{ст}} + \sqrt{\frac{(V_1 - V_0)^2}{k^2} + x_{\text{ст}}^2}. \quad (5.129)$$

Как видно, параметр x'_{\max} превышает $x_{\text{ст}}$ более чем в два раза.

При $V_1 = V_0$ выполняется условие $x'_{\max} = 2 \cdot x_{\text{ст}}$. Характер изменения скорости $\dot{x}(\tau)$ и силы $P_{\text{д}} = c \cdot x'$ во времени показан на рис. 5.14.

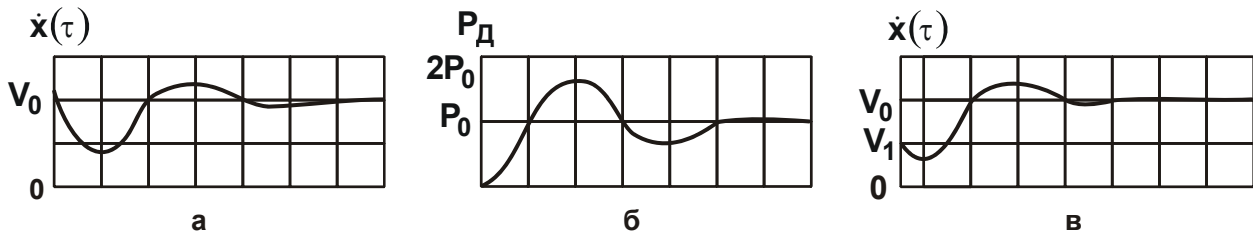


Рис. 5.14. Изменение скорости движения инструмента $\dot{x}(\tau)$ и динамической силы $P_{\text{д}}$ от времени τ при $V_1 = V_0$ (а, б) и $V_1 < V_0$ (в)

Случай $V_1 < V_0$ имеет место при нежестком креплении режущего инструмента, когда в результате выборки люфтов в стыках в момент врезания происходит падение скорости движения режущего инструмента от V_0 до V_1 . После этого скорость должна восстановиться до исходного значения V_0 в результате движения с ускорением. Это приводит к динамическим перегрузкам режущего инструмента. Наибольшее значение x'_{\max} достигается при условии $V_1 = 0$, т.е. при полной остановке режущего инструмента в момент врезания. Уменьшить x'_{\max} можно за счет выполнения условия $V_1 = V_0$.

Рассмотрим общее решение (5.125) при начальных условиях

$$x(0) = x_1; \quad \dot{x}(0) = V_1. \quad (5.130)$$

Тогда

$$x = \sqrt{\frac{(V_1 - V_0)^2}{k^2} + (x_{\text{ст}} - x_1)^2} \cdot \sin(k\tau - \varphi) + V_0 \cdot \tau - x_{\text{ст}} \quad (5.131)$$

или

$$x' = x_{\text{ст}} - \sqrt{\frac{(V_1 - V_0)^2}{k^2} + (x_{\text{ст}} - x_1)^2} \cdot \sin(k\tau - \varphi). \quad (5.132)$$

Максимальное значение x'_{\max} равно:

$$x'_{\max} = x_{\text{ст}} + \sqrt{\frac{(V_1 - V_0)^2}{k^2} + (x_{\text{ст}} - x_1)^2}. \quad (5.133)$$

При условиях $V_1 = V_0$ и $x_1 = x_{ст}$ параметр $x'_{max} = x_{ст}$, т.е. в этом случае исключаются динамические перегрузки, действующие на режущий инструмент.

Уменьшить x'_{max} можно также путем кратковременного приложения силы P_0 , в результате чего входящий в (5.132) множитель $\sin(kT - \varphi) < 1$ уменьшается (где T – время действия на режущий инструмент силы P_0). Тогда справедливо условие: $x'_{max} < x_{ст}$. Рассмотрим динамику режущего инструмента при формах импульсов силы, характерных для встречного и попутного фрезерования (рис. 5.15).

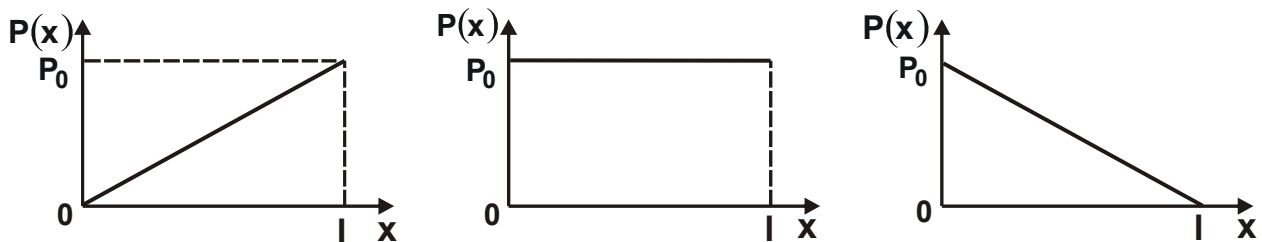


Рис. 5.15. Изменение силы $P(x)$ от перемещения инструмента x

Представляя $P_0 = c_0 \cdot x$, решение дифференциального уравнения (5.122) примет вид:

$$x = \frac{1}{k_1} \cdot (1 - \alpha) \cdot V_0 \cdot \sin k_1 \tau + \alpha \cdot V_0 \cdot \tau, \quad (5.134)$$

где $c_0 = \frac{P_{0max}}{l}$;

l – длина обработки, м;

$$k_1^2 = \frac{c + c_0}{m};$$

$$\alpha = \frac{k^2}{k_1^2} = \frac{c}{c + c_0} < 1.$$

Скорость движения режущего инструмента:

$$\dot{x} = (1 - \alpha) \cdot V_0 \cdot \cos k_1 \tau + \alpha \cdot V_0. \quad (5.135)$$

Зависимость (5.135) с учетом действия в системе диссипативных сил графически показана на рис. 5.16.

В момент врезания наблюдается падение скорости, затем она восстанавливается до значения $\alpha \cdot V_0 < V_0$, т.е. масса m_0 движется со скоростью, меньше исходной. Это обусловлено характером изменения динамической силы P_d , действующей на массу

$$P_D = c \cdot (1 - \alpha) \cdot V_0 \cdot \left(\tau - \frac{1}{k_1} \cdot \sin k_1 \tau \right). \quad (5.136)$$

После затухания колебаний выполняется условие $\sin k_1 \tau = 0$ и сила P_D пропорциональна толщине среза (рис. 5.16).

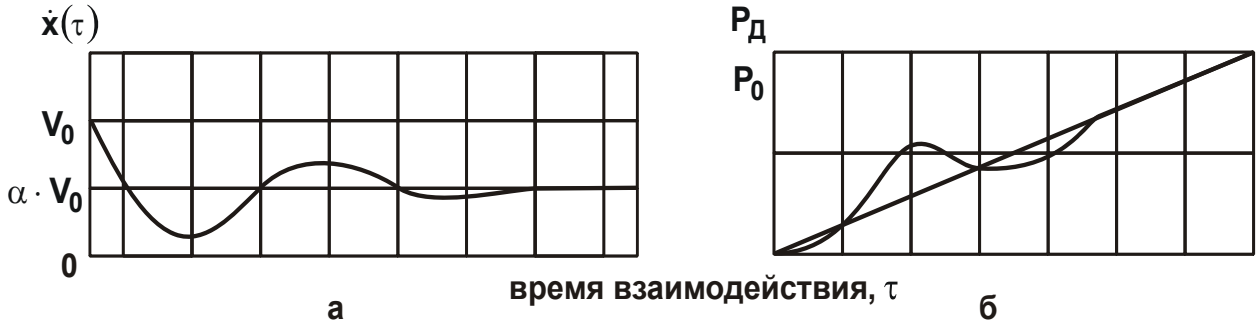


Рис. 5.16. Изменение скорости $\dot{x}(\tau)$ и силы P_D при встречном фрезеровании

При попутном фрезеровании $P_0 = P_{0\max} - c_0 \cdot x$ с учетом начальных условий: $x(0) = 0$; $\dot{x}(0) = V_0$ решение дифференциального уравнения (5.122) принимает вид:

$$x = \sqrt{\frac{V_0^2}{k_2^2} \cdot (1 - \rho)^2 + \frac{P_{0\max}^2}{(c - c_0)^2}} \cdot \sin(k_2 \tau - \varphi) + \beta \cdot V_0 \cdot \tau - \frac{P_{0\max}}{(c - c_0)}, \quad (5.137)$$

где $k_2^2 = \frac{c - c_0}{m_0}$; $\beta = \frac{k_2}{k_2^2}$;

$$\varphi = \arctg \left[\frac{P_{0\max} \cdot k_2}{(c - c_0) \cdot V_0 \cdot (1 - \beta)} \right].$$

С учетом затухания в системе изменение скорости \dot{x} показано на рис. 5.17. В начальный момент скорость движения режущего инструмента падает, затем восстанавливается до значения $\beta \cdot V_0 < V_0$.

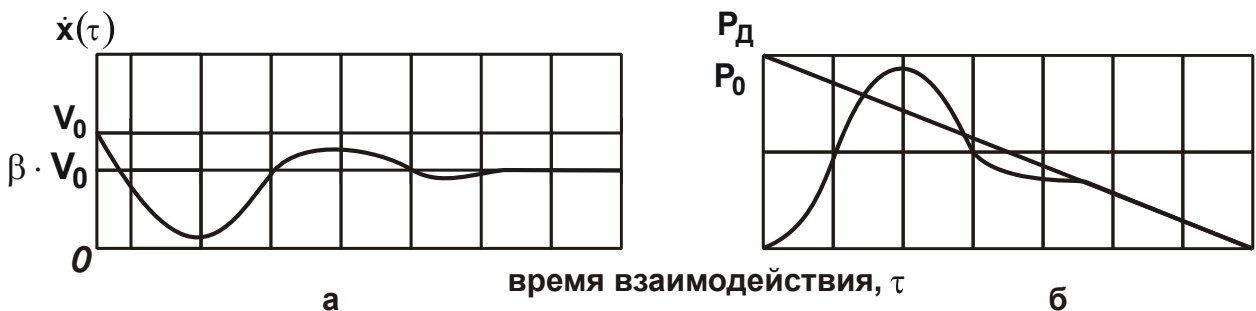


Рис. 5.17. Изменение скорости $\dot{x}(\tau)$ и силы P_D при попутном фрезеровании

Из рис. 5.17 следует, что динамическая сила P_D может быть меньше статической силы P_{0max} . Рассмотрим форму импульса силы, характерную для микрорезания зерном при шлифовании (рис. 5.18,а). На участке I параметры x и \dot{x} описываются зависимостями (5.134) и (5.135).

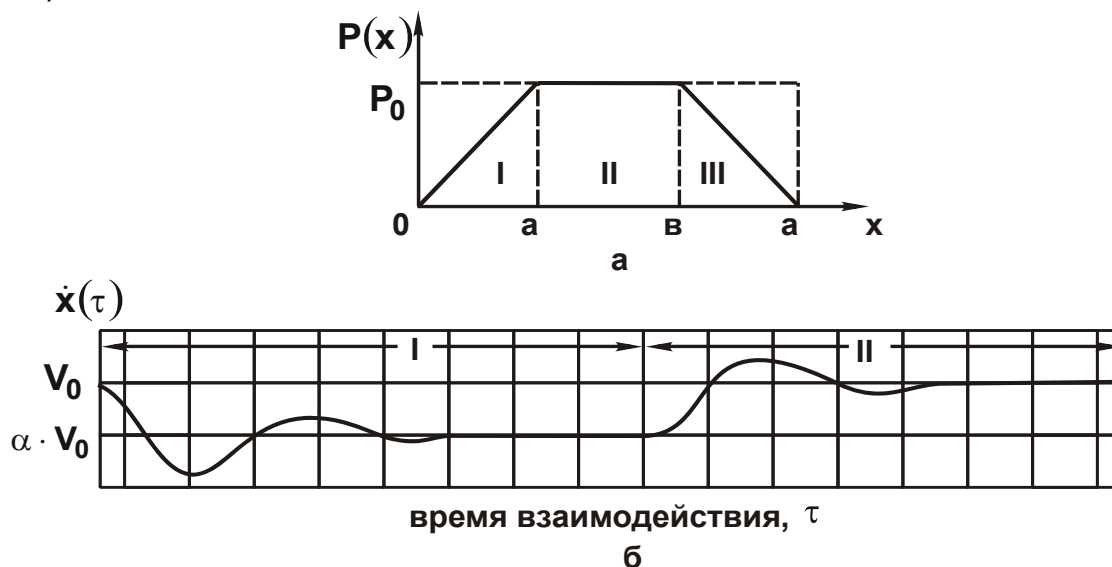


Рис. 5.18. Изменение силы $P(x)$ от перемещения инструмента x (а) и скорости $\dot{x}(\tau)$ от времени взаимодействия τ (б)

Начальные условия для участка II: $x(0) = -x_{ст}$; $\dot{x}(0) = \alpha \cdot V_0$.

Решая дифференциальное уравнение (5.122) с учетом этих начальных условий, имеем:

$$x = -\frac{1}{k} \cdot (1 - \alpha) \cdot V_0 \cdot \sin k\tau + V_0 \cdot \tau - x_{ст}; \quad (5.138)$$

$$\dot{x} = -V_0 \cdot (1 - \alpha) \cdot \cos k\tau + V_0. \quad (5.139)$$

Графически изменение \dot{x} показано на рис. 5.18,б. Динамическая сила P_D , действующая на зерно, на участке II выражается:

$$P_D = P_0 + \frac{V_0}{k} \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{c} + \frac{1}{c_0}\right)} \cdot \sin k\tau. \quad (5.140)$$

Второе слагаемое в зависимости (5.140) обусловлено восстановлением скорости движения зерна в момент перехода с участка I на участок II. С увеличением параметра c_0 сила P_D увеличивается и при условии $c_0 \rightarrow \infty$ равна

$$P_{D\max} = P_0 + \frac{V_0}{k} \cdot c. \quad (5.141)$$

В результате доказана определяющая роль падения скорости движения режущего инструмента в формировании динамических нагрузок.

5.8. Вынужденные колебания при резании материалов

5.8.1. Вынужденные колебания при резании материалов лезвийными инструментами

Возбуждение незатухающих колебаний при резании материалов может произойти вследствие периодичности процесса стружкообразования, когда радиальная составляющая сила резания P_y и толщина упруго-пластически деформируемого слоя материала d_1 от перемещения инструмента $x = V \cdot \tau$ (где V – скорость резания, м/с; τ – время, с) изменяются по закону, показанному на рис. 5.19.

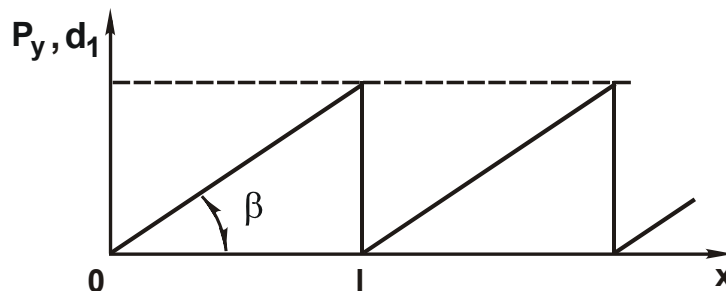


Рис. 5.19. Изменение P_y и d_1 от перемещения инструмента $x = V \cdot \tau$

Максимальное значение P_y достигается в момент отделения элементарного объема материала по условной плоскости сдвига обрабатываемого материала, расположенной под углом β к направлению движения режущего инструмента, и равно

$$P_y = \frac{\sigma}{K_{\text{рез}}} \cdot F \quad (5.142)$$

или

$$P_y = \frac{HV}{K_{\text{рез}}} \cdot F', \quad (5.143)$$

где $\sigma = \frac{4 \cdot \tau_{\text{сдв}}}{K_{\text{рез}}}$ – условное напряжение резания, Н/м²;

$K_{рез} = \text{ctg}(\psi - \gamma)$ – коэффициент резания;

γ – передний угол режущего инструмента;

ψ – условный угол трения на передней поверхности режущего инструмента;

$F = a \cdot b$ – площадь поперечного сечения среза, м^2 ;

a, b – толщина и ширина среза, м ;

$HV, \tau_{сдв}$ – твердость и предел прочности на сдвиг обрабатываемого материала, $\text{Н}/\text{м}^2$;

$F' = d_1 \cdot b$ – площадь поперечного сечения среза, подвергающегося упруго-пластическому деформированию (смятию), м^2 .

После преобразований зависимости (5.142) и (5.143) выразятся:

$$P_y = 4 \cdot \tau_{сдв} \cdot \text{tg}^2(\psi - \gamma) \cdot F; \quad (5.144)$$

$$P_y = HV \cdot \text{tg}(\psi - \gamma) \cdot F'. \quad (5.145)$$

Сравнивая зависимости (5.144) и (5.145), имеем

$$d_1 = \frac{4 \cdot \tau_{сдв} \cdot \text{tg}(\psi - \gamma) \cdot a}{HV}. \quad (5.146)$$

Как видно, толщина упруго-пластически деформируемого слоя материала d_1 тем больше, чем больше толщина среза a , $\text{tg}(\psi - \gamma)$ и $\tau_{сдв} / HV$. На участке $0 \dots l$ (рис. 5.19) радиальную составляющую силы резания P_y следует представить в виде:

$$P_y = \frac{HV}{K_{рез}} \cdot F', \quad (5.147)$$

где $F' = \text{tg}\beta \cdot b \cdot x$ – текущее значение площади F' , м^2 .

Тригонометрическая функция $\text{tg}\beta$ выражается через известное соотношение $\text{tg}2\beta = K_{рез}$ [131] с помощью тригонометрической функции

$\text{tg}2\beta = \frac{2 \cdot \text{tg}\beta}{1 - \text{tg}^2\beta}$, после преобразования которой получено:

$$\text{tg}\beta = \frac{1}{\left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}\right)}, \quad (5.148)$$

где β – условный угол сдвига обрабатываемого материала.

Колебание одномассовой системы под действием радиальной составляющей силы резания P_y в направлении оси ou опишется дифференциальным уравнением:

$$m \cdot \ddot{y} + c \cdot y = P_y \quad \text{или} \quad (5.149)$$

$$\ddot{y} + k^2 \cdot y = \frac{HV}{K_{\text{рез}} \cdot m} \cdot \text{tg}\beta \cdot v \cdot V \cdot \tau, \quad (5.150)$$

где $k^2 = c/m$.

Частное решение дифференциального уравнения:

$$y = A \cdot \tau, \quad (5.151)$$

где $A = \frac{HV \cdot \text{tg}\beta \cdot v \cdot V}{c \cdot K_{\text{рез}}}$.

Общее решение дифференциального уравнения (5.150):

$$y = B_1 \cdot \sin k\tau + B_2 \cdot \cos k\tau + A \cdot \tau, \quad (5.152)$$

где B_1, B_2 – постоянные интегрирования, определяются из начальных условий.

При нулевых начальных условиях, т.е. при $y(0)=0$ и $\dot{y}(0)=0$, зависимость (5.152) принимает вид:

$$y = -\frac{HV \cdot \text{tg}\beta \cdot v \cdot V}{c \cdot K_{\text{рез}}} \cdot \sin k\tau + \frac{HV \cdot \text{tg}\beta \cdot v \cdot V}{c \cdot K_{\text{рез}}} \cdot \tau. \quad (5.153)$$

Таким образом показано, что увеличивающаяся во времени сила резания P_y возбуждает колебания массы m с частотой, равной собственной частоте системы k .

Считая, что радиальная составляющая сила резания P_y является периодической функцией, важно определить величину упругого перемещения (амплитуду установившихся колебаний), используя два условия совместности:

$$\begin{cases} y(0) = y(T), \\ \dot{y}(0) = \dot{y}(T), \end{cases} \quad (5.154)$$

где $T = l/V$.

Подчиняя решение (5.152) условиям совместности (5.154), имеем:

$$y = \frac{A \cdot T}{2} \cdot \text{ctg} \frac{kT}{2} \cdot \sin k\tau + \frac{A \cdot T}{2} \cdot \cos k\tau + A \cdot \tau \quad (5.155)$$

или

$$y = A \cdot \left[\frac{T}{2 \sin \frac{kT}{2}} \cdot \sin(k\tau + \varphi) + \tau \right], \quad (5.156)$$

где $\varphi = -kT/2$ – сдвиг по фазе.

С учетом условия $T = 2\pi/\omega$ (где ω – частота периодических изменений силы P_y) при $k/\omega = n$ (где $n = 1; 2; 3; \dots$ – целое число) тригонометрическая функция $\sin kT/2 = 0$ и в системе наступает резонанс. Имеет место бесконечное множество резонансных состояний, поскольку n неограниченно. Очевидно, в силу рассеивания энергии резонансы при условии $n > 1$ проявляться практически не будут. Основное резонансное состояние будет наблюдаться при $n = 1$ ($\omega = k$). В этом случае определяющим в зависимости (5.156) является первое слагаемое, которое принимает наибольшее значение при условии $\sin(k\tau + \varphi) = 1$, т.е.

$$y_{\max} = A \cdot \frac{T}{2 \sin \frac{kT}{2}}. \quad (5.157)$$

Параметр T с учетом зависимости (5.146) описывается:

$$T = \frac{4 \cdot \tau_{\text{сдв}} \cdot a}{HV \cdot V_{\text{рез}}} \cdot \frac{\left(1 + \sqrt{1 + K_{\text{рез}}^2}\right)}{K_{\text{рез}}}. \quad (5.158)$$

Соответственно частота ω равна

$$\omega = \frac{\pi \cdot HV \cdot V_{\text{рез}}}{2 \cdot \tau_{\text{сдв}} \cdot a} \cdot \frac{K_{\text{рез}}}{\left(1 + \sqrt{1 + K_{\text{рез}}^2}\right)}. \quad (5.159)$$

С увеличением скорости резания V частота увеличивается ω и при достижении значения $\omega = k$ наступает резонанс. Следовательно, с увеличением скорости резания V упругое перемещение y_{\max} в соответствии с зависимостью (5.157) первоначально увеличивается, затем уменьшается, проходя точку максимума (с учетом диссипативных сил при $\omega = k$ упругое перемещение y_{\max} примет конечное значение).

Зависимость (5.157) с учетом зависимостей (5.158) и (5.151) опишется:

$$y_{\max} = \frac{2 \cdot V \cdot \tau_{\text{сдв}} \cdot a}{c} \cdot \text{tg}^2(\alpha - \gamma) \cdot \frac{1}{\sin \frac{kT}{2}}. \quad (5.160)$$

С увеличением переднего угла инструмента γ , жесткости c и уменьшением параметров v и $\tau_{\text{сдв}}$ при условии $\omega = k$ упругое перемещение y_{\max} уменьшится. С увеличением толщины среза a в соответствии с зависимостью (5.159) частота ω уменьшается от ∞ до 0. Следовательно, возможно возникновение условия резонанса ($\omega = k$).

Аналогично скорости резания, с увеличением толщины среза а упругое перемещение y_{\max} первоначально увеличивается, затем уменьшается. Входящий в числитель зависимости (5.160) параметр a усиливает увеличение y_{\max} .

Механические характеристики обрабатываемого материала, входящие в зависимость (5.159) в виде соотношения $HV / \tau_{\text{сдв}}$, и параметр $K_{\text{рез}}$ на частоту ω влияют несущественно.

Однако с увеличением $\tau_{\text{сдв}}$ и угла трения α упругое перемещение y_{\max} значительно увеличивается. Таким образом показано доминирующее влияние физических параметров T и ω на интенсивность колебаний. Уменьшить упругое перемещение (амплитуду колебаний) можно исключением резонансного состояния системы путем выбора соотношений параметров обработки в соответствии с зависимостями (5.158) и (5.159).

Теоретические данные согласуются с экспериментальными данными, приведенными на рис. 5.20 [55].

С увеличением скорости резания (при постоянной толщине среза) упругое перемещение (амплитуда колебаний) в некотором интервале увеличивается, а затем уменьшается.

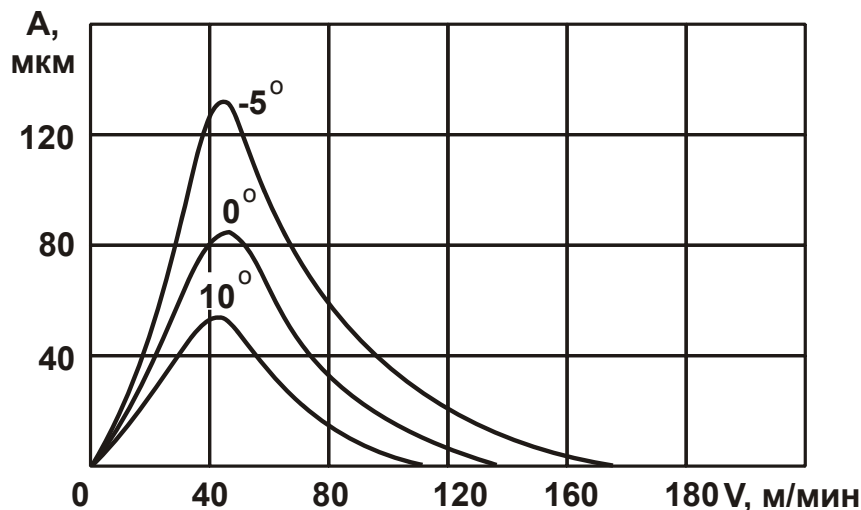


Рис. 5.20. Влияние скорости резания и переднего угла резца γ на амплитуду колебаний при точении: обрабатываемый материал – сталь 40Х, $\varphi = 30^\circ$, $t = 2\text{ мм}$, $S = 0,25\text{ мм/об}$.

С увеличением жесткости системы с амплитуда колебаний уменьшается (рис. 5.21 [13]).

При продольном точении ширину резания в можно представить зависимостью $v = t/\sin\varphi$ (рис. 5.22), где t – глубина резания, м; φ – главный угол резца в плане. Тогда с увеличением глубины резания t упругое перемещение (амплитуда колебаний) y_{\max} , исходя зависимости (5.149) увеличивается, а с увеличением главного угла резца в плане φ – уменьшается.

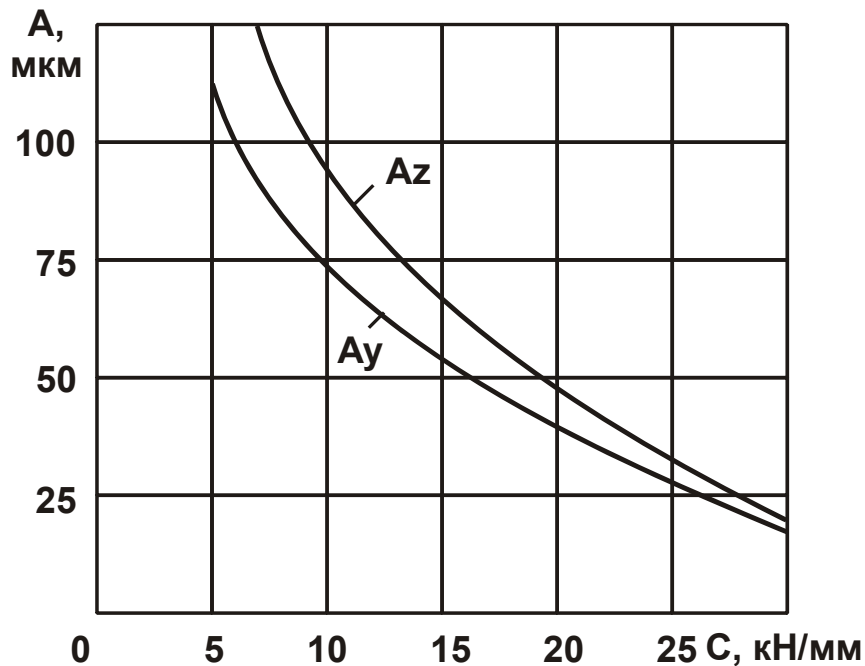


Рис. 5.21. Зависимость амплитуды колебаний от жесткости системы при точении стали X15H5Д2Т

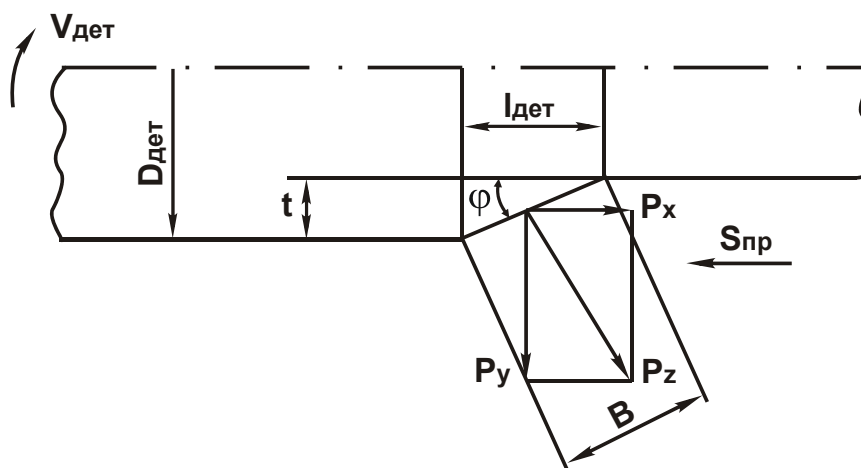


Рис. 5.22. Расчетная схема продольного точения

Полученные теоретические решения согласуются с экспериментальные данными (рис. 5.23 [11] и рис. 5.24 [28]), полученными для продольного точения.

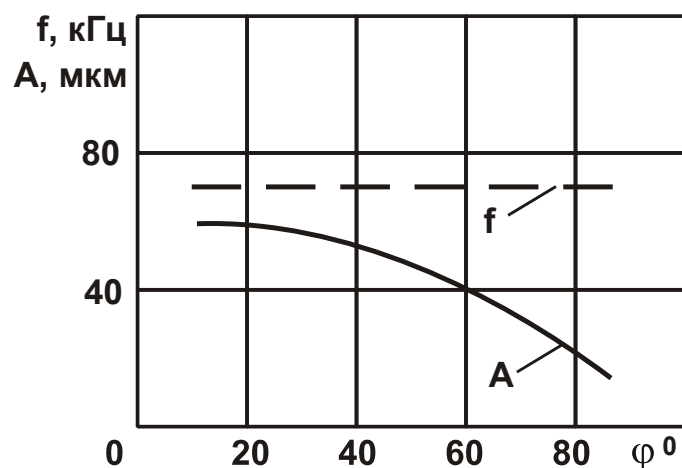


Рис. 5.23. Влияние главного угла резца в плане φ на частоту f и амплитуду A колебаний при точении: сталь 40X; $\gamma = 8^\circ$; $t = 2$ мм; $S = 0,25$ мм/об.; $V = 45$ м/мин

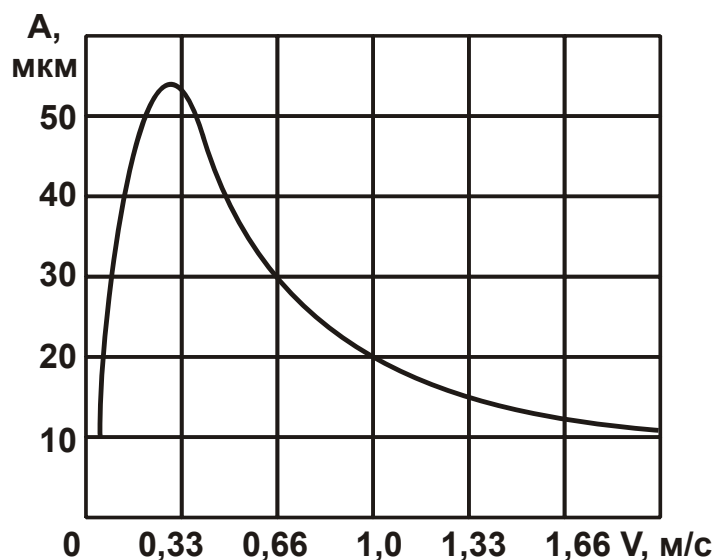


Рис. 5.24. Зависимость амплитуды колебаний от скорости резания при радиальном точении лопаточным резцом из ВК8: $\gamma = 0^\circ$; $\alpha = 12^\circ$; $b = 4$ мм; $S = 0,15$ мм/об.; сталь X15H5Д2Т

5.8.2. Вынужденные колебания при шлифовании материалов

При шлифовании и тонком точении параметр $K_{рез}$ описывается

$K_{рез} = 2 \cdot \beta = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot a \cdot \tau_{сдв}}{HV \cdot \rho}}$. Тогда зависимость (5.160) примет вид:

$$y_{max} = \frac{2 \cdot v}{c} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{HV \cdot \rho}{2}\right)} \cdot \tau_{сдв} \cdot a \cdot \frac{1}{\sin \frac{kT}{2}} \quad (5.161)$$

С учетом $K_{рез} < 1$ и $V = V_{кр}$ зависимость (5.159) видоизменится:

$$\omega = \frac{\pi \cdot V_{кр}}{4} \cdot \sqrt[3]{\frac{2}{\rho} \cdot \left(\frac{HV}{\tau_{сдв} \cdot a} \right)^2}. \quad (5.162)$$

На частоту колебаний ω существенное влияние оказывают три параметра: $V_{кр}$, a и ρ . Поэтому выполнение условия $\omega = k$ возможно при изменении этих трех параметров.

Уменьшить упругое перемещение (амплитуду колебаний) u_{max} можно исключением резонанса $\left| \sin \frac{kT}{2} \right| > 1$ и уменьшением параметров v , ρ , a (увеличением c). Очевидно, наиболее эффективно уменьшить радиус округления режущего зерна ρ путем применения правки круга или осуществления режима самозатачивания круга, поскольку это не требует снижения производительности обработки.

Толщину среза отдельным зерном $a = a_z$ при условии $a_z < \rho$ можно представить в виде [18]:

$$a_z = \frac{315 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{t \cdot \left(\frac{2}{D_{кр}} + \frac{2}{D_{дет}} \right)}}{m \cdot V_{кр} \cdot \rho^2}, \quad (5.163)$$

где m , \bar{X} – объемная концентрация и зернистость круга, м;

$V_{дет}$ – скорость детали, м/с;

$D_{кр}$, $D_{дет}$ – диаметры круга и детали, м;

t – глубина шлифования, м.

После подстановки зависимости (5.152) в (5.150) и (5.151), имеем:

$$u_{max} = \frac{2 \cdot v}{c} \cdot \sqrt[3]{\frac{80 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{t \cdot \left(\frac{2}{D_{кр}} + \frac{2}{D_{дет}} \right)} \cdot HV^2 \cdot \tau_{сдв}}{m \cdot V_{кр}}} \cdot \frac{1}{\sin kT/2}, \quad (5.164)$$

$$\omega = \frac{\pi \cdot V_{кр}}{4} \cdot \sqrt[3]{2 \cdot \rho^3 \cdot \frac{m \cdot V_{кр} \cdot HV}{315 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{t \cdot \left(\frac{1}{D_{кр}} + \frac{1}{D_{дет}} \right)} \cdot \tau_{сдв}}}. \quad (5.165)$$

Как видно, основное влияние на частоту ω оказывают скорость круга $V_{кр}$, радиус округления зерна ρ и зернистость круга \bar{X} . С увеличением параметров $V_{кр}$, ρ и уменьшением \bar{X} частота ω увеличивается и возможно выполнение условия резонанса $k = \omega$. Следовательно, для устранения колебаний необходимо в первую очередь управлять этими тремя параметрами.

Частота ω также увеличивается с увеличением концентрации круга m и уменьшением скорости детали $V_{дет}$ и глубины шлифования t . Учитывая определяющее влияние на y_{max} множителя $\sin kT/2$, в связи с резонансным состоянием системы, с изменением параметров $V_{кр}$, ρ , \bar{X} , m_n , $V_{дет}$ и t упругое перемещение (амплитуда колебаний) может изменяться по экстремальной зависимости, проходя точку максимума. В ограниченных пределах изменения этих параметров возможно только увеличение или уменьшение y_{max} .

Если выполняются условие $|\sin kT/2| > 0$, то упругое перемещение (амплитуда колебаний) y_{max} , согласно зависимости (5.64), увеличивается с увеличением параметров B , \bar{X} , $V_{дет}$, t , HV , $\tau_{сдв}$ и уменьшением c , m , $V_{кр}$.

Теоретические данные согласуются с экспериментальными данными Филимонова Л. Н. [139], Лурье Г. В. [64; 65] и других исследователей. Таким образом показано, что возбуждение незатухающих колебаний при резании может происходить от периодически изменяющейся силы резания, обусловленной периодичностью процесса стружкообразования при резании.

Выводы

1. В работе определены условия возбуждения автоколебаний при механической обработке и условия уменьшения их интенсивности. Теоретически установлено, что возбуждение автоколебаний при точении в радиальном направлении происходит при наличии падающего участка характеристики трения от скорости резания. Поэтому исключая этот участок, можно исключить возбуждение автоколебаний в технологической системе. Установлено также, что уменьшить интенсив-

ность автоколебаний можно увеличением коэффициента сопротивления системы и уменьшением площади поперечного сечения среза.

2. Теоретически установлено, что при точении вследствие наличия падающего участка характеристики трения от скорости резания в технологической системе могут возникнуть автоколебания в тангенциальном направлении. При этом имеет место экстремум (максимум) амплитуды колебаний от скорости резания, что согласуется с экспериментальными данными. Поэтому эффективно обработку производить со значениями скорости резания, исключая зону возникновения интенсивных автоколебаний.

3. Показано, что при точении автоколебания могут возникнуть вследствие достижения определенной площадки износа на задней поверхности режущего инструмента и ее интенсивного трения с обрабатываемым материалом. Расчетами установлено, что с увеличением ширины среза и твердости обрабатываемого металла амплитуда автоколебаний увеличивается; с увеличением скорости резания амплитуда изменяется по экстремальной зависимости, достигая максимума, а с увеличением подачи – непрерывно уменьшается. Это согласуется с известными экспериментальными данными. Исключить автоколебания в этом случае можно, например, применением инструментов из синтетических сверхтвердых материалов, характеризующихся высокой износостойкостью и низким коэффициентом трения, практически не зависящим от скорости скольжения.

4. Теоретически определены условия возникновения автоколебаний при точении вследствие трения образующейся стружки с передней поверхностью режущего инструмента. Установлено, что автоколебания возникают, если сила сопротивления системы меньше радиальной составляющей силы резания, а основным условием уменьшения интенсивности автоколебаний в этом случае является уменьшение радиальной составляющей силы резания.

5. Теоретически определены условия возникновения колебаний при врезании режущего инструмента в обрабатываемый материал. Показано, что при небольшом значении коэффициента сопротивления системы амплитуда колебаний может увеличиваться во времени или же оставаться постоянной, принимая значения, превышающие в 2 и более раз статическое перемещение от действия одной и той же по величине силы резания.

6. Теоретически определены условия возникновения резонансных состояний технологической системы при периодическом резании, когда режущий многолезвийный инструмент периодически контактирует с обрабатываемой деталью. Показано, что исключить резонансные состояния можно регулированием времени контакта режущего инструмента с обрабатываемой деталью и времени между контактами за счет изменения конструктивных параметров инструмента и режимов резания.

7. Теоретически определена роль динамического фактора при микрорезании единичным абразивным зерном. Показано, что в начальный момент обработки происходит падение скорости перемещения единичного абразивного зерна и поэтому ее дальнейшее восстановление сопровождается увеличением в несколько раз силы, действующей на зерно, по отношению к статическому значению силы резания. Это может привести к механическому разрушению зерна. Аналогичные результаты получены применительно к процессам точения и фрезерования. Показано, что и в этих случаях в начальный момент обработки возникают динамические перегрузки режущего инструмента, приводящие к его повышенному износу и даже к разрушению.

8. Проведен теоретический анализ вынужденных колебаний, возникающих при резании материалов вследствие периодичности процесса стружкообразования. Определены условия возникновения резонансных состояний в технологической системе и условия их исключения. Показано, что существует экстремальное значение скорости резания, при которой возникают резонансные состояния. Поэтому основным условием уменьшения интенсивности вынужденных колебаний следует рассматривать регулирование скорости резания, что подтверждается экспериментальными данными, приведенными в научно-технической литературе.

Установлено, что при шлифовании частота и амплитуда вынужденных колебаний определяется главным образом скоростью круга, степенью затупления режущих зерен и зернистостью круга. Поэтому, обеспечивая в процессе шлифования высокую режущую способность круга, можно добиться существенного уменьшения амплитуды колебаний и, соответственно, повышения качества и производительности обработки.

Раздел 6

Теоретические подходы к проектированию технологий высококачественной и высокопроизводительной механической обработки

6.1. Управление тепловыми процессами при механической обработке

Процесс резания материалов основан на механическом разрушении поверхностного слоя обрабатываемой детали. Исходя из этого, все основные технико-экономические показатели обработки должны определяться силовым фактором. Однако, как показывает практика, при резании материалов выделяется большое количество тепла, которое отрицательно сказывается на режущей способности инструмента и качестве обработки – износ инструмента резко увеличивается, а в поверхностном слое обрабатываемой детали возникают температурные дефекты (прижоги, микротрещины и т.д.). В этих условиях температурный фактор становится определяющим. Режимы резания и производительность обработки ограничиваются температурой резания.

Чтобы уменьшить отрицательную роль температурного фактора в процессе резания, прибегают к различным технологическим средствам: применяют эффективные смазочно-охлаждающие жидкости и другие технологические среды, снижают трение в зоне резания, применяют инструментальные материалы, характеризующиеся высокой теплостойкостью и теплопроводностью и т.д. В настоящее время накоплен большой опыт управления тепловой напряженностью процесса резания. Однако в полной мере проблема не решена, в особенности при резании труднообрабатываемых материалов. Этим объясняются многочисленные теоретические и экспериментальные исследования тепловых процессов при резании, а также то, что теплофизика резания из всех разделов теории резания материалов наиболее математически формализована. Основу теплофизики резания составляют фундаментальные решения дифференциального уравнения теплопроводности. Большое внимание решению уравнения теплопроводности

уделено применительно к процессам шлифования, исследованию термодинамических циклов при шлифовании. Заслуживает особого внимания полученное профессором Якимовым А. В. теоретическое решение, состоящее в возможности исключения теплового насыщения поверхностного слоя обрабатываемой детали и снижения температуры за счет применения кругов с прерывистой рабочей поверхностью [145 – 148]. Данное решение получило широкое практическое применение в новых конструкциях абразивных и алмазно-абразивных инструментов с прерывистой рабочей поверхностью.

Теплофизике резания посвящены монографии и учебники [15; 25 – 27; 70; 71; 106; 115; 124; 132; 149]. Особенностью настоящего исследования является теоретическое обоснование путей снижения температуры резания для повышения качества, производительности и экономичности обработки лезвийными и абразивными инструментами. Учитывая сложность теоретического анализа тепловых процессов при резании, предложен системный подход, реализующий принцип – от простого к сложному. Первоначально рассмотрены упрощенные тепловые задачи в одномерной постановке, а затем – более сложные в двухмерной постановке. Это позволило методически правильно решить поставленные задачи, приблизить математические модели к реальным условиям обработки, достаточно точно рассчитать температуру резания и другие параметры обработки, обусловленные температурным фактором.

Соединяя решения теплофизики и механики резания, получены аналитические зависимости для определения температуры резания при лезвийной и абразивной обработке с учетом режимов резания, характеристик режущего инструмента и обрабатываемой детали, что открывает новые возможности оптимизации процессов резания по температурному критерию. В частности, приведены новые решения относительно эффективного применения глубинного и прерывистого методов шлифования, исключения нежелательных растягивающих напряжений в поверхностном слое детали и т.д.

Необходимо отметить, что температурный фактор при шлифовании во многих случаях является основным ограничением применения на практике этого эффективного метода финишной обработки [45; 59; 74; 105; 106; 123; 124; 127; 135; 138; 147; 149; 150]. Поэтому определение условий уменьшения тепловой напряженности процесса шлифо-

вания имеет большое теоретическое и практическое значение, открывает новые направления высококачественной обработки деталей из закаленных сталей и других труднообрабатываемых материалов [60; 70; 71; 104; 115; 129].

Исследование тепловых процессов при шлифовании требует разработки математических моделей, позволяющих производить оптимизационные расчеты по определению наиболее эффективных вариантов обработки по температурному критерию. В связи с этим в настоящем параграфе теоретически обоснованы условия уменьшения температуры шлифования и повышения производительности обработки.

Для определения температуры шлифования θ использован теоретический подход, предложенный в работах [87; 90; 92], применительно к шлифованию прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга с постоянной скоростью $V_{рез}$ (рис. 6.1):

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot z, \quad (6.1)$$

где σ – условное напряжение резания, Н/м²;

z – относительная величина температуры (0 ... 1), которая определяется из уравнения: $\bar{l}_1 = \frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot l_1 \cdot V_{рез} = -\ln(1-z) - z$;

\bar{l}_1 – безразмерная величина;

l_1 – толщина слоя сошлифованного материала, м;

l_2 – толщина поверхностного слоя обрабатываемой детали, в котором концентрируется выделяющееся при шлифовании тепло, м;

c – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К);

ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³;

λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/м·К.

Необходимо отметить, что относительная величина температуры z по физической сути определяет долю тепла, уходящего в стружки при шлифовании. Очевидно, при условии $z \rightarrow 0$ фактически все образующееся при резании тепло уходит в обрабатываемую деталь, а при условии $z \rightarrow 1$, наоборот, все тепло уходит в стружки.

Согласно приведенной зависимости, температура шлифования θ определяется относительной величиной температуры z , которая является функцией параметров шлифования. Таким образом, темпера-

тура шлифования θ неявно выражена через параметры шлифования, что затрудняет проведение анализа и оптимизации параметров шлифования по температурному критерию.

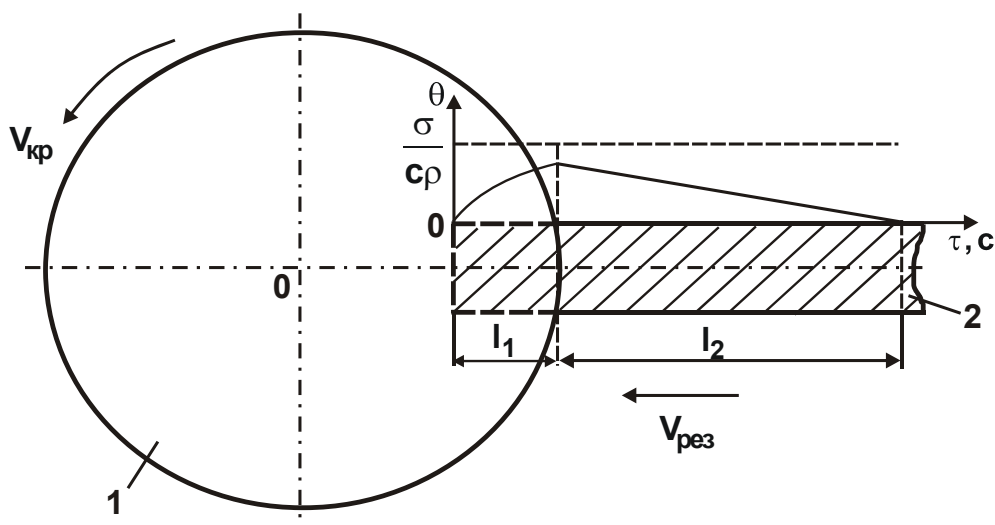


Рис. 6.1. Расчетная схема параметров шлифования прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга:
1 – круг; 2 – обрабатываемый образец

В связи с этим важно получить аналитическое решение, позволяющее в явном виде выразить температуру шлифования θ относительно параметров шлифования. Для этого следует обратиться к исходному интегральному уравнению [90] для определения температуры шлифования $\theta(\tau)$, составленному на основе баланса тепла, уходящего в образующиеся стружки и обрабатываемый образец с площадью поперечного сечения стержня F :

$$c \cdot \rho \cdot F \cdot V_{рез} \cdot \int_0^{\tau} \theta(\tau) \cdot d\tau + \frac{0,5 \cdot c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot F^2}{N} \cdot [\theta(\tau)]^2 = N \cdot \tau, \quad (6.2)$$

где τ – время обработки, с;

N – мощность теплового источника, Вт.

Уравнение (6.2) можно упростить, приняв первое слагаемое в левой части равным нулю. С физической точки зрения это означает, что тепловой источник не перемещается вглубь поверхностного слоя обрабатываемой детали со скоростью $V_{рез}$ (рис. 6.1), а остается неподвижным в начальной точке в течение времени τ_1 . Тогда с учетом соотношений [90]: $q = N/F = \sigma \cdot V_{рез}$ температура шлифования θ определяется:

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot V_{\text{рез}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot c \cdot \rho}{\lambda} \cdot \tau_1} = \sigma \cdot V_{\text{рез}} \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \tau_1}, \quad (6.3)$$

где q – плотность теплового потока, Вт/м².

Принимая $z = \frac{\theta}{\left(\frac{\sigma}{c \cdot \rho}\right)}$, получено $z = V_{\text{рез}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot c \cdot \rho}{\lambda} \cdot \tau_1}$. Откуда

$$\tau_1 = \frac{\lambda \cdot z^2}{2 \cdot c \cdot \rho \cdot V_{\text{рез}}^2}. \quad (6.4)$$

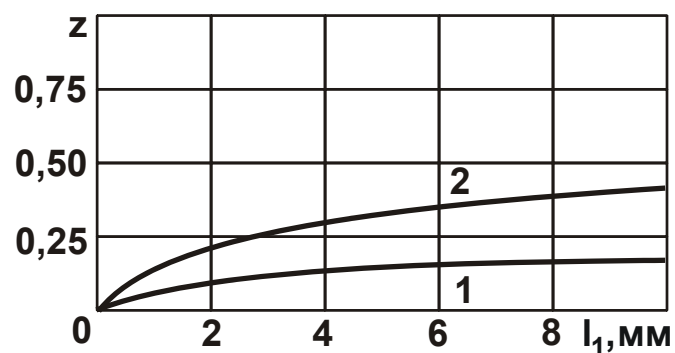
Зависимость (6.4) отличается от аналогичной зависимости $\tau = \frac{\lambda \cdot \bar{l}_1}{c \cdot \rho \cdot V_{\text{рез}}^2}$ [90], учитывающей движение теплового источника вдоль обрабатываемого образца со скоростью $V_{\text{рез}}$. Для оценки степени их отличия следует рассмотреть отношение τ_1/τ :

$$\frac{\tau_1}{\tau} = \frac{z^2}{2 \cdot \bar{l}_1}. \quad (6.5)$$

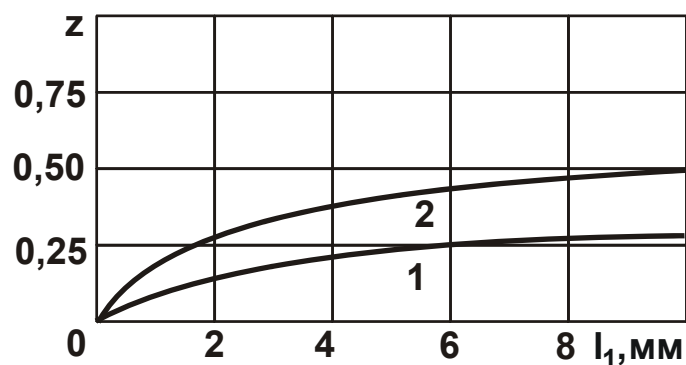
Расчетами установлено, что при условии $z < 0,1$ расхождение значений τ_1 и τ составляет до 6 %, при $0,1 < z < 0,2$ – до 14 %, при $0,2 < z < 0,3$ – до 20 %, при $0,3 < z < 0,4$ – до 27 %, а при $0,4 < z < 0,5$ – до 35 %. На рис. 6.2,а приведены расчетные значения относительной величины температуры z в зависимости от величины l_1 для разных значений $V_{\text{рез}}$ при шлифовании твердого сплава ВК8 ($c = 175,9$ Дж/кг·К; $\rho = 15 \cdot 10^3$ кг/м³; $\lambda = 50$ Вт/м·К; коэффициент температуропроводности $a = \lambda / c \cdot \rho = 18,9 \cdot 10^{-6}$ м²/с). Как видно, величина z принимает относительно небольшие значения, которые меньше единицы. Это свидетельствует о том, что основная часть выделяющегося тепла уходит в обрабатываемую деталь, в образующиеся стружки уходит значительно меньше тепла. Чем больше параметры l_1 и $V_{\text{рез}}$, тем больше z и, соответственно, больше доля тепла, уходящего в образующиеся стружки.

Для сравнения на рис. 6.2,б приведены расчетные значения z при шлифовании стали ШХ15 ($a = \lambda / c \cdot \rho = 8,4 \cdot 10^{-6}$ м²/с), которые, как видно, больше, чем при шлифовании твердого сплава. Это связано с меньшим коэффициентом температуропроводности a у стали ШХ15. Таким образом, расчетами установлено, что при шлифовании величина

на z изменяется в небольших пределах – 0,1 ... 0,2 и лишь при высокопроизводительном шлифовании достигает значения 0,5. Этим показано, что в связи с небольшими значениями скорости $V_{рез}$ и величины z в первом приближении движение теплового источника вдоль обрабатываемого образца (рис. 6.1) можно не рассматривать и расчет температуры шлифования θ производить по зависимости (6.3). Это упрощает расчет, не нарушая физические закономерности распространения тепла и формирования температуры при шлифовании. Однако при этом в каждом конкретном случае необходимо оценивать величину z и, соответственно, точность расчета температуры шлифования.



а



б

Рис. 6.2. Зависимость z от величины снимаемого припуска I_1 при шлифовании твердого сплава ВК8 (а) и стали ШХ15 (б):
1 – $V_{рез} = 2$ мм/мин; 2 – $V_{рез} = 10$ мм/мин

Далее произведены теоретический анализ условий уменьшения температуры шлифования и экспериментальная оценка достоверности полученных решений. На рис. 6.3 показаны рассчитанные по зависимости (6.1) значения температуры шлифования θ твердого сплава ВК8 с учетом значений z , приведенных на рис. 6.2,а. Условное напряжение резания σ определено по зависимости [131]: $\sigma = 2 \cdot \sigma_{сж} / K_{рез}$, где $\sigma_{сж}$ –

предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м^2 ; $K_{\text{рез}}$ – коэффициент резания, равный отношению тангенциальной и радиальной составляющих силы резания. В расчетах принято: $\sigma_{\text{сж}} = 4 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$; $K_{\text{рез}} = 0,3$; $\sigma = 26,7 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$.

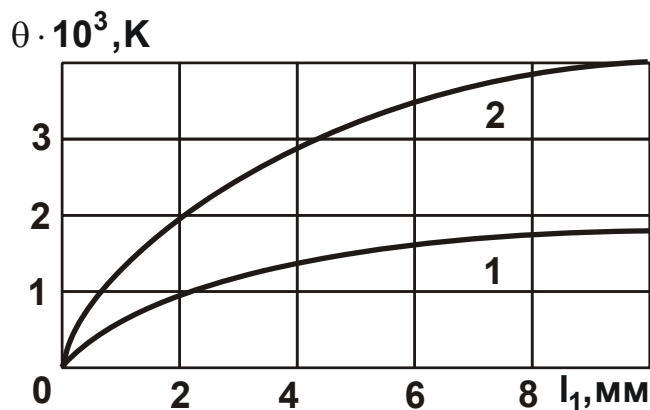


Рис. 6.3. Зависимость температуры θ от величины l_1 при шлифовании твердого сплава ВК8: 1 – $V_{\text{рез}} = 2 \text{ мм/мин}$; 2 – $V_{\text{рез}} = 10 \text{ мм/мин}$

Из рис. 6.3 следует, что при скорости $V_{\text{рез}} = 2 \text{ мм/мин}$ с увеличением величины l_1 температура шлифования θ увеличивается, достигая при $l_1 = 10 \text{ мм}$ значения $1500 \text{ }^\circ\text{C}$, при котором на обрабатываемых поверхностях еще не образуются температурные дефекты. При скорости $V_{\text{рез}} = 10 \text{ мм/мин}$ температура шлифования θ принимает значительно большие значения, при которых гарантированно на обрабатываемых поверхностях будут образовываться температурные дефекты. Чтобы их исключить, естественно необходимо уменьшить температуру шлифования θ . Это может быть достигнуто за счет уменьшения величины l_1 путем разбиения снимаемого припуска на части и осуществления многопереходной обработки, обеспечивающей периодическое прерывание процесса шлифования с целью создания условий для частичного остывания обрабатываемой детали. Прерывание процесса шлифования во времени можно обеспечить путем отвода на определенное время круга от детали или же, совершая перемещение детали по касательной к рабочей поверхности круга, т.е. обеспечивая продольную или круговую подачи. Данное условие реализовано, по сути, во всех схемах шлифования (круглое наружное, внутреннее и плоское шлифование).

На рис. 6.4 показан характер изменения температуры шлифования θ от времени обработки τ для разных условий нагрева и остывания образца. Как видно, при обработке в n переходов температура шлифования θ меньше, чем при обработке в один переход. Важным условием снижения температуры шлифования за счет периодического прерывания процесса следует рассматривать применение шлифовальных кругов с прерывистой рабочей поверхностью [147]. Как установлено экспериментально, периодический контакт круга с обрабатываемой поверхностью позволяет до 50 % уменьшить температуру шлифования и тем самым повысить качество обработки.

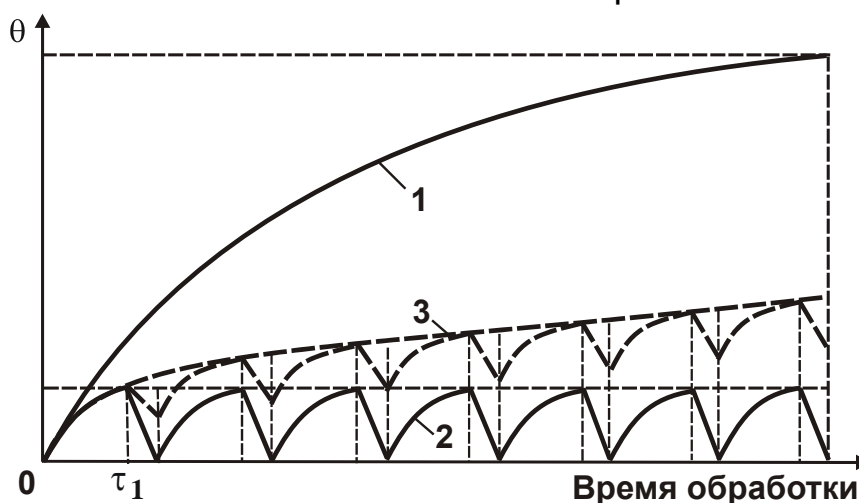


Рис. 6.4. Зависимость температуры шлифования θ от времени при обработке в один переход и отсутствии остывания обрабатываемого образца (1) и при обработке в n переходов при полном (2) и частичном (3) остывании образца

Прерывание во времени процесса шлифования является важным, но не единственным путем уменьшения температуры шлифования. Исходя из приведенных зависимостей, основным параметром, влияющим на температуру θ , является условное напряжение резания σ . Чем меньше эта величина, тем меньше температура. По физической сути σ соответствует энергоемкости обработки, определяющей количество энергии, затрачиваемой на съём единицы объема материала. Как известно, при шлифовании энергия расходуется на осуществление процесса резания зернами круга, а также на преодоление силы трения связки круга с обрабатываемым материалом. При этом энергия, затрачиваемая на преодоление силы трения связки круга с обрабатываемым материалом, превосходит энергию, затрачиваемую на осуществ-

ление процесса резания. Исходя из этого, условное напряжение резания σ в большей мере обусловлено процессом трения связки круга с обрабатываемым материалом, чем процессом резания. Следовательно, появляется возможность его уменьшения за счет снижения интенсивности трения в зоне шлифования, применяя для этого эффективные технологические среды и методы правки круга, оптимальные режимы шлифования и т.д.

Важно провести анализ температуры шлифования по упрощенной зависимости (6.3), рассматривая в ней время $\tau_1 = l_1 / V_{рез}$, тогда

$$\theta = \sigma \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot V_{рез} \cdot l_1}{c \cdot \rho \cdot \lambda}}. \quad (6.6)$$

Как видно, температура шлифования θ зависит от трех параметров: σ , $V_{рез}$ и l_1 . Наибольшее влияние на температуру шлифования θ оказывает условное напряжение резания σ . Температура шлифования θ может быть описана известной из курса физики формулой теплопроводности тела:

$$\theta = \frac{q \cdot l_2}{\lambda}. \quad (6.7)$$

С учетом соотношения $q = \sigma \cdot V_{рез}$ зависимость (6.7) примет вид:

$$\theta = \frac{\sigma \cdot V_{рез} \cdot l_2}{\lambda}. \quad (6.8)$$

Откуда толщина поверхностного слоя обрабатываемой детали l_2 , в котором концентрируется выделяющееся при шлифовании тепло (рис. 6.1), выразится:

$$l_2 = \frac{\lambda \cdot \theta}{\sigma \cdot V_{рез}}. \quad (6.9)$$

С физической точки зрения параметр l_2 определяет глубину проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемого материала.

Подставляя в (6.9) зависимость (6.3), получено

$$l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho}} \cdot \tau_1. \quad (6.10)$$

Из зависимости (6.10) вытекает, что параметр l_2 вполне однозначно определяется временем τ_1 . Чем больше τ_1 , тем больше толщина поверхностного слоя образца, в который проникло тепло. Заслу-

живает особого внимания тот факт, что плотность теплового потока $q = \sigma \cdot V_{рез}$ не оказывает влияния на параметр l_2 . С учетом $\tau_1 = l_1 / V_{рез}$ зависимость (6.10) примет вид:

$$l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{l_1}{V_{рез}}} \quad (6.11)$$

Нетрудно видеть, что скорость $V_{рез}$ определяет параметры q и l_2 . С ее увеличением плотность теплового потока q увеличивается, а параметр l_2 , наоборот, уменьшается, причем с меньшей интенсивностью, что приводит к увеличению температуры шлифования θ . Из этого можно заключить, что определяющим фактором в формировании температуры шлифования θ является плотность теплового потока q . Поэтому уменьшить θ можно, прежде всего, за счет уменьшения q , уменьшая условное напряжение резания σ и скорость $V_{рез}$.

Несомненно, для снижения температуры шлифования θ , исходя из зависимости (6.6), необходимо уменьшать и параметр l_1 , равный величине снимаемого припуска (рис. 6.5). Из этого вытекают два направления уменьшения температуры шлифования θ – это уменьшение параметров σ и $V_{рез} \cdot l_1$.

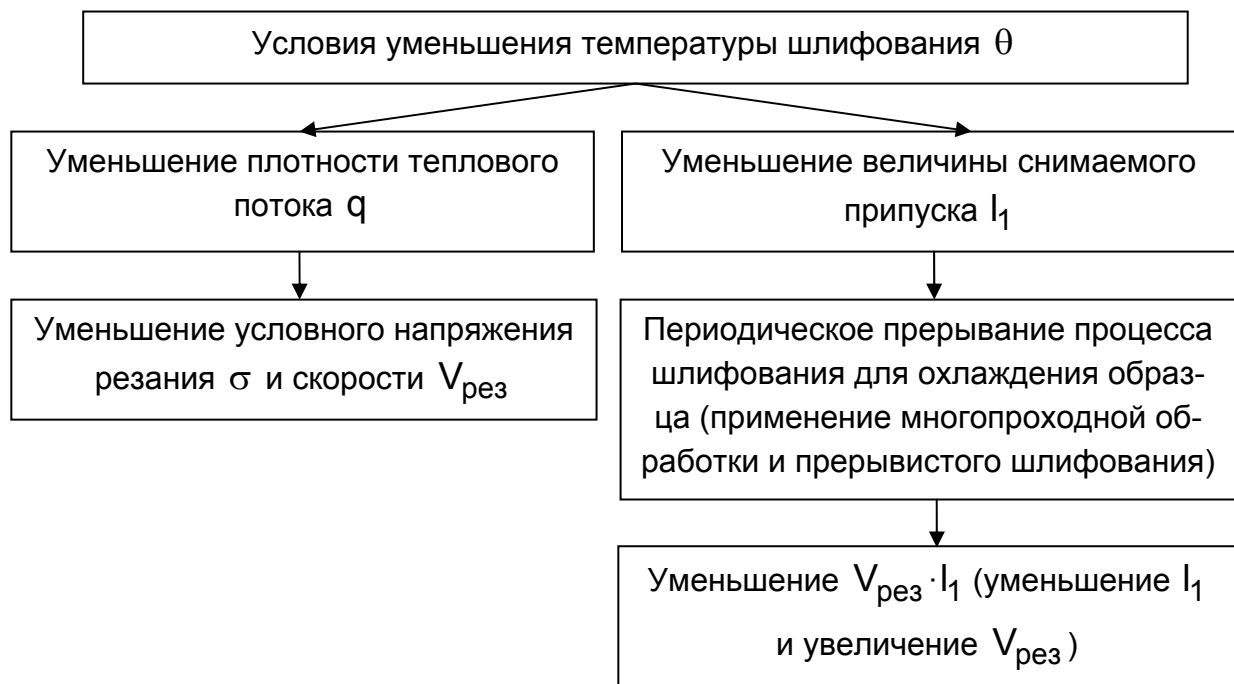


Рис. 6.5. Структурная схема условий уменьшения температуры шлифования θ

Основной путь уменьшения условного напряжения резания σ состоит в повышении режущей способности шлифовального круга и уменьшении интенсивности трения связки и зерен круга с обрабатываемым материалом. Уменьшение произведения параметров $V_{рез} \cdot l_1$ требует проведения оптимизации структуры и параметров операции шлифования по наименьшему времени обработки с учетом ограничения по температуре шлифования, поскольку лишь уменьшение скорости $V_{рез}$ связано со снижением производительности обработки $Q = V_{рез} \cdot F$, что не эффективно.

С целью оценки достоверности полученных зависимостей для определения температуры шлифования θ была произведена их экспериментальная проверка на примере шлифования торцом алмазного круга на керамической связке 12A2 150×10×3 AC4 200/160 4 пластинки шириной $B = 7$ мм из твердого сплава ВК6 с режимом: $V_{кр} = 15$ м/с; $S_{поп} = 0,06$ мм/дв.ход ($t = 0,06$ мм); $S_{пр} = 2$ м/мин [35]. Экспериментально установлено, что тангенциальная составляющая силы резания для данных условий шлифования равна $P_z = 75$ Н. Тогда условное напряжение резания $\sigma = P_z \cdot V_{кр} / Q = 80,35 \cdot 10^3$ МПа, где $Q = B \cdot S_{пр} \cdot t$ – производительность обработки, мм³/с. Как видно, условное напряжение резания σ принимает достаточно большое значение. Следовательно, формирование величины σ происходит как в результате процесса резания, так и процесса трения зерен и связки круга в зоне шлифования. Для заданных условий обработки по зависимости (6.6) была определена температура шлифования θ . В результате установлено, что $\theta = 342,7$ К или $70,7$ °С. Это незначительно отличается от экспериментально установленного значения температуры, равного $\theta = 362$ К или 90 °С, и свидетельствует о достоверности полученных упрощенных зависимостей для определения температуры шлифования θ .

Расчетами установлено, что относительная величина температуры z равна 0,011. Весьма малые значения величины z указывают на то, что фактически все образующееся при шлифовании тепло уходит в обрабатываемую деталь. Параметр l_2 , определяемый зависимостью (6.11), равен 10,66 мм, т.е. при шлифовании нагревается вся обрабатываемая пластина. Именно этим можно объяснить то, что температура поверхностного слоя пластинки принимает относительно неболь-

шее значение – 70 °С. При уменьшении параметра l_2 вследствие уменьшения отвода тепла в обрабатываемую пластинку, температура шлифования была бы выше. Следовательно, с одной стороны, уменьшение скорости $V_{рез}$ позволяет увеличить параметр l_2 по зависимости (6.11), а с другой стороны, уменьшает плотность теплового потока $q = \sigma \cdot V_{рез}$, что в конечном итоге приводит к уменьшению температуры шлифования θ .

Как показано выше, уменьшение параметра l_1 при съеме заданного припуска $\Pi > l_1$ связано с периодическим прерыванием процесса шлифования на время, достаточное для остывания обрабатываемого образца, и осуществлением обработки в несколько переходов. Уменьшение l_1 , исходя из зависимости (6.6), допускает увеличение скорости $V_{рез}$ (при заданной температуре шлифования θ) и производительности обработки.

6.2. Определение оптимальных условий механической обработки деталей по температурному критерию

В настоящее время отсутствуют простые и надежные инженерные методики расчета температуры резания, позволяющие с единых позиций обоснованно подойти к выбору наиболее рациональных методов и условий механической обработки по температурному критерию. В связи с этим, представляется важным решение задачи по разработке общего теоретического подхода к определению теплового баланса и температуры при механической обработке, включая методы абразивной и лезвийной обработки.

Расчетами установлено, что при шлифовании до 90 % выделяющегося тепла уходит в обрабатываемую деталь, а остальное тепло фактически уходит в образующиеся стружки. При точении, наоборот, до 90% выделяющегося при резании тепла уходит в образующуюся стружку. Исходя из этого, получены принципиально различные аналитические зависимости для определения температуры резания при плоском шлифовании периферией круга:

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot \sqrt{\frac{t \cdot V_{дет}}{a}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t}{R_{кр}}}, \quad (6.12)$$

и при обработке лезвийным инструментом [132]:

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho}, \quad (6.13)$$

где $a = \lambda / (c \cdot \rho)$ – коэффициент температуропроводности обрабатываемого материала, $\text{м}^2/\text{с}$;

t – глубина шлифования, м ;

$V_{\text{дет}}$ – скорость детали, $\text{м}/\text{с}$;

$R_{\text{кр}}$ – радиус круга, м .

Расчетами установлено, что множитель $\sqrt{\frac{t \cdot V_{\text{дет}}}{a}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t}{R_{\text{кр}}}}$, входя-

щий в зависимость (6.12), всегда меньше единицы и принимает значения $0,05 \dots 0,2$. Следовательно, температура резания лезвийным инструментом должна быть больше примерно на порядок температуры при шлифовании вследствие того, что при шлифовании фактически все образующееся тепло по причине теплопроводности материала уходит в обрабатываемую деталь. Однако в действительности такого не происходит. Как показывает практика, температура при шлифовании всегда больше температуры резания лезвийным инструментом. Объяснить данную закономерность можно на основе приведенной в работе [131] зависимости для определения условного напряжения резания (энергоемкости обработки):

$$\sigma = 2 \cdot \sigma_{\text{сж}} \cdot \text{tg}(\psi - \gamma), \quad (6.14)$$

где $\sigma_{\text{сж}}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, $\text{Н}/\text{м}^2$;

ψ – условный угол трения на передней поверхности резца ($\text{tg}\psi = f$ – коэффициент трения);

γ – положительный передний угол резца.

Применительно к процессу резания лезвийным инструментом данная зависимость содержит тригонометрическую функцию $\text{tg}(\psi - \gamma)$, а применительно к шлифованию – тригонометрическую функцию $\text{tg}(\psi + \gamma)$. Следовательно, при резании лезвийным инструментом условное напряжение резания (энергоемкость обработки) σ принимает весьма малые значения, поскольку $\gamma \rightarrow \psi$ и $(\psi - \gamma) \rightarrow 0$, а при шлифовании, наоборот, весьма большие значения, т.к. $(\psi + \gamma) \rightarrow 90^\circ$ и

$\operatorname{tg}90^0 \rightarrow \infty$. Из этого вытекает, что температура шлифования, рассчитанная по зависимости (6.12), всегда будет больше температуры резания лезвийным инструментом, рассчитанной по зависимости (6.13). Этому также способствует интенсивное трение связки круга с обрабатываемым материалом. Поэтому доля трения в общей энергоемкости процесса шлифования во много раз может превышать долю процесса резания, в результате образуются значительные температуры при шлифовании, превышающие предельные значения и вызывающие появление на обрабатываемых поверхностях прижогов и других температурных дефектов. Основным путем уменьшения температуры в данном случае является обеспечение высокой режущей способности круга, существенно снижающей интенсивность трения связки круга с обрабатываемым материалом и соответственно условное напряжение резания σ (энергоемкость обработки). Примером тому является разработанная эффективная технология зубошлифования по схеме профильного копирования на современном зубошлифовальном станке модели HOFLEER RAPID 1250 с применением специального высокопористого профильного абразивного круга, обладающего высокой режущей способностью в условиях производительного глубинного шлифования. Съём припуска величиной 0,4 мм на сторону производится за 4 прохода круга со скоростью его перемещения вдоль обрабатываемого зуба, равной 3 м/мин, и скоростью вращения круга 40 м/с. По сравнению с традиционной схемой зубошлифования по методу обката это позволило до 5 раз увеличить производительность обработки. В результате годовая программа обработки зубчатых колес выполняется на одном зубошлифовальном станке модели HOFLEER RAPID 1250, что позволило высвободить 4 зубошлифовальных станка, работающих по схеме обката. При этом на обрабатываемых поверхностях отсутствуют прижоги и другие температурные дефекты, что свидетельствует об относительно низкой температуре шлифования и высокой режущей способности круга в условиях глубинного шлифования. Повышению производительности обработки способствовало также значительное снижение вспомогательного времени обработки в связи с уменьшением количества проходов круга, что чрезвычайно важно для операции зубошлифования, которая характеризуется высокой трудоемкостью. Разработанная технология зубошлифования внедрена в основное производство ПАО ХМЗ "Свет шахтера" (г. Харьков) для обработки зубчатых колес приводов редукторов шахтных конвейеров.

6.3. Математическая модель определения температуры при глубинном шлифовании

Традиционно считается, что при многопроходном шлифовании температура резания меньше, чем при глубинном шлифовании и поэтому глубинное шлифование не получило такого широкого применения как многопроходное шлифование [6; 7; 118; 132; 147]. Вместе с тем, в опубликованных за последние 40 лет работах (особенно зарубежных), достаточно убедительно доказано, что при определенных условиях обработки глубинное шлифование, являясь высокопроизводительным процессом, обеспечивает снижение до требуемого уровня температуры резания и повышение качества обработки. Следовательно, существуют неиспользованные резервы обработки, связанные с применением высокопроизводительного глубинного шлифования [132]. Поэтому в настоящем параграфе произведена оценка температуры резания при глубинном и многопроходном шлифовании и обоснованы условия ее уменьшения без снижения производительности обработки.

Для этого рассмотрена расчетная схема параметров плоского шлифования (рис. 6.6), в которой снимаемый припуск представлен пакетом бесконечно тонких адиабатических стержней, которые поочередно перерезаются шлифовальным кругом со скоростью $V_{рез}$ [80; 122].

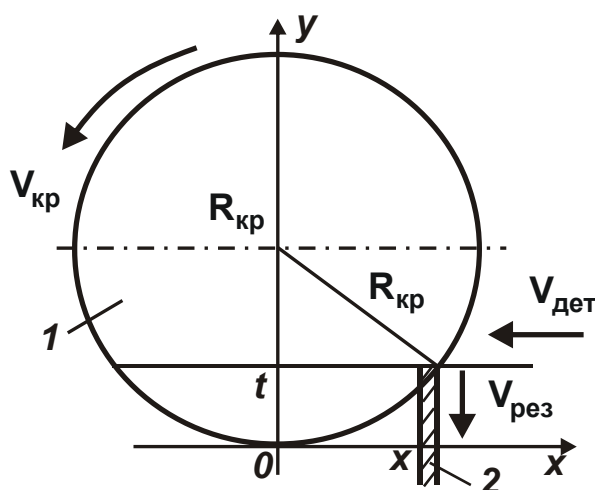


Рис. 6.6. Расчетная схема параметров плоского шлифования:
1 – круг; 2 – адиабатический стержень

Температура шлифования θ , возникающая в момент перерезания адиабатического стержня, определяется:

$$\theta = \sigma \cdot V_{\text{рез}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho}} \cdot \tau, \quad (6.15)$$

где τ – время контакта адиабатического стержня с кругом, с.

При плоском шлифовании $\tau = t / V_{\text{рез}}$, а $V_{\text{рез}} = V_{\text{дет}} \cdot \sqrt{t / D_{\text{кр}}}$, где t – глубина шлифования, м; $V_{\text{дет}}$ – скорость детали, м/с; $D_{\text{кр}} = 2 \cdot R_{\text{кр}}$ – диаметр круга, м; $R_{\text{кр}}$ – радиус круга, м. Тогда

$$\theta = \sigma \cdot V_{\text{рез}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho}} \cdot Q_{\text{уд}} \cdot \sqrt{\frac{t}{D_{\text{кр}}}}, \quad (6.16)$$

где $Q_{\text{уд}} = t \cdot V_{\text{дет}}$ – удельная производительность обработки, м²/с.

Как видно, при заданном значении $Q_{\text{уд}}$ уменьшить температуру θ можно уменьшением параметров σ и t , т.е. применением многопроходного шлифования. Данная закономерность справедлива при постоянной во времени скорости перерезания адиабатического стержня $V_{\text{рез}}$. В действительности, в связи с криволинейностью контакта круга с обрабатываемой деталью скорость $V_{\text{рез}}$ переменна во времени. В начальный момент перерезания адиабатического стержня она максимальна, а в конечный момент равна нулю (рис. 6.7). Это вытекает из аналитической зависимости:

$$V_{\text{рез}} = \frac{V_{\text{дет}}^2 \cdot (\tau_* - \tau)}{R_{\text{кр}}}, \quad (6.17)$$

где $\tau_* = \frac{x}{V_{\text{дет}}} = \frac{\sqrt{2 \cdot R_{\text{кр}} \cdot t}}{V_{\text{дет}}}$ – время контакта круга с адиабатическим стержнем, с;

τ – текущее время контакта круга с адиабатическим стержнем.

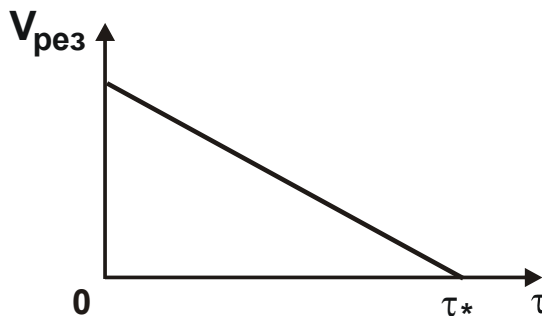


Рис. 6.7. Зависимость скорости $V_{\text{рез}}$ от текущего времени τ контакта круга с адиабатическим стержнем

Подставляя зависимость (6.17) в (6.15), имеем:

$$\theta = \frac{\sigma}{\lambda} \cdot \frac{V_{\text{дет}}^2 \cdot (\tau^* - \tau)}{R_{\text{кр}}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho}} \cdot \tau = \theta_* \cdot \left(1 - \frac{\tau}{\tau^*}\right) \cdot \sqrt{\frac{\tau}{\tau^*}}, \quad (6.18)$$

где

$$\theta_* = \frac{\sigma}{\lambda} \cdot \frac{V_{\text{дет}}^2 \cdot \tau^*}{R_{\text{кр}}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho}} \cdot \tau^* . \quad (6.19)$$

В зависимости (6.18) текущее время τ неоднозначно влияет на температуру шлифования θ . Поэтому, подчиняя зависимость (6.18) необходимому и достаточному условиям экстремума, установлено, что при $\tau = \tau^*/3$ имеет место максимум функции θ/θ_* (рис. 6.8). Следовательно, наибольшая температура шлифования достигается фактически в начальный момент перерезания адиабатического стержня (при $\tau = \tau^*/3$). На конечном этапе перерезания адиабатического стержня температура небольшая. Собственно этим можно объяснить эффективность применения глубинного шлифования, обеспечивающего, наряду с высокой производительностью обработки, относительно низкую температуру шлифования и высокое качество обрабатываемых поверхностей [5; 82; 87; 88; 115; 116; 118; 126; 150].

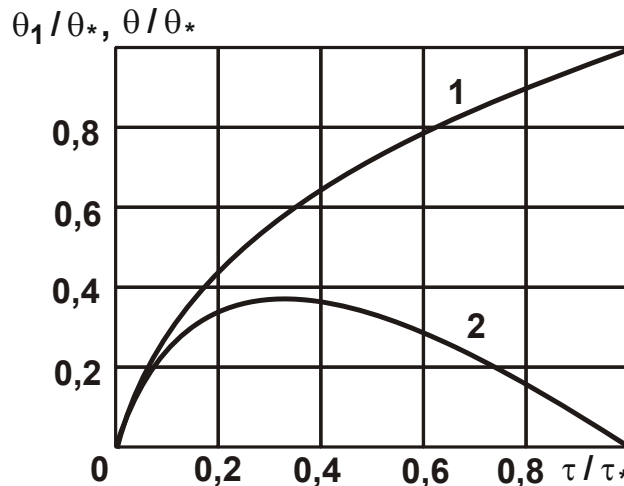


Рис. 6.8. Зависимости θ_1/θ_* (1) и θ/θ_* (2) от τ/τ_*

Для более полного анализа закономерностей формирования температуры при глубинном шлифовании проведем анализ зависимости (6.19), определяющей максимальную температуру шлифования θ_* , и рассматривая в ней скорость $V_{\text{рез}}$ постоянной величиной:

$$\frac{\theta_1}{\theta_*} = \sqrt{\frac{\tau}{\tau^*}} . \quad (6.20)$$

Для сравнения на рис. 6.8 приведены графики функций θ_1/θ_* и θ/θ_* . Как видно, при шлифовании с постоянной во времени скоростью $V_{рез}$ температура шлифования θ_1/θ_* непрерывно увеличивается с течением времени обработки, а при шлифовании с переменной скоростью $V_{рез}$ – изменяется по экстремальной зависимости (функция θ/θ_*), проходя точку максимума. Следовательно, благодаря реализации переменной (уменьшающейся во времени) скорости $V_{рез}$ температура шлифования θ/θ_* меньше температуры θ_1/θ_* приблизительно в 3 раза. Причем, максимум температуры шлифования θ/θ_* достигается фактически в начальный момент шлифования, тогда как наибольшее значение температуры θ_1/θ_* достигается на конечном этапе шлифования. Это свидетельствует о том, что при шлифовании с уменьшающейся во времени скоростью $V_{рез}$ нагреву подвергается главным образом снимаемый припуск, поверхностный слой обрабатываемой детали нагревается в меньшей мере, тогда как при шлифовании с постоянной во времени скоростью $V_{рез}$ нагревается в основном поверхностный слой обрабатываемой детали. Очевидно, в первом случае основная часть тепла будет уноситься образующимися стружками, в обрабатываемую деталь будет уходить меньше тепла, что снижает вероятность появления на обрабатываемых поверхностях различного рода температурных дефектов.

Максимальная температура шлифования, описываемая зависимостью (6.18), определяется при условии $\tau = \tau_*/3$:

$$\theta_{max} = \frac{\sigma}{\lambda} \cdot \frac{V_{дет}}{R_{кр}} \cdot \frac{2 \cdot \tau_*}{3} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{\tau_*}{3}} = 0,91 \cdot \sigma \cdot \sqrt{\frac{Q_{уд}}{c \cdot \rho \cdot \lambda}} \cdot \sqrt{\frac{t}{R_{кр}}}, \quad (6.21)$$

где $Q_{уд} = t \cdot V_{дет}$ – удельная производительность обработки, m^2/c .

Очевидно, уменьшить максимальную температуру шлифования θ_{max} можно уменьшением параметров σ , t , $Q_{уд}$ и $V_{дет}$. Аналогичным путем можно уменьшить и максимальную температуру θ_* , которая достигается при шлифовании с неизменной во времени скоростью $V_{рез}$.

На первый взгляд может показаться, что в связи с уменьшением скорости $V_{рез}$ во времени (вплоть до нуля) температура поверхностного слоя обрабатываемой детали должна принимать нулевые значения.

Однако в действительности это не так. В момент достижения максимума температуры (при условии $\tau = \tau^* / 3$) глубина проникновения тепла превышает глубину шлифования, что приводит к нагреву поверхностного слоя обрабатываемой детали. В этот момент температура поверхностного слоя обрабатываемой детали достигает своего максимума, после чего уменьшается до нуля. В связи с этим важно определить температуру θ , возникающую при шлифовании с переменной во времени скоростью $V_{рез}$, на уровне $y = 0$ (рис. 6.6), т.е. на уровне обработанной поверхности:

$$\theta = \frac{0,94 \cdot \sigma}{\lambda \cdot \sqrt{R_{кр}}} \cdot \left(\sqrt{\frac{0,94 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \sqrt{R_{кр}} \cdot t \cdot Q_{уд}} - \sqrt{t} \cdot Q_{уд} \right). \quad (6.22)$$

Как видно, на температуру шлифования θ неоднозначное влияние оказывают параметры t , $V_{дет}$ и $Q_{уд}$. С их увеличением первое слагаемое зависимости (6.22) увеличивается, а второе слагаемое уменьшается, т.е. температура шлифования θ проходит точку экстремума. Поэтому важно провести исследование функции θ на экстремум в зависимости от переменной $U = Q_{уд} \cdot \sqrt{t}$, представляя ее в виде:

$$\theta = \frac{0,94 \cdot \sigma}{\lambda \cdot \sqrt{R_{кр}}} \cdot \left(\sqrt{\frac{0,94 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \sqrt{R_{кр}} \cdot U} - U \right). \quad (6.23)$$

Подчиняя температуру шлифования θ необходимому и достаточному условиям экстремума, установлены экстремальное значение переменной U и максимальное значение температуры шлифования:

$$U = \frac{0,94 \cdot \lambda \cdot \sqrt{R_{кр}}}{4 \cdot c \cdot \rho}; \quad (6.24)$$

$$\theta_{max} = 0,22 \cdot \frac{\sigma}{c \cdot \rho}. \quad (6.25)$$

На рис. 6.9 приведены рассчитанные по зависимости (6.23) значения функции $\theta \cdot c \cdot \rho / \sigma$ для различных значений переменной U применительно к шлифованию стали ШХ15 кругом с радиусом $R_{кр} = 0,3$ м. Как видно, с увеличением переменной U функция $\theta \cdot c \cdot \rho / \sigma$ первоначально увеличивается до максимального значения, затем уменьшается до нуля. Максимум функции $\theta \cdot c \cdot \rho / \sigma$ достигается при значении $U = 10^{-6} \text{ м}^{2,5} / \text{с}$. Следовательно, для того чтобы существенно уменьшить

температуру шлифования θ необходимо выполнить одно из условий:
 $U \rightarrow 0$ или $U \rightarrow 4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{2,5} / \text{с}$.

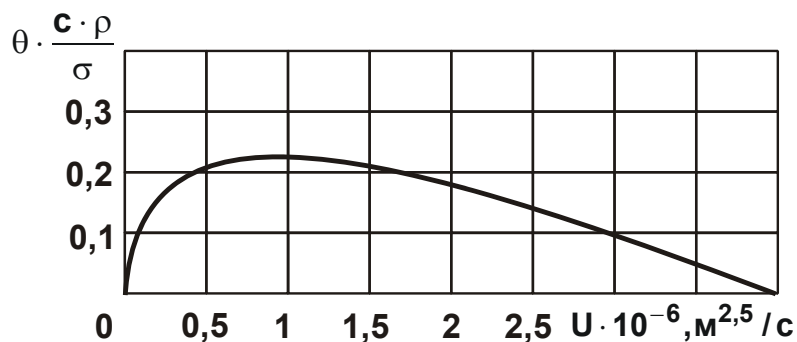


Рис. 6.9. Изменение функции $\theta \cdot c \cdot \rho / \sigma$ от переменной U

Переменная U зависит от двух величин: глубины шлифования t и скорости детали $V_{\text{дет}}$. Принимая их произведение $t \cdot V_{\text{дет}} = Q_{\text{уд}} = 2000 \text{ мм}^3 / \text{мин}$ постоянной величиной, на рис. 6.10 показан характер изменения функции $\theta \cdot c \cdot \rho / \sigma$ от глубины шлифования t и скорости детали $V_{\text{дет}}$ при выполнении условия $V_{\text{дет}} = Q_{\text{уд}} / t$ в соответствии с зависимостью (6.22).

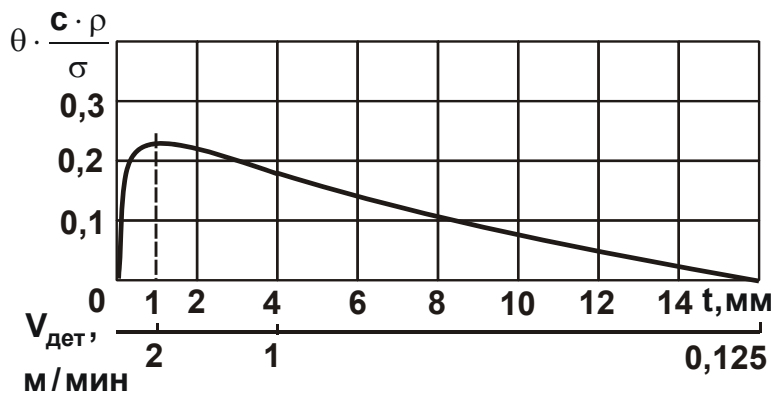


Рис. 6.10. Изменение функции $\theta \cdot c \cdot \rho / \sigma$ от глубины шлифования t (при одновременном изменении скорости детали $V_{\text{дет}}$)

Как видно, функция $\theta \cdot c \cdot \rho / \sigma$ при заданной удельной производительности обработки $Q_{\text{уд}}$ с увеличением глубины шлифования t (и одновременном уменьшении скорости детали $V_{\text{дет}}$) изменяется по экстремальной зависимости, проходя точку максимума $\theta \cdot c \cdot \rho / \sigma = 0,22$. Значения глубины шлифования t и скорости детали $V_{\text{дет}}$ в точке максимума соответственно равны: 1 мм и 2 м/мин. Этим показано, что од-

ну и ту же температуру шлифования при одинаковой удельной производительности обработки $Q_{уд}$ можно достичь разными путями: во-первых, за счет применения обычного многопроходного шлифования с небольшой глубиной шлифования t , реализуя левую ветвь зависимости. Во-вторых, за счет применения глубинного шлифования с глубиной шлифования до $t=16$ мм, реализуя правую ветвь зависимости. Таким образом, теоретически обоснована эффективность применения глубинного шлифования с точки зрения уменьшения температуры шлифования, что хорошо согласуется с известными экспериментальными данными, например, приведенными на рис. 6.11 [150].

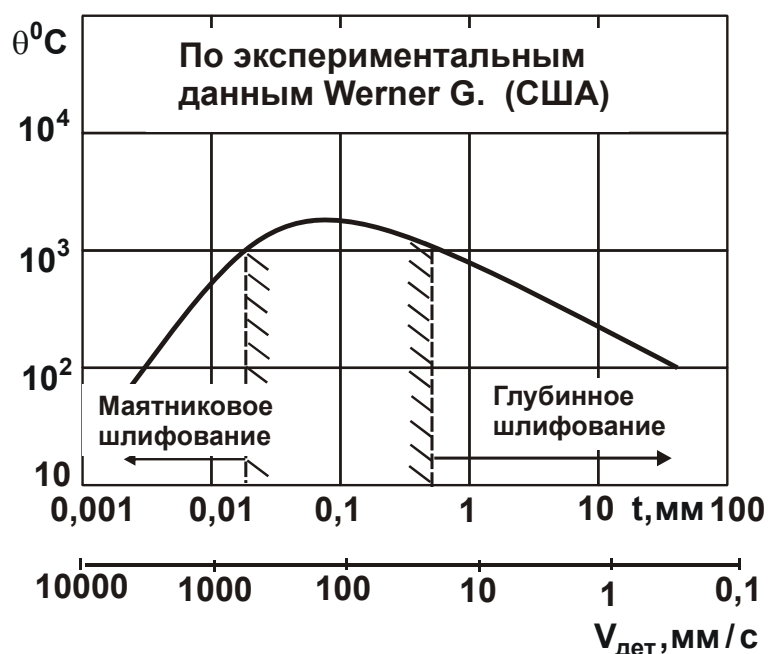


Рис. 6.11. Характеристика температуры краевых зон изделия при маятниковом и глубинном шлифовании

Необходимо отметить, что с увеличением удельной производительности обработки $Q_{уд}$ экстремум функции $\theta \cdot c \cdot \rho / \sigma$ смещается в область меньших значений глубины шлифования t , а максимальное значение функции $\theta \cdot c \cdot \rho / \sigma$ остается неизменным, равным 0,22. Поэтому добиться существенного уменьшения температуры шлифования с увеличением глубины шлифования можно при относительно большой производительности обработки. Например, при глубине шлифования в пределах 10 мм удельная производительность обработки $Q_{уд}$ должна быть на уровне 5 ... 10 тыс. мм³/(мин·мм). В противном случае эффект снижения температуры шлифования будет отсутствовать.

Именно этим объясняется тот факт, что на практике уменьшение температуры шлифования достигается при глубинном шлифовании с весьма большими глубинами шлифования. В этом случае с точки зрения производительности обработки глубинное шлифование становится вполне конкурентоспособным с фрезерованием и другими методами высокопроизводительной лезвийной обработки.

6.4. Повышение эффективности операций шлифования изделий из труднообрабатываемых материалов на основе уменьшения теплонапряженности процесса

Как показано в пп. 6.1 – 6.3, основным ограничением повышения качества и производительности обработки на операциях шлифования изделий из труднообрабатываемых материалов является температурный фактор. Образующиеся при шлифовании прижоги, микротрещины и другие температурные дефекты снижают качество обработки и требуют уменьшения режимов резания и применения более "мягких" шлифовальных кругов, что приводит к повышению трудоемкости обработки. В особой мере это относится к изделиям из твердых сплавов, высокопрочных сталей, наплавов и других материалов повышенной твердости. В связи с этим важно обосновать условия повышения качества и производительности обработки изделий из труднообрабатываемых материалов на основе оптимизации структуры и параметров операций шлифования по температурному критерию.

Для решения поставленной задачи следует воспользоваться упрощенной зависимостью (6.6) для определения температуры шлифования. Как следует из зависимости (6.6), основными условиями уменьшения температуры шлифования θ является уменьшение условного напряжения резания σ и величины снимаемого припуска l_1 . При съеме заданного припуска $\Pi > l_1$ уменьшение параметра l_1 связано с периодическим прерыванием процесса шлифования на время, достаточное для частичного остывания обрабатываемого образца, и осуществления обработки в несколько переходов. Уменьшение параметра l_1 , исходя из зависимости (6.6), допускает увеличение скорости $V_{рез}$ (при заданной температуре шлифования θ) и, соответственно, производительности обработки.

На рис. 6.4 приведены обобщенные зависимости температуры шлифования θ от величины снимаемого припуска Π при обработке в один переход и отсутствии остывания обрабатываемого образца, а также при обработке в n переходов при полном и частичном остывании образца. Как видно, при обработке в n переходов температура шлифования θ меньше. Поэтому следует оценить основное время обработки операции шлифования и обосновать пути его уменьшения с учетом ограничения по температуре шлифования на основе оптимизации структуры и параметров операции шлифования для различных условий нагрева и охлаждения обрабатываемого образца.

Основное время обработки τ при шлифовании в n переходов прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга с постоянной скоростью $V_{рез}$ на каждом переходе, определяется зависимостью:

$$\tau = \frac{\Pi_1}{V_{рез1}} + \frac{\Pi_2}{V_{рез2}} + \dots + \frac{\Pi_n}{V_{рез.n}}, \quad (6.26)$$

где Π_1, \dots, Π_n – припуски, удаляемые на каждом переходе ($\Pi_1 + \dots + \Pi_n = \Pi$), м;

Π – суммарный снимаемый припуск, м;

$V_{рез1}, \dots, V_{рез.n}$ – скорости радиальной подачи на каждом переходе, м/с.

Рассматривая в зависимости (6.6) в качестве параметра $V_{рез}$ параметр $V_{рез.n}$, а вместо параметра l_1 параметр Π_n , следует разрешить зависимость (6.6) относительно $V_{рез.n}$ и полученное выражение подставить в зависимость (6.26):

$$\tau = \frac{\left[\Pi_1^2 + \Pi_2^2 + \dots + \Pi_{n-1}^2 + (\Pi - \Pi_1 - \Pi_2 - \dots - \Pi_{n-1})^2 \right]}{A}, \quad (6.27)$$

где $A = \left(\frac{c \cdot \rho \cdot \lambda}{2} \right) \cdot \left(\frac{\theta}{\sigma} \right)^2$.

Очевидно, входящие в зависимость (6.27) переменные $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{n-1}$ неоднозначно влияют на основное время обработки τ .

Подчиняя функцию τ необходимому условию экстремума от переменных $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{n-1}$, т.е. дифференцируя функцию τ по пе-

ременным $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{n-1}$, получено систему $(n-1)$ линейных уравнений с $(n-1)$ неизвестными:

$$\begin{aligned} \Pi_1 - (\Pi - \Pi_1 - \dots - \Pi_{n-1}) &= 0; \\ \Pi_2 - (\Pi - \Pi_1 - \dots - \Pi_{n-1}) &= 0; \\ &\dots\dots\dots \\ \Pi_{n-1} - (\Pi - \Pi_1 - \dots - \Pi_{n-1}) &= 0. \end{aligned} \quad (6.28)$$

Определяя разности каждого последующего и предыдущего уравнений, получены следующие решения: $\Pi_2 = \Pi_1$; $\Pi_3 = \Pi_2$; ...; $\Pi_{n-1} = \Pi_{n-2}$, откуда $\Pi_1 = \Pi_2 = \dots = \Pi_{n-1}$. Тогда, с учетом того, что $\Pi_n = \Pi - \Pi_1 - \dots - \Pi_{n-1}$ первое уравнение системы (6.28) примет вид: $\Pi_1 - \Pi_n = 0$ или $\Pi_n = \Pi_1$, т.е.

$$\Pi_1 = \Pi_2 = \dots = \Pi_n = \frac{\Pi}{n}. \quad (6.29)$$

Таким образом доказано, что величины снимаемого припуска на каждом из n переходов одинаковы. Подставляя отношения (6.29) в зависимость (6.27), определено минимальное основное время обработки:

$$\tau_{\min} = \frac{\Pi^2}{n \cdot A}. \quad (6.30)$$

Из зависимости (6.30) следует, что при шлифовании в n переходов можно практически в n раз уменьшить основное время обработки по сравнению с операцией шлифования в один переход (рис. 6.12,а). Скорости $V_{\text{рез}}$ на каждом из n переходов равны между собой и определяются зависимостью:

$$V_{\text{рез}} = \frac{n \cdot A}{\Pi}. \quad (6.31)$$

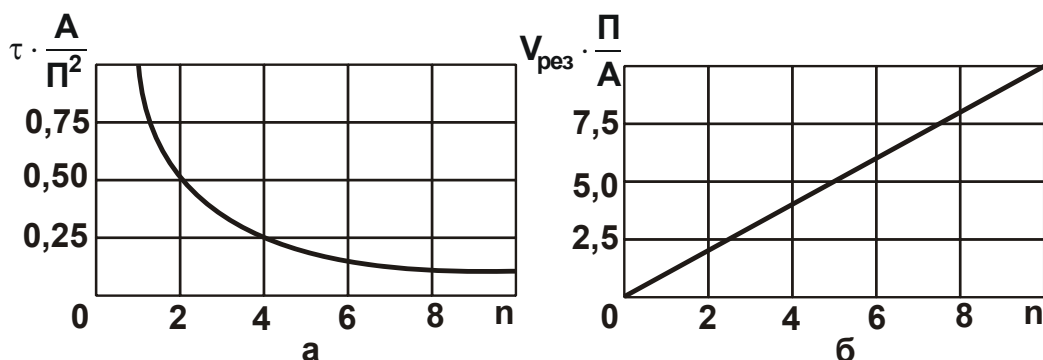


Рис. 6.12. Зависимости основного времени обработки $\tau \cdot A / \Pi^2$ (а) и скорости $V_{\text{рез}} \cdot \Pi / A$ (б) от количества переходов n

По сравнению с операцией шлифования в один переход скорость $V_{рез}$ увеличивается в n раз (рис. 6.12,б). Таким образом получено аналитическое решение задачи оптимизации структуры и параметров операций шлифования по критерию основного времени обработки с учетом ограничения по температуре шлифования.

Основным условием осуществления данного решения является полное остывание обрабатываемого образца в период между переходами, т.е. в начале каждого последующего перехода температура образца должна равняться нулю.

Выполнить данное условие можно при использовании традиционных схем плоского и круглого (наружного и внутреннего) шлифования, разбивая снимаемый припуск по проходам круга. Причем, с уменьшением припуска, удаляемого на каждом проходе круга, основное время обработки будет уменьшаться в соответствии с зависимостью (6.30).

Необходимо отметить, что данное решение можно получить, непосредственно анализируя зависимость (6.6). Очевидно, с уменьшением величины l_1 (рассматривая ее равной величине снимаемого на каждом переходе припуска) при заданной температуре шлифования θ увеличивается скорость $V_{рез}$, а это приводит к уменьшению основного времени обработки $\tau = l_1 / V_{рез}$.

Необходимо также определить наименьшее основное время обработки с учетом времени полного остывания обрабатываемого образца между переходами. Как показано выше, чтобы реализовать оптимальный цикл шлифования (рис. 6.4, кривая 2) необходимо обеспечить полное остывание обрабатываемого образца между переходами. В связи с этим определено время полного остывания образца, считая, что количество тепла $Q_{нагр}$, затраченного на нагревание образца до температуры θ , описывается зависимостью:

$$Q_{нагр} = S \cdot \lambda \cdot \frac{\theta}{l_2} \cdot \tau_{нагр} = S \cdot \theta \cdot \sqrt{0,5 \cdot c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \tau_{нагр}} , \quad (6.32)$$

где $l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \tau_{нагр}} ;$

$\tau_{нагр}$ – время нагрева образца, с.

Данное количество тепла должно равняться количеству тепла

$Q_{\text{охл}}$, выделившемуся из нагретого образца на этапе его охлаждения (при отсутствии съема металла) [147]:

$$Q_{\text{охл}} = q_{\text{охл}} \cdot S \cdot \tau_{\text{охл}} = \alpha \cdot (\theta - \theta_0) \cdot S \cdot \tau_{\text{охл}}, \quad (6.33)$$

где $q_{\text{охл}} = \alpha \cdot (\theta - \theta_0)$ – плотность теплового потока, Вт/м²;

θ_0 – температура образца после его охлаждения ($\theta_0 = 0$);

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

$\tau_{\text{охл}}$ – время охлаждения образца, с.

Из условия $Q_{\text{нагр}} = Q_{\text{охл}}$ получено:

$$\tau_{\text{охл}} = \frac{\sqrt{0,5 \cdot c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \tau_{\text{нагр}}}}{\alpha} \quad (6.34)$$

или

$$\frac{\tau_{\text{охл}}}{\tau_{\text{нагр}}} = \frac{\sqrt{c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \frac{1}{2 \cdot \tau_{\text{нагр}}}}}{\alpha} \quad (6.35)$$

В табл. 6.1 приведены рассчитанные по зависимости (6.35) значения $\tau_{\text{охл}} / \tau_{\text{нагр}}$ при шлифовании твердого сплава ВК8 ($\rho = 14,5 \cdot 10^3$ кг/м³; $c = 40$ кал/(кг·град); $\lambda = 14$ кал/(м·с·град); $\alpha = 10^4$ кал/(м²·с·град)). Как видно, с увеличением времени нагрева образца $\tau_{\text{нагр}}$ отношение $\tau_{\text{охл}} / \tau_{\text{нагр}}$ уменьшается, принимая значения меньше единицы.

Таблица 6.1

Расчетные значения $\tau_{\text{охл}} / \tau_{\text{нагр}}$

$\tau_{\text{нагр}}, \text{ с}$	0,062	0,25	1,0	4,0
$\tau_{\text{охл}} / \tau_{\text{нагр}}$	0,8	0,4	0,2	0,1

Используя зависимость (6.34), можно определить степень влияния времени охлаждения $\tau_{\text{охл}}$ на минимальное основное время обработки τ_{min} , описываемое зависимостью (6.30). Для этого данную зависимость необходимо представить в виде:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{min}} &= \frac{\tau}{n} + (n-1) \cdot \tau_{\text{охл}} = \frac{\tau}{n} + (n-1) \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot \sqrt{\frac{c \cdot \rho \cdot \lambda}{2} \cdot \frac{\tau}{n^2}} = \\ &= \frac{1}{n} \cdot \left(\tau - \frac{\sqrt{0,5 \cdot c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \tau}}{\alpha} \right) + \frac{\sqrt{0,5 \cdot c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \tau}}{\alpha}, \end{aligned} \quad (6.36)$$

где $\tau_{\text{нагр}} = \frac{\tau}{n^2}$;

n – количество переходов;

$\tau = \frac{\Pi^2}{A}$ – время съема припуска Π за один переход при условии

обеспечения заданной температуры шлифования θ , с.

Как и в зависимости (6.30), с увеличением количества переходов n происходит уменьшением τ_{min} , однако не бесконечно, а до конечного значения:

$$\tau_{\text{min}} = \frac{\sqrt{0,5 \cdot c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \tau}}{\alpha} \quad (6.37)$$

На рис. 6.13 приведены рассчитанные по зависимости (6.36) значения τ_{min} для исходных данных, принятых в табл. 6.1. Для определения параметра A принято $\theta = 1000$ °С; $\sigma = 10^5$ Н/мм² (обработка твердого сплава ВК8), тогда $A = 7 \cdot 10^{-9}$ м²/с.

Как видно, с увеличением количества переходов n величина τ_{min} уменьшается в 6 раз соответственно до значения 0,24 с (при $\Pi = 0,1$ мм) и до значения 2,4 с (при $\Pi = 1$ мм). Следовательно, интенсивность уменьшения величины τ_{min} с увеличением количества переходов n не зависит от снимаемого припуска Π .

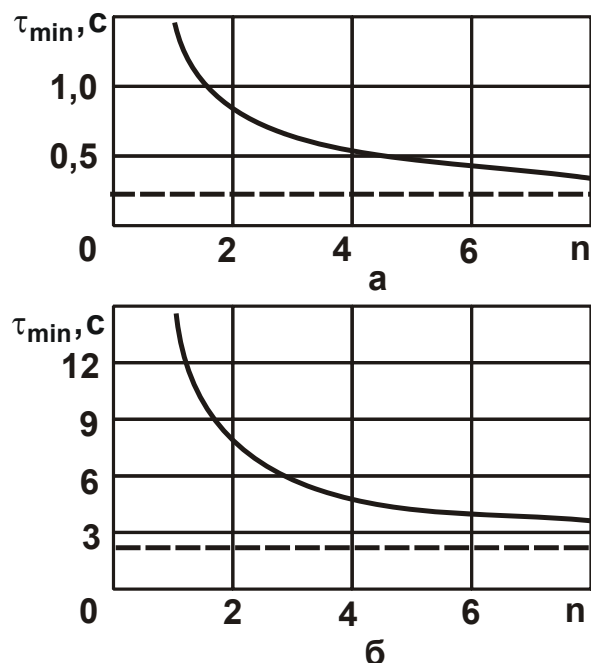


Рис. 6.13. Зависимость τ_{min} от количества переходов n :

а – $\Pi = 0,1$ мм; б – $\Pi = 1$ мм

В табл. 6.2 для сравнения приведены значения τ_{\min} , полученные на основе зависимости (6.30), не учитывающей время охлаждения обрабатываемого образца между переходами. Как видно, эти значения меньше аналогичных значений τ_{\min} , полученных с учетом времени охлаждения образца и приведенных на рис. 6.13. Отличие значений τ_{\min} , полученных без учета и с учетом времени охлаждения образца между переходами, можно оценить коэффициентом k (табл. 6.2), который увеличивается с увеличением количества переходов n . Следовательно, эффект от прерывания процесса шлифования с целью охлаждения обрабатываемого образца с увеличением количества переходов n проявляется в меньшей мере.

Таблица 6.2

Расчетные значения коэффициента k для $\Pi = 0,1$ мм

n	1	2	3	4	8	16
$\tau_{\min}, \text{с}$	1,43	0,715	0,477	0,357	0,178	0,089
k	1	1,17	1,33	1,5	2,18	3,53

В табл. 6.3 приведены расчетные значения $\tau_{\text{нагр}} = \frac{\tau}{n^2} = \frac{\Pi^2}{n^2 \cdot A}$ и $\tau_{\text{охл}} / \tau_{\text{нагр}}$, установленные на основе зависимостей (6.34) и (6.35) для $\Pi = 0,1$ мм. Исходные данные для расчета взяты те же, что и для табл. 6.1.

Таблица 6.3

Расчетные значения $\tau_{\text{нагр}}$, $\tau_{\text{охл}} / \tau_{\text{нагр}}$ и l для $\Pi = 0,1$ мм

n	1	2	3	4	8	16
$\tau_{\text{нагр}}, \text{с}$	1,43	0,357	0,159	0,089	0,022	0,0056
$\tau_{\text{охл}} / \tau_{\text{нагр}}$	–	0,337	0,505	0,675	1,358	2,693
$l, \text{м}$	–	10,7	4,74	2,7	0,66	0,17

Как видно, с увеличением количества переходов n , время $\tau_{\text{нагр}}$ уменьшается, а отношение $\tau_{\text{охл}} / \tau_{\text{нагр}}$, наоборот, увеличивается, принимая при $n > 6$ значения, превышающие единицу (рис. 6.14).

Необходимо оценить возможности практической реализации полученного решения в условиях шлифования прерывистым кругом, ра-

бочая поверхность которого состоит из чередующихся выступов (рабочих элементов) и впадин.

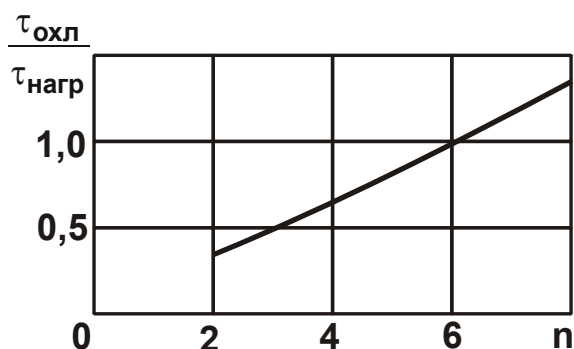


Рис. 6.14. Зависимость отношения $\tau_{охл} / \tau_{нагр}$ от количества переходов n

Расчеты длины рабочего выступа прерывистого круга $l = \tau_{нагр} \cdot V_{кр}$ при скорости круга $V_{кр} = 30$ м/с и $\Pi = 0,1$ мм (табл. 6.3) показали, что она принимает относительно большие значения, превышающие длину рабочей поверхности круга $\pi \cdot D_{кр}$, где $D_{кр}$ – диаметр круга, м.

Следовательно, реализовать данные значения l в конструкции прерывистого круга не представляется возможным, т.е. с помощью прерывистого шлифования сложно осуществить условия обработки, соответствующие кривой 2 на рис. 6.4. Уменьшение длины рабочего выступа круга l и отношения $\tau_{охл} / \tau_{нагр}$ (что имеет место в прерывистых кругах) приводит к неполному остыванию обрабатываемого образца между переходами и реализации кривой 3 на рис. 6.4, согласно которой температура шлифования θ увеличивается с течением времени обработки.

Эта закономерность подтверждается многочисленными результатами экспериментальных исследований прерывистого шлифования [132; 147]. Это свидетельствует о том, что при прерывистом шлифовании действительно сложно реализовать условия обработки, соответствующие кривой 2 на рис. 6.4. Для их осуществления нужны новые технические решения, связанные с возможностью периодического прерывания процесса шлифования в течение весьма малых промежутков времени, составляющих доли секунды, что представляет довольно сложную задачу.

Для оценки возможностей уменьшения основного времени обработки за счет периодического прерывания процесса шлифования с целью охлаждения обрабатываемого образца следует провести анализ зависимости (6.36). Очевидно, для того чтобы получить эффект обработки, необходимо выполнить условие: $\tau_{\min} > \tau = \frac{\Pi^2}{A}$, где τ – время съема припуска Π за 1 переход при обеспечении заданной температуры шлифования θ . С учетом зависимости (6.36) имеем:

$$\tau > \frac{1}{n} \cdot \left(\tau - \frac{\sqrt{0,5 \cdot c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \tau}}{\alpha} \right) + \frac{\sqrt{0,5 \cdot c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \tau}}{\alpha}. \quad (6.38)$$

Данное неравенство можно преобразовать к виду:

$$\tau > \frac{c \cdot \rho \cdot \lambda}{2 \cdot \alpha^2}. \quad (6.39)$$

Расчетами установлено, что применительно к шлифованию твердого сплава ВК8 ($\rho = 14,5 \cdot 10^3$ кг/м³; $c = 40$ кал/(кг·град); $\lambda = 14$ кал/(м·с·град; $\alpha = 10^4$ кал/(м²·с·град)) основное время обработки τ должно быть больше 0,0406 с. При невыполнении данного условия эффект уменьшения основного времени обработки достигаться не будет. Исходя из зависимости $\tau = \Pi^2 / A$, можно определить минимальное значение снимаемого припуска Π , соответствующее минимальному значению $\tau = 0,0406$ с. Для $A = 7 \cdot 10^{-9}$ м²/с, имеем $\Pi > 16,7$ мкм.

Важно произвести уточненный расчет наименьшего основного времени обработки с учетом времени полного остывания обрабатываемого образца между переходами. Полученное выше решение предполагает одинаковые по продолжительности переходы. Однако, в связи с наличием этапов охлаждения образца результаты оптимизации, приведенные выше, могут быть несколько иными. Поэтому следует уточнить данное решение. Для этого зависимость (6.27), описывающую основное время обработки в два перехода, с учетом зависимости (6.34), представлено в виде:

$$\tau = \frac{[\Pi_1^2 + (\Pi - \Pi_1)^2]}{A} + \tau_{\text{охл}} = \frac{[\Pi_1^2 + (\Pi - \Pi_1)^2]}{A} + \frac{1}{\alpha} \cdot \sqrt{c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \frac{\Pi_1^2}{2A}}, \quad (6.40)$$

где $\tau_{\text{нагр}} = \Pi_1^2 / A$.

Используя необходимое условие экстремума $\tau'_{\Pi_1} = 0$, определено экстремальное значение припуска Π_1 , удаляемого на первом переходе:

$$\Pi_1 = \frac{\Pi}{2} - \frac{\sqrt{0,5 \cdot c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot A}}{4\alpha}. \quad (6.41)$$

Как видно, величина Π_1 меньше $\Pi/2$, тогда как в предыдущем решении для $n=2$, вытекающем из зависимости (6.29): $\Pi_1 = \Pi/2$. Например, при $\Pi = 0,1$ мм, как установлено расчетами, $\Pi_1 = 45,8$ мкм, а $\Pi_2 = \Pi - \Pi_1 = 54,2$ мкм. При большем снимаемом припуске, например, $\Pi = 1$ мм значения Π_1 и Π_2 почти одинаковы. Следовательно, на первом переходе удаляется припуск $\Pi_1 < \Pi/2$, а на втором переходе – припуск $\Pi_1 > \Pi/2$. Соответственно, на 1 и 2 переходах реализуются разные скорости радиальной подачи $V_{рез1} > V_{рез2}$ (рис. 6.15).

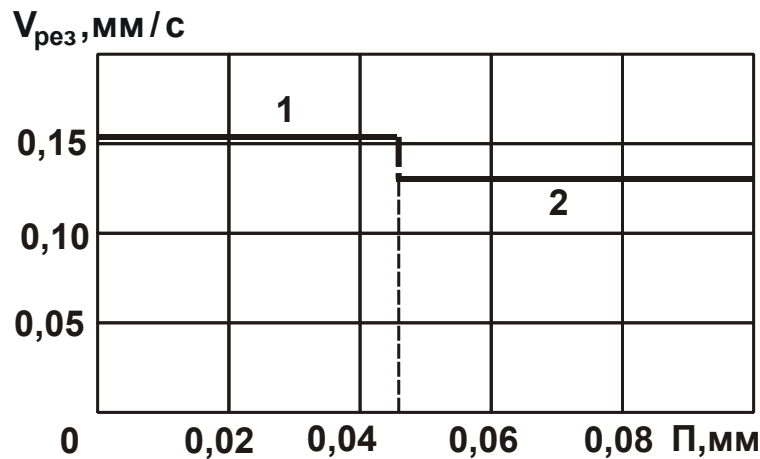


Рис. 6.15. Характер изменения скорости радиальной подачи $V_{рез}$ по переходам: 1 – первый переход; 2 – второй переход

Минимальное основное время обработки τ_{min} определяется подстановкой зависимости (6.41) в (6.40):

$$\tau_{min} = \frac{\Pi^2}{2A} + \frac{\Pi}{2\alpha} \cdot \sqrt{\frac{c \cdot \rho \cdot \lambda}{2A} - \frac{c \cdot \rho \cdot \lambda}{16\alpha^2}}. \quad (6.42)$$

Значение τ_{min} в данном случае больше аналогичного значения $\tau_{min} = \frac{\Pi^2}{2 \cdot A}$, вытекающего из зависимости (6.30), полученной без учета продолжительности этапа охлаждения обрабатываемого образца. Таким образом показано, что введение дополнительного этапа охлаждения образца изменяет характер съема припуска: на первом переходе удаляется меньшая часть припуска, а на втором – большая часть припуска. При этом справедливо соотношение $V_{рез1} > V_{рез2}$.

Для исходных данных: $\theta = 1000$ °С; $\sigma = 10^5$ Н/мм² (обработка твердого сплава ВК8: $\rho = 14,5 \cdot 10^3$ кг/м³; $c = 40$ кал/(кг·град); $\lambda = 14$ кал/(м·с·град); $\alpha = 10^4$ кал/(м²·с·град)), $A = 7 \cdot 10^{-9}$ м²/с; $\Pi = 0,1$ мм определено минимальное основное время обработки τ_{\min} :

$$\tau_{\min} = 0,715 \text{ с} + 0,12 \text{ с} - 0,005 \text{ с} = 0,83 \text{ с}.$$

Как видно, величина τ_{\min} незначительно отличается от первого слагаемого, определяющего основное время обработки без учета времени дополнительного этапа охлаждения образца. Следовательно, за счет прерывания процесса шлифования и охлаждения образца между переходами можно существенно уменьшить основное время обработки при одновременном обеспечении заданной температуры шлифования θ .

Необходимо отметить, что эффект уменьшения величины τ_{\min} в данном случае выше, чем в аналогичном решении (6.35). Так, при $\Pi = 0,1$ мм величина $\tau_{\min} = 0,83$ с, тогда как согласно рис. 6.13,а, $\tau_{\min} = 0,835$ с (при $n = 2$). Следовательно, шлифование с уменьшающейся по переходам скоростью радиальной подачи $V_{\text{рез}}$ позволяет в большей степени уменьшить τ_{\min} по сравнению с шлифованием с одинаковой на каждом переходе скоростью радиальной подачи $V_{\text{рез}}$. Однако, как видно, отличие значений τ_{\min} для двух случаев незначительно. Практически реализовать эти схемы обработки, как уже отмечалось выше, затруднено в связи с небольшой продолжительностью переходов, составляющей доли секунды. Основными направлениями их осуществления следует рассматривать применение прерывистого шлифования (вибрационного шлифования, в том числе с использованием ультразвуковых колебаний), различных адаптивных систем управления и схем шлифования, когда образец движется не по нормали к рабочей поверхности круга, а по касательной к кругу (в тангенциальном направлении), например, схем плоского и круглого наружного шлифования (рис. 6.16).

Для оценки достоверности полученных теоретических решений были проведены экспериментальные исследования. Установлено, что периодическое прерывание процесса шлифования за счет применения прерывистого круга позволяет существенно снизить теплонапряженность процесса, исключить образование на обрабатываемых поверхностях прижогов и других температурных дефектов и увеличить произ-

водительность обработки. Так, применение прерывистого алмазного круга по сравнению с обычным алмазным кругом на органической связке при торцовом шлифовании твердосплавных пластин позволило до 5 раз увеличить производительность при обеспечении бесприжоговой обработки, что хорошо согласуется с полученными теоретическими решениями.



Рис. 6.16. Структурная схема условий реализации периодического прерывания процесса шлифования

Экспериментально установлено, что шлифование твердосплавных инструментов алмазным кругом на металлической связке после его электроэрозионной правки по сравнению с обычным алмазным шлифованием и алмазным электроэрозионным шлифованием (основанным на введении в зону резания электрических разрядов [12; 142]) позволяет повысить качество обработки, обеспечивает формирование в поверхностном слое материала благоприятных сжимающих остаточных напряжений, исключает образование прижогов и микротрещин, а также лунок, возникающих от действия электрических разрядов при алмазном электроэрозионном шлифовании. Эффект шлифования достигается за счет обеспечения высокой режущей способности алмазного круга и снижения энергоемкости обработки, что позволяет рекомендовать данный метод для шлифования и заточки твердосплавных режущих инструментов.

Экспериментально также установлено, что при алмазном торцовом шлифовании вращающегося кольца из композиционного материала на основе релита зависимость вероятности появления прижогов на его поверхности от увеличения площади контакта алмазного круга с кольцом имеет экстремум, принимая минимальное значение при усло-

вии, когда площадь контакта круга с кольцом равна приблизительно половине обрабатываемой поверхности. Полученный экспериментальный результат согласуется с теоретическими решениями, что свидетельствует об их достоверности.

На основе экспериментальных исследований показано, что применение высокопористых абразивных кругов, обладающих повышенной режущей способностью, позволяет полностью исключить образование прижогов и микротрещин на обрабатываемых поверхностях при глубинном шлифовании (с глубиной шлифования до 4 мм) елочных замков турбинных лопаток, изготовленных из жаропрочного сплава на никелевой основе марки ЧС88У-ВИ. При этом производительность обработки соответствует производительности лезвийной обработки, что позволяет перейти от малоэффективной технологии фрезерования к высокопроизводительному глубинному шлифованию, обеспечивающему требуемое качество обработки. Полученные экспериментальные данные подтверждают теоретические результаты, согласно которым при больших глубинах шлифования и небольшой скорости детали можно снизить тепловую напряженность процесса без уменьшения производительности обработки.

6.5. Оптимизация структуры и параметров операции шлифования по критерию наименьшего основного времени обработки с учетом ограничения по температуре резания

Как показано в п. 6.1, обеспечить заданную температуру резания при одновременном увеличении производительности обработки можно уменьшением параметра l_1 в зависимости (6.6), выполняя операцию шлифования за несколько переходов и таким образом разбивая снимаемый припуск по переходам. Для реализации этого подхода необходимо решить задачу минимизации основного времени обработки при условии, что в конце каждого перехода температура шлифования θ равна заданной, а в начале каждого последующего перехода температура шлифования θ может быть больше нуля. Иными словами, допускается, что к началу каждого перехода обрабатываемый образец может полностью и не охладиться. Для решения указанной выше задачи

необходимо определить оптимальные значения скорости радиальной подачи обрабатываемого образца и величины снимаемых припусков на каждом переходе. Поэтому рассмотрено первоначально операцию шлифования, выполняемую в два перехода. В этом случае основное время обработки τ равно:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = \frac{\Pi_1}{V_{рез1}} + \frac{\Pi_2}{V_{рез2}}, \quad (6.43)$$

где Π_1 , Π_2 , $V_{рез1}$, $V_{рез2}$ – величины снимаемых припусков и скорости радиальных подач на 1-ом и 2-ом переходах;

$\Pi_1 + \Pi_2 = \Pi$ – суммарный снимаемый припуск, м.

Температура шлифования в конце 1-го и 2-го переходов определяется следующими зависимостями:

$$\theta = \sigma \cdot V_{рез1} \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \tau_1} = \sigma \cdot V_{рез1} \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \left(\frac{\Pi_1}{V_{рез1}} \right)}; \quad (6.44)$$

$$\theta = \sigma \cdot V_{рез2} \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot (\tau_1 + \tau_2)} = \sigma \cdot V_{рез2} \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \left(\frac{\Pi_1}{V_{рез1}} + \frac{\Pi_2}{V_{рез2}} \right)}. \quad (6.45)$$

Разрешая эти зависимости относительно скоростей $V_{рез1}$ и $V_{рез2}$ с учетом зависимости (6.43), получено квадратное уравнение относительно неизвестной величины $\sqrt{\tau}$:

$$\tau - \frac{\Pi_2}{\sqrt{A}} \cdot \sqrt{\tau} - \frac{\Pi_1^2}{A} = 0, \quad (6.46)$$

где $A = \left(\frac{c \cdot \rho \cdot \lambda}{2} \right) \cdot \left(\frac{\theta}{\sigma} \right)^2$;

$$\left(\frac{\Pi_1}{V_{рез1}} + \frac{\Pi_2}{V_{рез2}} \right) = \tau.$$

Решение уравнения с учетом $\Pi_2 = \Pi - \Pi_1$:

$$\tau = \frac{1}{A} \cdot \left[\frac{(\Pi - \Pi_1)}{2} + \sqrt{\frac{(\Pi - \Pi_1)^2}{4} + \Pi_1^2} \right]^2. \quad (6.47)$$

Как видно, величина Π_1 неоднозначно влияет на основное время обработки τ , т.е. имеет место экстремум функции τ от величины Π_1 . Для определения экстремального значения Π_1 следует подчинить

функцию τ необходимому и достаточному условиям экстремума. В результате установлено, что функция τ от величины Π_1 имеет минимум (рис. 6.17,а).

Экстремальные значения величин Π_1 , Π_2 , а также минимальное значение функции τ равны:

$$\Pi_1 = 0,4 \cdot \Pi; \quad (6.48)$$

$$\Pi_2 = 0,6 \cdot \Pi; \quad (6.49)$$

$$\tau_{\min} = \tau_1 + \tau_2 = (0,16 + 0,48) \cdot \frac{\Pi^2}{A} = 0,64 \cdot \frac{\Pi^2}{A}. \quad (6.50)$$

Основное время обработки τ_1 на первом переходе в 3 раза меньше основного времени обработки τ_2 на втором переходе и составляет 25 % от основного времени обработки τ на операции шлифования (рис. 6.17,б).

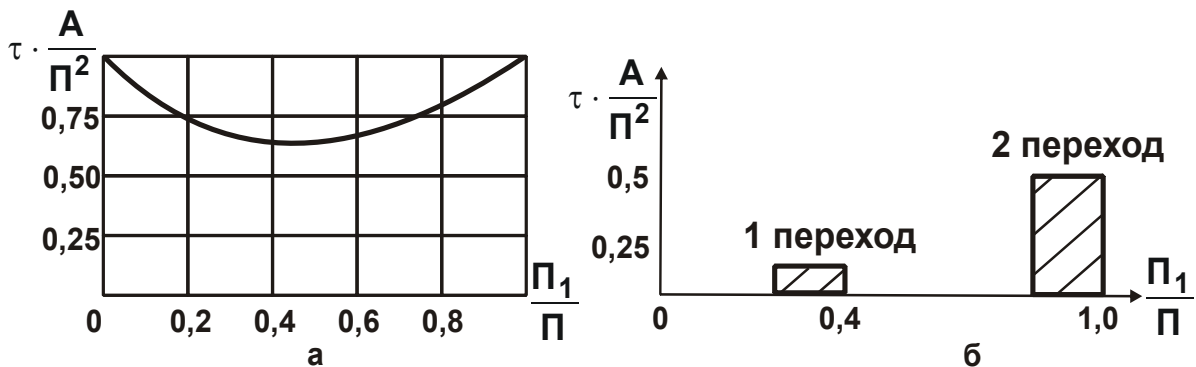


Рис. 6.17. Зависимость $\tau \cdot A / \Pi^2$ от Π_1 / Π (а) и характер изменения величины $\tau \cdot A / \Pi^2$ по переходам (б)

Как следует из рис. 6.18,а, скорость $V_{рез1}$ в 2,5 раза, а скорость $V_{рез2}$ в 1,25 раза больше скорости $V_{рез3}$ при шлифовании в один переход. Основное время обработки τ при шлифовании в 3 перехода определяется:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 = \frac{\Pi_1}{V_{рез1}} + \frac{\Pi_2}{V_{рез2}} + \frac{\Pi_3}{V_{рез3}}, \quad (6.51)$$

где Π_1 , Π_2 , Π_3 и $V_{рез1}$, $V_{рез2}$, $V_{рез3}$ – величины снимаемых припусков и скорости радиальных подач на первом, втором и третьем переходах;

$\Pi_1 + \Pi_2 + \Pi_3 = \Pi$ – суммарный снимаемый припуск, м.

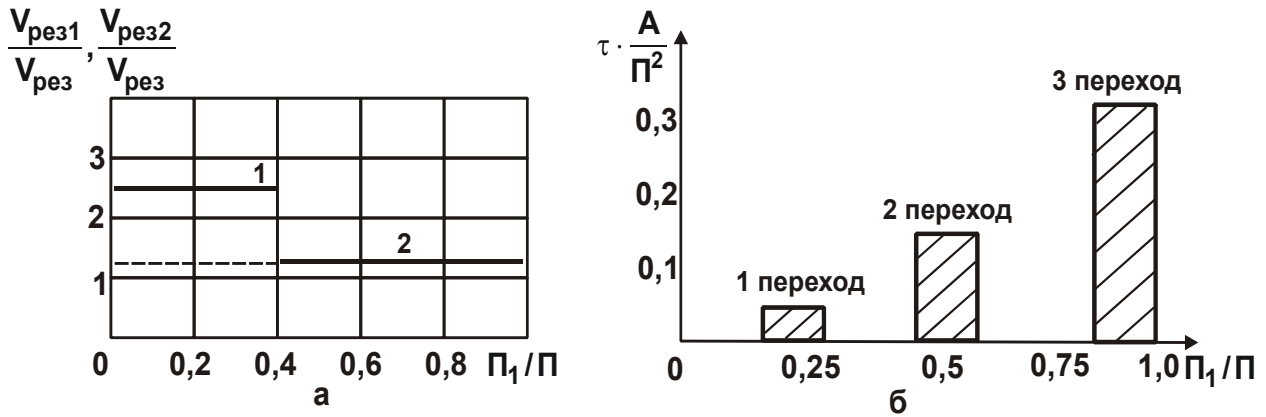


Рис. 6.18. Характер расположения зависимостей $V_{рез1} / V_{рез}$ (1) и $V_{рез2} / V_{рез}$ (2) на двух переходах (а) и характер изменения величины $\tau \cdot A / \Pi^2$ по переходам (б)

Температура шлифования θ в конце первого, второго и третьего переходов определяется на основе зависимости (6.6):

$$\theta = \sigma \cdot V_{рез1} \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \tau_1} = \sigma \cdot V_{рез1} \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \left(\frac{\Pi_1}{V_{рез1}} \right)}; \quad (6.52)$$

$$\theta = \sigma \cdot V_{рез2} \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot (\tau_1 + \tau_2)} = \sigma \cdot V_{рез2} \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \left(\frac{\Pi_1}{V_{рез1}} + \frac{\Pi_2}{V_{рез2}} \right)}; \quad (6.53)$$

$$\begin{aligned} \theta &= \sigma \cdot V_{рез3} \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3)} = \\ &= \sigma \cdot V_{рез3} \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \left(\frac{\Pi_1}{V_{рез1}} + \frac{\Pi_2}{V_{рез2}} + \frac{\Pi_3}{V_{рез3}} \right)}. \end{aligned} \quad (6.54)$$

Разрешая зависимости (6.52), (6.53) и (6.54) относительно величин $V_{рез1}$, $V_{рез2}$, $V_{рез3}$ с учетом зависимости (6.51), получено квадратное уравнение относительно величины $\sqrt{\tau}$:

$$\tau - \frac{\Pi_3}{\sqrt{A}} \cdot \sqrt{\tau} - (\tau_1 + \tau_2) = 0. \quad (6.55)$$

Решение квадратного уравнения (6.55):

$$\tau = \frac{1}{4A} \cdot \left\{ \Pi_3 + \sqrt{\Pi_3^2 + \left[\Pi_2 + \sqrt{(\Pi_2^2 + 4\Pi_1^2)} \right]^2} \right\}^2. \quad (6.56)$$

Установлено, что функция τ имеет экстремум (минимум) от двух переменных: Π_1 и Π_2 . Экстремальные значения параметров Π_1 ; Π_2 ;

Π_3 равны: $\Pi_1 = 0,224 \cdot \Pi$; $\Pi_2 = 0,337 \cdot \Pi$; $\Pi_3 = 0,439 \cdot \Pi$. Соответственно, минимальное значение функции τ определяется:

$$\tau_{\min} = (0,05 + 0,15 + 0,314) \cdot \frac{\Pi^2}{A} = 0,514 \cdot \frac{\Pi^2}{A}. \quad (6.57)$$

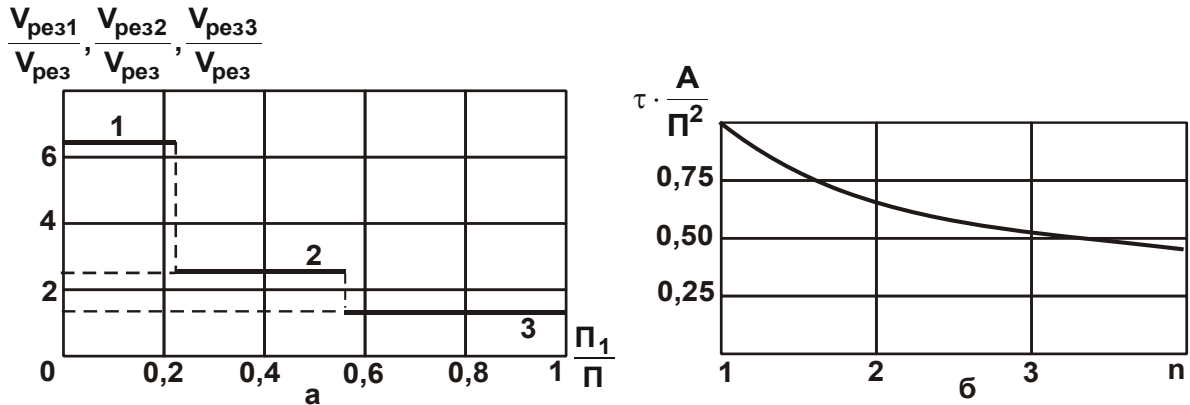


Рис. 6.19. Характер расположения зависимостей $V_{рез1} / V_{рез}$ (1), $V_{рез2} / V_{рез}$ (2) и $V_{рез3} / V_{рез}$ (3) на трех переходах (а) и зависимость $\tau \cdot A / \Pi^2$ от n

По сравнению с шлифованием в 2 перехода основное время обработки на первом и втором переходах существенно меньше (рис. 6.18,б). По сравнению с шлифованием в 2 перехода (рис. 6.18,а) скорости $V_{рез1}$, $V_{рез2}$, $V_{рез3}$ также увеличились (рис. 6.19,а). Следовательно, увеличение количества переходов позволяет увеличить скорости $V_{рез1}$, $V_{рез2}$, $V_{рез3}$ при заданной температуре шлифования θ , а это способствует снижению основного времени обработки.

Для оценки основного времени обработки τ при шлифованием в четыре перехода следует провести анализ следующей зависимости:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 = \frac{\Pi_1}{V_{рез1}} + \frac{\Pi_2}{V_{рез2}} + \frac{\Pi_3}{V_{рез3}} + \frac{\Pi_4}{V_{рез4}}, \quad (6.58)$$

где Π_1 , Π_2 , Π_3 , Π_4 и $V_{рез1}$, $V_{рез2}$, $V_{рез3}$, $V_{рез4}$ – величины снимаемых припусков и скорости радиальных подач на 1-ом, 2-ом, 3-ем и 4-ом переходах;

$\Pi_1 + \Pi_2 + \Pi_3 + \Pi_4 = \Pi$ – суммарный снимаемый припуск, м.

Пользуясь вышеприведенной методикой, и, используя зависимость (6.58), расчетами установлены экстремальные значения величин Π_1 , Π_2 , Π_3 , Π_4 , которые равны: $\Pi_1 = 0,146 \cdot \Pi$; $\Pi_2 = 0,219 \cdot \Pi$;

$\Pi_3 = 0,285 \cdot \Pi$; $\Pi_4 = 0,35 \cdot \Pi$. Соответственно, минимальное значение функции τ определяется:

$$\tau_{\min} = (0,021 + 0,063 + 0,133 + 0,233) \cdot \frac{\Pi^2}{A} = 0,45 \cdot \frac{\Pi^2}{A}. \quad (6.59)$$

Как видно, при шлифовании в четыре перехода минимальное основное время обработки $\tau \cdot A / \Pi^2$ меньше, чем при шлифовании в три перехода, т.е. с увеличением количества переходов наблюдается уменьшение $\tau \cdot A / \Pi^2$ (рис. 6.19,б). На рис. 6.20 показан характер изменения основного времени обработки $\tau \cdot A / \Pi^2$ и скоростей $V_{\text{рез1}}$, $V_{\text{рез2}}$, $V_{\text{рез3}}$, $V_{\text{рез4}}$ при шлифовании в четыре перехода по отношению к шлифованию в один переход, когда $V_{\text{рез}} = A / \Pi$. По сравнению с шлифованием в один переход скорость $V_{\text{рез1}}$ увеличилась в 6,952 раза, скорость $V_{\text{рез2}}$ – в 3,476 раза, скорость $V_{\text{рез3}}$ – в 2,142 раза, а скорость $V_{\text{рез4}}$ – в 1,502 раза. По сравнению с шлифованием в два перехода (рис. 6.17,б) и в три перехода (рис. 6.18,а) скорости $V_{\text{рез1}}$, $V_{\text{рез2}}$, $V_{\text{рез3}}$, $V_{\text{рез4}}$ также увеличились.

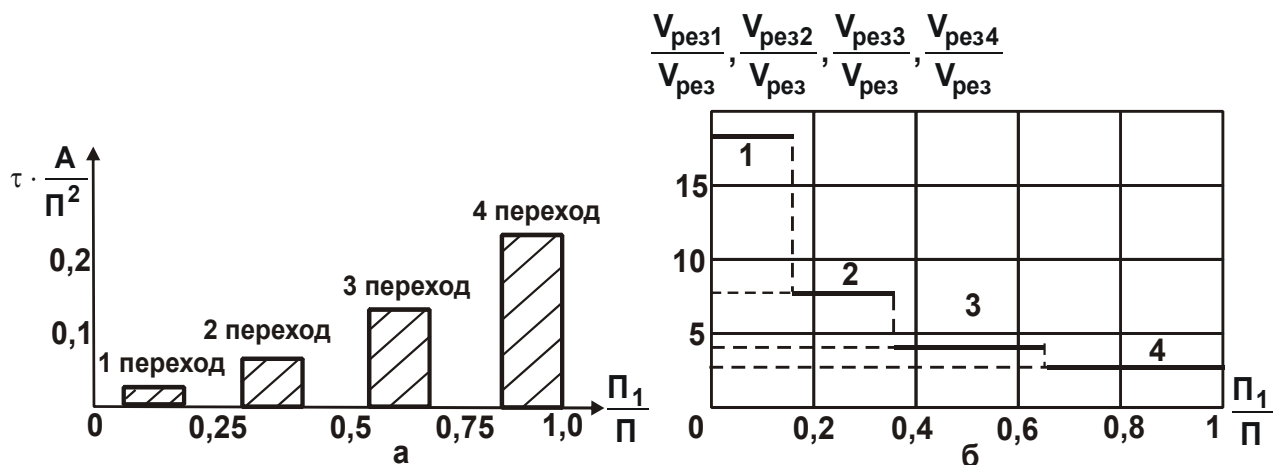


Рис. 6.20. Характер изменения величины $\tau \cdot A / \Pi^2$ по переходам (а) и характер расположения зависимостей $V_{\text{рез1}} / V_{\text{рез}}$ (1), $V_{\text{рез2}} / V_{\text{рез}}$ (2), $V_{\text{рез3}} / V_{\text{рез}}$ (3) и $V_{\text{рез4}} / V_{\text{рез}}$ (4) на четырех переходах (б)

Аналогично можно проанализировать характер изменения основного времени обработки и соответственно скоростей и снимаемых припусков для большего количества переходов. Однако тенденции их

изменения, выявленные при анализе шлифования в два, три и четыре перехода, сохранятся. Это указывает на эффективность осуществления шлифования с переменной во времени скоростью $V_{рез}$. Чем больше отличие максимального и минимального значений скоростей, тем меньше основное время обработки при шлифовании. Исходя из этого, наиболее эффективным вариантом шлифования следует рассматривать вариант, согласно которому скорость $V_{рез}$ во времени уменьшается от своего максимального значения до нуля. Очевидно, для реализации этого условия требуется создание автоматизированных циклов шлифования, что представляет значительные сложности. Более просто это условие реализовать за счет, например, создания в технологической системе начального натяга, который при шлифовании (выхаживании) приведет к уменьшению во времени скорости $V_{рез}$ вплоть до нуля.

Результаты исследований использованы при разработке эффективного процесса круглого наружного абразивного шлифования колец подшипников. Установлено, что применение шлифования с уменьшающейся по переходам скоростью радиальной подачи круга (в соответствии с предложенным в работе алгоритмом расчета) позволяет исключить образование на обрабатываемых поверхностях прижогов и других температурных дефектов при одновременном увеличении производительности обработки.

6.6. Расчеты температурных напряжений при резании материалов методами теории упругости

Выделяющееся в процессе резания тепло идет на нагревание обрабатываемой детали, инструмента, технологической оснастки, элементов станка, что вызывает их деформирование и снижение точности и качества обработки. Для управления температурными деформациями элементов технологической системы необходимо знать законы изменения температурных напряжений. Рассчитать температурные напряжения в телах сложной формы с помощью элементарных методов не представляется возможным. Необходимо применять методы теории упругости, математически описывающие поля напряжений в двух- и трехмерных задачах. В качестве примеров ниже приведены

решения задач распределения температурных напряжений в шлифовальном (алмазном отрезном) круге, имеющем стальной корпус в виде диска, и в поверхностном слое обрабатываемого материала.

6.6.1. Температурные напряжения, возникающие в отрезном алмазном круге

Нагрев отрезного алмазного круга вызывает появление в нем напряжений и его деформацию. Деформация круга увеличивает силы резания и вызывает заклинивание и разрушение круга. Для управления процессом обработки необходимо знать количественный уровень возникающих тепловых напряжений и условия их уменьшения.

Исходя из теории упругости [121], радиальные σ_r и тангенциальные σ_φ напряжения удовлетворяют условию равновесия, описываемому дифференциальным уравнением:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\varphi}{r} = 0. \quad (6.60)$$

Касательные напряжения $\tau_{r\varphi}$ равны нулю ввиду симметрии поля деформаций (рис. 6.21). Для решения уравнения (6.60) следует принять соотношения между деформациями и напряжениями в виде [121]:

$$\varepsilon_r - \alpha \cdot \theta = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_r - \nu \cdot \sigma_\varphi); \quad (6.61)$$

$$\varepsilon_\varphi - \alpha \cdot \theta = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_\varphi - \nu \cdot \sigma_r), \quad (6.62)$$

где $\varepsilon_r, \varepsilon_\varphi$ – радиальная и тангенциальная деформация материала;

E – модуль упругости материала;

ν – коэффициент Пуассона материала;

α – коэффициент теплового расширения материала;

θ – температура материала.

После установления из зависимостей (6.61) и (6.62) выражений для определения напряжений σ_r, σ_φ и подстановки их в дифференциальное уравнение (6.60), получено:

$$r \cdot \frac{d}{dr} (\varepsilon_r + \nu \cdot \varepsilon_\varphi) + (1 - \nu) \cdot (\varepsilon_r - \varepsilon_\varphi) = (1 - \nu) \cdot \alpha \cdot r \cdot \frac{d\theta}{dr}. \quad (6.63)$$

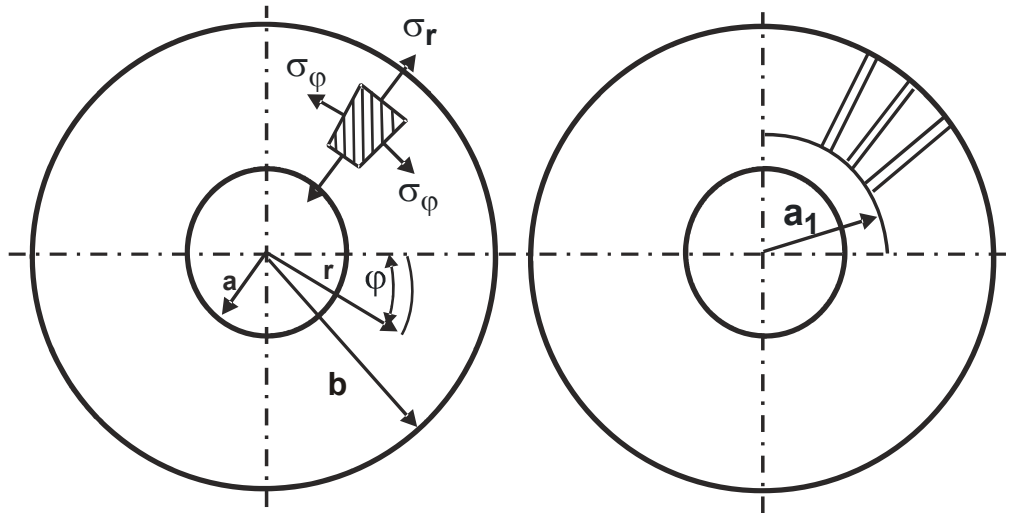


Рис. 6.21. Расчетная схема напряжений в диске круга

Если через переменную U обозначить радиальное перемещение, то величины деформаций примут вид:

$$\varepsilon_r = \frac{dU}{dr}; \quad (6.64)$$

$$\varepsilon_\varphi = \frac{U}{r}. \quad (6.65)$$

После подстановки зависимостей (6.64) и (6.65) в дифференциальное уравнение (6.63), получено:

$$\frac{d^2U}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dU}{dr} - \frac{U}{r^2} = (1+\nu) \cdot \alpha \cdot \frac{d\theta}{dr}. \quad (6.66)$$

После упрощения, имеем:

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \cdot \frac{d(r \cdot U)}{dr} \right] = (1+\nu) \cdot \alpha \cdot \frac{d\theta}{dr}. \quad (6.67)$$

Интегрируя дифференциальное уравнение (6.67), определено перемещение:

$$U = (1+\nu) \cdot \alpha \cdot \frac{1}{r} \cdot \int_0^r \theta \cdot r \cdot dr + C_1 \cdot r + \frac{C_2}{r}, \quad (6.68)$$

где C_1, C_2 – постоянные интегрирования, определяются из граничных условий.

Подставляя зависимость (6.68) в (6.65), а затем в зависимости (6.61) и (6.62), получено:

$$\sigma_\varphi = \alpha \cdot E \cdot \frac{1}{r^2} \cdot \int_0^r \theta \cdot r \cdot dr - \alpha \cdot E \cdot \theta + \left(\frac{E}{1-\nu^2} \right) \cdot \left[C_1 \cdot (1+\nu) + C_2 \cdot (1-\nu) \cdot \frac{1}{r^2} \right]; \quad (6.69)$$

$$\sigma_r = -\alpha \cdot E \cdot \frac{1}{r^2} \cdot \int_0^r \theta \cdot r \cdot dr + \frac{E}{(1-\nu^2)} \cdot \left[C_1 \cdot (1+\nu) + C_2 \cdot (1-\nu) \cdot \frac{1}{r^2} \right]. \quad (6.70)$$

После интегрирования зависимость (6.68) примет вид:

$$U = (1+\nu) \cdot \frac{\alpha \cdot \theta}{2r} \cdot (r^2 - a^2) + C_1 \cdot r + \frac{C_2}{r}. \quad (6.71)$$

Можно предположить, что перемещения U на внутреннем и наружном контурах диска, т.е. при значениях $r = a$ и $r = b$, равны нулю (рис. 6.21). Это обусловлено тем, что перемещение U внутреннего контура отрезного круга ограничивает посадочный диаметр вала, а перемещение U на внешнем контуре – сила резания, которая сжимает круг. Тогда граничные условия примут вид:

$$U \Big|_{r=a} = U \Big|_{r=b} = 0. \quad (6.72)$$

Подчиняя зависимость (6.71) граничным условиям (6.72), определены постоянные интегрирования C_1 и C_2 . На основании полученных решений в табл. 6.4 приведены расчетные значения параметров U , σ_r , σ_φ в зависимости от значения радиуса r для исходных данных: $a = 12$ мм, $b = 120$ мм, $\nu = 0,3$ (для стали), $E = 2,1 \cdot 10^5$ Н/мм², $\alpha = 0,12 \cdot 10^4$ 1/град, $\theta = 1000$ °С.

Таблица 6.4

Расчетные значения U , σ_r , σ_φ

r , мм	12	50	100	120
U , мм	0	0	0	0
σ_r , Н/мм ²	-3600	-3600	-3600	-3600
σ_φ , Н/мм ²	-3600	-3600	-3600	-3600

Как видно, перемещение U во всех точках отрезного круга равно нулю, т.е. контуры круга жестко защемлены. Напряжения σ_r и σ_φ – сжимающие, равны между собой во всех точках диска (отрезного круга) и принимают значения, превышающие предельно допустимые напряжения. Высокий уровень напряжений указывает на то, что диск будет деформироваться в поперечном направлении, принимая самые разнообразные формы. На практике, как правило, наблюдается деформирование диска круга в форме волны вдоль его рабочей поверхности. Как отмечалось выше, это приводит к отрицательным послед-

ствиям с точки зрения снижения качества обработки и работоспособности круга.

Отрезные круги с прерывистой рабочей поверхностью (с радиальными пазами) работают более стабильно со значительно меньшими деформациями в поперечном направлении. Для оценки степени уменьшения напряжений в диске за счет наличия радиальных пазов, дифференциальное уравнение (6.60) следует решить для условия, когда напряжение σ_φ не зависит от угла φ в диске (рис. 6.21). Решая дифференциальное уравнение (6.60) аналогично предыдущему случаю, получены зависимости для определения перемещения U и напряжения σ_r :

$$U = \int_0^r \alpha \cdot \theta \cdot dr + C_3 \cdot \ln r + C_4, \quad (6.73)$$

$$\sigma_r = E \cdot \frac{C_3}{r}, \quad (6.74)$$

где C_3, C_4 – постоянные интегрирования.

Полученное решение справедливо при изменении радиуса r в пределах $a_1 < r < b$. При изменении радиуса r в пределах $b < r < a_1$ справедливы предыдущие решения: (6.68) – (6.70).

Для определения постоянных интегрирования C_1, C_2, C_3, C_4 следует воспользоваться двумя граничными условиями:

$$U_1 \Big|_{r=a} = 0; \quad U_2 \Big|_{r=b} = 0 \quad (6.75)$$

(где U_1 и U_2 – значения параметра U сплошного и прерывистого отрезных кругов) и двумя условиями совместности для: $r = a_1$

$$U_1 \Big|_{r=a_1} = U_2 \Big|_{r=a_1}; \quad \sigma_{r1} \Big|_{r=a_1} = \sigma_{r2} \Big|_{r=a_1}. \quad (6.76)$$

Подчиняя соответствующие зависимости для определения перемещения U и напряжения σ_r граничным условиям (6.75) и условиям совместности (6.76), определены постоянные интегрирования C_1, C_2, C_3, C_4 и напряжения σ_r и σ_φ для случая $r = a_1 = 20$ мм.

В табл. 6.5 приведены расчетные значения напряжений σ_r, σ_φ в отрезном алмазном круге с конструктивными параметрами $a = 12$ мм, $a_1 = 20$ мм, $b = 120$ мм.

Таблица 6.5

Расчетные значения напряжений σ_r и σ_φ

г, мм	12	20	120
σ_r , Н/мм ²	- 7250	- 6400	- 1070
σ_φ , Н/мм ²	- 4700	0	0

Как видно, напряжение σ_r увеличивается по мере уменьшения радиуса г. На внешнем контуре прерывистого отрезного круга напряжение $\sigma_r = -1700$ Н/мм², а в диске без радиальных пазов напряжение $\sigma_r = -3600$ Н/мм². Этим показано, что наличие радиальных пазов позволяет уменьшить напряжения в отрезном алмазном круге в области его рабочей зоны и, соответственно, уменьшить поперечные деформации круга, исключая заклинивание его в процессе работы круга. Однако следует заметить, что наличие радиальных пазов не устраняет возникающие напряжения, а перераспределяет их в пределах контура круга. Увеличение напряжений σ_r и σ_φ до значений (-7250 Н/мм²) и (-4700 Н/мм²) соответственно также не желательно, поскольку это может вызвать в процессе работы разрыв круга.

В табл. 6.6 приведены расчетные значения напряжений σ_r и σ_φ в отрезном круге с параметрами $a = 12$ мм, $a_1 = 40$ мм, $b = 120$ мм.

Таблица 6.6

Расчетные значения напряжений σ_r , σ_φ

г, мм	12	40	120
σ_r , Н/мм ²	- 4600	- 4250	- 1420
σ_φ , Н/мм ²	- 3930	0	0

С уменьшением длины радиальных пазов на прерывистом круге напряжение σ_r на внешнем контуре увеличивается, а на внутреннем контуре уменьшается. Уменьшается также и напряжение σ_φ .

В табл. 6.7 приведены расчетные значения напряжения σ_r в прерывистом круге с параметрами $a = 12$ мм, $a_1 = 100$ мм, $b = 120$ мм.

Как видно, уменьшением длины радиальных пазов напряжение σ_r на внешнем контуре круга увеличивается, а на внутреннем контуре

уменьшается. Следовательно, оптимизация конструкции прерывистых алмазных отрезных кругов создает условия для их рационального использования. Уменьшение температуры в зоне резания способствует снижению общего уровня напряжений σ_r и σ_φ в круге.

Таблица 6.7

Расчетные значения напряжения σ_r

г, мм	12	100	120
σ_r , Н/мм ²	- 1880	- 2470	- 2060

Приведенные решения имеют важное практическое значение для совершенствования технологии изготовления алмазных отрезных кругов. При спекании алмазоносного слоя, при условии высоких температур и давлений, возникает коробление круга, которое, как правило, не исправляется при его правке. Наличие радиальных пазов на круге позволяет управлять короблением круга в процессе термообработки его алмазоносного слоя на стадии изготовления.

6.6.2. Температурные напряжения, возникающие в поверхностном слое обрабатываемого материала

Приведенное в п. 6.6.1. теоретическое решение можно использовать для расчета температурных (термоупругих) напряжений в поверхностном слое обрабатываемого материала. Для этого следует условно разбить рассмотренный диск с внутренним отверстием на две одинаковые части, считая, что диаметральной плоскостью определяет обрабатываемую поверхность детали, в центре которой действует тепловой источник длиной, равной диаметру внутреннего отверстия. Также следует принять в первом приближении, что тепловой источник действует по контуру внутреннего отверстия, а распределение напряжений σ_r и σ_φ является симметричным, считая наружный радиус границей обрабатываемого материала, где температура равна нулю.

Рассмотрим плоское напряженное состояние поверхностного слоя обрабатываемого материала с учетом температурных деформаций. Обозначая полную радиальную деформацию параметром ε_r , а ее составляющую, обусловленную действием напряжения, в виде $\varepsilon_r - \alpha \cdot \theta$ (где α – коэффициент линейного расширения, 1/град; θ –

температура, град.), закон Гука [121] выразится зависимостями (6.61) и (6.62). Разрешая эти зависимости относительно напряжения σ_r , получено:

$$\sigma_r = \left(\frac{E}{1-\nu^2} \right) \cdot [\varepsilon_r + \nu \cdot \varepsilon_\theta - (1+\nu) \cdot \alpha \cdot \theta]. \quad (6.77)$$

Деформации ε_r и ε_θ для осесимметричного поля деформаций описываются зависимостями:

$$\varepsilon_r = \frac{dU}{dr}; \quad (6.78)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{U}{r}. \quad (6.79)$$

Для упрощения решений с определенными допущениями можно принять условие $\sigma_\theta = 0$. Тогда с учетом зависимостей (6.77) и (6.79) дифференциальное уравнение равновесия (6.60) примет вид:

$$\frac{d^2U}{dr^2} + \frac{(1+\nu)}{r} \cdot \frac{dU}{dr} = (1+\nu) \cdot \alpha \cdot \left[\frac{d\theta}{dr} + \frac{\theta}{r} \right]. \quad (6.80)$$

Обозначая $z = \frac{dU}{dr}$, получено:

$$\frac{dz}{dr} + \frac{(1+\nu)}{r} \cdot z = (1+\nu) \cdot \alpha \cdot \left[\frac{d\theta}{dr} + \frac{\theta}{r} \right] \quad (6.81)$$

или

$$\frac{dz}{dr} + P(r) \cdot z = Q(r). \quad (6.82)$$

Общее решение данного дифференциального уравнения [25]:

$$z = \left[\int dr \cdot Q(r) \cdot e^{\int P(r) \cdot dr} + C_1 \right] \cdot e^{-\int P(r) \cdot dr}. \quad (6.83)$$

После преобразований с учетом условия $\theta = \text{const}$, имеем:

$$z = \alpha \cdot \theta + C_1 \cdot r^{-(1+\nu)}; \quad (6.84)$$

$$U = \alpha \cdot \theta \cdot r - \frac{C_1}{\nu \cdot r^\nu} + C_2, \quad (6.85)$$

где C_1, C_2 – постоянные интегрирования.

Напряжение σ_r выражается:

$$\sigma_r = \left(\frac{E}{1-\nu^2} \right) \cdot \frac{\nu \cdot C_2}{r}. \quad (6.86)$$

Для определения постоянных интегрирования C_1 и C_2 следует принять граничные условия (рис. 6.22):

$$U \Big|_{r=R_1}^{r=R_2} = 0. \quad (6.87)$$

$$\text{Тогда } C_1 = -\frac{\alpha \cdot \theta \cdot \nu \cdot (R_2 - R_1)}{\left(\frac{1}{R_1^\nu} - \frac{1}{R_2^\nu}\right)}; \quad C_2 = -\alpha \cdot \theta \cdot R_1 \cdot \left[\frac{\left(\frac{R_2}{R_1} - 1\right)}{\left(1 - \frac{R_1^\nu}{R_2^\nu}\right)} + 1 \right].$$

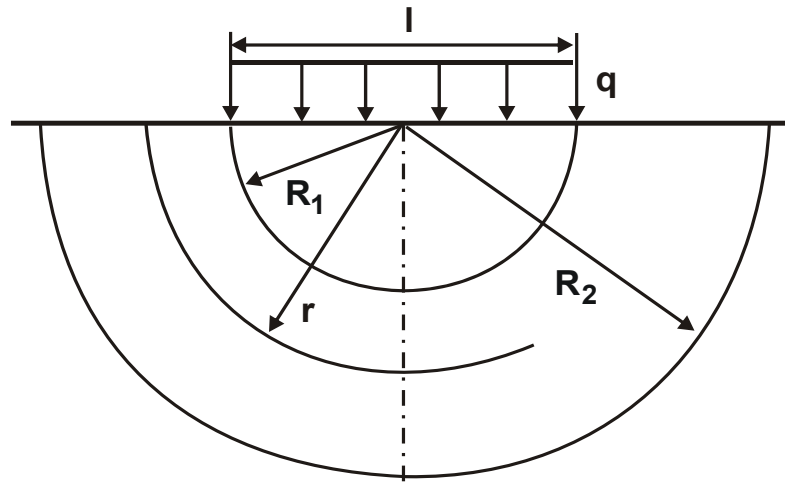


Рис. 6.22. Расчетная схема деформаций от нагрузки q

Напряжение σ_r окончательно выразится:

$$\sigma_r = -\frac{E \cdot \alpha \cdot \nu \cdot \theta \cdot R_1}{(1 - \nu^2) \cdot r} \cdot \left[\frac{\left(\frac{R_2}{R_1} - 1\right)}{\left(1 - \frac{R_1^\nu}{R_2^\nu}\right)} + 1 \right]. \quad (6.88)$$

При условии $R_2 \gg R_1$, имеем

$$\sigma_r = -\frac{E \cdot \alpha \cdot \nu \cdot \theta \cdot R_2}{(1 - \nu^2) \cdot r}. \quad (6.89)$$

Из зависимости (6.89) следует увеличение напряжения σ_r с увеличением параметров E , α , ν , θ и соотношения R_2/r .

При условии $\sigma_r = \sigma_{сж}$ возможно разрушение материала в точках полуокружности диаметром $D = l$. Поэтому, исходя из зависимости (5.88), определена предельная температура θ при условии $R_1 = r$ (знак "минус" опущен):

$$\theta = \frac{(1-\nu^2) \cdot \sigma_{сж}}{E \cdot \nu \cdot \alpha} \cdot \frac{1}{\left[\frac{\left(\frac{R_2}{R_1} - 1 \right)}{\left(1 - \frac{R_1^{\nu}}{R_2^{\nu}} \right)} + 1 \right]} \quad (6.90)$$

При условии $R_2 \gg R_1$, имеем:

$$\theta = \frac{(1-\nu^2) \cdot \sigma_{сж}}{E \cdot \nu \cdot \alpha} \cdot \frac{R_1}{R_2} \quad (6.91)$$

Как видно, температура θ тем больше, чем меньше радиус R_2 и больше радиус R_1 . Отношение $\sigma_{сж}/E$ определяет упругую деформацию материала $\varepsilon_{упр}$. Следовательно, чем больше $\varepsilon_{упр}$, тем больше должна быть температура θ , обеспечивающая выполнение условия $\sigma_r = \sigma_{сж}$. Исходя из этого, хрупкие материалы (например, алмаз), характеризующиеся меньшими значениями $\varepsilon_{упр}$, в большей степени подвержены разрушению от действия термоупругих напряжений. Так, значение $\varepsilon_{упр} = \sigma_{сж}/E$ для алмаза равно 0,002; для твердых сплавов – 0,009; для быстрорежущих сталей – 0,016.

Применительно к процессу резания материала (рис. 6.23), напряжение σ_r , возникающее в точках полуокружности диаметром $D = l$ (1 четверть), определяется суммой напряжений, вызванных силовым и тепловым факторами (при значении $R_1 = r$):

$$\sigma_r = -\frac{2 \cdot q}{\pi} = -\frac{E \cdot \nu \cdot \alpha \cdot \theta}{(1-\nu^2)} \cdot \left[\frac{\left(\frac{R_2}{R_1} - 1 \right)}{\left(1 - \frac{R_1^{\nu}}{R_2^{\nu}} \right)} + 1 \right] \quad (6.92)$$

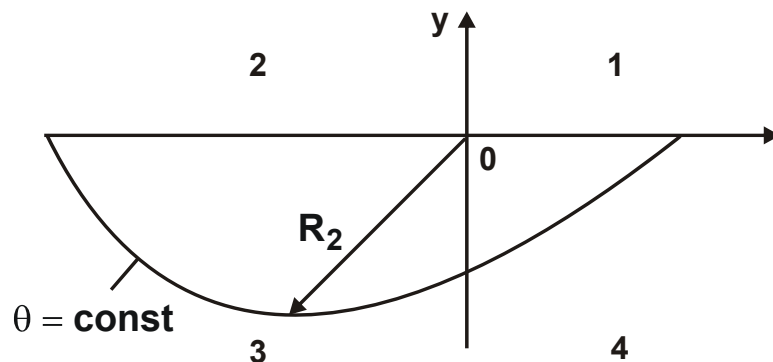


Рис. 6.23. Положение изотермы в обрабатываемом материале

При условии $\sigma_r = \sigma_{сж}$ справедливо равенство:

$$\sigma_{сж} = -\frac{2 \cdot q}{\pi} - \frac{E \cdot \nu \cdot \alpha \cdot \theta}{(1 - \nu^2)} \cdot \left[\frac{\left(\frac{R_2}{R_1} - 1 \right)}{\left(1 - \frac{R_1^{\nu}}{R_2^{\nu}} \right)} + 1 \right]. \quad (6.93)$$

При условии $R_2 \gg R_1$:

$$\sigma_{сж} = -\frac{2 \cdot q}{\pi} - \frac{E \cdot \nu \cdot \alpha \cdot \theta \cdot R_2}{(1 - \nu^2) \cdot R_1}. \quad (6.94)$$

С учетом соотношений $q = \frac{P}{l} = \frac{P}{2 \cdot R_1}$, имеем:

$$\sigma_{сж} = \frac{1}{R_1} \cdot \left[\frac{P}{\pi} + \frac{E \cdot \nu \cdot \alpha \cdot \theta \cdot R_2}{(1 - \nu^2)} \right]. \quad (6.95)$$

Как видно, чем больше параметры θ и R_2 , тем меньше сила P , обеспечивающая разрушение материала. Термоупругие напряжения σ_r , определяемые зависимостью (6.89), зависят от параметра R_2 . Принципиально температурное поле (положение изотермы $\theta = \text{const}$), возникающее в процессе резания, имеет вид, представленный на рис. 6.23.

Следовательно, в 3-й четверти параметр R_2 существенно больше, чем в 4-й четверти. Это предопределяет более высокие значения напряжения σ_r в 3-й четверти и условия возможного разрушения поверхностных слоев материала в конце зоны контакта с режущим инструментом. Уменьшить термоупругие напряжения в 3-й четверти, согласно зависимости (6.89), можно уменьшением параметров θ и R_2 , в том числе путем применения охлаждающей жидкости. Полученные теоретические решения согласуются с аналогичными результатами экспериментальных исследований, приведенными в работах профессора Якимова А. В. [145 – 148].

При шлифовании (рис. 6.24) термоупругие напряжения, описываемые зависимостью (6.89), при условии $r = R_1$ определяются:

$$\sigma_r = -\frac{E \cdot \nu \cdot \alpha \cdot \theta \cdot R_2}{(1 - \nu^2) \cdot R_1}. \quad (6.96)$$

Как видно, чем больше отношение R_2 / R_1 , тем больше напряжение σ_r . Очевидно, в 3-й четверти напряжение σ_r больше, чем в 4-й

четверти, поскольку температурное поле охватывает большую область. Наибольшее значение радиуса R_2 достигается на поверхности обработанного материала, что может стать причиной разрушения поверхностных слоев материала.

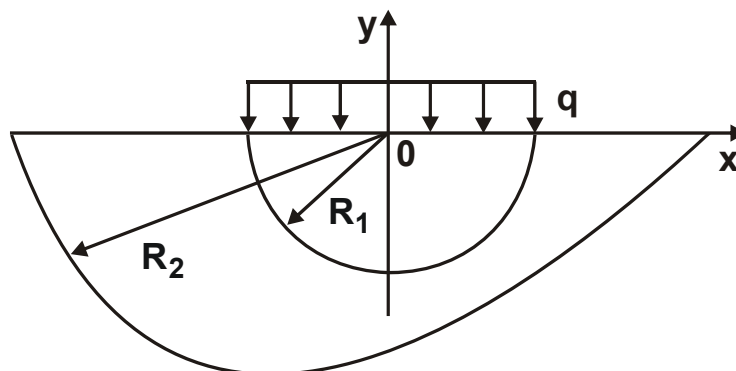


Рис. 6.24. Расчетная схема термоупругих напряжений при шлифовании

Длина контакта круга с обрабатываемым материалом равна $2 \cdot R_1$. Поэтому напряжение σ_r зависит от отношения толщины прогретого слоя материала R_2 и длины контакта круга с материалом $2 \cdot R_1$. Очевидно, при глубинном шлифовании параметры R_2 и R_1 больше, чем при обычном многопроходном шлифовании. Однако из этого еще не следует увеличение напряжения σ_r при глубинном шлифовании, поскольку отношение R_2 / R_1 и средняя температура θ в диапазоне $R_1 \dots R_2$ могут быть меньше, чем при многопроходном шлифовании. Этим, в частности, можно объяснить повышение качества обработки при глубинном шлифовании [19].

При условии $\sigma_r = \sigma_{сж}$ получена зависимость, идентичная зависимости (6.91), которая с учетом известного соотношения $\varepsilon_{упр} = \sigma_{сж} / E$ принимает вид:

$$\theta = \frac{(1 - \nu^2) \cdot \varepsilon_{упр} \cdot R_1}{\nu \cdot \alpha \cdot R_2}. \quad (6.97)$$

Температура θ уменьшается с уменьшением деформации $\varepsilon_{упр}$. Это требует значительного снижения температуры при шлифовании, например, твердых сплавов, алмазов и других материалов, характеризующихся относительно небольшими значениями $\varepsilon_{упр}$. Эффективно увеличивать отношение R_1 / R_2 при условии $\theta = \text{const}$.

Важно определить напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя обрабатываемого материала при изменении температуры по закону $\theta = A/r^n$, где A, n – некоторые постоянные.

Решая дифференциальное уравнение (6.80), имеем:

$$U = \frac{\alpha \cdot (1 + \nu) \cdot A}{(1 + \nu - n)} \cdot r^{1-n} - \frac{C_1}{\nu} \cdot r^{-\nu} + C_2. \quad (6.98)$$

Постоянные интегрирования C_1 и C_2 определяются из граничных условий: $U(r = R_1) = U(r = R_2) = 0$.

Напряжение σ_r описывается зависимостью (6.86) с учетом

$$C_2 = -\frac{\alpha \cdot (1 + \nu) \cdot A}{(1 + \nu - n)} \cdot \left\{ \frac{\left[\left(\frac{R_2}{R_1} \right)^{1-n} - 1 \right]}{\left(1 - \frac{R_1^\nu}{R_2^\nu} \right)} + 1 \right\} \cdot R_1^{1-n}. \quad (6.99)$$

При $n = 0$ приходим к решению (6.92). При $n = 1$ имеем:

$$C_2 = -\alpha \cdot A \cdot \frac{(1 + \nu)}{\nu}; \quad (6.100)$$

$$\sigma_r = -\frac{E \cdot \alpha \cdot A}{(1 - \nu) \cdot r} = -\frac{E \cdot \alpha \cdot \theta}{(1 - \nu)}. \quad (6.101)$$

Напряжение σ_r изменяется по закону $\theta(r)$, поэтому уменьшить его можно лишь уменьшением температуры $\theta(r)$. Максимальное значение напряжения $\sigma_r = \sigma_{сж}$ достигается при значении $r = R_1$:

$$\sigma_{сж} = -\frac{E \cdot \alpha \cdot A}{(1 - \nu) \cdot R_1}, \quad (6.102)$$

откуда параметр A , пропорциональный температуре θ , равен

$$A = -\frac{(1 - \nu) \cdot \sigma_{сж} \cdot R_1}{E \cdot \alpha}. \quad (6.103)$$

Как видно, параметр A тем больше, чем больше длина контакта обрабатываемого материала с передней поверхностью резца $2 \cdot R_1$. Следовательно, увеличение $2 \cdot R_1$ предполагает увеличение параметра A (или температуры θ) для выполнения условия $\sigma_r = \sigma_{сж}$.

В зависимости (6.102) параметр R_2 отсутствует. Максимальное значение напряжения σ_r зависит лишь от параметра R_1 , т.е. механизмы формирования термоупругих напряжений при значениях $n = 0$ и $n = 1$ различны.

Выводы

1. В работе разработана математическая модель определения температуры при шлифовании прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга с постоянной скоростью. Доказано, что при шлифовании доля тепла, уходящего в обрабатываемый образец, значительно больше доли тепла, уходящего в образующиеся стружки. Теоретически определены основные условия уменьшения температуры шлифования. Они состоят, главным образом, в уменьшении условного напряжения резания (энергоёмкости обработки) и в съеме припуска небольшими частями за счет периодического прерывания процесса шлифования с целью частичного охлаждения нагретых поверхностей обрабатываемого образца.

2. Проведено сравнение температуры резания при шлифовании и лезвийной обработке. Расчетами установлено, что энергоёмкость обработки при шлифовании больше, чем при лезвийной обработке, поэтому больше и температура резания при шлифовании. Основным путем уменьшения температуры резания при шлифовании является обеспечение высокой режущей способности круга. Например, применение специального высокопористого профильного абразивного круга, обладающего высокой режущей способностью, в условиях производительного глубинного шлифования по схеме профильного копирования на современном зубошлифовальном станке модели HOFLER RAPID 1250 позволило съём припуска величиной 0,4 мм на сторону производить за 4 прохода круга со скоростью его перемещения вдоль обрабатываемого зуба, равной 3 м/мин, и скоростью вращения круга 40 м/с. По сравнению с традиционной схемой зубошлифования по методу обката это позволило до 5 раз увеличить производительность обработки и высвободить 4 зубошлифовальных станка, работающих по схеме обката. При этом на обрабатываемых поверхностях отсутствуют прижоги и другие температурные дефекты, что свидетельствует об относительно низкой температуре шлифования и высокой режущей способности круга в условиях глубинного шлифования

3. Разработана математическая модель определения температуры при глубинном шлифовании. Установлено, что в условиях съема больших припусков перерезание адиабатических стержней, которыми условно представлен снимаемый припуск в расчетной схеме, происхо-

дит с уменьшающейся во времени скоростью. Это приводит к экстремальному характеру изменения температуры по толщине снимаемого припуска. Температура проходит точку максимума фактически в начальный момент перерезания адиабатического стержня, то есть нагреву подвергается главным образом снимаемый припуск. Поверхностный слой обрабатываемой детали нагревается в меньшей мере, тогда как при шлифовании с постоянной во времени скоростью перерезания адиабатического стержня нагревается в основном поверхностный слой обрабатываемой детали. Установлено, что при глубинном шлифовании максимальная температура, достигаемая в слое снимаемого припуска, в 2 раза больше температуры поверхностного слоя обработанной детали. При этом температура, рассчитанная с учетом уменьшающейся во времени скорости перерезания адиабатического стержня в 6 раз меньше температуры, рассчитанной для постоянной скорости. Это позволяет по-новому обосновать закономерности формирования параметров качества обработки при глубинном шлифовании и научно обоснованно подойти к выбору оптимальных условий обработки.

4. Проведена оптимизация структуры и параметров операции шлифования по наименьшему основному времени обработки для заданной температуры шлифования для различных случаев нагревания и охлаждения образца. Установлено, что при обеспечении полного остывания образца между переходами (но без учета времени, затрачиваемого на его остывание) основное время обработки изменяется по экстремальной зависимости, принимая минимальное значение при условии разбиения снимаемого припуска на одинаковые части и выполнения многопереходной обработки с одинаковой скоростью радиальной подачи. При этом минимальное основное время обработки тем меньше, чем больше количество переходов и меньше величина припуска, снимаемого на каждом переходе.

5. Расчетами установлено, что учет времени, затрачиваемого на полное остывание образца между переходами, не изменяет экстремальный характер зависимости основного времени обработки от количества переходов, однако, увеличивает его минимальное значение. Доказано, что эффект обработки имеет место при условии разбиения припуска как на одинаковые, так и разные части. Во втором случае можно значительно уменьшить основное время обработки.

6. Расчетами установлено, что реализовать условие полного остывания образца между переходами и добиться наибольшего эффекта обработки за счет применения прерывистого шлифования сложно, так как это требует превышения длины впадины прерывистого круга над длиной рабочего выступа. Наиболее просто реализовать данное условие можно за счет применения различных адаптивных систем управления и схем шлифования, когда образец движется не по нормали, а по касательной к кругу (в тангенциальном направлении), например, в схемах плоского и круглого наружного шлифования.

7. Установлено, что при шлифовании с частичным остыванием образца между переходами основное время обработки также изменяется по экстремальной зависимости. Однако, минимум времени обработки обусловлен неравномерно снимаемым по переходам припуском, подчиняющимся закону, близкому к возрастающей геометрической прогрессии. При этом скорость радиальной подачи по переходам изменяется по закону, близкому к убывающей геометрической прогрессии, а минимальное время обработки тем меньше, чем больше количество переходов.

8. В работе приведены решения задач распределения температурных напряжений в алмазном отрезном круге. Теоретически установлено, что наличие радиальных пазов позволяет уменьшить напряжения в отрезном круге в области его рабочей зоны и, соответственно, уменьшить поперечные деформации круга, исключая заклинивание его в процессе работы. Наличие радиальных пазов на круге также позволяет управлять короблением круга в процессе термообработки его алмазного слоя на стадии изготовления.

9. Произведен расчет температурных (термоупругих) напряжений в поверхностном слое обрабатываемого материала с использованием методов теории упругости. Установлено, что хрупкие материалы (например, алмаз) в большей степени подвержены разрушению от действия термоупругих напряжений. В процессе резания и, особенно при шлифовании, более высокие значения радиального напряжения достигаются в конце зоны контакта обрабатываемого материала с режущим инструментом, что может стать причиной разрушения поверхностных слоев материала.

Раздел 7

Расчеты температурных полей при механической обработке на основе решения дифференциального уравнения теплопроводности методом Фурье разделения переменных

7.1. Уравнение теплопроводности и определение распределения температуры в полуплоскости

Для более глубокого изучения закономерностей формирования температуры при механической обработке традиционно производят расчеты температурных полей, возникающих в зоне резания, используя уравнение теплопроводности, представляющее собой линейное дифференциальное уравнение в частных производных второго порядка [144]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right), \quad (7.1)$$

где $a = \lambda / (c \cdot \rho)$ – коэффициент температуропроводности обрабатываемого материала, $\text{м}^2/\text{с}$;

λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;

c – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$;

ρ – плотность обрабатываемого материала, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Если температура при механической обработке θ не зависит от времени τ , то распределение тепла называется стационарным. Функция $\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = 0$ и дифференциальное уравнение (7.1) принимает упрощенный вид:

$$\left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) = 0. \quad (7.2)$$

Дифференциальное уравнение (7.2) называется уравнением Лапласа. Общее решение дифференциального уравнения в частных производных представляет собой бесконечное множество функций от

независимых переменных. Для того чтобы выделить единственное решение, необходимо задать дополнительные условия – начальные и граничные.

Традиционно дифференциальное уравнение теплопроводности применительно к теплофизическим задачам технологии машиностроения решают методом источников (методом Грина) и методом интегральных преобразований.

Одним из наиболее изученных методов решения дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка является также метод разделения переменных (метод Фурье), который, к сожалению, не получил достаточно широкого применения при решении теплофизических задач технологии машиностроения. Этот метод основан на алгебраическом преобразовании исходного дифференциального уравнения к равенству двух выражений, зависящих от разных независимых переменных. Поэтому в настоящем разделе рассмотрены примеры решения дифференциальных уравнений (7.1) и (7.2) применительно к обработке материалов резанием и шлифованием.

Первоначально рассмотрим закономерности распределения температуры в полуплоскости для условия $\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = 0$. В этом случае распределение температуры в полуплоскости зависит от положения точки с координатами x , y , z и не зависит от времени, т.е. подчиняется уравнению Лапласа (7.2). Получим решение дифференциального уравнения (7.2) для полуплоскости ($-\infty < x < \infty$, $y > 0$), удовлетворяющее граничному условию:

$$\theta(x, y) = \varphi(x) \quad \text{при} \quad (-\infty < x < \infty), \quad (7.3)$$

где $\varphi(x)$ – некоторая функция.

Для этого следует применить метод Фурье разделения переменных, представляя искомое решение в виде произведения двух функций X и Y , где функция X зависит только от координаты x , а функция Y – от координаты y [144].

Подставляя функцию $\theta(x, y) = X \cdot Y$ в дифференциальное уравнение (7.2), получено:

$$\frac{1}{x} \cdot \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} = - \frac{1}{Y} \cdot \frac{\partial^2 Y}{\partial y^2}. \quad (7.4)$$

В тождестве (7.4) левая часть не зависит от координаты y , а правая – от координаты x , т.е. левая и правая части определяются разными переменными. Поэтому тождество будет выполняться, если левая и правая части равны между собой и принимают значение некоторой постоянной η :

$$\frac{1}{x} \cdot \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} = -\frac{1}{Y} \cdot \frac{\partial^2 Y}{\partial y^2} = -\eta^2. \quad (7.5)$$

Из тождества (7.5) следуют два обыкновенных линейных дифференциальных уравнения:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + \eta^2 \cdot X = 0; \\ \frac{\partial^2 Y}{\partial y^2} - \eta^2 \cdot Y = 0, \end{cases} \quad (7.6)$$

решения которых общеизвестны [17]:

$$X = C_1 \cdot \cos \eta x + C_2 \cdot \sin \eta x; \quad (7.7)$$

$$Y = C_3 \cdot e^{\eta y} + C_4 \cdot e^{-\eta y}. \quad (7.8)$$

Неизвестные постоянные C_1, C_2, C_3, C_4 определяются из граничных условий. С учетом зависимостей (6.7) и (6.8) искомое решение $\theta(x, y)$ принимает вид:

$$\theta(x, y) = (C_1 \cdot \cos \eta x + C_2 \cdot \sin \eta x) \cdot (C_3 \cdot e^{\eta y} + C_4 \cdot e^{-\eta y}). \quad (7.9)$$

Если предположить, что функция $\theta(x, y)$ при условии $y \rightarrow \infty$ принимает значение $\theta(x, y) = 0$, то функция $Y = 0$. Тогда из зависимости (6.8) следует, что $C_3 = 0$ и зависимость (7.9) описывается:

$$\theta(x, y) = (C_I \cdot \cos \eta x + C_{II} \cdot \sin \eta x) \cdot e^{-\eta y}, \quad (7.10)$$

где $C_I = C_1 \cdot C_4$; $C_{II} = C_2 \cdot C_4$ – постоянные интегрирования.

В результате получено частное решение уравнения Лапласа.

Очевидно, сумма функций $\theta(x, y)$ и интеграл по параметру η также будут решениями дифференциального уравнения (7.2). В последнем случае справедливо:

$$\theta(x, y) = \int_0^{\infty} (C_I \cdot \cos \eta x + C_{II} \cdot \sin \eta x) \cdot e^{-\eta y} \cdot d\eta. \quad (7.11)$$

Постоянные интегрирования C_I и C_{II} определяются из граничного условия (7.3), которое с учетом зависимости (7.11) описывается:

$$\theta(x,0) = \int_0^{\infty} (C_I \cdot \cos \eta x + C_{II} \cdot \sin \eta x) \cdot d\eta = \varphi(x). \quad (7.12)$$

Разложение функции $\varphi(x)$ можно представить интегралом Фурье:

$$\begin{aligned} \varphi(x) = \int_0^{\infty} \left\{ \left[\frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\xi) \cdot \cos \eta \xi \cdot d\xi \right] \cdot \cos \eta x + \right. \\ \left. + \left[\frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\xi) \cdot \sin \eta \xi \cdot d\xi \right] \cdot \sin \eta x \right\} \cdot d\eta, \end{aligned} \quad (7.13)$$

где ξ – новая переменная.

После сравнения зависимостей (7.12) и (7.13) получено:

$$C_I = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\xi) \cdot \cos \eta \xi \cdot d\xi; \quad (7.14)$$

$$C_{II} = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\xi) \cdot \sin \eta \xi \cdot d\xi. \quad (7.15)$$

После подстановки постоянных интегрирования C_I и C_{II} в зависимость (7.11) имеем:

$$\theta(x,y) = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{\infty} e^{-\eta y} \cdot \left[\int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\xi) \cdot \cos \eta(\xi - x) \cdot d\xi \right] \cdot d\eta. \quad (7.16)$$

Поменяв местами интегралы, получено:

$$\theta(x,y) = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\xi) \cdot \left[\int_0^{\infty} e^{-\eta y} \cdot \cos \eta(\xi - x) \cdot d\eta \right] \cdot d\xi. \quad (7.17)$$

С учетом табличного интеграла

$$\int_0^{\infty} e^{-\omega \cdot S} \cdot \cos Sx \cdot dx = \frac{\omega^2}{\omega^2 + x^2}, \quad (7.18)$$

(где $\omega > 0$) решение (7.17) примет вид:

$$\theta(x,y) = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\xi) \cdot \left[\frac{y \cdot d\xi}{y^2 + (\xi - x)^2} \right]. \quad (7.19)$$

Для граничных условий (рис. 7.1):

$$\begin{cases} \theta(x,0) = \theta_0 \text{ при } -a < x < a, \\ \theta(x,0) = 0 \text{ при } |x| \geq a, \end{cases} \quad (7.20)$$

зависимость (7.19) выразится:

$$\theta(x, y) = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-a}^a \theta_0 \cdot \frac{y \cdot d\xi}{[y^2 + (\xi - x)^2]} = \frac{\theta_0}{\pi} \cdot \left[\operatorname{arctg} \frac{(a-x)}{y} + \operatorname{arctg} \frac{(a+x)}{y} \right], \quad (7.21)$$

где $x = \pm a$ – предельные значения координаты x , при которых функция $\theta(x, 0)$ принимает ненулевые значения.

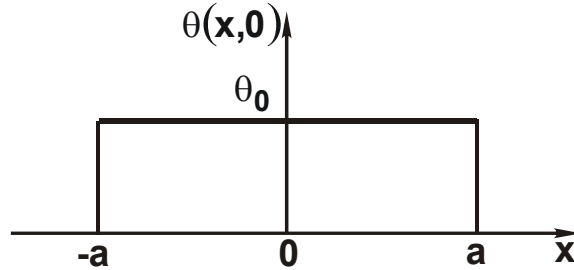


Рис. 7.1. Вид функции $\theta(x, 0)$

С учетом известного тригонометрического преобразования

$$\operatorname{arctg} \alpha_1 - \operatorname{arctg} \alpha_2 = \operatorname{arctg} \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)}{(1 + \alpha_1 \cdot \alpha_2)} \quad (7.22)$$

зависимость (7.21) опишется:

$$\theta(x, y) = \frac{\theta_0}{\pi} \cdot \operatorname{arctg} \left[\frac{2a \cdot y}{y^2 - (a^2 - x^2)} \right] \quad (7.23)$$

или

$$\operatorname{tg} \left[\frac{\theta(x, y)}{\theta_0} \cdot \pi \right] = \left[\frac{2a \cdot y}{y^2 - (a^2 - x^2)} \right]. \quad (7.24)$$

Обозначая

$$\operatorname{tg} \left[\frac{\theta(x, y)}{\theta_0} \cdot \pi \right] = C \quad (7.25)$$

и преобразуя зависимость (7.24), получено уравнение окружности:

$$x^2 + \left(y - \frac{a}{C} \right)^2 = a^2 \cdot \left(1 + \frac{1}{C^2} \right) \quad \text{или} \quad (7.26)$$

$$x^2 + (y - b)^2 = R^2, \quad (7.27)$$

где $b = a/C$;

$R = a \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{C^2}}$ – радиус окружности.

В каждой точке окружности температура $\theta(x,y)$ постоянна. Окружность определяет положение изотермы (рис. 7.2).

При $y = 0$ значение x равно:

$$x = \pm\sqrt{R^2 - b^2} = \pm\sqrt{a^2 \cdot \left(1 + \frac{1}{C^2}\right) - \frac{a^2}{C^2}} = \pm a. \quad (7.28)$$

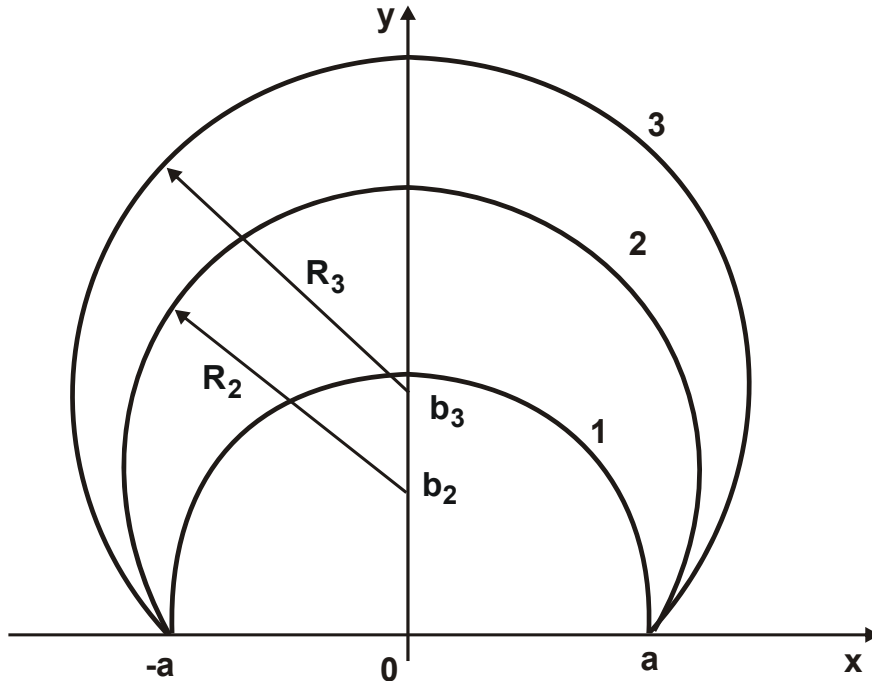


Рис. 7.2. Температурное поле в изотермах ($C_1 > C_2 > C_3$; $b_1 = 0$)

Следовательно, все окружности проходят через точки $x = \pm a$. С уменьшением параметра C радиусы окружностей $R = a \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{C^2}}$ увеличиваются, а их центры смещаются в область больших значений $b = a/C$. Уменьшение параметра C , согласно зависимости (7.25), предполагает уменьшение температуры $\theta(x,y)$ при заданном значении θ_0 . Следовательно, чем больше радиус окружности R , тем меньше температура $\theta(x,y)$. Наибольшая температура достигается на границе полуплоскости и равна θ_0 . Параметр b всегда положительный. При условии $C \rightarrow \infty$ он стремится к нулю ($b \rightarrow 0$), т.е. наименьший радиус $R \rightarrow a$. Большему значению a соответствуют большие значения b и R .

Величина $b + R = \frac{a}{C} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + C^2}\right)$ определяет максимальное расстояние от точки O до точки, в которой температура принимает задан-

ное значение $\theta(0, y)$, соответствующее условию $C = \text{const}$. Уменьшить величину $(b + R)$ при условии $C = \text{const}$ (при заданных значениях θ и θ_0) можно лишь уменьшением величины a .

Геометрический смысл решения (7.21) состоит в следующем. Исходя из расчетной схемы, приведенной на рис. 7.3, справедливы тригонометрические отношения:

$$\frac{x - a}{y} = \text{tg}\beta_2; \quad (7.29)$$

$$\frac{x - (-a)}{y} = \frac{x + a}{y} = \text{tg}\beta_1, \quad (7.30)$$

где β_1, β_2 – углы.

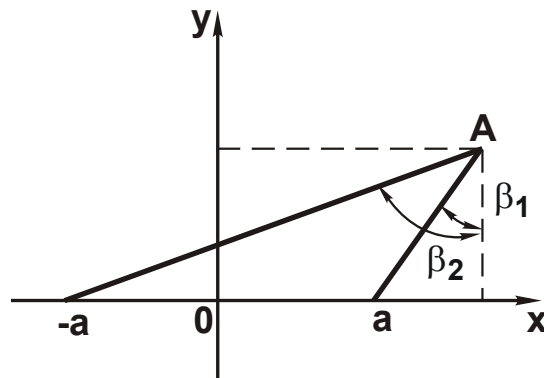


Рис. 7.3. Положение углов β_1 и β_2

Подставляя эти отношения в зависимость (7.21), имеем:

$$\theta(x, y) = \frac{\theta_0}{\pi} \cdot [\text{arctg}(\text{tg}\beta_2) - \text{arctg}(\text{tg}\beta_1)] = \frac{\theta_0}{\pi} \cdot (\beta_2 - \beta_1). \quad (7.31)$$

Как видно, функция $\theta(x, y)$ вполне однозначно определяется разностью углов $(\beta_2 - \beta_1)$. Чем больше $(\beta_2 - \beta_1)$, тем больше $\theta(x, y)$. Разность углов $(\beta_2 - \beta_1)$ может изменяться в пределах $0 < (\beta_2 - \beta_1) < \pi$. Поэтому при $(\beta_2 - \beta_1) \rightarrow 0$ справедливо условие $\theta(x, y) \rightarrow 0$, а при $(\beta_2 - \beta_1) \rightarrow \pi$ (на границе полуплоскости) – условие $\theta(x, y) \rightarrow \theta_0$.

Из планиметрии известно, что все вписанные в окружность углы, опирающиеся на данную дугу, равны между собой и составляют половину центрального угла φ , опирающегося на ту же дугу (рис. 7.4). Следовательно, справедливы отношения $\varphi = 2(\beta_2 - \beta_1)$ и $a/R = \sin(\beta_2 - \beta_1)$. Принимая в первом приближении условие $\sin(\beta_2 - \beta_1) \approx (\beta_2 - \beta_1)$ и подставляя его в зависимость (7.31), получено:

$$\theta(x,y) = \frac{\theta_0}{\pi} \cdot \frac{a}{R}, \quad (7.32)$$

где R – радиус окружности.

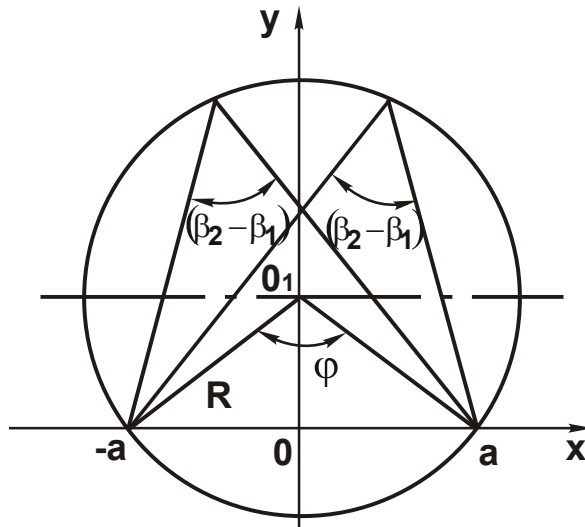


Рис. 7.4. Положение угла $(\beta_2 - \beta_1)$

При заданных значениях θ_0 и a температура $\theta(x,y)$ зависит лишь от радиуса окружности R : чем больше радиус R , тем меньше $\theta(x,y)$.

При условии $R \rightarrow \infty$ температура $\theta(x,y) \rightarrow 0$, а при условии $R = a$ температура $\theta(x,y) = \frac{\theta_0}{\pi} < \theta_0$.

Заслуживает внимания анализ подинтегральной функции в зависимости (7.19). Исходя из расчетной схемы, приведенной на рис. 7.5, справедливо условие $[y^2 + (\xi - x)^2] = d_1^2$, где d_1 – расстояние от точки А до точки В. С учетом соотношений $y/d_1 = \cos \gamma$ и $d_1/\cos \gamma = d$ (где d – расстояние от точки А до точки С), подинтегральная функция в зависимости (7.19) равна $\varphi(\xi) \cdot \frac{1}{d}$.

Параметр d зависит от угла γ : чем он больше по абсолютной величине, тем больше d . При условии $|\gamma| \rightarrow \pi/2$ параметр $d \rightarrow \infty$, а подинтегральная функция стремится к нулю.

При изменении угла γ в ограниченных пределах, соответствующих изменению координаты x в пределах $-a < x < a$, подинтегральная функция принимает ограниченные значения.

С геометрической точки зрения параметр d соответствует диа-

метру окружности, проведенной через три точки A, B и C. По условию построения, окружность должна касаться прямой $y = \text{const}$ в точке A.

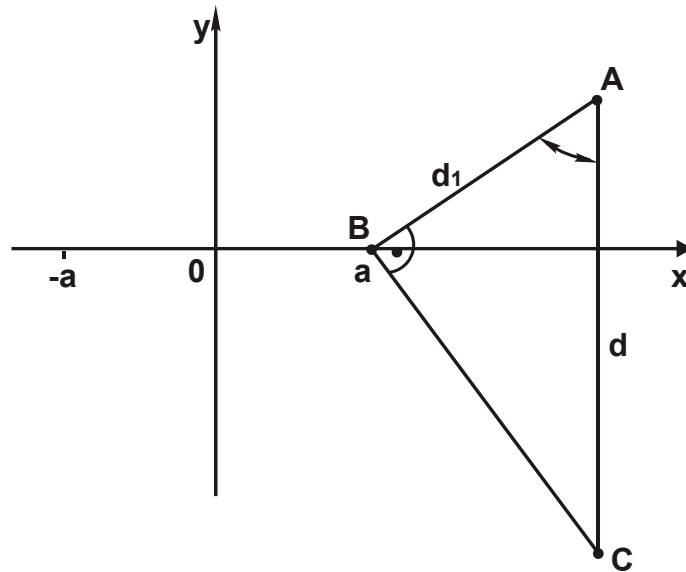


Рис. 7.5. Расчетная схема параметра d_1

Пределы изменения диаметра окружности d дают наглядное геометрическое представление об изменении подинтегральной функции и собственно интеграла (7.19).

7.2. Изменение плотности теплового потока

С учетом решения (7.23) плотность теплового потока $q_y(x, y) = -\lambda \cdot \frac{\partial \theta}{\partial y}$ выразится:

$$q_y(x, y) = -\frac{2a \cdot \lambda \cdot \theta_0}{\pi} \cdot \frac{(-y^2 - a^2 + x^2)}{(y^2 - a^2 + x^2)^2 + 4a^2 \cdot y^2}. \quad (7.33)$$

Для анализа зависимости (7.33) следует упростить ее, используя новую переменную $z^2 = x^2 - a^2$ при условии $|x| \geq a$, тогда

$$q_y(x, y) = \frac{2a \cdot \lambda \cdot \theta_0}{\pi} \cdot \frac{(y^2 - z^2)}{(y^2 + z^2)^2 + 4a^2 \cdot y^2}. \quad (7.34)$$

Также следует перейти к полярной системе координат: $y = r \cdot \sin \alpha$, $z = r \cdot \cos \alpha$, тогда

$$q(r, \alpha) = \frac{2a \cdot \lambda \cdot \theta_0}{\pi} \cdot \frac{-\cos 2\alpha}{(r^2 + 4a^2 \cdot \sin^2 \alpha)}. \quad (7.35)$$

Обозначая величину $C = \frac{\pi \cdot q(r, \alpha)}{2a \cdot \lambda \cdot \theta_0}$, получено:

$$r = \sqrt{-\frac{1}{C} \cdot \cos 2\alpha - 4a^2 \cdot \sin^2 \alpha}. \quad (7.36)$$

При значении $z = 0$ координата $x = \pm a$.

Следовательно, с учетом условия $|x| \geq a$ зависимость (7.36) справедлива для значений угла $0 < \alpha < 90^\circ$ ($x \geq a$).

В пределах изменения угла $0 < \alpha < 45^\circ$ функция $\cos 2\alpha$ положительна, подкоренное выражение отрицательно, и решение возможно при условии $C < 0$. Это указывает на то, что при значениях угла $0 < \alpha < 45^\circ$ плотность теплового потока отрицательная величина, и происходит отвод тепла из полуплоскости, поскольку произведение $2a \cdot \lambda \cdot \theta_0$ – положительная величина.

При значениях угла $45^\circ < \alpha < 90^\circ$ функция $\cos 2\alpha < 0$, тогда $1/C > 0$, $q > 0$ и происходит подвод тепла в полуплоскость.

В общем виде зависимость (7.36) выражается:

$$R = \sqrt{\frac{1}{C} \cdot \cos 2\alpha - 4a^2 \cdot \sin^2 \alpha}. \quad (7.37)$$

При угле $\alpha > 0^\circ$ радиус $r = \sqrt{\frac{1}{C}} = \sqrt{\frac{2a \cdot \lambda \cdot \theta_0}{\pi \cdot q(r, \alpha)}}$. Большшему значению $q(r, \alpha)$ соответствует меньшее значение радиуса r . При условии $q(r, \alpha) \rightarrow \infty$ радиус $r \rightarrow 0$, а при условии $q(r, \alpha) \rightarrow 0$ радиус $r \rightarrow \infty$.

С увеличением угла α в пределах $0 < \alpha < 45^\circ$ первое слагаемое в зависимости (7.37) уменьшается до нуля, а второе увеличивается.

При определенном значении угла $\alpha = \alpha_*$ радиус $r = 0$. Следовательно, радиус r с увеличением угла α уменьшается от значения $r = \sqrt{1/C}$ при ($\alpha = 0^\circ$) до значения $r = 0$ (при условии $\alpha = \alpha_*$). Угол α_* определяется из условия:

$$\operatorname{tg}^2 \alpha_* = \frac{1}{(1 + 4a^2 \cdot C)} = \frac{1}{(1 + \frac{2a \cdot \pi \cdot q}{\lambda \cdot \theta_0})}. \quad (7.38)$$

Как видно, чем больше плотность теплового потока q , тем меньше угол α_* . При условии $q \rightarrow \infty$ угол $\alpha_* \rightarrow \infty$, а при условии $q \rightarrow 0$ угол $\alpha_* \rightarrow 45^\circ$. Характер изменения функции $r = r(\alpha)$ для значений угла $0 < \alpha < 45^\circ$ показан на рис 7.6,а.

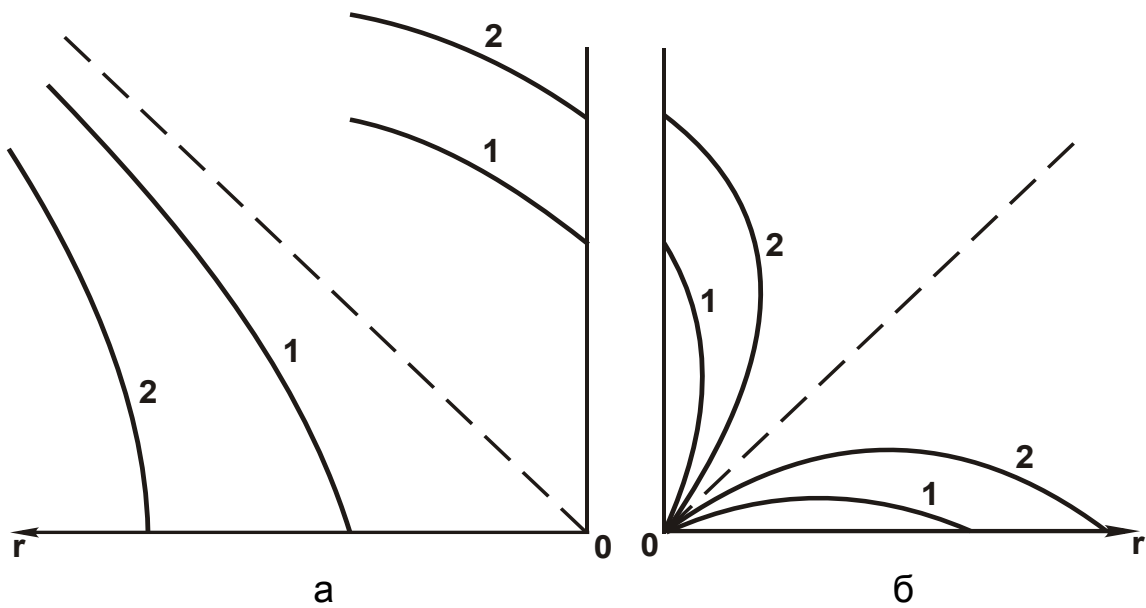


Рис. 7.6. Положения линий $q(r, \alpha) = \text{const}$, $q_1(r, \alpha) > q_2(r, \alpha)$

С увеличением угла α в пределах $45^\circ < \alpha < 90^\circ$ функция $|\cos 2\alpha|$, входящая в зависимость (7.37), увеличивается от нуля до единицы, а функция $\sin \alpha$ увеличивается от значения $\sqrt{2}/2$ до единицы. Очевидно, при угле $\alpha = 45^\circ$ решение не существует, поскольку подкоренное выражение отрицательно.

При определенном значении угла $\alpha_* > 45^\circ$ радиус $r = 0$. При дальнейшем увеличении угла $\alpha > 45^\circ$ радиус r увеличивается за счет более интенсивного увеличения первого слагаемого.

При угле $\alpha = 90^\circ$ радиус $r = \sqrt{\frac{1}{C} - 4a^2}$, т.е. $\frac{1}{C} > 4a^2$ или $q < \frac{\lambda \cdot \theta_0}{2 \cdot \pi \cdot a}$.

Следовательно, плотность теплового потока q при изменении угла α в пределах $45^\circ < \alpha < 90^\circ$ ограничена. Графически функция $r(\alpha)$ показана на рис. 7.6,а.

Для анализа зависимости (7.33) в пределах $-a < x < a$ необходимо ввести новую переменную $z^2 = a^2 - x^2$. Значение z^2 для данных значений x всегда положительно. Тогда зависимость (7.33) примет вид:

$$q_y(x, y) = -\frac{2a \cdot \lambda \cdot \theta_0}{\pi} \cdot \frac{(-y^2 - z^2)}{(y^2 - z^2)^2 + 4a^2 \cdot y^2}. \quad (7.39)$$

Следует также перейти к полярной системе координат: $y = r \cdot \sin \alpha$, $z = r \cdot \cos \alpha$, тогда

$$q(r, \alpha) = \frac{2a \cdot \alpha \cdot \theta_0}{\pi} \cdot \frac{1}{(r^2 \cdot \cos^2 2\alpha + 4a^2 \cdot \sin^2 \alpha)}. \quad (7.40)$$

С учетом параметра $C = \frac{\pi \cdot q(r, \alpha)}{2 \cdot a \cdot \lambda \cdot \theta_0}$ получено:

$$r = \sqrt{\frac{1}{\cos^2 2\alpha} \cdot \left(\frac{1}{C} - 4a^2 \cdot \sin^2 \alpha \right)}. \quad (7.41)$$

Подкоренное выражение положительно при условии $C > 0$. Следовательно, при изменении угла α в пределах $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ плотность теплового потока $q(r, \alpha) > 0$ и происходит подвод тепла в полуплоскость. С увеличением угла α в пределах $90^\circ < \alpha < 135^\circ$ функция $|\cos 2\alpha|$ уменьшается от единицы до нуля, а функция $\sin \alpha$ – уменьшается от единицы до значения $\sqrt{2}/2$.

При угле $\alpha = 90^\circ$ радиус $r = \sqrt{\frac{1}{C} - 4 \cdot a^2}$, т.е. значения радиуса r при угле $\alpha = 90^\circ$, полученные по зависимостям (7.37) и (7.41), одинаковы. Очевидно, с увеличением угла α в пределах $90^\circ < \alpha < 135^\circ$ функция $\sin \alpha$ изменяется мало, и радиус r зависит в основном от функции $\frac{1}{\cos 2\alpha}$, которая увеличивается от единицы до бесконечности (рис. 7.6,б).

С увеличением угла α в пределах $135^\circ < \alpha < 180^\circ$ функция $|\cos 2\alpha|$ увеличивается от нуля до единицы, а функция $\sin \alpha$ – уменьшается от значения $\sqrt{2}/2$ до нуля.

Радиус r уменьшается от бесконечности до значения $r = 1/\sqrt{C}$ (при $\alpha = 180^\circ$), рис. 7.6,б. Учитывая симметричность решения относительно оси ou , общий характер положения линии $C = \text{const}$ при изменении угла α в пределах $0 < \alpha < 180^\circ$ показан на рис. 7.7.

Вместо значений $r = 1/\sqrt{C}$ при значениях углов $\alpha = 0^\circ$ и $\alpha = 180^\circ$ следует рассматривать значения:

$$x = \sqrt{z^2 + a^2} = \sqrt{\cos 2\alpha \left(\frac{1}{C} \cdot \cos^2 \alpha + a^2 \cdot \cos 2\alpha \right)} \quad (7.42)$$

при угле $\alpha = 0^\circ$ или $|x| \geq a$;

$$x = \sqrt{a^2 - z^2} = \sqrt{\frac{1}{\cos^2 2\alpha} \cdot \left(a^2 - \frac{1}{C} \cdot \cos^2 \alpha \right)} \quad (7.43)$$

при угле $\alpha = 180^\circ$ или $|x| < a$.

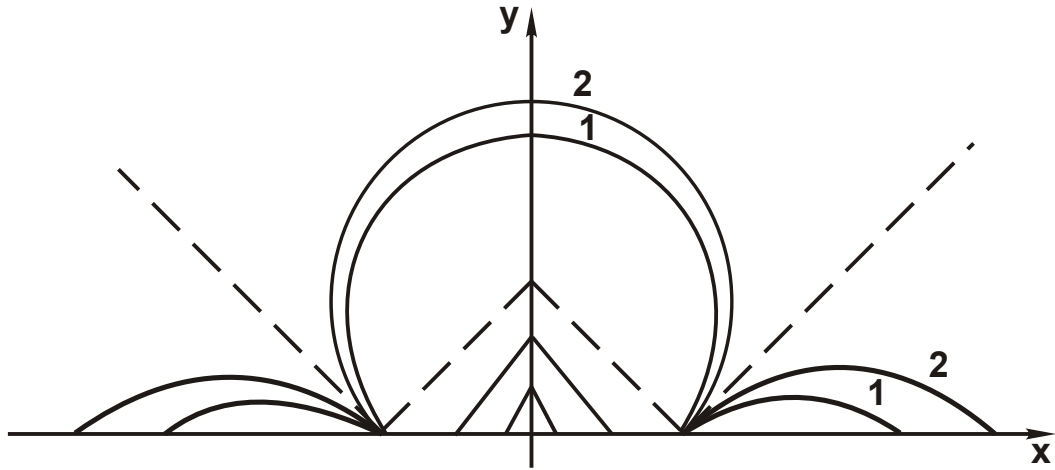


Рис. 7.7. Общий вид линий $q(r, \alpha) = \text{const}$, $q_1(r, \alpha) > q_2(r, \alpha)$

В первом случае $x = \sqrt{\frac{1}{C} + a^2}$, а во втором случае $x = \sqrt{a^2 - \frac{1}{C}}$.

Следовательно, при условии $|x| \geq a$ значения x равны $\pm \sqrt{\frac{1}{C} + a^2}$, а при условии $|x| < a$ $\sqrt{a^2 - \frac{1}{C}}$. Отсюда вытекает, что при значении $x = 0$

справедливо соотношение: $C = \frac{1}{a^2}$, т.е. $q = -\frac{2 \cdot \lambda \cdot \theta_0}{\pi}$.

При значениях $x = \pm a$ справедливо: $1/C = 0$ или $q \rightarrow \infty$.

При условии $x \rightarrow \pm \infty$ справедливо: $C \rightarrow \infty$ или $q \rightarrow 0$. Аналогичное решение вытекает из зависимости (7.33) при координате $y = 0$:

$$q_y(x, 0) = -\frac{2 \cdot \lambda \cdot \theta_0 \cdot a}{\pi \cdot (x^2 - a^2)}. \quad (7.44)$$

График изменения функции $q_y(x, 0)$ показан на рис. 7.8.

При значениях $x = \pm a$ функция $q_y(x, 0) \rightarrow \infty$. Минимум функции $q_y(x, 0)$ достигается при значении $x = 0$. Следовательно, наибольший подвод тепла в тело осуществляется при значениях $x = \pm a$, а наименьший – при значении $x = 0$.

При условии $|x| \geq a$ плотность теплового потока $q_y(x, 0)$ отрицательная величина, и происходит отвод тепла из тела. Наибольший отвод происходит при значениях $x = \pm a$.

Важно проанализировать изменение плотности теплового потока в направлении оси ox :

$$q_y(x,0) = -\lambda \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{4 \cdot a \cdot \lambda \cdot \theta_0}{\pi} \cdot \frac{x \cdot y}{[y^2 - (a^2 - x^2)]^2 + 4a^2 \cdot y^2}. \quad (7.45)$$

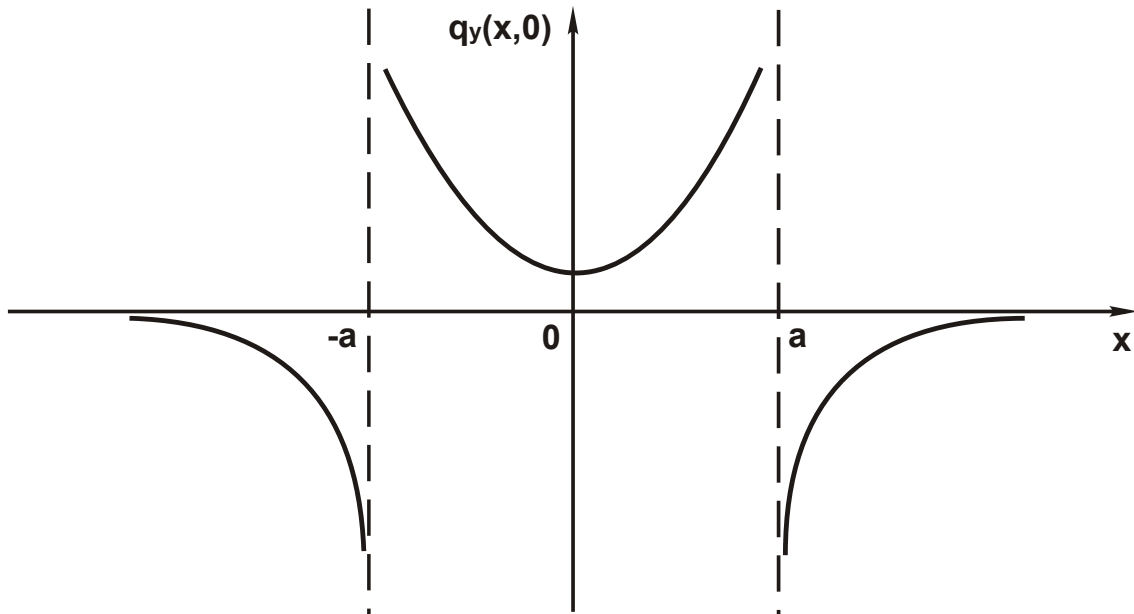


Рис. 7.8. Изменение функции $q_y(x,0)$

Для этого следует перейти к полярной системе координат: $y = r \cdot \sin \alpha$, $x = r \cdot \cos \alpha$. Тогда зависимость (7.45) примет вид:

$$q(r, \alpha) = \frac{4 \cdot a \cdot \lambda \cdot \theta_0}{\pi} \cdot \frac{0,5 \cdot r^2 \cdot \sin 2\alpha}{(r^2 - a^2)^2 + 4a^2 \cdot r^2 \cdot \sin^2 \alpha}. \quad (7.46)$$

С учетом параметра $C = \frac{\pi \cdot q(r, \alpha)}{4 \cdot a \cdot \lambda \cdot \theta_0}$ получено уравнение:

$$r^4 + r^2 \cdot (4a^2 \cdot \sin^2 \alpha - 2a^2 - \frac{1}{2C} \cdot \sin 2\alpha) + a^4 = 0 \quad \text{или} \quad (7.47)$$

$$\left[(r^2 + a^2) - r \cdot \sqrt{2a^2 - D} \right] \cdot \left[(r^2 + a^2) + r \cdot \sqrt{2a^2 - D} \right] = 0, \quad (7.48)$$

где $D = 4a^2 \cdot \sin^2 \alpha - 2a^2 - \frac{1}{2C} \cdot \sin 2\alpha$.

Решение уравнения:

$$r = \sqrt{a^2 + z} + \sqrt{z}, \quad (7.49)$$

где $z = -a^2 \cdot \sin^2 \alpha + \frac{1}{8 \cdot C} \cdot \sin 2\alpha$.

График изменения функции z при изменении угла α в пределах $0 < \alpha < 90^\circ$ показан на рис. 7.9. Значения угла α , соответствующие максимальным значениям z , определяются из условия экстремума функции g .

Тогда

$$\operatorname{tg}2\alpha = \frac{1}{4 \cdot a^2 \cdot C}. \quad (7.50)$$

При условии $C \rightarrow 0$ (или $q \rightarrow 0$) угол $\alpha = 45^\circ$, а при условии $C \rightarrow \infty$ (или $q \rightarrow \infty$) угол $\alpha = 0$.

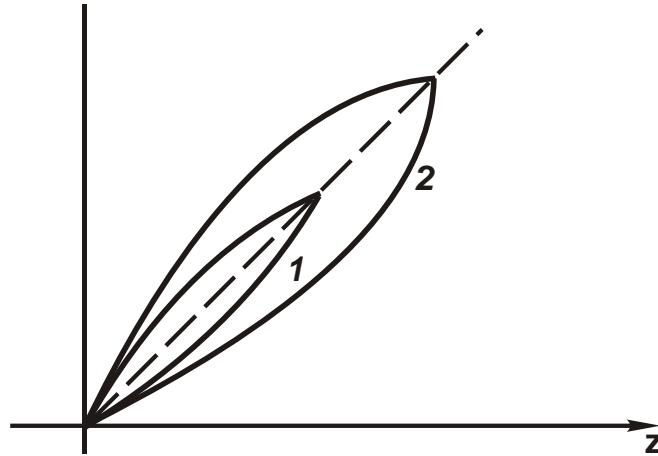


Рис. 7.9. Изменение функции z при $0 < \alpha < 90^\circ$, $C_1 > C_2$

Параметр z может принимать значения $z \geq 0$. Условие $z = 0$ выполняется при значении $\operatorname{tg}\alpha = \frac{1}{4 \cdot a^2 \cdot C}$.

Угол α изменяется в пределах $0 < \alpha < 90^\circ$. Значение $\alpha \rightarrow 0^\circ$ достигается при условии $C \rightarrow \infty$ ($q \rightarrow \infty$), а значение $\alpha \rightarrow 90^\circ$ – при условии $C \rightarrow 0$ ($q \rightarrow 0$).

При условии $r < a$ решение отсутствует.

Учитывая симметричность решения относительно оси oy , на рис. 7.10 показан общий вид зависимости $r(\alpha)$ в координатах x, y .

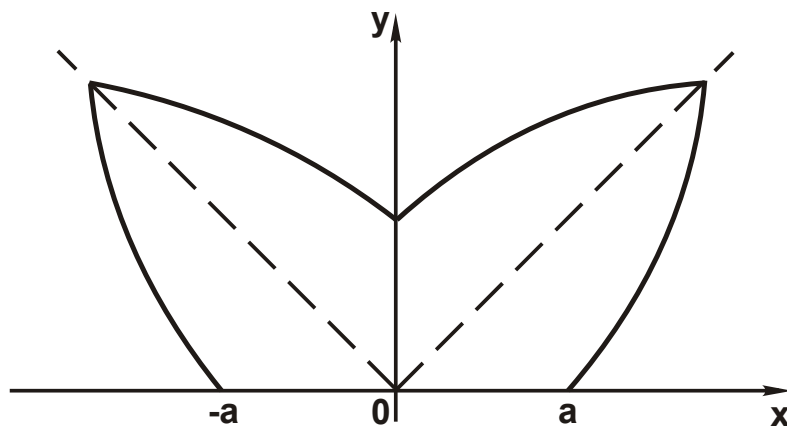


Рис. 7.10. Общий вид линии $q_x(x, y) = \text{const}$

7.3. Распределение температуры в бесконечной полосе

Получим решение дифференциального уравнения (7.2) для бесконечной полосы $-\infty < x < \infty$; $0 < y < y_1$, удовлетворяющее граничным условиям:

$$\begin{cases} \theta(x, y_1) = \varphi(x), \text{ при } -\infty < x < \infty \\ \theta(x, 0) = 0. \end{cases} \quad (7.51)$$

Решение следует искать в виде, описанном зависимостью (7.9). Подчиняя зависимость (7.9) второму граничному условию (7.51), имеем $C_4 = -C_3$. Тогда решение в виде интеграла функции $\theta(x, y)$ по параметру η запишется:

$$\theta(x, y) = \int_0^{\infty} (C_I \cdot \cos \eta x + C_{II} \cdot \sin \eta x) \cdot (e^{\eta y} - e^{-\eta y}) \cdot d\eta, \quad (7.52)$$

где $C_I = C_1 \cdot C_3$; $C_{II} = C_2 \cdot C_3$ – постоянные интегрирования.

Зависимость (7.52) следует подчинить первому граничному условию (7.51):

$$\theta(x, y_1) = \int_0^{\infty} (C_I \cdot \cos \eta x + C_{II} \cdot \sin \eta x) \cdot (e^{\eta y_1} - e^{-\eta y_1}) \cdot d\eta = \varphi(x). \quad (7.53)$$

По аналогии с решением, описываемым зависимостями (7.12) – (7.15), постоянные интегрирования C_I и C_{II} определяются:

$$C_I = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{(e^{\eta y_1} - e^{-\eta y_1})} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\xi) \cdot \cos \eta \xi \cdot d\xi; \quad (7.54)$$

$$C_{II} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{(e^{\eta y_1} - e^{-\eta y_1})} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\xi) \cdot \sin \eta \xi \cdot d\xi. \quad (7.55)$$

Подставляя постоянные интегрирования C_I и C_{II} в зависимость (7.52), получено:

$$\begin{aligned} \theta(x, y) &= \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{\infty} \frac{(e^{\eta y} - e^{-\eta y})}{(e^{\eta y_1} - e^{-\eta y_1})} \cdot \left[\int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\xi) \cdot \cos \eta(\xi - x) d\xi \right] \cdot d\eta = \\ &= \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\xi) \cdot \left[\int_0^{\infty} \frac{(e^{\eta y} - e^{-\eta y})}{(e^{\eta y_1} - e^{-\eta y_1})} \cdot \cos \eta(\xi - x) \cdot d\eta \right] \cdot d\xi. \end{aligned} \quad (7.56)$$

С учетом преобразований

$$\frac{(e^{\eta y} - e^{-\eta y})}{(e^{\eta y_1} - e^{-\eta y_1})} = e^{-\eta(y_1 - y)} = \frac{(1 - e^{-2\eta y})}{(1 - e^{-2\eta y_1})}; \quad (7.57)$$

$$e^{-2\eta y} = 1 - \frac{2 \cdot \eta \cdot y}{1!} + \frac{(2 \cdot \eta \cdot y)^2}{2!} - \dots, \quad (7.58)$$

ограничиваясь в разложении функции $e^{-2\eta y}$ в ряд первыми двумя слагаемыми, получено:

$$\theta(x, y) = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{y}{y_1} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\xi) \cdot \left[\int_0^a e^{-\eta(y_1 - y)} \cdot \cos \eta(\xi - x) d\eta \right] \cdot d\xi. \quad (7.59)$$

Принимая граничные условия (рис. 7.11):

$$\begin{cases} \varphi(\xi) = \theta_0 & \text{при } -a < \xi < a, \\ \varphi(\xi) = 0 & \text{при } |\xi| \geq a, \end{cases} \quad (7.60)$$

имеем

$$\theta(x, y) = \frac{\theta_0}{\pi} \cdot \frac{y}{y_1} \cdot \left\{ \operatorname{arctg} \left[\frac{2a \cdot (y_1 - y)}{(y_1 - y)^2 - (a^2 - x^2)} \right] \right\} \quad (7.61)$$

или

$$(y_1 - y)^2 - (a^2 - x^2) = \frac{2a \cdot (y_1 - y)}{C}, \quad (7.62)$$

где $C = \operatorname{tg} \left(\pi \cdot \frac{\theta}{\theta_0} \cdot \frac{y_1}{y} \right)$.

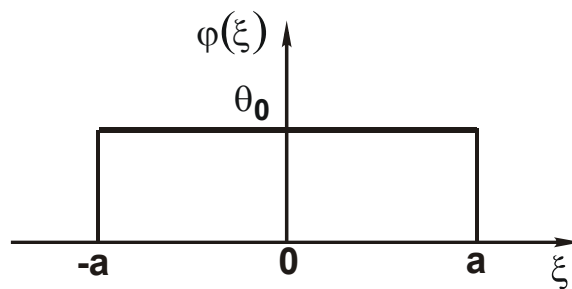


Рис. 7.11. Вид функции $\varphi(\xi)$

Обозначая $(y_1 - y) = \Delta y$ и преобразуя зависимость (7.62) к виду

$$\left(\Delta y - \frac{a}{C} \right)^2 + x^2 = a^2 \cdot \left(1 + \frac{1}{C^2} \right), \quad (7.63)$$

получено уравнение окружности радиусом $R = a \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{C^2}}$, центр кото-

рой смещен по оси ou относительно точки $y = y_1$ на величину $b = a/C$.

Величины b и R переменны в силу переменности параметра C . При уменьшении y от y_1 до нуля параметр C неограниченно увеличивается и приводит к уменьшению параметров b и R ($b \rightarrow 0$, $R \rightarrow a$).

Для анализа данного решения, исходя из расчетной схемы, приведенной на рис. 7.12, получены следующие отношения:

$$\frac{(x - a)}{(y_1 - y)} = \operatorname{tg}\beta_1; \quad (7.64)$$

$$\frac{(x + a)}{(y_1 - y)} = \operatorname{tg}\beta_2. \quad (7.65)$$

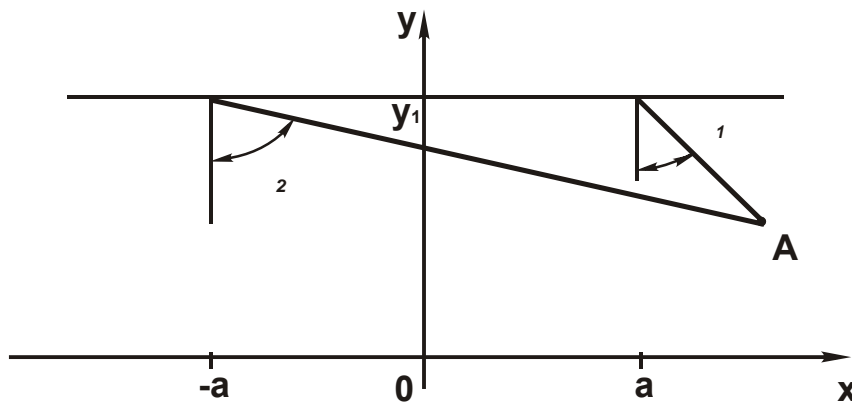


Рис. 7.12. Положение углов β_1 и β_2

Подставляя (7.64) и (7.65) в зависимость (7.61), получено:

$$\theta(x, y) = \frac{\theta_0}{\pi} \cdot \frac{y}{y_1} \cdot [\operatorname{arctg}(\operatorname{tg}\beta_2) - \operatorname{arctg}(\operatorname{tg}\beta_1)] = \frac{\theta_0}{\pi} \cdot \frac{y}{y_1} \cdot (\beta_1 - \beta_2). \quad (7.66)$$

Положение изотерм $\theta(x, y) = \operatorname{const}$ зависит от разности углов $(\beta_1 - \beta_2)$ и соотношения y/y_1 . Постоянство величины $(\beta_1 - \beta_2)$ соответствует постоянству радиуса окружности R . С уменьшением координаты y от значения y_1 до нуля соотношение y/y_1 уменьшается от 1 до 0. Следовательно, для обеспечения условия $\theta(x, y) = \operatorname{const}$ величина $(\beta_1 - \beta_2)$ должна увеличиваться, что приводит к уменьшению радиуса окружности R и деформированию окружности в кривую, показанную на рис. 7.13 сплошной линией.

Таким образом, переход от полуплоскости (где координата y неограниченна) к полосе ограниченной ширины, равной y_1 , приводит к "сжатию" окружностей (которые определяют положение изотерм) по координате y .

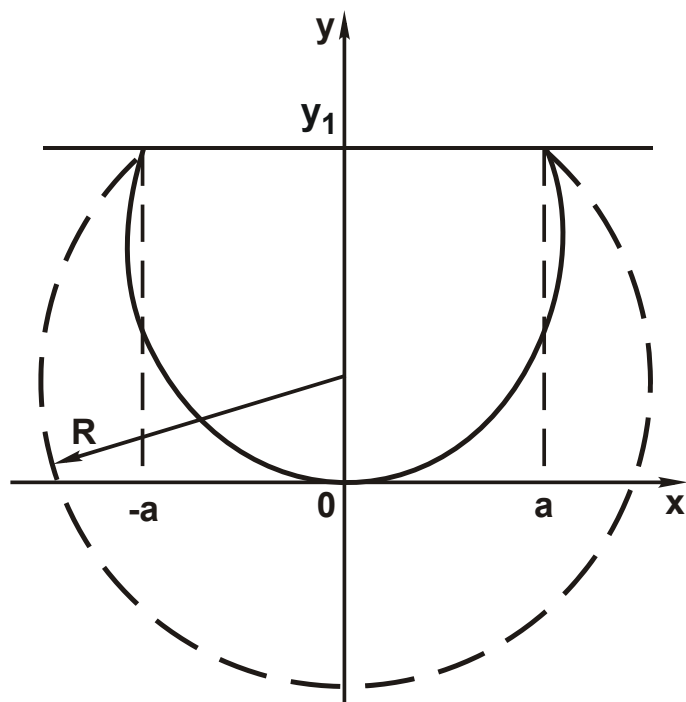


Рис. 7.13. Положение изотермы

Приведенные кривые отличны от формы эллипса, поскольку степень деформирования исходной окружности неравномерна по координате y .

Плотность теплового потока $q_y(x, y) = -\lambda \cdot \frac{\partial \theta}{\partial y}$ определяется зависимостью:

$$q_y(x, y) = -\frac{\lambda \cdot \theta_0}{\pi \cdot y_1} \cdot \left\{ \operatorname{arctg} \frac{2a \cdot (y_1 - y)}{[(y_1 - y)^2 - (a^2 - x^2)]} + y \times \left[\frac{(a - x)}{(y_1 - y)^2 + (a - x)^2} + \frac{(a + x)}{(y_1 - y)^2 + (a + x)^2} \right] \right\}. \quad (7.67)$$

При значении $y = y_1$:

$$q_y(x, y_1) = \frac{2a \cdot \lambda \cdot \theta_0}{\pi \cdot (x^2 - a^2)}. \quad (7.68)$$

В положительном направлении оси oy при условии $|x| < a$ функция $q_y(x, y_1) < 0$ и имеет место подвод тепла, а при условии $|x| > a$ – отвод тепла. В отрицательном направлении оси oy , наоборот. Следовательно, характер изменения функции $q_y(x, y_1)$ такой же, как и для полуплоскости, определяемой зависимостью (7.44).

При значении $y = 0$ справедлива зависимость:

$$q_y(x, y) = -\frac{\lambda \cdot \theta_0}{\pi \cdot y_1} \cdot \operatorname{arctg} \frac{2a \cdot y_1}{[x^2 + (y_1^2 - a^2)]}. \quad (7.69)$$

В этом случае характер изменения функции $q_y(x, y)$ подчиняется более сложным закономерностям, чем в случае $y = y_1$.

7.4. Распределение температуры в клине

Требуется установить решение уравнения Лапласа для клина в области $0 < x < \infty$, $0 < y < \infty$, удовлетворяющее граничным условиям:

$$\begin{cases} \theta(x, 0) = \varphi(x) \text{ при } 0 < x < a, \\ \theta(x, 0) = 0 \text{ при } x \geq a, \\ \theta(0, y) = 0. \end{cases} \quad (7.70)$$

Решение следует искать в виде, описанном зависимостью (7.10), в котором учтено условие $\theta(x, y \rightarrow \infty) = 0$. Подчиняя зависимость (7.10) граничному условию $\theta(0, y) = 0$, имеем $C_I = 0$. Тогда

$$\theta(x, y) = \int_0^{\infty} C_{II} \cdot \sin \eta x \cdot e^{-\eta y} \cdot d\eta. \quad (7.71)$$

Подчиняя зависимость (7.71) первому граничному условию (7.70), получено:

$$\theta(x, 0) = \int_0^{\infty} C_{II} \cdot \sin \eta x \cdot d\eta = \varphi(x). \quad (7.72)$$

Постоянная интегрирования C_{II} определяется из (7.15):

$$C_{II} = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\xi) \cdot \sin \eta \xi \cdot d\xi. \quad (7.73)$$

Подставляя постоянную интегрирования C_{II} в зависимость (7.71) с учетом $\varphi(\xi) = \theta_0$, имеем:

$$\begin{aligned} \theta(x, 0) &= \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{\infty} e^{-\eta y} \cdot \sin \eta x \cdot \left[\int_0^a \varphi(\xi) \cdot \sin \eta \xi \cdot d\xi \right] \cdot d\eta = \\ &= -\frac{\theta_0}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^a \left\{ e^{-\eta y} \cdot [\cos \eta(\xi + x) - \cos \eta(\xi - x)] \cdot d\eta \right\} \cdot d\xi = \\ &= -\frac{\theta_0}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\operatorname{arctg} \frac{(a+x)}{y} - \operatorname{arctg} \frac{x}{y} \right] + \frac{\theta_0}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\operatorname{arctg} \frac{(a+x)}{y} - \operatorname{arctg} \frac{-x}{y} \right]. \end{aligned} \quad (7.74)$$

С учетом зависимости (7.22), получено:

$$\theta(x,0) = \frac{\theta_0}{2 \cdot \pi} \cdot \operatorname{arctg} \frac{2 \cdot a^2 \cdot x \cdot y}{[(y^2 + x^2)^2 - x^2 \cdot a^2 + y^2 \cdot a^2]} \quad \text{или} \quad (7.75)$$

$$\operatorname{tg} \left[2\pi \cdot \frac{\theta(x,y)}{\theta_0} \right] = \frac{2 \cdot a^2 \cdot x \cdot y}{[(y^2 + x^2)^2 - x^2 \cdot a^2 + y^2 \cdot a^2]} = C. \quad (7.76)$$

С учетом перехода к полярной системе координат: $y = r \cdot \sin \alpha$, $x = r \cdot \cos \alpha$ уравнение (7.76) принимает вид:

$$r = a \cdot \sqrt{\cos 2\alpha + \frac{1}{C} \cdot \sin 2\alpha}. \quad (7.77)$$

Положение изотермы ($C = \text{const}$) показано на рис. 7.14.

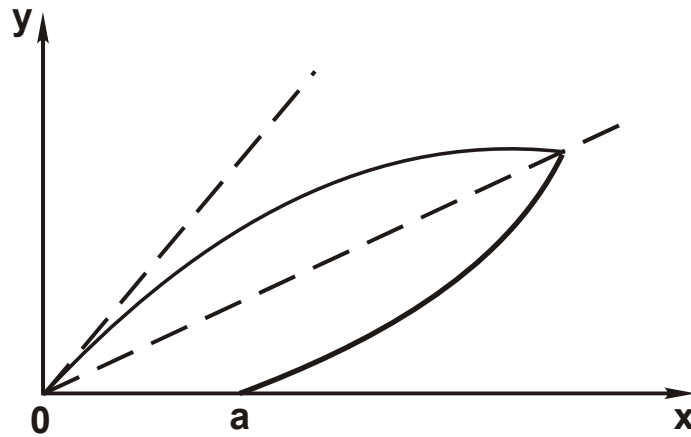


Рис. 7.14. Положение изотермы при $C = 1$

Значение угла α , определяющее максимальное значение радиуса r при $C = \text{const}$, получено из условия экстремума радиуса r :

$$r'_a = a \cdot \left(\cos 2\alpha + \frac{1}{C} \cdot \sin 2\alpha \right)^{-0,5} \cdot \left(-\sin 2\alpha + \frac{1}{C} \cdot \cos 2\alpha \right) = 0. \quad (7.78)$$

Откуда

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{1}{C}. \quad (7.79)$$

Как видно, чем меньше величина C , тем больше угол α . При условии $C \rightarrow 0$ угол $\alpha \rightarrow 45^\circ$, а при условии $C \rightarrow \infty$ угол $\alpha \rightarrow 0$.

Плотность теплового потока с учетом зависимости (7.75) выражается:

$$q_y(x,y) = -\frac{\lambda \cdot \theta_0}{\pi} \cdot \frac{a^2 x [(y^2 + x^2)^2 - x^2 a^2 - y^2 a^2 - 4y^2 (y^2 + x^2)]}{[(y^2 + x^2)^2 - x^2 a^2 + y^2 a^2]^2 + 4a^4 x^2 y^2}. \quad (7.80)$$

При значении $y = 0$:

$$q_y(x,0) = \frac{\lambda \cdot \theta_0}{\pi} \cdot \frac{a^2}{x(a^2 - x^2)}. \quad (7.81)$$

При значениях $x = 0$ и $x = \pm a$ плотность теплового потока принимает бесконечные значения. Минимум функции $q_y(x,0)$ достигается при значении $x = a/\sqrt{3}$. Следовательно, функции $q_y(x,0)$ для полуплоскости и клина отличаются лишь положением точки минимума.

Плотность теплового потока в направлении оси ox определяется:

$$q_x(x,y) = -\frac{\lambda \cdot \theta_0}{\pi} \cdot \frac{a^2 y^2 [(y^2 + x^2)^2 + x^2 a^2 + y^2 a^2 - 4x^2(y^2 + x^2)]}{[(y^2 + x^2)^2 - x^2 a^2 + y^2 a^2]^2 + 4a^4 x^2 y^2}. \quad (7.82)$$

При значении $x = 0$:

$$q_x(0,y) = \frac{-\lambda \cdot a^2 \cdot \theta_0}{\pi \cdot y \cdot (y^2 + a^2)}. \quad (7.83)$$

Функция $q_x(0,y)$ отрицательна для значений $y > 0$. Следовательно, при значении $x = 0$ происходит отвод тепла из клина.

7.5. Действие теплового источника на некотором удалении от вершины клина

Получим решение уравнения Лапласа в случае действия теплового источника на некотором удалении от вершины клина при следующих граничных условиях:

$$\begin{cases} \theta(x,0) = \varphi(x) & \text{при } x_1 < x < x_2, \\ \theta(x,0) = 0 & \text{при } 0 < x < x_1, x_2 < x < \infty, \\ \theta(0,y) = 0. \end{cases} \quad (7.84)$$

Решение аналогично предыдущему, отличаются лишь пределы интегрирования в зависимости (7.74):

$$\theta(x,y) = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^\infty e^{-\eta y} \cdot \sin \eta x \cdot \left[\int_{x_1}^{x_2} \varphi(\xi) \cdot \sin \eta \xi \cdot d\xi \right] \cdot d\eta. \quad (7.85)$$

С учетом условия $\varphi(\xi) = \theta_0$ получено:

$$\theta(x,y) = \frac{\theta_0}{2\pi} \cdot \operatorname{arctg} \frac{(x_2 - x_1) \cdot y}{[y^2 + (x_2 - x) \cdot (x_1 - x)]} - \frac{\theta_0}{2\pi} \cdot \operatorname{arctg} \frac{(x_2 - x_1) \cdot y}{[y^2 + (x_2 + x) \cdot (x_1 + x)]}. \quad (7.86)$$

Плотность теплового потока $q_y(x, y)$ определяется:

$$q_y(x, y) = \frac{\lambda \cdot \theta_0}{2 \cdot \pi} \cdot \left\{ \frac{(x_2 - x_1) \cdot [(x_2 + x) \cdot (x_1 + x) - y^2]}{[y^2 + (x_2 + x) \cdot (x_1 + x)]^2 + (x_2 - x_1)^2 y^2} - \frac{(x_2 - x_1) [(x_2 - x)(x_1 - x) - y^2]}{[y^2 + (x_2 - x)(x_1 - x)]^2 + (x_2 - x_1)^2 \cdot y^2} \right\}. \quad (7.87)$$

При значении $y = 0$:

$$q_y(x, 0) = -\frac{\lambda \cdot \theta_0}{\pi} \cdot \frac{x \cdot (x_2^2 + x_1^2)}{(x_2^2 - x^2) \cdot (x_1^2 - x^2)}. \quad (7.88)$$

При значениях $x_1 = 0$ и $x_2 = a$ приходим к зависимости (7.81).

При значениях $x = x_1$ и $x = x_2$ плотность теплового потока обращается в бесконечность, т.е. решение (7.88) аналогично решению (7.81).

При значении $x_2 = x_1 + a$ зависимость (7.88) выразится:

$$q_y(x, 0) = -\frac{\lambda \cdot \theta_0}{\pi} \cdot \frac{a \cdot (2x_1 + a) \cdot x}{(x_2^2 - x^2) \cdot (x_1^2 - x^2)}. \quad (7.89)$$

Чем больше величина x_1 и, соответственно координата x , тем больше должна быть плотность теплового потока, обеспечивающая заданную температуру θ_0 на границе $y = 0$, $x_1 < x < x_1 + a$. Следовательно, с увеличением величины x_1 улучшается теплоотвод и уменьшается температура в клине.

7.6. Распределение температуры в полубесконечной полосе

Получим решение уравнения Лапласа для полубесконечной полосы при следующих граничных условиях:

$$\begin{cases} \theta(x, 0) = \varphi(x) & \text{при } x_1 < x < x_2, \\ \theta(x, 0) = 0 & \text{при } x < x_1, x > x_2, \\ \theta(0, y) = 0, \\ \theta(x_3, 0) = 0. \end{cases} \quad (7.90)$$

Решение следует искать в виде, описанном зависимостью (7.10) и удовлетворяющем условию $\theta(x, y \rightarrow \infty) = 0$. Подчиняя зависимость (7.10) граничным условиям $\theta(0, y) = 0$ и $\theta(x_3, 0)$, имеем:

$$C_I = 0; \quad C_{II} \cdot \sin \eta x_3 = 0. \quad (7.91)$$

При нетривиальном решении (не равном тождественно нулю) должно выполняться условие:

$$C_{//} \neq 0; \quad \sin \eta x_3 = 0. \quad (7.92)$$

Тогда $\eta x_3 = k \cdot \pi$, где $k = 0; 1; 2; 3; \dots$ – целые числа. Откуда

$$\eta = \frac{k \cdot \pi}{x_3}. \quad (7.93)$$

С учетом (7.93) зависимость (7.10) примет вид:

$$\theta_k(x, y) = C_{//} \cdot \sin \frac{k \cdot \pi \cdot x}{x_3} \cdot e^{-\frac{k \cdot \pi}{x_3} \cdot y}. \quad (7.94)$$

Числа k называются собственными значениями, а соответствующее каждому из них решение $\theta_k(x, y)$ – собственной функцией.

Сумма бесконечного ряда:

$$\theta(x, y) = \sum_{k=1}^{\infty} C_{//} \cdot \sin \frac{k \cdot \pi \cdot x}{x_3} \cdot e^{-\frac{k \cdot \pi}{x_3} \cdot y} \quad (7.95)$$

также является решением уравнения Лапласа.

Постоянная интегрирования $C_{//}$ определяется с использованием первого граничного условия (7.90):

$$\theta(x, 0) = \varphi(x) = \sum_{k=1}^{\infty} C_{//} \cdot \sin \frac{k \cdot \pi \cdot x}{x_3}. \quad (7.96)$$

Приведенное равенство является разложением функции $\varphi(x)$ в ряд Фурье по синусам. Тогда при условии $\varphi(x) = \theta_0$ получено:

$$\begin{aligned} C_{//} &= \frac{2}{(x_2 - x_1)} \cdot \int_{x_1}^{x_2} \theta_0 \cdot \sin \frac{k \cdot \pi \cdot \xi}{x_3} \cdot d\xi = \\ &= \frac{2\theta_0}{(x_2 - x_1)} \cdot \frac{x_3}{k \cdot \pi} \cdot \left(\cos \frac{k \cdot \pi \cdot x_1}{x_3} - \cos \frac{k \cdot \pi \cdot x_2}{x_3} \right). \end{aligned} \quad (7.97)$$

Подставляя зависимость (7.97) в (7.95), имеем:

$$\begin{aligned} \theta(x, y) &= \frac{2\theta_0 \cdot x_3}{\pi \cdot (x_2 - x_1)} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \left[\frac{1}{k} \cdot \left(\cos \frac{k \cdot \pi \cdot x_1}{x_3} - \cos \frac{k \cdot \pi \cdot x_2}{x_3} \right) \times \right. \\ &\quad \left. \times \sin \frac{k \cdot \pi \cdot x}{x_3} \cdot e^{-\frac{k \cdot \pi}{x_3} \cdot y} \right]. \end{aligned} \quad (7.98)$$

Данный ряд сходящийся, поскольку функция $\sin \frac{k \cdot \pi \cdot x}{x_3}$ ограничена в пределах $-1 \dots +1$, а функция $1/k$ – убывающая.

Параметр x_3 определяет ширину полубесконечной полосы, а разность $(x_2 - x_1)$ – протяженность теплового источника. Температура зависит от величин x_1, x_2, x_3 и $(x_2 - x_1)$.

7.7. Распределение температуры в прямоугольной пластине

Получим решение уравнения Лапласа для прямоугольной пластины при граничных условиях (рис. 7.15):

$$\begin{cases} \theta(x, y_1) = \varphi(x) \text{ при } x_1 < x < x_2, \\ \theta(x, y_1) = 0 \text{ при } x < x_1, x > x_2, \\ \theta(0, y) = 0, \\ \theta(x_3, y) = 0, \\ \theta(x, 0) = 0. \end{cases} \quad (7.99)$$

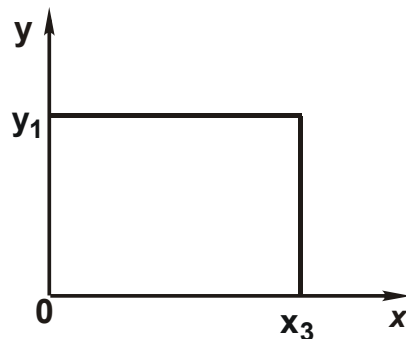


Рис. 7.15. Положение прямоугольной пластины в осях координат

Решение следует искать в виде, описываемом зависимостью (7.9). Подчиняя зависимость (7.9) граничному условию $\theta(x, 0) = 0$, имеем $C_4 = -C_3$. Тогда зависимость (7.9) запишется:

$$\theta(x, y) = (C_I \cdot \cos \eta x + C_{II} \cdot \sin \eta x) \cdot (e^{\eta y} - e^{-\eta y}), \quad (7.100)$$

где $C_I = C_1 \cdot C_3$; $C_{II} = C_2 \cdot C_3$ – постоянные интегрирования.

Подчиняя зависимость (7.100) граничным условиям $\theta(0, y) = 0$; $\theta(x_3, y) = 0$, получено:

$$C_I = 0; \quad C_{II} \cdot \sin \eta x_3 = 0. \quad (7.101)$$

При значении $C_{//} = 0$ решение будет тождественно равно нулю. Поэтому необходимо принять $\sin \eta x_3 = 0$, откуда $\eta x_3 = k \cdot \pi$, где $k = 0; 1; 2; 3; \dots$, тогда

$$\eta = \frac{k \cdot \pi}{x_3}. \quad (7.102)$$

С учетом зависимостей (7.101) и (7.102) решение (7.100) можно представить в виде бесконечного ряда:

$$\theta(x, y) = \sum_{k=1}^{\infty} C_{//} \cdot \sin \frac{k \cdot \pi \cdot x}{x_3} \cdot \left(e^{\frac{k \cdot \pi}{x_3} \cdot y} - e^{-\frac{k \cdot \pi}{x_3} \cdot y} \right). \quad (7.103)$$

Для определения постоянной интегрирования $C_{//}$ следует подчинить зависимость (7.103) первому граничному условию (7.99):

$$\theta(x, y_1) = \sum_{k=1}^{\infty} C_{//} \cdot \sin \frac{k \cdot \pi \cdot x}{x_3} \cdot \left(e^{\frac{k \cdot \pi}{x_3} \cdot y_1} - e^{-\frac{k \cdot \pi}{x_3} \cdot y_1} \right) = \varphi(x). \quad (7.104)$$

Данное равенство является разложением функции $\varphi(x)$ в ряд Фурье по синусам. При условии $\varphi(x) = \theta_0$ справедливо:

$$C_{//} = \frac{2 \cdot \theta_0 \cdot x_3 \cdot (\cos \frac{k \pi}{x_3} x_1 - \cos \frac{k \pi}{x_3} x_2)}{k \cdot \pi \cdot (x_2 - x_1) \cdot \left(e^{\frac{k \cdot \pi}{x_3} \cdot y_1} - e^{-\frac{k \cdot \pi}{x_3} \cdot y_1} \right)}. \quad (7.105)$$

Подставляя постоянную интегрирования $C_{//}$ в зависимость (7.103), получено решение в виде бесконечного ряда для двух переменных x и y , описывающее распределение температуры для граничных условий (7.99):

$$\theta(x, y) = \frac{2 \cdot \theta_0 \cdot x_3}{\pi \cdot (x_2 - x_1)} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(\cos \frac{k \cdot \pi}{x_3} x_1 - \cos \frac{k \cdot \pi}{x_3} x_2)}{\left(e^{\frac{k \cdot \pi}{x_3} \cdot y_1} - e^{-\frac{k \cdot \pi}{x_3} \cdot y_1} \right)} \times \\ \times \sin \frac{k \cdot \pi \cdot x}{x_3} \cdot \left(e^{\frac{k \cdot \pi}{x_3} \cdot y} - e^{-\frac{k \cdot \pi}{x_3} \cdot y} \right) \cdot \frac{1}{k}. \quad (7.106)$$

Аналогично ряду (7.98), ряд (7.103) сходящийся, позволяет установить распределение температуры в замкнутой области (прямоугольной формы) при различном положении и протяженности теплового источника.

7.8. Нестационарное распределение температуры в полуплоскости

Получим решение дифференциального уравнения (7.1) для полуплоскости, удовлетворяющее начальному условию:

$$\theta(x, y = 0, \tau = 0) = \varphi(x) \quad \text{при} \quad -\infty < x < \infty. \quad (7.107)$$

Решение следует искать в виде:

$$\theta(x, y, \tau) = X \cdot Y \cdot T, \quad (7.108)$$

где X, Y, T – функция соответственно координат x, y и времени τ .

После подстановки зависимости (7.108) в (7.1) с учетом $\frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = 0$ получено:

$$\frac{1}{a} \cdot \frac{T'}{T} = \frac{X''}{X} + \frac{Y''}{Y}, \quad (7.109)$$

где $T' = \frac{\partial T}{\partial \tau}$; $X'' = \frac{\partial^2 X}{\partial x^2}$; $Y'' = \frac{\partial^2 Y}{\partial y^2}$ – производные функций T, X, Y .

Равенство (7.109) выполняется при условии:

$$\frac{1}{a} \cdot \frac{T'}{T} = \frac{X''}{X} + \frac{Y''}{Y} = -\eta^2, \quad (7.110)$$

где η – некоторая постоянная.

Из зависимости (7.110) вытекают два обыкновенные дифференциальные уравнения:

$$\frac{1}{a} \cdot \frac{T'}{T} = -\eta^2; \quad (7.111)$$

$$\frac{X''}{X} + \frac{Y''}{Y} = -\eta^2. \quad (7.112)$$

Для решения дифференциального уравнения (7.111) необходимо представить $T' = \frac{\partial T}{\partial \tau}$, тогда

$$\frac{dT}{T} = -a \cdot \eta^2 \cdot d\tau. \quad (7.113)$$

После интегрирования получено:

$$T = C \cdot e^{-a \cdot \eta^2 \cdot \tau}, \quad (7.114)$$

где C – постоянная интегрирования, определяется из начального условия (7.107).

Если принять в зависимости (7.110) постоянную величину η со знаком "плюс", то зависимость (7.114) примет вид $T = e^{-a \cdot \eta^2 \cdot \tau}$, т.е. температура во времени увеличивается. Однако это противоречит начальному условию, согласно которому в результате остывания тела температура должна уменьшаться.

Дифференциальное уравнение (7.112) выполняется при условии:

$$\frac{X''}{X} = -\frac{Y''}{Y} - \eta^2 = -\eta_1^2, \quad (7.115)$$

где η_1 – некоторая постоянная.

Из равенства (7.115) вытекают два обыкновенные дифференциальные уравнения второго порядка:

$$X'' + \eta_1^2 \cdot X = 0, \quad (7.116)$$

$$Y'' - \alpha^2 \cdot Y = 0, \quad (7.117)$$

где $\alpha^2 = \eta_1^2 - \eta^2$.

Решения дифференциальных уравнений (7.116) и (7.117) аналогичны решениям (7.7) и (7.8):

$$X = C_1 \cdot \cos \eta_1 x + C_2 \cdot \sin \eta_1 x; \quad (7.118)$$

$$Y = C_3 \cdot e^{\alpha \cdot y} + C_4 \cdot e^{-\alpha \cdot y}. \quad (7.119)$$

С учетом зависимостей (7.114), (7.118) и (7.119) решение (7.108) примет вид:

$$\begin{aligned} \theta(x, y, \tau) = & C \cdot e^{-a \cdot \eta^2 \cdot \tau} \cdot (C_1 \cdot \cos \eta_1 x + C_2 \cdot \sin \eta_1 x) \times \\ & \times (C_3 \cdot e^{\alpha \cdot y} + C_4 \cdot e^{-\alpha \cdot y}). \end{aligned} \quad (7.120)$$

При условии $y \rightarrow \infty$ справедливо $\theta(x, \infty, \tau) = 0$. Тогда $C_3 = 0$ и зависимость (7.120) опишется:

$$\theta(x, y, \tau) = (C_I \cdot \cos \eta_1 x + C_{II} \cdot \sin \eta_1 x) \cdot e^{-\alpha \cdot y} \cdot e^{-a \cdot \eta^2 \cdot \tau}, \quad (7.121)$$

где $C_I = C \cdot C_1 \cdot C_4$; $C_{II} = C \cdot C_2 \cdot C_4$ – постоянные интегрирования.

Учитывая, что параметры η и η_1 могут изменяться от нуля до бесконечности, решением дифференциального уравнения теплопроводности (7.1) является также функция:

$$\theta(x, y, \tau) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} (C_I \cdot \cos \eta_1 x + C_{II} \cdot \sin \eta_1 x) \cdot e^{-\alpha \cdot y} \cdot e^{-a \cdot \eta^2 \tau} \cdot d\eta \cdot d\eta_1. \quad (7.122)$$

Постоянные интегрирования C_I и C_{II} определяются из начального условия (7.107):

$$\theta(x, 0, 0) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} (C_I \cdot \cos \eta_1 x + C_{II} \cdot \sin \eta_1 x) \cdot d\eta \cdot d\eta_1 = \varphi(x). \quad (7.123)$$

Представляя разложение функции $\varphi(x)$ интегралом Фурье:

$$\varphi(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \left[\frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\xi) \cdot \cos \eta_1 \xi \cdot d\xi \right] \cdot \cos \eta_1 x + \left[\frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\xi) \cdot \sin \eta_1 \xi \cdot d\xi \right] \cdot \sin \eta_1 x \right\} \cdot d\eta_1 \quad (7.124)$$

и сравнивая зависимости (7.123) и (7.124), имеем:

$$C_I = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\xi) \cdot \cos \eta_1 \xi \cdot d\xi; \quad (7.125)$$

$$C_{II} = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\xi) \cdot \sin \eta_1 \xi \cdot d\xi. \quad (7.126)$$

Подставляя зависимости (7.125) и (7.126) в (7.122) с учетом $\varphi(\xi) = \theta_0$ при $-b < \xi < b$ и $\varphi(\xi) = 0$ при $|x| \geq b$, имеем:

$$\begin{aligned} \theta(x, y, \tau) &= \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\xi) \cdot \cos \eta_1 (\xi - x) \cdot d\xi \right] \cdot e^{-\alpha \cdot y} \cdot e^{-a \cdot \eta^2 \tau} \cdot d\eta \cdot d\eta_1 = \\ &= \frac{\theta_0}{\pi} \cdot \int_0^{\infty} e^{-a \cdot \eta^2 \tau} \cdot \left\{ \int_{-b}^b \left[\int_0^{\infty} e^{-\alpha \cdot y} \cdot \cos \eta_1 (\xi - x) \cdot d\eta_1 \right] \cdot d\xi \right\} \cdot d\eta. \quad (7.127) \end{aligned}$$

В связи со сложностью интегрирования в зависимости (7.127), выразить функцию $\theta(x, y, \tau)$ явно через координаты x , y и время τ затруднено. Поэтому можно ограничиться решением (7.122), представляя его в виде суммы ряда:

$$\theta(x, y, \tau) = \sum_{\eta=0}^{\infty} \sum_{\eta_1=0}^{\infty} (C_I \cdot \cos \eta_1 x + C_{II} \cdot \sin \eta_1 x) \cdot e^{-\alpha \cdot y} \cdot e^{-a \cdot \eta^2 \tau}, \quad (7.128)$$

где постоянные интегрирования C_I и C_{II} определяются зависимостями (7.125) и (7.126).

Для теоретического анализа полученного решения следует рассмотреть упрощенную одномерную задачу теплопроводности для полубесконечного стержня.

7.9. Теплопроводность для полубесконечного стержня

При решении одномерной задачи теплопроводности для полубесконечного стержня дифференциальное уравнение (7.1) принимает вид:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (x > 0). \quad (7.129)$$

Решение, удовлетворяющее начальному условию

$$\theta(x, \tau = 0) = \varphi(x) \quad \text{при } 0 < x < \infty, \quad (7.130)$$

следует искать в виде:

$$\theta(x, \tau) = X \cdot T, \quad (7.131)$$

где $X = X(x)$; $T = T(\tau)$ – функция одной переменной.

Подставляя функцию (7.131) в зависимость (7.129), получено равенство, в котором левая часть является функцией переменной T , а правая часть – функцией переменной X :

$$\frac{1}{a} \cdot \frac{T'}{T} = \frac{X''}{X}, \quad (7.132)$$

где $T' = \frac{\partial T}{\partial \tau}$; $X'' = \frac{\partial^2 X}{\partial x^2}$ – производные функций T и X .

Равенство (7.132) выполняется при условии:

$$\frac{1}{a} \cdot \frac{T'}{T} = \frac{X''}{X} = \pm \eta^2, \quad (7.133)$$

где η – некоторая постоянная.

Принимая в равенстве (7.133) знак "минус", имеем

$$\frac{1}{a} \cdot \frac{T'}{T} = -\eta^2; \quad (7.134)$$

$$\frac{X''}{X} = -\eta^2. \quad (7.135)$$

Решения дифференциальных уравнений (7.134) и (7.135):

$$T(\tau) = C \cdot e^{-a \cdot \eta^2 \cdot \tau}; \quad (7.136)$$

$$X(x) = C_1 \cdot \cos \eta x + C_2 \cdot \sin \eta x. \quad (7.137)$$

Функция (7.131) выражается:

$$\theta(x, \tau) = (C_I \cdot \cos \eta x + C_{II} \cdot \sin \eta x) \cdot e^{-a \cdot \eta^2 \cdot \tau}, \quad (7.138)$$

где $C_I = C \cdot C_1$; $C_{II} = C \cdot C_2$ – постоянные интегрирования.

С течением времени τ функция $\theta(x, \tau)$ уменьшается. Следовательно, имеет место остывание стержня и знак в зависимости (7.133) принят правильно.

Интеграл от функции $\theta(x, \tau)$ по параметру η также является решением уравнения (7.129):

$$\theta(x, \tau) = \int_0^{\infty} (C_I \cdot \cos \eta x + C_{II} \cdot \sin \eta x) \cdot e^{-a \cdot \eta^2 \cdot \tau} \cdot d\eta. \quad (7.139)$$

Подчиняя зависимость (7.139) начальному условию (7.130), получено:

$$\theta(x, 0) = \int_0^{\infty} (C_I \cdot \cos \eta x + C_{II} \cdot \sin \eta x) \cdot d\eta = \varphi(x). \quad (7.140)$$

Коэффициенты Фурье C_I и C_{II} определяются зависимостями (7.125) и (7.126), принимая вместо параметра η_1 параметр η . Тогда решение (7.139) выразится:

$$\begin{aligned} \theta(x, \tau) &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \cdot e^{-a \cdot \eta^2 \cdot \tau} \cdot \left[\int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\xi) \cdot \cos \eta(\xi - x) \cdot d\xi \right] \cdot d\eta = \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \varphi(\xi) \cdot \left[\int_0^{\infty} e^{-a \cdot \eta^2 \cdot \tau} \cdot \cos \eta(\xi - x) \cdot d\eta \right] \cdot d\xi. \end{aligned} \quad (7.141)$$

С учетом табличного интеграла:

$$\int_0^{\infty} e^{-\alpha^2 \cdot S^2} \cos \beta S \cdot dS = \frac{\sqrt{\pi}}{2 \cdot \alpha} \cdot e^{-\frac{\beta^2}{4 \cdot \alpha^2}}, \quad \alpha > 0 \quad (7.142)$$

и функции $\varphi(\xi)$, графически показанной на рис. 7.16, получено

$$\theta(x, \tau) = \frac{\theta_0}{\pi} \cdot \int_0^b \left[\frac{\sqrt{\pi}}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}} - e^{-\frac{(\xi-x)^2}{4 \cdot a \cdot \tau}} \right] \cdot d\xi. \quad (7.143)$$

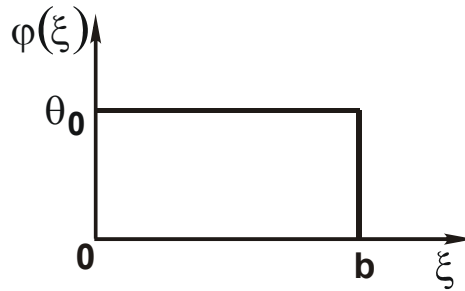


Рис. 7.16. Вид функции $\varphi(\xi)$

Данный интеграл нельзя выразить в конечном виде через элементарные функции. Поэтому следует воспользоваться разложением в ряд:

$$e^{-\alpha^2 \cdot (\xi-x)^2} = 1 - \frac{\alpha^2 \cdot (\xi-x)^2}{1!} + \frac{\alpha^4 \cdot (\xi-x)^4}{2!} - \dots + (-1)^n \cdot \frac{[\alpha \cdot (\xi-x)]^{2n}}{n!}; \quad (7.144)$$

$$\int_0^b e^{-\alpha^2 \cdot (\xi-x)^2} \cdot d\xi = b - \frac{\alpha^2}{3} \cdot [(b-x)^3 + x^3] + \frac{\alpha^4}{10} \cdot [(b-x)^5 + x^5] - \dots \quad (7.145)$$

Тогда зависимость (7.143) примет вид:

$$\theta(x, \tau) = \frac{\theta_0}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot a \cdot \tau}} \times \left\{ b - \frac{1}{12 \cdot a \cdot \tau} \cdot [(b-x)^3 + x^3] + \frac{1}{10} \left(\frac{1}{4a \cdot \tau} \right)^2 \cdot [(b-x)^5 + x^5] - \dots \right\}. \quad (7.146)$$

Данный знакпеременный ряд сходящийся. Поэтому влияние времени τ на температуру $\theta(x, \tau)$ следует рассматривать за счет изменения функции $1/\sqrt{\tau}$. Очевидно, с увеличением времени τ температура $\theta(x, \tau)$ уменьшается.

Аналогичный вывод можно сделать, анализируя подинтегральную функцию в зависимости (7.143). Рассматривая $x \gg b$; ξ , т.е. принимая $x - \xi \approx x$, видно, что подинтегральная функция не зависит от переменной ξ . Тогда

$$\theta(x, \tau) = \frac{\theta_0 \cdot b}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot a \cdot \tau}} \cdot e^{-\frac{x^2}{4 \cdot a \cdot \tau}}. \quad (7.147)$$

С увеличением времени τ функция $e^{-\frac{x^2}{4 \cdot a \cdot \tau}}$ увеличивается, однако, несущественно по сравнению с уменьшением функции $1/\sqrt{\tau}$. Следовательно, с увеличением времени τ температура уменьшается, что соответствует условиям задачи.

7.10. Распределение температуры при движущемся тепловом источнике

При обработке материалов резанием инструмент или деталь совершают движение. В результате образующийся в зоне резания тепловой источник перемещается по поверхности обрабатываемой детали, что вносит изменения в стационарное распределение температуры в полуплоскости. Предполагая, что тепловой источник шириной $2b$ движется со скоростью V по границе полуплоскости, требуется определить распределение температуры в полуплоскости.

При выполнении расчетов следует принять, что теплообмен с внешней средой отсутствует; все тепло уходит на нагревание тела; температура на границе полуплоскости на всем участке перемещения теплового источника равна θ_0 . В результате приходим к решению (7.24), рассматривая в качестве параметра $2b$ длину участка перемещения теплового источника.

Положение изотерм описывается уравнением окружности (7.26), как показано на рис. 7.2. Очевидно, после действия теплового источника происходит остывание тела, температура внутри и на границе тела уменьшается во времени. Математически это учитывается следующим образом. Предположим, после прохождения тепловым источником всего участка $2b$ (рис. 7.17) в полуплоскости сформировалось симметричное (относительно оси oy) тепловое поле, описываемое зависимостью (7.24), с одинаковой температурой на границе θ_0 .

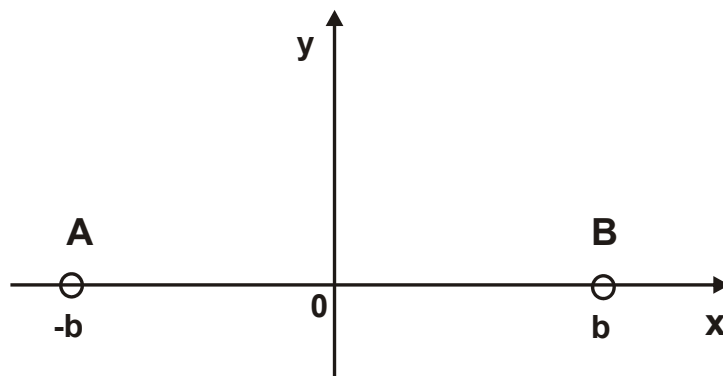


Рис. 7.17. Положение участка перемещения АВ в осях координат

Процесс остывания каждой точки границы полуплоскости в пределах $2b$ начинается в разное время. В точке А (начале перемещения теплового источника) он начинается в момент времени $\tau = 0$. В конеч-

ной точке В он начнется в момент времени $\tau = \frac{2b}{V}$. Следовательно, начальное условие для температуры $\theta(x, y, \tau_*) = \theta_0$ каждой точки границы полуплоскости будет выполняться в разное время, равное $\tau_* = (x + b)/V$, т.е. в точке А (координата $x = -b$) время $\tau = 0$, а в точке В (координата $x = b$) время $\tau = 2b/V$.

Математически начальное условие запишется:

$$\begin{cases} \theta(x, y = 0, \tau_*) = \theta_0 & \text{при } \tau_* = \frac{x+b}{V}, -b < x < b; \\ \theta(x, y = 0, \tau_*) = 0 & \text{при } |x| \geq b. \end{cases} \quad (7.148)$$

Решением дифференциального уравнения теплопроводности (7.1) при условии $\frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = 0$ является функция $\theta(x, y, \tau)$, описываемая зависимостью (7.121), а также дважды интегрируемая функция $\theta(x, y, \tau)$, описываемая зависимостью (7.122).

Постоянные интегрирования C_I и C_{II} определяются из начального условия (7.148), подчиняя ему зависимость (7.122):

$$\theta(x, 0, \tau_*) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} (C_I \cdot \cos \eta x + C_{II} \cdot \sin \eta x) \cdot e^{-a \cdot \frac{(x+b)}{V} \cdot \eta^2} \cdot d\eta \cdot d\eta_1 = \theta_0. \quad (7.149)$$

Следует умножить левую и правую части уравнения (7.149) на функцию $e^{a \cdot \frac{(x+b)}{V} \cdot \eta^2}$. Так как функция $e^{a \cdot \frac{(x+b)}{V} \cdot \eta^2}$ непрерывна и ограничена, то полученный интеграл снова будет состоять из непрерывных функций и равномерно сходиться к новой непрерывной функции $\theta_0 \cdot e^{a \cdot \frac{(x+b)}{V} \cdot \eta^2}$.

После преобразований зависимость (7.149) примет вид:

$$\theta_0 \cdot e^{a \cdot \frac{(x+b)}{V} \cdot \eta^2} = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} (C_I \cdot \cos \eta_1 x + C_{II} \cdot \sin \eta_1 x) \cdot d\eta \cdot d\eta_1. \quad (7.150)$$

Функцию $\varphi(x) = \theta_0 \cdot e^{a \cdot \frac{(x+b)}{V} \cdot \eta^2}$ можно представить разложением в интеграл Фурье согласно зависимости (7.124). Тогда решение, описываемое зависимостью (7.122), примет вид:

$$\theta(x, y, \tau) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \left[\int_{-b}^b \varphi(\xi) \cdot \cos \eta_1 (\xi - x) \cdot d\xi \right] \cdot \frac{1}{\pi} \times \\ \times e^{-\alpha \cdot y} \cdot e^{-a \cdot \eta^2 \cdot \tau} \cdot d\eta \cdot d\eta_1. \quad (7.151)$$

Учитывая сложность интегрирования (7.151), решение можно представить в виде сумм ряда:

$$\theta(x, y, \tau) = \sum_{\eta=0}^{\infty} \sum_{\eta_1=0}^{\infty} [C_I \cdot \cos \eta_1 x + C_{II} \cdot \sin \eta_1 x] \cdot e^{-\alpha \cdot y} \cdot e^{-a \cdot \eta^2 \cdot \tau}, \quad (7.152)$$

где постоянные интегрирования C_I и C_{II} определяются из условий (7.125) и (7.126), рассматривая

$$\varphi(\xi) = \theta_0 \cdot e^{a \cdot \frac{(x+b)}{V} \cdot \eta^2} \quad \text{при} \quad -b < \xi < b. \quad (7.153)$$

Очевидно, распределение температуры относительно оси ou будет несимметричным в связи с несимметричностью функции $\theta_0 \cdot e^{a \cdot \frac{(x+b)}{V} \cdot \eta^2}$. Аналогично определяется изменение температуры во времени для начальных условий, когда температура на границе одинакова:

$$\theta(x, y, \tau^*) = \varphi(x) \quad \text{при} \quad \tau^* = \frac{x+b}{V}; \quad -\infty < x < \infty. \quad (7.154)$$

Таким образом, установлено распределение температуры при движущемся тепловом источнике.

7.11. Распределение температуры в полуплоскости для заданной плотности теплового потока

Получим решение уравнения теплопроводности для полуплоскости ($-\infty < x < \infty, y > 0$), удовлетворяющее граничному условию:

$$q_y(x, y) = q(x) \quad \text{при} \quad -\infty < x < \infty. \quad (7.155)$$

Решение следует искать в виде, описанном зависимостью (7.11), а постоянные интегрирования C_I и C_{II} определить из граничного условия (7.155) с учетом $q_y(x, y) = -\lambda \cdot \frac{\partial \theta}{\partial y}$:

$$q_y(x, y) = \lambda \cdot \int_0^{\infty} (C_I \cdot \cos \eta x + C_{II} \cdot \sin \eta x) \cdot \eta \cdot e^{-\eta y} \cdot d\eta \quad \text{или} \quad (7.156)$$

$$q_y(x, y) = \lambda \cdot \int_0^{\infty} (\overline{C}_I \cdot \cos \eta x + \overline{C}_{II} \cdot \sin \eta x) \cdot e^{-\eta y} \cdot d\eta, \quad (7.157)$$

где $\overline{C}_I = C_I \cdot \eta$; $\overline{C}_{II} = C_{II} \cdot \eta$ – постоянные интегрирования.

При значении $y = 0$:

$$q_y(x, 0) = \lambda \cdot \int_0^{\infty} (\overline{C}_I \cdot \cos \eta x + \overline{C}_{II} \cdot \sin \eta x) \cdot d\eta = q(x). \quad (7.158)$$

Представляя разложение функции $q(x)$ интегралом Фурье

$$q(x) = \int_0^{\infty} \left\{ \left[\frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} q(\xi) \cdot \cos \eta \xi \cdot d\xi \right] \cdot \cos \eta x + \left[\frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} q(\xi) \cdot \sin \eta \xi \cdot d\xi \right] \cdot \sin \eta x \right\} \cdot d\eta \quad (7.159)$$

и сравнивая зависимости (7.158) и (7.159), имеем:

$$\overline{C}_I = \frac{1}{\pi \cdot \lambda} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} q(\xi) \cdot \cos \eta \xi \cdot d\xi; \quad (7.160)$$

$$\overline{C}_{II} = \frac{1}{\pi \cdot \lambda} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} q(\xi) \cdot \sin \eta \xi \cdot d\xi. \quad (7.161)$$

Подставляя \overline{C}_I и \overline{C}_{II} в зависимость (7.157), имеем:

$$q_y(x, y) = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\eta y} \cdot \left[\int_{-\infty}^{\infty} q(\xi) \cdot \cos \eta(\xi - x) \cdot d\xi \right] \cdot d\eta = \\ = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} q(\xi) \cdot \left[\int_0^{\infty} e^{-\eta y} \cdot \cos \eta(\xi - x) \cdot d\eta \right] \cdot d\xi = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} q(\xi) \cdot \left[\frac{y \cdot d\xi}{y^2 + (\xi - x)^2} \right]. \quad (7.162)$$

Полученное решение аналогично решению (7.19) для определения температуры $\theta(x, y)$. Для граничного условия:

$$\begin{cases} q(x) = q_0 & \text{при } |x| < a, \\ q(x) = 0 & \text{при } |x| \geq a \end{cases} \quad (7.163)$$

зависимость (7.162) выразится:

$$q_y(x, y) = \frac{q_0}{\pi} \cdot \int_{-a}^a \left[\frac{y \cdot d\xi}{y^2 + (\xi - x)^2} \right] = \\ \frac{q_0}{\pi} \cdot \left[\operatorname{arctg} \frac{(a-x)}{y} + \operatorname{arctg} \frac{(a+x)}{y} \right] = \frac{q_0}{\pi} \cdot \operatorname{arctg} \left[\frac{2 \cdot a \cdot y}{y^2 + (a^2 - x^2)} \right]. \quad (7.164)$$

Обозначая $\operatorname{tg} \left[\pi \cdot \frac{q(x, y)}{q_0} \right] = C$, получено уравнение окружности:

$$x^2 + (y - b)^2 = R^2, \quad (7.165)$$

где $b = \frac{a}{C}$; $R = a \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{C^2}}$.

Положения окружностей, соответствующих одному значению плотности теплового потока q_0 , идентичны положениям окружностей, соответствующих одному значению температуры в решении (7.27), рис. 7.2.

Подставляя в зависимость (7.11) постоянные интегрирования $C_I = \frac{\overline{C_I}}{\eta}$ и $C_{II} = \frac{\overline{C_{II}}}{\eta}$, получено:

$$\theta(x, y) = \frac{1}{\pi \cdot \lambda} \cdot \int_0^{\infty} e^{-\eta y} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \left[\int_{-\infty}^{\infty} q(\xi) \cdot \cos \eta(\xi - x) \cdot d\xi \right] \cdot d\eta. \quad (7.166)$$

После замены местами интегралов, имеем:

$$\theta(x, y) = \frac{1}{\pi \cdot \lambda} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} q(\xi) \cdot \left[\int_0^{\infty} e^{-\eta y} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \cos \eta(\xi - x) \cdot d\eta \right] \cdot d\xi. \quad (7.167)$$

Внутренний интеграл в зависимости (7.167) сводится к табличному интегралу [49]:

$$\int_0^{\infty} e^{\omega s} \cdot \frac{\cos s \beta}{s} \cdot ds = \infty, \quad (7.168)$$

где ω, β – постоянные величины.

Неопределенность интеграла (7.168) обусловлена функцией $1/s$, которая при условии $s \rightarrow 0$ стремится к бесконечности. Следовательно, температуру $\theta(x, y)$ нельзя определить, пользуясь зависимостью (7.167). Решение возможно, если рассматривать в зависимости (7.166) вместо внешнего интеграла по параметру η бесконечный ряд:

$$\theta(x, y) = \frac{1}{\pi \cdot \lambda} \cdot \sum_{\eta=1}^{\infty} e^{-\eta y} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \left[\int_{-\infty}^{\infty} q(\xi) \cdot \cos \eta(\xi - x) \cdot d\xi \right]. \quad (7.169)$$

Для граничного условия:

$$\begin{cases} q(x) = q_0 & \text{при } |x| < a, \\ q(x) = 0 & \text{при } |x| \geq a \end{cases} \quad (7.170)$$

интеграл по параметру ξ , входящий в зависимость (7.169), выразится:

$$\int_{-a}^a q_0 \cdot \cos \eta(\xi - x) \cdot d\xi = \frac{2 \cdot q_0}{\eta} \cdot \sin \eta a \cdot \cos \eta x, \quad (7.171)$$

тогда

$$\theta(x, y) = \frac{2 \cdot q_0}{\pi \cdot \lambda} \cdot \sum_{\eta=1}^{\infty} e^{-\eta y} \cdot \frac{1}{\eta^2} \cdot \sin \eta a \cdot \cos \eta x. \quad (7.172)$$

Ряд (7.172) является сходящимся, поскольку функции $\sin \eta a$ и $\cos \eta x$ ограничены в пределах от -1 до 1 , а функции $e^{-\eta y}$ и $1/\eta^2$ – убывающие.

Следовательно, при достижении определенного значения η сумма членов ряда будет оставаться практически постоянной.

7.12. Распределение температуры в прямоугольной пластине для заданной плотности теплового потока

Представляет интерес решение дифференциального уравнения теплопроводности (7.1) применительно к процессу резания инструментом с режущей пластиной, показанной на рис. 7.18. На выделенную пластину в пределах контакта с обрабатываемой деталью l_3 действует постоянный тепловой поток интенсивностью q_0 .

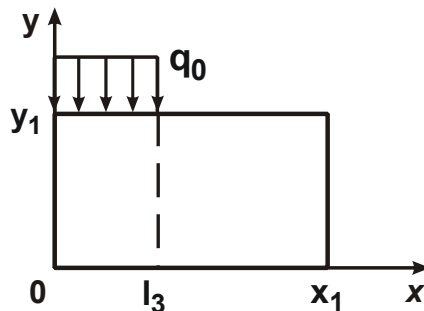


Рис. 7.18. Расчетная схема режущей пластины

Предположим, что на границах пластины ($x = 0$; $x = x_1$; $y = 0$) температура равна нулю. В результате приходим к решению задачи теплоотвода в двухмерной системе. Уравнение Лапласа (7.2) принимает следующий вид:

$$\left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) = 0. \quad (7.173)$$

Граничные условия:

$$\begin{cases} \theta(x=0) = 0; \\ \theta(x=x_1) = 0; \\ \theta(y=0) = 0; \\ q(y=y_1) = q(x), \end{cases} \quad (7.174)$$

где $q(x)$ – заданная функция плотности теплового потока (рис. 7.19).

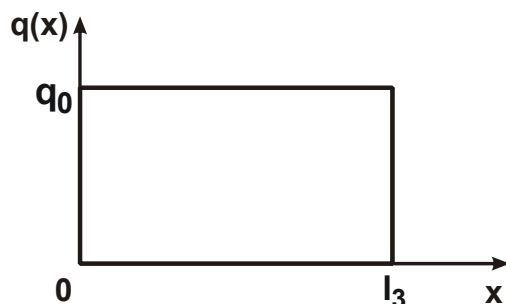


Рис. 7.19. Изменение функции плотности теплового потока

Решение дифференциального уравнения (7.173) следует искать методом Фурье разделения переменных. Искомое решение представится в виде произведения двух функций X и Y , где функция X зависит только от координаты x , а функция Y – от координаты y .

Подставляя функцию $\theta(x,y) = X \cdot Y$ в дифференциальное уравнение (7.173), имеем:

$$\frac{1}{x} \cdot \frac{d^2 X}{dx^2} = -\frac{1}{Y} \cdot \frac{d^2 Y}{dy^2} = -\eta^2, \quad (7.175)$$

где η – некоторая постоянная.

В тождестве (7.175) левая часть не зависит от функции Y , а правая часть – от функции X .

Из тождества (7.175) вытекают два обыкновенные линейные дифференциальные уравнения:

$$\begin{cases} \frac{d^2 X}{dx^2} + \eta^2 \cdot X = 0, \\ \frac{d^2 Y}{dy^2} - \eta^2 = 0, \end{cases} \quad (7.176)$$

решения которых общеизвестны [17]:

$$X = C_1 \cdot \cos \eta x + C_2 \cdot \sin \eta x; \quad (7.177)$$

$$Y = C_3 \cdot \exp(\eta y) + C_4 \cdot \exp(-\eta y). \quad (7.178)$$

Постоянные интегрирования C_1, C_2, C_3, C_4 определяются из граничных условий. С учетом зависимостей (7.177) и (7.178) искомое решение $\theta(x, y)$ принимает вид:

$$\theta(x, y) = (C_1 \cdot \cos \eta x + C_2 \cdot \sin \eta x) \cdot [C_3 \cdot \exp(\eta y) + C_4 \cdot \exp(-\eta y)]. \quad (7.179)$$

Постоянные интегрирования C_1 и C_2 определяются на основе использования первого и второго граничных условий (7.174). Откуда $C_1 = 0; C_2 = \sin \eta x_1 = 0$.

При значении $C_2 = 0$ функция $\theta(x, y)$ тождественно равна нулю. Следовательно, должно выполняться условие $\sin \eta x_1$ или

$$\eta = \frac{k \cdot \pi}{x_1}, \quad (7.180)$$

где $k = 1; 2; 3, \dots$ – целые числа.

Подчиняя функцию $\theta(x, y)$ третьему граничному условию, имеем: $C_3 = -C_4$.

Подставляя постоянные интегрирования C_1, C_2, C_3 в зависимость (7.180), получено:

$$\theta(x, y) = C \cdot \left[\exp\left(\frac{k \cdot \pi}{x_1} \cdot y\right) - \exp\left(-\frac{k \cdot \pi}{x_1}\right) \right] \cdot \sin \frac{k \cdot \pi x}{x_1}, \quad (7.181)$$

где $C = C_2 \cdot C_3$ – постоянная интегрирования.

Сумма функций $\theta(x, y)$ по параметру k также будет решением уравнения (7.173):

$$\theta(x, y) = \sum_{k=1}^{\infty} C_k \cdot \left[\exp\left(\frac{k \cdot \pi y}{x_1}\right) - \exp\left(-\frac{k \cdot \pi y}{x_1}\right) \right] \cdot \sin \frac{k \cdot \pi x}{x_1}. \quad (7.182)$$

Плотность теплового потока

$$q(x, y) = -\lambda \cdot \frac{d\theta}{dy} = -\lambda \cdot \sum_{k=1}^{\infty} C_k \cdot \frac{k \cdot \pi}{x_1} \cdot \left[\exp\left(\frac{k \cdot \pi y}{x_1}\right) + \exp\left(-\frac{k \cdot \pi y}{x_1}\right) \right] \cdot \sin \frac{k \cdot \pi x}{x_1}. \quad (7.183)$$

Подчиняя зависимость (7.183) четвертому граничному условию (7.174), имеем:

$$-q(x) = \lambda \cdot \sum_{k=1}^{\infty} C_k \cdot \frac{k \cdot \pi}{x_1} \cdot \left[\exp\left(\frac{k \cdot \pi y_1}{x_1}\right) + \exp\left(-\frac{k \cdot \pi y_1}{x_1}\right) \right] \cdot \sin \frac{k \cdot \pi x}{x_1}. \quad (7.184)$$

Полученное равенство является разложением функции $q(x)$ в ряд Фурье по синусам.

Коэффициент ряда Фурье выражается:

$$\lambda \cdot C_k \cdot \frac{k \cdot \pi}{x_1} \cdot \left[\exp\left(\frac{k \cdot \pi y_1}{x_1}\right) + \exp\left(-\frac{k \cdot \pi y_1}{x_1}\right) \right] = \frac{2}{x_1} \cdot \int_0^{x_1} q(x) \cdot \sin \frac{k \cdot \pi x}{x_1} dx. \quad (7.185)$$

С учетом функции $q(x)$, графически представленной на рис. 7.19, коэффициент C_k определяется:

$$C_k = \frac{2 \cdot q_0 \cdot x_1}{k^2 \cdot \pi^2 \cdot \lambda} \cdot \frac{\left(1 - \cos \frac{k \cdot \pi \cdot l_3}{x_1}\right)}{\left[\exp\left(\frac{k \cdot \pi y_1}{x_1}\right) + \exp\left(-\frac{k \cdot \pi y_1}{x_1}\right)\right]}. \quad (7.186)$$

Подставляя зависимость (7.186) в (7.182), получено:

$$\theta(x, y) = \frac{2 \cdot q_0 \cdot x_1}{\pi^2 \cdot \lambda} \times \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \frac{\left(1 - \cos \frac{k \cdot \pi \cdot l_3}{x_1}\right) \cdot \left[\exp\left(\frac{k \cdot \pi y}{x_1}\right) - \exp\left(-\frac{k \cdot \pi y}{x_1}\right)\right]}{k_2 \cdot \left[\exp\left(\frac{k \cdot \pi y_1}{x_1}\right) + \exp\left(-\frac{k \cdot \pi y_1}{x_1}\right)\right]} \cdot \sin \frac{k \cdot \pi x}{x_1} \right\}. \quad (7.187)$$

Как видно, ряд сходящийся, поскольку функция $\sin \frac{k \cdot \pi x}{x_1}$ ограничена в пределах $-1 \dots +1$, а функция $1/k^2$ – убывающая.

Порядок расчета согласно зависимости (7.187) следующий. Первоначально задаются значения q_0 , λ , геометрические размеры пластины и длина l_3 . Затем производится разбиение пластины сеткой с заданным размером ячейки Δx и Δy . Задается начальная координата $x = 0$ и для нее просчитываются все значения температуры при переменной координате y с шагом Δy . Далее изменяется координата x на величину Δx и расчет повторяется.

Расчет температуры для конкретных значений x и y следующий. Задается нулевое значение θ_0 . На основе зависимости (7.187) для значения $k = 1$ определяется величина температуры. Найденное значение суммируется с нулевым значением температуры, после чего аналогично определяется значение температуры для значения $k = 2$.

Это значение суммируется с предыдущим и т.д. Расчет производится до тех пор, пока сумма членов ряда станет постоянной.

Выполненные расчеты показали, что приведенный ряд Фурье медленно сходящийся, достаточное число членов ряда составляет

$k = 200$. Для одного значения x определена температура в 40 точках по координате y .

На рис. 7.20 показаны температурное поле и изотермы для исходных данных: $x_1 = 1,2 \cdot 10^{-2}$ м; $\lambda = 54,34$ Вт/м·К; $l_3 = 10^{-4}$ м; $y_1 = 4 \cdot 10^{-3}$ м.

Как видно, по мере удаления от зоны действия теплового потока наблюдается резкое снижение температуры, т.е. имеет место высокий градиент температуры. Например, при удалении от вершины пластины на 0,5 мм, температура уменьшилась в 52 раза: с 266°C до 5°C . Наибольшая температура достигается на линии действия теплового потока (линии контакта задней поверхности пластины с деталью) и равна 266°C . Это практически совпадает с экспериментально установленным значением температуры, равным 270°C .

На рис. 7.20 показано изменение температуры по линии действия теплового потока (линии контакта задней поверхности пластины с деталью). Максимальная температура достигается не в вершине пластины, а на некотором расстоянии от нее (0,07 мм).

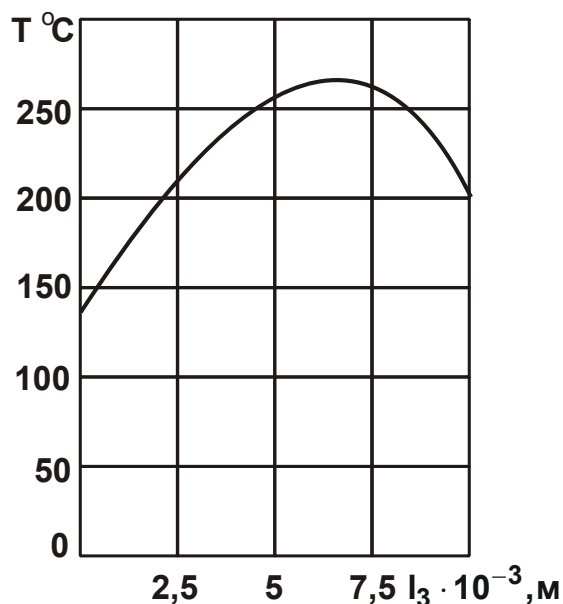


Рис. 7.20. Изменение температуры по линии контакта задней поверхности пластины с обрабатываемым материалом

7.13. Уточненный расчет температуры резания

Заслуживает внимания анализ температуры резания, возникающей на задней поверхности резца, на основе зависимости (7.187).

Плотность теплового потока q_0 представлена в виде:

$$q_0 = \frac{P_z \cdot V}{l_3}, \quad (7.188)$$

где V – скорость резания, м/с;

l_3 – длина контакта задней поверхности резца с обрабатываемым материалом, м.

Тангенциальная составляющая силы резания P_z , приходящаяся на единицу ширины среза, выражена зависимостью $P_z = f \cdot P_y$, где f – коэффициент трения на задней поверхности резца; $P_y \cong HV \cdot l_3$ – радиальная составляющая силы резания, приходящаяся на единицу ширины среза, Н; HV – твердость обрабатываемого материала (по Виккерсу), Н/м². После преобразований зависимости (7.188), получено:

$$q_0 = f \cdot HV \cdot V. \quad (7.189)$$

Как видно, плотность теплового потока q_0 тем меньше, чем меньше коэффициент трения f , твердость обрабатываемого материала HV и скорость резания V . Учитывая то, что уменьшение скорости резания V связано с уменьшением производительности обработки, уменьшить q_0 можно за счет уменьшения коэффициента трения f . Это достигается применением эффективных технологических сред, а также нанесением на рабочие поверхности инструмента специальных покрытий, снижающих коэффициент трения.

Исходя из зависимости (7.187), уменьшить температуру резания можно путем оптимизации геометрических параметров твердосплавной пластины режущего инструмента x_1 , y_1 и уменьшения l_3 .

Применим решение (7.187) для анализа температуры резания, возникающей на передней поверхности резца, считая, что на участке его передней поверхности длиной l_3 действует тепловой поток плотностью

$$q_0 = \frac{P_y \cdot V_{\text{стр}}}{l_3}, \quad (7.190)$$

где $P_y = f \cdot P_z$;

$V_{\text{стр}} = \frac{V}{k_L} = V \cdot \text{tg} \beta$ – скорость перемещения стружки по передней

поверхности резца, м/с;

k_L – коэффициент усадки стружки;

β – условный угол сдвига обрабатываемого материала режущим инструментом с нулевым передним углом.

Представим тангенциальную составляющую силы резания P_z , приходящуюся на единицу ширины среза, в виде: $P_z = \sigma \cdot a$; σ – условное напряжение резания, Н/м^2 ; a – толщина среза, м; $\sigma = \frac{\sigma_{сж}}{2 \cdot \text{tg}\beta}$. Тогда плотность теплового потока q_0 с учетом $\text{tg}\beta = a/l$ определится:

$$q_0 = 0,5 \cdot \sigma_{сж} \cdot f \cdot V \cdot \text{tg}\beta. \quad (7.191)$$

Соответственно температура резания, определяемая зависимостью (7.187), примет вид:

$$\theta = \frac{\sigma_{сж} \cdot V \cdot f \cdot \text{tg}\beta \cdot x_1}{\pi^2 \cdot \lambda} \cdot A, \quad (7.192)$$

где A – максимальное значение суммы сходящегося ряда (7.187), которое для исходных данных, принятых в п. 7.12, равно 0,02.

Окончательно температура резания опишется:

$$\theta = \frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma_{сж} \cdot V \cdot f \cdot \text{tg}\beta \cdot x_1}{\lambda}. \quad (7.193)$$

Для исходных данных: $\sigma_{сж} = 36 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$; $\lambda = 0,058 \text{ кал/см}\cdot\text{с}\cdot\text{град.} = 24,24 \text{ Дж/м}\cdot\text{с}\cdot\text{град.}$; $f = 0,3$; $\text{tg}\beta = 1$; $V = 1 \text{ м/с}$; $h = 12 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ (обрабатываемый материал – сталь Р18) температура резания θ , рассчитанная по зависимости (7.193), при условии $x_1 = h$ равна $534,6 \text{ }^\circ\text{С}$.

Очевидно, зависимость (7.193) позволяет определить значения температуры, близкие к реальным условиям механической обработки. Таким образом, для правильного расчета температуры резания необходимо использовать уравнение Лапласа, описывающее распределение температуры в заданной области.

С увеличением длины контакта обрабатываемого материала с передней поверхностью резца параметр A увеличивается (табл. 7.1).

Таблица 7.1

Расчетные значения параметра A

$l_3 \cdot 10^3, \text{ м}$	0,1	1,0	10,0
A	0,02	0,28	2,8

На рис. 7.21 приведены результаты численных расчетов тепловых полей в твердосплавной пластине для заданной длины контакта обрабатываемого материала с передней поверхностью резца l_3 . Тем-

пература на передней поверхности изменяется по экстремальной зависимости. Максимум температуры достигается примерно в конечной точке пластического контакта обрабатываемого материала с резцом, т.е. в точке $x = l_3$ (табл. 7.2).

Таблица 7.2

Расчетные значения x_2 и θ_{\max} °С

l_3 , мм	0,1	1,0	10,0
x_2 , мм	0,09	0,7	6,0
θ_{\max} °С	3,297	37,83	224,572

Параметр x_2 определяет положение точки на передней поверхности резца, в которой температура резания максимальна θ_{\max} .

Как следует из табл. 7.2, с уменьшением длины l_3 значение x_2 приближается к l_3 . С увеличением l_3 максимальная температура резания θ_{\max} увеличивается. Это связано с уменьшением участка $l_3 - x_0$ (рис. 7.21), на который не действует тепловой источник, и, следовательно, ухудшением условий теплоотвода.

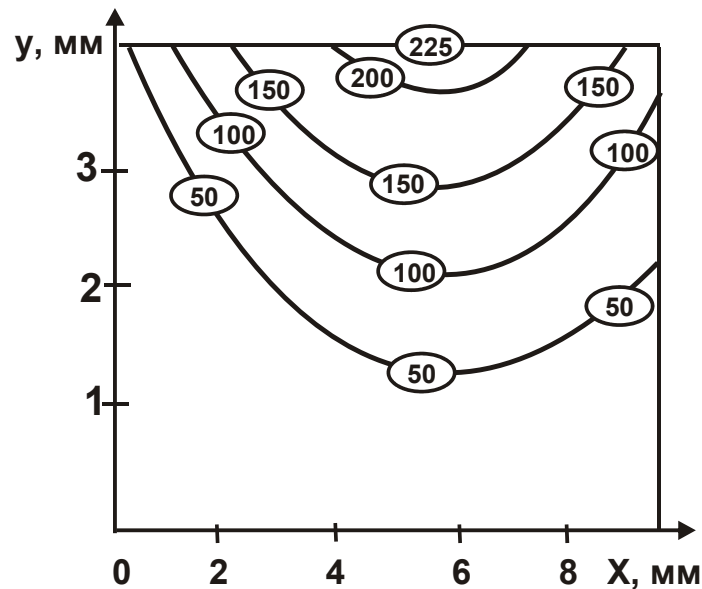


Рис. 7.21. Температурное поле в пластине

Приведенные на рис. 7.21 зависимости совпадают с аналогичными зависимостями, установленными экспериментально и приведенными в научно-технической литературе, например, в работе [63] на рис. 7.22.

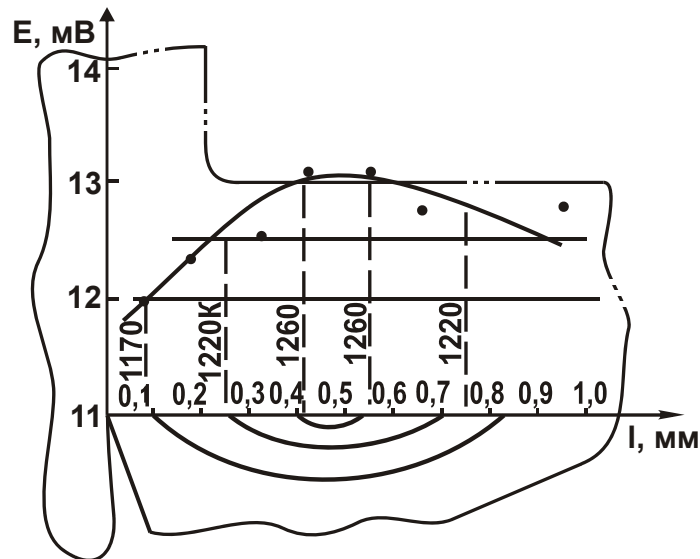


Рис. 7.22. Изменение температуры по длине l контакта передней поверхности: $V = 3,47$ м/с; $S = 0,21$ мм/об.

Таким образом установлено, что максимум температуры на передней поверхности резца обусловлен характером распределения температуры в замкнутой области (режущем клине) и описывается уравнением теплопроводности (7.1).

Зависимость (7.187) можно использовать для анализа различных процессов обработки. Например, применительно к процессу плоского шлифования (рис. 7.23) в зависимости (7.187) следует рассматривать параметр l_3 как ширину шлифования, а параметры x_1 и y_1 как размеры обрабатываемой детали. Зависимость (7.187) следует представить:

$$\theta = \frac{2 \cdot q_0 \cdot x_1}{\pi^2 \cdot \lambda} \cdot A. \quad (7.194)$$

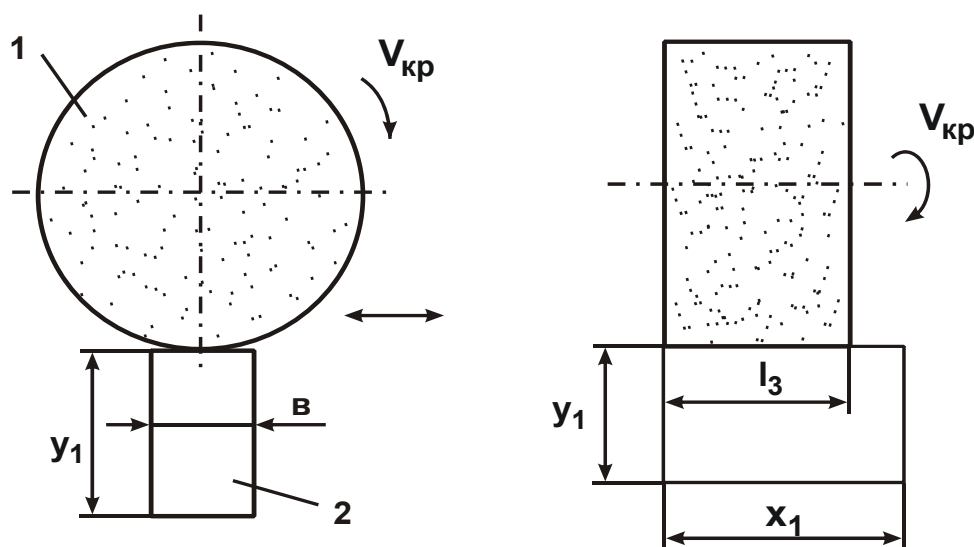


Рис. 7.23. Расчетная схема плоского шлифования: 1 – круг; 2 – деталь

Рассмотрим процесс алмазного плоского шлифования твердосплавной пластины ($x_1 = 12 \cdot 10^{-3}$ м; $y_1 = 4 \cdot 10^{-3}$ м; $l_3 = 10 \cdot 10^{-3}$ м; $A = 2,8$). Коэффициент теплопроводности λ для твердого сплава ВК8 равен $\lambda = 58,6$ Дж/м·с·град. Экспериментально установлено, что мощность шлифования $N = 2 \cdot 10^2$ Вт, а плотность теплового потока $q_0 = N/F = 4 \cdot 10^6$ Вт/м², где F – площадь контакта шлифовального круга с обрабатываемой твердосплавной пластиной.

Подставляя исходные данные в зависимость (7.194), имеем: $\theta = 465,2$ °С. Расчетное значение температуры шлифования приблизительно равно экспериментально полученному значению, что свидетельствует о достоверности математической модели, основанной на решении дифференциального уравнения теплопроводности методом Фурье разделения переменных. Этим показана возможность решения дифференциального уравнения теплопроводности методом Фурье разделения переменных применительно к теплофизическим задачам технологии машиностроения.

Выводы

1. В работе предложено решение дифференциального уравнения теплопроводности в частных производных методом Фурье разделения переменных, что является новым направлением в решении теплофизических задач технологии машиностроения, поскольку традиционно используются метод источников (метод Грина) и метод интегральных преобразований. Метод Фурье сводится к представлению искомой функции температуры в виде произведения функций, каждая из которых зависит лишь от трех координат и времени. Это позволяет перейти от дифференциального уравнения теплопроводности в частных производных к системе обычных дифференциальных уравнений, решения которых общеизвестны и не вызывают сложностей в математических преобразованиях. Используя метод Фурье разделения переменных, в работе получены решения дифференциального уравнения теплопроводности для различных начальных и граничных условий, традиционно применяемых при решении теплофизических задач технологии машиностроения.

2. Теоретически установлено распределение температуры полуплоскости для заданной постоянной температуры на определенном

участке границы полуплоскости без учета времени, т.е. на основе решения уравнения Лапласа. Показано, что положение изотермы определяется положением окружности, радиус которой тем больше, чем меньше температура. Расчетами установлено, что все окружности проходят через крайние точки на границе полуплоскости, где температура принимает заданное (ненулевое) значение. Это позволило довольно просто определить температуру в любой точке полуплоскости. Для более глубокого анализа закономерностей изменения температуры в полуплоскости определен характер изменения плотности теплового потока с геометрическим построением кривых его изменения в рассматриваемой полуплоскости.

3. Получено теоретическое решение распределения температуры в бесконечной по длине и ограниченной по ширине полосе. Показано, что переход от полуплоскости к полосе ограниченной ширины приводит к "сжатию" окружностей, определяющих положение изотерм. При этом степень "сжатия" окружностей неравномерна по ширине полосы, что не позволяет их рассматривать в форме эллипса.

4. Получено теоретическое решение распределения температуры в клине. В этом случае положение изотермы определяется сложной геометрической зависимостью, близкой к форме вытянутой окружности вдоль прямой, проходящей через вершину клина. Чем больше температура, тем ближе к вершине клина расположена изотерма.

5. Получены теоретические решения распределения температуры в полубесконечной полосе и в прямоугольной пластине. Показано, что в этих случаях температура математически определяется сходящимися рядами. Это позволяет установить распределение температуры в замкнутой области (например, прямоугольной формы) при различном положении и протяженности теплового источника.

6. Установлено нестационарное распределение температуры в полуплоскости, а с целью упрощения полученного решения – в полубесконечном стержне. Расчеты показали, что в этом случае с течением времени температура уменьшается, а это соответствует условиям задачи и свидетельствует о достоверности полученного решения.

7. Установлено распределение температуры в полуплоскости при движущемся тепловом источнике, что, например, имеет место при обработке материалов резанием. Учитывая сложность интегрирования полученных выражений, решение представлено в виде сумм ряда. По-

казано, что в данном случае распределение температуры (вглубь полуплоскости) несимметрично и зависит от времени действия теплового источника.

8. Получено теоретическое решение распределения температуры в полуплоскости для заданной плотности теплового потока. В этом случае чисто аналитически задачу решить не удалось, поэтому решение получено в виде суммы сходящегося ряда, требующего численного расчета. На этой основе определено распределение температуры в прямоугольной режущей пластине инструмента при обработке детали (для заданной плотности теплового потока). Расчеты показали, что ряд, которым представлено решение, медленно сходящийся, а достаточное число членов ряда равно 200. Установлено, что по мере удаления от места действия теплового источника наблюдается резкое снижение температуры, т.е. имеет место высокий градиент температуры. Например, при удалении от вершины режущей пластины на 0,5 мм, температура уменьшилась в 52 раза: с 266 °С до 5 °С. Наибольшая температура достигается на линии действия теплового источника (линии контакта задней поверхности режущей пластины инструмента с обрабатываемой деталью) и равна 266 °С. Это практически совпадает с экспериментальным значением температуры, равным 270 °С.

9. Полученное теоретическое решение распределения температуры в прямоугольной режущей пластине соответствует распределению температуры в зоне резания при точении, экспериментально установленной профессором Лоладзе Т. М. Также определена высокая сходимости расчетных и экспериментальных значений температуры при шлифовании, что свидетельствует о достоверности решений дифференциального уравнения теплопроводности в частных производных методом Фурье разделения переменных. Это открывает новые возможности решения теплофизических задач технологии машиностроения и поиска оптимальных условий механической обработки по температурному критерию.

Общие выводы

В работе рассмотрены современные технологии механической обработки деталей машин, металлорежущие станки с ЧПУ типа "обрабатывающий центр" и сборные лезвийные твердосплавные и керамические инструменты с износостойкими покрытиями зарубежного производства, обобщен богатый практический опыт их эффективного применения на предприятиях Украины, накопленный в крупнейшей инженеринговой компании Украины – Инженерно-Техническом Центре "ВариУс" (г. Днепр). Показана возможность существенного повышения производительности и параметров точности и качества обрабатываемых деталей машин, в том числе благодаря оптимальному проектированию технологических процессов и применению эффективного метода высокоскоростного резания, реализуемого на современных станках с ЧПУ с использованием режущих инструментов, обладающих высокой твердостью и теплостойкостью. Приведены примеры высокоэффективной обработки сложнопрофильных деталей, изготовленных из труднообрабатываемых материалов, что открывает широкие перспективы проектирования современных технологий механической обработки для станков с ЧПУ и создания с их применением конкурентоспособной машиностроительной продукции.

В системном виде обоснованы закономерности и особенности автоматизированного проектирования и программирования технологических процессов для станков с ЧПУ с применением высокотехнологичного программного продукта САПР ESPRIT. Показано, что средствами ESPRIT эффективно программировать все виды обработки на станках с ЧПУ, которые востребованы современным машиностроительным производством. Это 2 – 5-осевая фрезерная обработка, 2 – 22-осевая токарная обработка, обработка на многофункциональных токарно-фрезерных центрах и станках с осью В, а также 2 – 5-осевая электроэрозионная обработка. Благодаря наличию обширного набора трансляторов, ESPRIT напрямую работает с 3D-моделями из любой САПР, импортируя их без каких-либо повреждений.

В последние годы ESPRIT все чаще используется на предприятиях Украины, максимально реализуя потенциальные возможности современных металлорежущих станков с ЧПУ и инструментов зарубежного производства. Для более эффективного использования САПР

ESPRIT на предприятиях Украины данную систему настроили под решение конкретных задач: построена и собрана математическая модель станка; разработаны необходимые постпроцессоры для станков с ЧПУ; подготовлены инструментальные блоки; дописан требуемый функционал.

В работе получены новые теоретические решения, определяющие оптимальные условия высокопроизводительной механической обработки с учетом ограничений по параметрам точности и качества обрабатываемых поверхностей, которые могут быть использованы при проектировании технологических процессов обработки на станках с ЧПУ. Теоретически установлено, что уменьшение силовой и тепловой напряженностей процесса резания за счет снижения энергоемкости обработки (условного напряжения резания) путем обеспечения высокой режущей способности инструмента позволяет существенно повысить производительность при одновременном повышении точности и качества обрабатываемых поверхностей. В особой мере это относится к процессам шлифования высокопористыми, прерывистыми и алмазными кругами, снижающими интенсивность трения связки круга с обрабатываемым материалом и соответственно силы и температуры резания. Теоретически обоснована эффективность применения высокоскоростного резания при лезвийной обработке с точки зрения снижения температуры резания. Показана определяющая роль многопроходности съема припуска в формировании параметров точности и качества обрабатываемых поверхностей.

Определены условия снижения интенсивности автоколебаний и вынужденных колебаний, возникающих при механической обработке, что имеет большое практическое значение при проектировании технологических процессов обработки на станках с ЧПУ. В заключение работы приведены новые аналитические решения дифференциального уравнения теплопроводности материала в частных производных с использованием метода Фурье разделения переменных для различных начальных и граничных условий применительно к теплофизическим задачам технологии машиностроения. Используя эти решения, можно довольно просто рассчитать температуру резания и произвести выбор оптимальных условий обработки с учетом ограничений по температурному критерию, обеспечивая высокие показатели качества обрабатываемых поверхностей.

Список использованных источников

1. Алмазная обработка : учебное пособие / А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, Г. В. Новиков, А. А. Якимов. – Киев : ІЗМН, 1996. – 168 с.
2. Алмазно-абразивная обработка материалов : справочник / Под ред. профессора А. Н. Резникова. – Москва : Машиностроение, 1977. – 390 с.
3. Анділахай О. О. Наукові основи ефективної оздоблювальної абразивної обробки деталей затопленими струменями : автореф. дис. ... докт. техн. наук за спеціальністю 05.02.08 "Технологія машинобудування" / О. О. Анділахай. – Одеса : ОНПУ, 2013. – 47 с.
4. Андреев Г. С. Экспериментальное исследование кинематического состояния системы СПИД при периодическом прерывистом резании / Г. С. Андреев, В. С. Комаров // Надежность режущего инструмента. – Киев : Техника, 1972. – С. 190–195.
5. А. с. № 1426756 СССР, МК4 В 24 В 1/00. Способ глубинного шлифования цилиндрической детали / Ф. В. Новиков, А. А. Якимов (СССР). – № 4225397/25-08; заявл. 05.01.1987; опубл. 30.09.1988, Бюл. № 36. – 11 с. : ил.
6. А. с. № 1539046 СССР, МКИ В 24 В 1/00. Способ круглого продольного шлифования / Ф. В. Новиков, Е. И. Суворов, А. В. Якимов, Г. В. Новиков (СССР). – № 4276601/25-08; заявл. 06.07.1987; опубл. 30.01.1990, Бюл. № 4. – 8 с. : ил.
7. А. с. № 1542782 СССР, МКИ В 24 В 1/00. Способ шлифования цилиндрической детали / Ф. В. Новиков (СССР). – № 4276762/25-08; заявл. 06.07.1987; опубл. 15.02.1990, Бюл. № 6. – 9 с. : ил.
8. Байкалов А. К. Введение в теорию шлифования материалов / А. К. Байкалов. – Киев : Наукова думка, 1978. – 207 с.
9. Балакшин Б. С. Основы технологии машиностроения / Б. С. Балакшин. – Москва : Машиностроение, 1969. – 359 с.
10. Баталин А. С. Тенденции развития высокоскоростной обработки / А. С. Баталин, В. М. Мануйленко // Физические и компьютерные технологии: труды 15-й Междунар. научн.-техн. конф., 2–3 декабря 2009, Харьков. – Харьков : ХНПК "ФЭД", 2009. – С. 137–145.
11. Беззубенко Н.К. Особенности работы алмазного инструмента в интенсифицированном режиме / Н. К. Беззубенко // Резание и инструмент. – 1981. – Вып. 25. – С. 39–43.

12. Беззубенко Н. К. Повышение эффективности алмазного шлифования путем введения в зону обработки дополнительной энергии в форме электрических разрядов : автореф. дис. ... докт. техн. наук по специальности 05.03.01 "Процессы механической обработки, станки и инструменты" / Н. К. Беззубенко. – Харьков : ХГТУ, 1995. – 56 с.
13. Бетанели А. И. Расчет хрупкой прочности режущей части инструмента / А. И. Бетанели // Надежность режущего инструмента. – Киев: Техника, 1972. – С. 18–25.
14. Бобров В. Ф. Влияние угла наклона главной режущей кромки инструмента на процесс резания металлов / В. Ф. Бобров. – Москва : Машгиз, 1962. – 204 с.
15. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – Москва : Машиностроение, 1975. – 343 с.
16. Бугров Я. С. Высшая математика. Дифференциальные уравнения. Кратные интегралы. Ряды. Функции комплексного переменного / Я. С. Бугров, С. М. Никольский. – Москва : Наука. Глав. ред. физ.-мат. литературы, 1981. – 448 с.
17. Выгодский М. Я. Справочник по высшей математике / М. Я. Выгодский / Издание четвертое, стереотипное. – Москва : Гос. изд-во физ.-мат. литературы, 1959. – 783 с.
18. Високопродуктивне шліфування : навчальний посібник / О. В. Якимов, Ф. В. Новіков, Г. В. Новіков, О. О. Якимов. – Київ : ІСДО, 1995. – 180 с.
19. Глубинное шлифование деталей из труднообрабатываемых материалов / С. С. Силин, В. А. Хрульков, А. В. Лобанов, Н. С. Рыкунов. – Москва : Машиностроение, 1984. – 62 с.
20. Грабченко А. И. Расширение технологических возможностей алмазного шлифования / А. И. Грабченко. – Харьков : Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1985. – 184 с.
21. Грановский Г. И. Резание металлов : учебник / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. – Москва : Высшая школа, 1985. – 304 с.
22. Гусарев В. С. Модели процессов. Алгоритмы. Структуры технологических машин: научное издание / В. С. Гусарев. – Одесса: Изд-во "Печатный дом", 2018. – 227 с.
23. Гусарев В. С. Технологи машиностроения (Биографии основоположников) / В. С. Гусарев. – Одесса: Изд-во "Печатный дом", 2017. – 112 с.

24. Гуцаленко Ю. Г. Доцільність і особливості організації торцевого планетарного шліфування у електрофізикохімічних технологіях / Ю. Г. Гуцаленко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – Харків : ХНТУСГ, 2010. – Вип. 106. – С. 134–140.
25. Даниелян А. М. Теплота и износ инструментов в процессе резания металлов / А. М. Даниелян. – Москва : Машгиз, 1954. – 275 с.
26. Евсеев Д. Г. Физические основы процесса шлифования / Д. Г. Евсеев, А. И. Сальников. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1978. – 128 с.
27. Евсеев Д. Г. Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке / Д. Г. Евсеев. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 127 с.
28. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом. – Ленинград : Машиностроение, Ленингр. отдел., 1986. – 184 с.
29. Жовтобрюх В. А. Определение условий уменьшения себестоимости обработки деталей машин / В. А. Жовтобрюх // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 6/7 (54). – С. 50–53.
30. Жовтобрюх В. А. Повышение эффективности механической обработки деталей гидравлических систем путем выбора рациональных параметров операций по критерию себестоимости: дис. ... канд. техн. наук по специальности 05.02.08 "Технология машиностроения" / Жовтобрюх Валерий Алексеевич. – Мариуполь: ПГТУ, 2012. – 233 с.
31. Жовтобрюх В. А. Разработка и внедрение эффективных технологических процессов механической обработки / В. А. Жовтобрюх // Сучасні системи технологій у машинобудуванні. Збірник наукових праць, присвячений 90-річчю з дня народження професора Одеського національного політехнічного університету (ОНПУ) Якимова О. В. – Днепропетровськ : ЛІРА. – 2015. – С. 92–105.
32. Жовтобрюх В. А. Теоретический анализ себестоимости обработки / В. А. Жовтобрюх // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 2/1 (56). – С. 18–21.
33. Жовтобрюх В. А. Теоретический анализ условий уменьшения себестоимости механической обработки / В. А. Жовтобрюх // Вісник Харківського національного технічного університету сільського гос-

подарства ім. Петра Василенка. – Харків : ХНТУСГ, 2011. – Вип. 115. – С. 68–73.

34. Жовтобрюх В. А. Теоретическое определение теплового баланса и температуры резания при механической обработке / В. А. Жовтобрюх // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 5/5 (53). – С. 51–54.
35. Захаренко И. П. Алмазная заточка твердосплавного инструмента совместно со стальной державкой / И. П. Захаренко, А. А. Шепелев. – Киев : Наукова думка, 1976. – 219 с.
36. Захаренко И. П. Алмазные инструменты и процессы обработки / И. П. Захаренко. – Київ : Техніка, 1980. – 212 с.
37. Захаренко И. П. Основы алмазной обработки твердосплавного инструмента / И. П. Захаренко. – Киев : Наукова думка, 1981. – 300 с.
38. Интеллектуальные средства диагностики и прогнозирования надежности авиадвигателей: монография / В. И. Дубровин, С. А. Субботин, А. В. Богуслаев, В. К. Яценко. – Запорожье: ООО "МоторСич", 2003. – 279 с.
39. Качество и производительность абразивно-алмазной обработки : учебное пособие / А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, Г. В. Новиков, А. А. Якимов. – Одесса : ОГПУ, 1999. – 212 с.
40. Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке / Э. В. Рыжов, А. А. Сагарда, В. Б. Ильицкий, И. Х. Чеповецкий. – Киев : Наукова думка, 1979. – 244 с.
41. Каширин А.И. Исследование вибраций при резании металлов. – Москва : Изд-во АН СССР, 1944. – 262 с.
42. Кащук В. А. Справочник заточника / В. А. Кащук, А. Д. Мелехин, Б. П. Бармин. – Москва : Машиностроение, 1982. – 232 с.
43. Кащук В. А. Справочник шлифовщика / В. А. Кащук, А. Б. Верещагин. – Москва : Машиностроение, 1988. – 480 с.
44. Ковальчук О. М. Оптимізація структури і параметрів операцій шліфування відповідальних валів приводів шахтних конвеєрів: автореф. дис. ... канд. техн. наук за спеціальністю 05.02.08 "Технологія машинобудування" / О. М. Ковальчук. – Одеса: ОНПУ, 2008. – 21 с.
45. Кленов О. С. Технологічне забезпечення бездефектної обробки деталей гідроапаратури на фінішних операціях: автореф. дис. ...

- канд. техн. наук за спеціальністю 05.02.08 "Технологія машинобудування". – Одеса: ОНПУ, 2011. – 21 с.
46. Колев К. С. Точность обработки и режимы резания / К. С. Колев, Л. М. Горчаков. – Москва : Машиностроение, 1976. – 144 с.
 47. Коломиец В. В. Новые инструментальные материалы и область их применения: учебное пособие / В. В. Коломиец. – Киев : УМК ВО, 1990. – 64 с.
 48. Королев А. В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке / А. В. Королев. – Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 1975. – 212 с.
 49. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – Москва : Наука, 1974. – 832 с.
 50. Корчак С. Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей / С. Н. Корчак. – Москва : Машиностроение, 1974. – 280 с.
 51. Кудинов В. А. Динамика станков / В. А. Кудинов. – Москва : Машиностроение, 1967.
 52. Кремнев Г. П. Ресурсо- и энергосберегающие технологии в машиностроении : учебное пособие / Г. П. Кремнев, Ф. В. Новиков. – Днепропетровск : ЛИРА, 2016. – 297 с.
 53. Кремнев Г. П. Типовые технологические процессы механической обработки деталей машин: учебное пособие / Г. П. Кремнев, Ф. В. Новиков, В. М. Колесник. – Днепропетровск : ЛИРА, 2017. – 252 с.
 54. Кумабэ Д. Вибрационное резание: Перевод с японского. С. Л. Масленникова / Под ред. И. И. Портнова, В. В. Белова. – Москва : Машиностроение, 1985. – 424 с.
 55. Кучма Л. К. Экспериментальные исследования вибраций при резании на токарном станке / Л. К. Кучма // В кн.: "Новые исследования в области резания металлов". – Москва–Ленинград : Машгиз, 1948. – С. 100–128.
 56. Лавриненко В. И. Инструменты из сверхтвердых материалов в технологиях абразивной и физико-технической обработки : монография / В. И. Лавриненко, В. Ю. Солод. – Каменское : ДГТУ, 2016. – 529 с.
 57. Лавріненко В. І. Надтверді матеріали : посібник для допитливих / В. І. Лавріненко; Ін-т надтвердих матеріалів ім. В. М Бакуля НАН України. – Київ: Академперіодика, 2018. – 336 с.

58. Лавриненко В. І. Наукові основи шліфування інструментальних матеріалів із спрямованою зміною характеристик контактних поверхонь: автореф. дис. ... докт. техн. наук за спеціальністю 05.03.01 "Процеси механічної обробки, верстати та інструменти" / В. І. Лавриненко. – Київ : Ін-т надтв. матеріалів, 2000. – 35 с.
59. Ларшин В. П. Интегрированная технологическая система шлифования сложнопрофильных деталей (на примере резьбошлифования): автореф. дис. ... докт. техн. наук по специальности 05.02.08 "Технология машиностроения" / В. П. Ларшин. – Одесса : ОГПУ, 1995. – 33 с.
60. Лебедев В. Г. Имитационная модель автоматического управления контактной температурой шлифования / В. Г. Лебедев, Н. Н. Клименко, Т. В. Чумаченко // Фізичні та комп'ютерні технології : матеріали XXII Міжнар. науково-практ. конф., 7–9 грудня 2016, м. Харків. – Дніпро : ЛІРА, 2016. – С. 236–240.
61. Линчевский П. А. Обработка деталей на отделочно-расточных станках / П. А. Линчевский, Т. Г. Джугурян, А. А. Оргиян. – Киев : Техника, 2001. – 300 с.
62. Ловыгин А. А. Современный станок с ЧПУ и CAD/CAM-система / А. А. Ловыгин, Л. В. Теверовский. – Москва : ДМК Пресс, 2012. – 280 с.
63. Лоладзе Т. Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента / Т. Н. Лоладзе. – Москва : Машиностроение, 1982. – 320 с.
64. Лурье Г. Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования / Г. Б. Лурье. – Ленинград : Машиностроение, 1984. – 103 с.
65. Лурье Г. Б. Шлифование металлов / Г. Б. Лурье. – Москва : Машиностроение, 1969. – 197 с.
66. Малыхин В. В. Повышение эффективности шлифования вольфрамсодержащих твердых сплавов совместно со сталью алмазными кругами : дис. ... канд. техн. наук по специальности 05.03.01 "Процессы механической и физико-химической обработки, станки и инструменты" / В. В. Малыхин. – Харьков : ХПИ, 1985. – 266 с.
67. Марчук В. И. Технологические основы качества рабочих поверхностей колец роликоподшипников : автореф. дис. ... докт. техн. наук по специальности: 05.02.08 "Технология машиностроения" / В. И. Марчук. – Одесса : ОНПУ, 2004. – 36 с.

68. Маслов Е. Н. Теория шлифования металлов / Е. Н. Маслов. – Москва : Машиностроение, 1974. – 319 с.
69. Маталин А. А. Технология машиностроения : учебник / А. А. Маталин. – Ленинград : Машиностроение, 1985. – 496 с.
70. Математическое моделирование технологических систем / А. В. Усов, В. А. Вайсман, Д. В. Дмитришин и др. – Київ: Техніка, 1996. – 320 с.
71. Моделирование систем: монография / Г. А. Оборский, А. Ф. Дашенко, А. В. Усов и др. – Одесса : Астропринт, 2013. – 664 с.
72. Мурашкин А.С. Прикладная нелинейная механика станков / А. С. Мурашкин, С. А. Мурашкин. – Ленинград : Машиностроение, 1977. – 192 с.
73. Надтверді матеріали в механообробці : енциклопедичний довідник / В. І. Лавріненко, М. В. Новіков; за заг. ред. М. В. Новікова. – Київ : ІНМ ім. В. М. Бакуля НАН України, 2013. – 456 с.
74. Нежебовський В. В. Технологічне забезпечення якості обробки зубчастих коліс приводів шахтних конвеєрів на операціях зубошліфування : автореф. дис. ... канд. техн. наук за спеціальністю 05.02.08 "Технологія машинобудування" / В. В. Нежебовський. – Одеса : ОНПУ, 2011. – 21 с.
75. Новиков Г. В. Повышение эффективности алмазно-искрового шлифования деталей с высокопрочными покрытиями: дис. ... канд. техн. наук по специальности 05.02.08 "Технология машиностроения" / Г. В. Новиков. – Харьков : ХПИ, 1989. – 210 с.
76. Новиков Г. В. Повышение эффективности алмазного шлифования деталей с высокопрочными покрытиями / Г. В. Новиков // Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. – 2004. – Випуск 26. – С. 10–15.
77. Новиков Г. В. Элементы теории энергоемкости процессов механической обработки / Г. В. Новиков // Високі технології в машинобудуванні: Збірник наукових праць НТУ "ХПІ". – Харків, 2006. – Вип. 2(13). – С. 74–86.
78. Новиков Д. Ф. Инвестиционная деятельность при модернизации машиностроительных предприятий / Д. Ф. Новиков // Физические и компьютерные технологии : труды 19-й Междунар. научн.-практ. конф., 25–26 июня 2014, Харьков. – Харьков : ГП ХМЗ "ФЭД", 2014. – С. 153–156.

79. Новиков Д. Ф. Методика инвестиционного планирования технического перевооружения промышленного предприятия / Д. Ф. Новиков // Физические и компьютерные технологии : труды 20-й междунар. научн.-практ. конф., 23–24 декабря 2014, Харьков. – Днепропетровск : ЛИРА, 2015. – С. 222–225.
80. Новиков Ф. В. Математическая модель определения температуры при шлифовании на основе учета баланса тепла, уходящего в образующиеся стружки и обрабатываемую деталь / Ф. В. Новиков // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – Харків : ХНТУСГ, 2007. – Вип. 61. – С. 23–33.
81. Новиков Ф. В. Механика круглого алмазного шлифования изделий с прерывистыми поверхностями и пути ее оптимального управления: автореф. дис. ... канд. техн. наук по специальности 05.03.01 "Процессы и машины обработки материалов резанием; автоматические линии" / Ф. В. Новиков. – Киев : ИСМ, 1984. – 21 с.
82. Новиков Ф. В. Оптимальные решения в технологии машиностроения : монография / Ф. В. Новиков, В. А. Жовтобрюх, В. Г. Шкурूपий. – Днепр : ЛИРА, 2018. – 424 с.
83. Новиков Ф. В. Оптимизация параметров операций шлифования с учетом ограничений по температуре резания / Ф. В. Новиков, О. С. Кленов // Вісник НТУ "ХПІ". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2009. – № 2. – С. 45-53.
84. Новиков Ф. В. Оптимизация структуры и параметров операций шлифования плоских и внутренних цилиндрических поверхностей деталей / Ф. В. Новиков, Р. А. Бережной // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – Харків : ХНТУСГ, 2010. – Вип. 101. – С. 28–39.
85. Новиков Ф. В. Оптимизация структуры и параметров операций шлифования валов приводов шахтных конвейеров / Ф. В. Новиков, А. И. Ковальчук // Физические и компьютерные технологии : труды 14-й междунар. научн.-техн. конф., 24–25 сентября 2008, г. Харьков. – Харьков: ХНПК "ФЭД", 2008. – С. 3–13.
86. Новиков Ф. В. Оптимизация структуры процесса съема припуска при механической обработке / Ф. В. Новиков, А. Н. Ковальчук // Віс-

- ник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2005. – № 37. – С. 169–176.
87. Новиков Ф. В. Основы математического моделирования технологических процессов механической обработки : монография / Ф. В. Новиков. – Днепр : ЛИРА, 2018. – 400 с.
88. Новиков Ф. В. Основы повышения качества и производительности механической обработки : монография / Ф. В. Новиков, В. А. Жовтобрюх, Г. В. Новиков. – Днепр : ЛИРА, 2017. – 452 с.
89. Новиков Ф. В. Оценка и анализ долей энергий резания и трения в общем энергетическом балансе процесса механической обработки / Ф. В. Новиков // Резание и инструменты в технологических системах : Междунар. науч.-техн. сборник / Под общ. ред. проф. А. Н. Шелкового, редкол. : проф. А. И. Грабченко (отв. ред.) и др. – Харьков : НТУ "ХПИ", 2018. – Вып. 89 (101). – С. 117–125.
90. Новиков Ф. В. Повышение эффективности технологии финишной обработки деталей пар трения поршневых насосов / Ф. В. Новиков, С. М. Яценко // Физические и компьютерные технологии : труды 13-й междунар. научн.-техн. конф., 19–20 апреля 2007, Харьков. – Харьков : ХНПК "ФЭД", 2007. – С. 8–20.
91. Новиков Ф. В. Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования : автореф. дис. ... докт. техн. наук по специальности 05.03.01 "Процессы механической обработки, станки и инструменты" / Ф. В. Новиков. – Одесса : ОГПУ, 1995. – 36 с.
92. Новіков Ф. В. Високопродуктивне алмазне шліфування : монографія / Ф. В. Новіков. – Харків : Вид. ХНЕУ, 2014. – 412 с.
93. Новіков Ф. В. Теоретичні основи механічної обробки високоточних деталей : монографія / Ф. В. Новіков, І. О. Рябенков. – Харків : Вид. ХНЕУ, 2013. – 352 с.
94. Новоселов Ю. К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю. К. Новоселов. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1979. – 232 с.
95. Новые составы твердых смазок для лезвийной и абразивной обработки труднообрабатываемых материалов / Г. П. Кремнев, В. Б. Наддачин, А. В. Якимов и др. // Вісник інженерної академії України. – 2001. – № 3, частина 1. – С. 351–353.

96. Обработка резанием деталей с покрытиями / С. А. Клименко, В. В. Коломиец, М. Л. Хейфец и др.; под общей редакцией С. А. Клименко. – Киев : ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2011. – 353 с.
97. Основы прикладной теории колебаний и удара / Я. Г. Пановко. – 4-е изд. – Ленинград : Политехника, 1990. – 272 с.
98. Островский В. И. Теоретические основы процесса шлифования / В. И. Островский. – Ленинград : Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. – 139 с.
99. Патент на корисну модель № 125568 "Спосіб обробки внутрішньої поверхні циліндрів" / В. О. Анділахай, Д. Ф. Новіков, Ф. В. Новіков, О. О. Анділахай. – Заявка у 2017 12994, 27.12.2017. Опубл. 10.05.2018. – Бюл. № 9. – 4 с.
100. Пермяков А. А. Синтез технологических параметров высокопроизводительной обработки зубчатых реек спаренными фрезами / А. А. Пермяков, А. А. Ключко, Ю. А. Синица // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць. Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2017. – № 17 (1239). – С. 71–77.
101. Подураев В. Н. Обработка резанием с вибрациями / В. Н. Подураев. – Москва : Машиностроение, 1970. – 350 с.
102. Подураев В. Н. Резание труднообрабатываемых материалов / В. Н. Подураев. – Москва : Высшая школа, 1974. – 587 с.
103. Попов С. А. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов / С. А. Попов, Н. П. Малевский, Л. М. Терещенко. – Москва : Машиностроение, 1977. – 263 с.
104. Полянский В. И. Определение технологических возможностей механической обработки по температурному критерию / В. И. Полянский // Вісник Приазовського державного технічного університету : зб. наук. праць. – Вип. 36. – Маріуполь : ДВНЗ "ПДТУ", 2018. – С. 172–180.
105. Полянський В. І. Технологічне забезпечення якості та продуктивності механічної обробки отворів в деталях гідроапаратури: автореф. дис. ... канд. техн. наук за спеціальністю 05.02.08 "Технологія машинобудування" / В. І. Полянський. – Маріуполь : ДВНЗ "Приазовський державний технічний університет", 2012. – 21 с.
106. Резников А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А. Н. Резников. – Москва : Машиностроение, 1981. – 279 с.

107. Робочі процеси високих технологій в машинобудуванні : навчальний посібник / за ред. А. І. Грабченка. – Харків : ХДПУ, 1999. – 436 с.
108. Рыбицкий В. А. Алмазное шлифование твердых сплавов / В. А. Рыбицкий. – Киев : Наукова думка, 1980. – 223 с.
109. Рыжов Э. В. Технологическое обеспечение качества деталей с покрытиями / Э. В. Рыжов, С. А. Клименко, О. Г. Гуцаленко. – Киев : Наукова думка, 1994. – 180 с.
110. Рябенков І. О. Підвищення ефективності фінішної обробки деталей гідроапаратури на основі вибору раціональної структури і параметрів операцій : автореф. дис. ... канд. техн. наук за спеціальністю 05.02.08 "Технологія машинобудування" / І. О. Рябенков. – Одеса : ОНПУ, 2009. – 21 с.
111. Сагарда А. А. Алмазно-абразивная обработка деталей машин / А. А. Сагарда, И. Х. Чеповецкий, Л. Л. Мишнаевский. – Київ : Техніка, 1974. – 179 с.
112. Сизый Ю. А. Динамика и теплофизика шлифования / Ю. А. Сизый, Д. В. Сталинский. – Харьков: ГП УкрНТЦ "Энергосталь", 2016. – 448 с.
113. Силин С. С. Метод подобия при резании материалов / С. С. Силин. – Москва : Машиностроение, 1979. – 152 с.
114. Синтетические алмазы в машиностроении / Под ред. В. Н. Бакуля. – Киев : Наукова думка, 1976. – 351 с.
115. Сипайлов В. А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности / В. А. Сипайлов. – Москва : Машиностроение, 1978. – 166 с.
116. Современные технологии и техническое перевооружение предприятий : монография / Ф. В. Новиков, В. А. Жовтобрюх, А. А. Андилахай, Д. Ф. Новиков, В. И. Полянский. – Днепр : ЛИРА, 2018. – 400 с.
117. Старков В. К. Шлифование высокопористыми кругами / В. К. Старков. – Москва : Машиностроение, 2007. – 688 с.
118. Старцев Н. К. Исследование некоторых факторов, определяющих эффективность процесса глубинного шлифования пазов : автореф. дис. ... канд. техн. наук по специальности 05.02.08 "Технология машиностроения" / Н. К. Старцев. – Минск : БПИ, 1978. – 24 с.
119. Ташлицкий И. И. Первичный источник энергии возбуждения автоколебаний при резании металлов / И. И. Ташлицкий // Вестник машиностроения. – 1960. – №2. – С. 45–50.

120. Тверской М. М. Автоматическое управление режимами обработки деталей на станках / М. М. Тверской. – Москва : Машиностроение, 1982. – 208 с.
121. Тимошенко С. П. Теория упругости / С. П. Тимошенко, Дж. Гудьер – Москва : Наука, 1975. – 576 с.
122. Теоретические основы резания и шлифования материалов : учебное пособие / А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, Г. В. Новиков и др. – Одесса : ОГПУ, 1999. – 450 с.
123. Теоретические основы технологии машиностроения : учебник / А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, А. А. Якимов и др. – Одесса : ОНПУ, 2002. – 491 с.
124. Теплофізика механічної обробки : підручник / О. В. Якимов, А. В. Усов, П. Т. Слободяник та ін. – Одеса : Астропринт, 2000. – 256 с.
125. Технологія автоматизованого машинобудування : підручник / О. В. Якимов, В. С. Гусарев, О. О. Якимов та ін. – Одеса : ОНПУ, 2008. – 410 с.
126. Технологии производства : проблемы и решения : монография / Ф. В. Новиков, В. А. Жовтобрюх, С. А. Дитиненко и др. – Днепр : ЛИРА, 2018. – 536 с.
127. Технологические процессы формирования поверхностного слоя зубчатых колес тяжелых токарных станков с ЧПУ / А. А. Клочко, Е. В. Мироненко, О. А. Анциферова и др. // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, 2015. – Вип. № 37. – С. 105–111.
128. Узунян М. Д. Алмазно-искровое шлифование твердых сплавов / М. Д. Узунян. – Харків : НТУ "ХПІ", 2003. – 359 с.
129. Усов А. В. Управление технологическими процессами по критериям качества рабочих поверхностей / А. В. Усов, Э. Донеv // Високі технології в машинобудуванні : збірник наукових праць НТУ "ХПІ". – Харків : НТУ "ХПІ", 2002. – Вип. 1(5). – С. 259–276.
130. Федорович В. А. Динамическое математическое моделирование процесса алмазного выглаживания / В. А. Федорович, И.Н. Пыжов, Н. В. Рязанова-Хитровская, В. В. Воропай // Сучасні технології в машинобудуванні : збірник наукових праць. – Вип. 13 / редкол. :

- В. О. Федорович (голова) [та ін.]. – Харків : НТУ "ХПІ", 2018. – С. 142–152.
131. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. – Одесса : ОНПУ, 2002. – Т. 1. "Механика резания материалов". – 580 с.
132. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. – Одесса : ОНПУ, 2003. – Т. 2. "Теплофизика резания материалов". – 625 с.
133. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. – Одесса : ОНПУ, 2003. – Т. 3. "Резание материалов лезвийными инструментами". – 546 с.
134. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. – Одесса : ОНПУ, 2002. – Т. 4. "Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов". – 802 с.
135. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. – Одесса : ОНПУ, 2003. – Т. 6. "Качество обработки деталей машин". – 716 с.
136. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. – Одесса : ОНПУ, 2004. – Т. 7. "Точность обработки деталей машин". – 546 с.
137. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. – Одесса : ОНПУ, 2004. – Т. 8. "Оптимизация технологических процессов в машиностроении". – 509 с.
138. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. – Одесса : ОНПУ, 2005. – Т. 10. "Концепции развития технологии машиностроения". – 565 с.

139. Филимонов Л. Н. Высокоскоростное шлифование / Л. Н. Филимонов. – Ленинград : Машиностроение, 1979. – 245 с.
140. Хавин Г. Л. Закономерности износа инструмента, отличного от спирального сверла при обработке отверстий в композитах / Г. Л. Хавин // Фізичні та комп'ютерні технології. Матеріали XXII Міжнар. науково-практ. конф., 7–9 грудня 2016, м. Харків. – Дніпропетровськ : ЛІРА, 2016. – С. 135–138.
141. Швец В. В. Некоторые вопросы теории технологии машиностроения / В. В. Швец. – Москва : Машиностроение, 1967. – 63 с.
142. Шелковий О. М. Формування та адаптивне технологічне забезпечення ефективної спадковості інтегрованих технологій електричного розряду у життєвих циклах виробів шліфування / О. М. Шелковий, М. С. Степанов, Ю. Г. Гуцаленко // Сучасні технології в машинобудуванні: збірник наукових праць. – Вип. 13 / редкол.: В. О. Федорович (голова) [та ін.]. – Харків: НТУ "ХПІ", 2018. – С. 99-104.
143. Шлифование труднообрабатываемых материалов кругами из алмазов и эльбора: монография / П. Г. Матюха, В. В. Полтавец, А. В. Бурдин, В. В. Габитов. – Черкассы : Вертикаль, издатель Кандыч С. Г., 2015. – 252 с.
144. Чупров И. Ф. Уравнения математической физики с приложениями к задачам нефтедобычи и трубопроводного транспорта газа : учебное пособие / И. Ф. Чупров, Е. А. Канева, А. А. Мордвинов. – Ухта : УГТУ, 2004. – 128 с.
145. Якимов А. В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей / А. В. Якимов. – Москва : Машиностроение, 1984. – 212 с.
146. Якимов А. В. Высокопроизводительная обработка абразивно-алмазными инструментами / А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, А. А. Якимов. – Київ : Техніка, 1993. – 152 с.
147. Якимов А. В. Оптимизация процесса шлифования / А. В. Якимов. – Москва : Машиностроение, 1975. – 175 с.
148. Якимов А. В. Прерывистое шлифование / А. В. Якимов. – Киев–Одесса : Изд. объедин. "Вища школа", 1986. – 175 с.
149. Ящерицын П. И. Тепловые явления при шлифовании и свойства обработанных поверхностей / П. И. Ящерицын, А. К. Цокур, М. Л. Еременко. – Минск : Наука и техника, 1973. – 184 с.
150. Werner G. Technologische und Konstruktive Voraussetzungen für das Tiefschleifen / Werner G. – "Werkstattstechnik", 1979. – Nr. 10. – S. 613–620.

Содержание

Предисловие	3
Введение	15
Раздел 1. Современные технологии механической обработки и их промышленное применение	17
1.1. Криогенная обработка – новое слово в авиационной промышленности	17
1.2. Современные токарные металлорежущие инструменты.	21
1.3. SWISS TOOLS системы и инструмент для обработки отверстий	25
1.4. Высокоточные производительные метчики от компании Morse	28
1.5. Morse Cutting Tools – достойный соперник труднообрабатываемым материалам	32
1.6. Станочная оснастка SWISS TOOLS – максимально эффективное использование рабочего пространства обрабатывающего центра и повышение производительности обработки	33
1.7. Прецизионная регулировка инструмента прямо на шпинделе станка от компании Swiss Tools	37
1.8. Реализованные проекты ИТЦ "ВариУс" по токарной и фрезерной обработке деталей	39
1.9. Международные промышленные форумы с участием ИТЦ "ВариУс"	42
1.9.1. XII Международный промышленный форум	42
1.9.2. XVI Международный промышленный форум	46
1.9.3. XVII Международный промышленный форум	50
Выводы	71
Раздел 2. Технологические возможности современных металлорежущих станков с ЧПУ, применяемых на предприятиях Украины	74
2.1. DOOSAN снова вырывается вперед с серией вертикальных обрабатывающих центров Mynx!	74
2.2. Все в восторге от 5-осевой обработки: компактные вертикальные обрабатывающие центры DOOSAN серии DVF ..	80

2.3. Станки DOOSAN укрощают титан	83
2.4. Удобная автоматизация с помощью DooCell!	91
2.5. Наши multifункциональные токарные центры стали еще более производительными	94
2.6. Двухшпindelный вертикальный обрабатывающий центр – двойная эффективность обработки при той же площади занимаемой производственной поверхности ...	97
2.7. Большому стейку – большой гриль: выполняйте объемные задачи металлообработки на крупнейших станках DOOSAN	101
2.8. Как избавиться от механической головной боли или 5 причин использовать программное обеспечение DOOSAN Easy Operation Package (EOP)	108
2.9. Как подготовить собственника к приобретению горизонтального обрабатывающего центра	113
2.10. DHF 8000 – идеальное решение для обработки технологически сложных деталей	117
2.11. Новая серия обрабатывающих центров Doosan DNM 750 II – для высокоточной и высокоскоростной обработки деталей..	118
2.12. VM 1530M и VM 2035M – 3-осевые обрабатывающие центры с двумя колоннами для обработки крупногабаритных пресс-форм	120
2.13. Новая серия DNM – вертикальный обрабатывающий центр международного стандарта	122
Выводы	126
Раздел 3. Автоматизированное проектирование и программирование технологических процессов для станков с ЧПУ	129
3.1. Системы автоматизированного проектирования и программирования технологических процессов для станков с ЧПУ..	129
3.2. ESPRIT – лучший программный инструмент для производства	135
3.3. Испытайте систему ESPRIT и станьте ее фаном!	142
3.4. PROFITMILLING для эффективного фрезерования	146
3.5. В помощь инструментальным решениям: новые стратегии обработки, повышающие стойкость инструмента и производительность технологических операций	152

3.6. Новые возможности ESPRIT-2014: причины успеха в мире и в Украине	157
3.7. ESPRIT и Компас-3D – полная совместимость	163
3.8. Успешные истории побед в машиностроении	167
3.9. От ИТЦ "ВариУс" заказчик получает решение задачи, а не только набор оборудования	184
3.10. Стратегия ESPRIT ProfitTurning™	189
3.11. Обзор возможностей CAM-системы ESPRIT 2017	199
3.12. Лучшая CAM-система для управления осью В на токарно-фрезерных операциях	210
3.13. ESPRIT TNG – новое поколение программного продукта.	220
3.14. Esprit: простое решение сложных задач	228
Выводы	233
Раздел 4. Теоретические подходы к проектированию технологий высокоточной и высокопроизводительной механической обработки	237
4.1. Теоретический анализ условий повышения точности и производительности обработки при растачивании и внутреннем шлифовании	237
4.2. Расчет и анализ параметров силовой напряженности механической обработки	244
4.3. Аналитическое определение энергоемкости обработки при шлифовании	251
4.4. Теоретический анализ возможностей повышения точности и производительности при многопроходной обработке	258
4.5. Оптимизация структуры технологического процесса съема припуска по критерию наименьшего основного времени обработки с учетом ограничения по точности обработки	271
4.6. Оптимизация структуры и параметров операций круглого наружного шлифования валов приводов шахтных конвейеров	279
4.7. Оптимизация структуры и параметров процесса съема припуска при плоском шлифовании	295
Выводы	301

Раздел 5. Управление интенсивностью автоколебаний и вынужденных колебаний при механической обработке	304
5.1. Условия возбуждения автоколебаний при механической обработке	304
5.2. Анализ колебаний, возникающий от трения задней поверхности режущего инструмента с обрабатываемым материалом	316
5.3. Анализ колебаний, возникающих от трения стружки с передней поверхностью режущего инструмента	322
5.4. Колебания при переменной жесткости системы	328
5.5. Колебания при врезании режущего инструмента в обрабатываемый материал	332
5.6. Динамика периодического резания	333
5.7. Роль динамического фактора при микрорезании	337
5.8. Вынужденные колебания при резании материалов	344
5.8.1. Вынужденные колебания при резании материалов лезвийными инструментами	344
5.8.2. Вынужденные колебания при шлифовании материалов	350
Выводы	352
Раздел 6. Теоретические подходы к проектированию технологий высококачественной и высокопроизводительной механической обработки	355
6.1. Управление тепловыми процессами при механической обработке	355
6.2. Определение оптимальных условий механической обработки деталей по температурному критерию	366
6.3. Математическая модель определения температуры при глубинном шлифовании	369
6.4. Повышение эффективности операций шлифования изделий из труднообрабатываемых материалов на основе уменьшения теплонапряженности процесса	376
6.5. Оптимизация структуры и параметров операции шлифования по критерию наименьшего основного времени обработки с учетом ограничения по температуре резания..	388
6.6. Расчеты температурных напряжений при резании материалов методами теории упругости	394

6.6.1. Температурные напряжения, возникающие в отрезном алмазном круге	395
6.6.2. Температурные напряжения, возникающие в поверхностном слое обрабатываемого материала.	400
Выводы	407
Раздел 7. Расчеты температурных полей при механической обработке на основе решения дифференциального уравнения теплопроводности методом Фурье разделения переменных	410
7.1. Уравнение теплопроводности и определение распределения температуры в полуплоскости	410
7.2. Изменение плотности теплового потока	418
7.3. Распределение температуры в бесконечной полосе	425
7.4. Распределение температуры в клине	429
7.5. Действие теплового источника на некотором удалении от вершины клина	431
7.6. Распределение температуры в полубесконечной полосе.	432
7.7. Распределение температуры в прямоугольной пластине.	434
7.8. Нестационарное распределение температуры в полуплоскости	436
7.9. Теплопроводность для полубесконечного стержня	439
7.10. Распределение температуры при движущемся тепловом источнике	442
7.11. Распределение температуры в полуплоскости для заданной плотности теплового потока	444
7.12. Распределение температуры в прямоугольной пластине для заданной плотности теплового потока	447
7.13. Уточненный расчет температуры резания	451
Выводы	456
Общие выводы	459
Список использованных источников	461

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

Жовтобрюх Валерій Олексійович
Новіков Федір Васильович

**Проектування та автоматизоване
програмування сучасних
технологій для верстатів із ЧПУ**

Монографія

(Російською мовою)

Відповідальний за випуск **Новіков Ф. В.**

В авторській редакції

Підп. до друку 12.02.2019 р.
Формат 60x84/16. Друк офсетний. Ум.-друк. арк. 27,9.
Наклад 300 пр. Заказ № 105.

Видавництво і друкарня ПП "Ліра ЛТД"
49107, м. Дніпро, вул. Наукова, 5
Свідоцтво про внесення до Держреєстру
ДК № 6042 від 26.02.2018.

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ
ПРОГРАММИРОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
ДЛЯ СТАНКОВ С ЧПУ**

**В. А. Жовтобрюх
Ф. В. Новилов**

**Днепр
ЛИРА
2019**

**Днепр / ЛИРА
2019**

ISBN 978-966-981-108-0



9 789669 811080