

Ф. В. НОВИКОВ, докт. техн. наук, **С. М. ЯЦЕНКО**, (г. Харьков, Украина)

ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНОГО ФАКТОРА

У роботі приведені результати теоретичного аналізу структури і параметрів технологічного процесу механічної обробки з урахуванням температурного фактора.

The results of structural & parametric theoretical analysis of technologic process of machining taking into account of temperature factor are devoted.

При выборе оптимальной структуры и параметров операции необходимо прежде всего учитывать температурный фактор, который как правило, является основным ограничением достижения высоких показателей качества и производительности обработки [1-5]. В нашей работе [6] предложен новый подход к расчету температуры поверхностного слоя обрабатываемого материала. Используя его, можно решить ряд важных практических задач по обоснованию и выбору оптимальной структуры и параметров технологического процесса обработки. Поэтому целью настоящей работы является теоретический анализ структуры и параметров технологического процесса механической обработки с учетом температурного фактора.

Рассмотрим условия уменьшения температуры при шлифовании торцом круга прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга со скоростью $V_{рез}$.

Зависимость для определения температуры θ имеет вид [6]

$$\theta = q \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \tau}{\lambda \cdot c \cdot \rho_i}}, \quad (1)$$

где $q = \sigma \cdot V_{рез}$ - плотность теплового потока, Вт/м²; σ - условное напряжение резания, Н/м²; τ - время обработки, с; λ, c, ρ - соответственно коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/(м·К), удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К) и плотность обрабатываемого материала, кг/м³.

Как следует из зависимости (1), уменьшить температуру θ можно двумя путями: уменьшением плотности теплового потока q или времени обработки τ . Уменьшить q можно в первую очередь за счет снижения

скорости $V_{рез}$. Однако, это ведет к уменьшению производительности обработки, что не всегда эффективно. Поэтому предпочтительным путем уменьшения температуры следует рассматривать снижение времени обработки τ , которое определяется соотношением $\tau = \Pi / V_{рез}$, где Π - снимаемый припуск, м. Очевидно, уменьшить τ можно разбиением снимаемого припуска на отдельные части. Причем, чем их больше, тем меньше Π , τ и температура θ . Практически реализовать такое разделение припуска на составные части можно, выполняя обработку в несколько операций. Тогда в пределах каждой операции температура θ будет определяться по преобразованной зависимости (1):

$$\theta = \sigma \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot V_{рез} \cdot \Pi}{\lambda \cdot c \cdot \rho_M}}, \quad (2)$$

откуда

$$V_{рез} \cdot \Pi = \frac{\lambda \cdot c \cdot \rho_M \cdot \theta^2}{2 \cdot \sigma^2}, \quad (3)$$

где Π - снимаемый припуск, м.

Из зависимости (3) следует, что для заданных значений θ и σ произведение $V_{рез} \cdot \Pi$ является постоянной величиной. Следовательно, уменьшая $\Pi \rightarrow 0$, можно значительно увеличить скорость $V_{рез}$ и соответственно производительность обработки. Реализовать условие $\Pi \rightarrow 0$ можно путем периодического прерывания процесса шлифования. Это достигается, например, за счет применения прерывистого круга: в момент контакта рабочего выступа круга с обрабатываемым образцом снимается слой материала определенной (небольшой) толщины Π , а в момент прохождения впадины круга происходит остывание образца. Температура при этом значительно уменьшается, и новый рабочий выступ круга контактирует практически с охлажденным образцом.

Периодичность контакта круга с обрабатываемым образцом можно обеспечить за счет сообщения кругу или образцу в радиальном направлении вибраций (ультразвуковых колебаний), а также применяя схему шлифования с продольной подачей, которая обеспечивает периодический выход круга из контакта с образцом.

Самое простое техническое решение – это применение схемы плоского шлифования, рассматривая снимаемый припуск детали как набор адиабатических стержней расположенных перпендикулярно обрабатываемой поверхности. В этом случае время между контактами круга с фиксированным адиабатическим стержнем существенно возрастает, и он фактически успевает остыть до момента следующего контакта с кругом.

К такому же решению приходим, используя схемы круглого наружного и внутреннего шлифования периферией круга, хотя круглое наружное шлифование можно выполнить и торцом круга.

В укрупненном виде реализацией условия (3) является по сути разбиение процесса обработки на отдельные операции и переходы. В результате общий снимаемый припуск надо разделить на количество операций, что естественно приведет к уменьшению межоперационных припусков и, согласно зависимости (3), к увеличению скорости $V_{рез}$ и производительности обработки при заданных значениях θ и σ . Таким образом за счет применения операционной технологии обеспечивается уменьшение величины Π в зависимости (3) и соответственно увеличение производительности обработки. Уменьшение величины Π в результате выполнения обработки за несколько операций позволяет также уменьшить температуру θ для заданной скорости $V_{рез}$ и производительности обработки. Чем больше количество выполняемых операций, тем меньше условная величина межоперационного припуска и тем выше может быть достигнута производительность обработки с учетом ограничения по температурному фактору.

На практике принято финишные операции выполнять с меньшей производительностью и со съемом меньших припусков по сравнению с черновыми операциями. Исходя из зависимости (3), это приводит к уменьшению произведения $V_{рез} \cdot \Pi$ и температуры θ . Следовательно, данный подход направлен на снижение температуры и исключение температурных дефектов обработки, т.е. повышение качества обрабатываемых поверхностей.

Учитывая то, что температура θ и произведение $V_{рез} \cdot \Pi$ связаны между собой нелинейной зависимостью (3), для обеспечения ощутимого уменьшения температуры θ требуется значительное уменьшение произведения $V_{рез} \cdot \Pi$, т.е. уменьшения параметров $V_{рез}$ и Π . Этим и объясняется существенное отличие режимов резания и величин снимаемых припусков на операциях черновой и чистовой обработки.

Важнейшим условием уменьшения температуры θ и увеличения скорости $V_{рез}$ и производительности обработки, как следует из зависимости (3), является уменьшение условного напряжения резания σ за счет повышения режущей способности инструмента, снижения трения в зоне обработки и т.д.

При выборе оптимальных условий обработки необходимо обеспечить концентрацию образующегося тепла как можно в меньшем объеме поверхностного слоя материала, т.е. уменьшить длину адиабатического стержня l_2 , которыми условно в работах [6] представлен снимаемый припуск. Параметр l_2 определяется аналитической зависимостью:

$$l_2 = \sqrt{\frac{2\lambda \cdot \tau}{c \cdot \rho_i}}. \quad (4)$$

Как следует из зависимости (4), уменьшить l_2 можно лишь за счет уменьшения времени τ . Поэтому все выводы, сделанные выше при анализе условий уменьшения температуры θ , остаются справедливыми и при анализе условий уменьшения параметра l_2 .

Параметры θ и l_2 связаны между собой известной из курса физики зависимостью (формулой теплопроводности тела):

$$\theta = \frac{q \cdot l_2}{\lambda}. \quad (5)$$

По сути, из зависимости (5) вытекает зависимость (1), т.е. уменьшить температуру θ можно уменьшением двух параметров: q и l_2 . Поскольку плотность теплового потока q посредством скорости $V_{рез}$ связана с производительностью обработки и поэтому ее уменьшать нецелесообразно, основным путем уменьшения температуры θ является снижение параметра l_2 за счет времени обработки τ , согласно зависимости (4). Уменьшение $\tau \rightarrow 0$ предполагает уменьшение величины снимаемого припуска $\Pi \rightarrow 0$ на последнем этапе обработки.

Возникает вопрос – а какая закономерность съема припуска на предшествующих этапах (операциях и переходах)? Чтобы ответить на данный вопрос, рассмотрим условия обработки, позволяющие концентрировать образующееся при резании тепло в основном в слое снимаемого припуска, практически исключая его проникновение в поверхностный слой обрабатываемого материала. Математически это выражается условием: $\Pi = l_2$, откуда с учетом зависимости (4), определяется время обработки τ :

$$\tau = \frac{c \cdot \rho_i \cdot \Pi^2}{2 \cdot \lambda} \quad (6)$$

В общем случае $\tau = \Delta\Pi / V_{рез}$, где $\Delta\Pi$ – текущее значение снимаемого припуска, м. В результате приходим к двум неизвестным величинам $\Delta\Pi$ и $V_{рез}$. Для определения одной из них наложим ограничение на температуру θ , выражаемую зависимостью (5). При условии $l_2 = \Pi$, имеем

$$\theta = \frac{\sigma \cdot V_{рез} \cdot \Pi}{\lambda} \quad (7)$$

Из зависимости (7) определяется скорость $V_{рез}$:

$$V_{рез} = \frac{\lambda \cdot \theta}{\sigma \cdot \Pi} \quad (8)$$

Как видим, скорость $V_{рез}$ тем больше, чем больше температура θ и меньше величина снимаемого припуска Π . В результате пришли к зависимости, подобной зависимости (3). Зная параметры $V_{рез}$ и τ , определим величину $\Delta\Pi = V_{рез} \cdot \tau$ с учетом зависимостей (6) и (8):

$$\Delta\Pi = \frac{c \cdot \rho_i \cdot \theta \cdot \Pi}{2 \cdot \sigma} \quad (9)$$

или

$$\frac{\Delta\Pi}{\Pi} = \frac{c \cdot \rho_i \cdot \theta}{2 \cdot \sigma} \quad (10)$$

Как показано в работе [6] выражение $\theta^* = \frac{\sigma}{c \cdot \rho}$ определяет максимально возможную температуру, обусловленную тепловым насыщением адиабатического стержня, которыми условно представлен снимаемый припуск. Тогда зависимость (10) примет вид

$$\frac{\Delta\Pi}{\Pi} = \frac{\theta}{2 \cdot \theta^*} \quad (11)$$

Поскольку $\theta \ll \theta^*$, отношение $\Delta\Pi / \Pi$ всегда меньше единицы. Из этого вытекает, что условие $\Delta\Pi = \Pi$ может быть выполнено лишь при обеспечении температуры $\theta = 2\theta^*$. Однако с физической точки зрения это не всегда осуществимо. Поэтому снимаемый припуск Π необходимо удалять частями на отдельных операциях, переходах или за счет периодического прерывания процесса резания. Предположим, на первом этапе обработки (а это может быть первая операция или переход, первое прерывание контакта круга с обрабатываемым материалом) произведен сьем слоя материала толщиной $\Delta\Pi_1$. Оставшаяся часть припуска равна $\Pi - \Delta\Pi_1$. Тогда на втором этапе, исходя из зависимости (11), произойдет сьем слоя материала меньшей толщины $\Delta\Pi_2 < \Delta\Pi_1$, т.к. оставшийся после первого этапа припуск $\Pi - \Delta\Pi_1$ меньше начального припуска Π .

На третьем этапе произойдет сьем еще меньшего слоя припуска $\Delta\Pi_3 < \Delta\Pi_2$ и т.д. В результате на последнем этапе $\Delta\Pi_n \rightarrow 0$.

Из этого вытекает, что для выполнения условия $\Pi = l_2$ необходимо обеспечить условно периодическое прерывание процесса обработки путем разбиения его на отдельные операции или за счет периодического выхода круга из контакта с обрабатываемым материалом в пределах одной операции. Причем, снимаемый слой обрабатываемого материала с каждым последующим прерыванием процесса обработки должен уменьшаться.

Рассмотрим данную закономерность, принимая в зависимости новое обозначение $A = \frac{\theta}{2 \cdot \theta^*}$. Тогда $\frac{\Delta\Pi_1}{\Pi} = A$, откуда

$$\Delta\Pi_1 = A \cdot \Pi. \quad (12)$$

На втором этапе обработки $\frac{\Delta\Pi_2}{\Pi - \Delta\Pi_1} = A$, откуда

$$\Delta\Pi_2 = A \cdot (1 - A) \cdot \Pi. \quad (13)$$

На третьем этапе обработки $\frac{\Delta\Pi_3}{\Pi - \Delta\Pi_1 - \Delta\Pi_2} = A$, откуда

$$\Delta\Pi_3 = A \cdot (1 - A)^2 \cdot \Pi. \quad (14)$$

Аналогичным образом определяются значения $\Delta\Pi_4, \Delta\Pi_5 \dots$

В результате приходим к ряду:

$$\begin{aligned} \Delta\Pi_1 + \Delta\Pi_2 + \Delta\Pi_3 + \dots &= A \cdot \Pi + A \cdot (1 - A)^2 \cdot \Pi + A \cdot (1 - A)^3 \cdot \Pi + \dots = \\ &= A \cdot \Pi \cdot (1 + x + x^2 + x^3 + \dots), \end{aligned} \quad (15)$$

где $x = (1 - A)$.

Сумма данного ряда равна

$$\Sigma = A \cdot \Pi \left[1 + \frac{x}{(1 - x)} \right] = \Pi. \quad (16)$$

Таким образом, на каждом последующем этапе обработки величина снимаемого припуска $\Delta\Pi$ в $(1-A)$ раз меньше, чем на предыдущем этапе обработки.

Приблизительно к такому же закону изменения съема припуска во времени можно прийти, представляя зависимость (4) в виде:

$$l_2 = \Pi = \sqrt{\frac{2\lambda}{c \cdot \rho_M} \cdot \frac{\Delta\Pi}{V_{рез}}} \quad (17)$$

В первом приближении можно принять $\Delta\Pi = \frac{V}{F}$, $V_{рез} = \frac{dV}{d\tau} \cdot \frac{1}{F}$,

рассматривая скорость $V_{рез}$ переменной величиной (здесь V - объем снятого материала, m^3 ; F - площадь поперечного сечения обрабатываемого образца, m^2). После преобразования зависимости (17) приходим к линейному дифференциальному уравнению первого порядка:

$$\frac{dV}{d\tau} - \frac{2\lambda}{c \cdot \rho_i \cdot \Pi^2} \cdot V = 0. \quad (18)$$

Его решение

$$V = \left(\int d\tau \cdot c_1 \cdot e^{\int B \cdot d\tau} + c_2 \right) \cdot e^{-\int B \cdot d\tau}, \quad (19)$$

где $c_1 = 0$ (правая часть уравнения); $B = -\frac{2\lambda}{c \cdot \rho_i \cdot \Pi^2}$;

c_2 - постоянная интегрирования.

Откуда

$$V = c_2 \cdot e^{-B \cdot \tau}. \quad (20)$$

Постоянную c_2 определим из начального условия (при $\tau = 0$):

$$\frac{dV}{d\tau} \cdot \frac{1}{F} = V_{рез}.$$

Тогда зависимость (20) принимает вид

$$c_2 = F \cdot V_{рез} \quad (21)$$

или

$$V = \frac{2\lambda \cdot F \cdot V_{рез}}{c \cdot \rho_m \cdot \Pi^2} \cdot e^{\frac{2\lambda\tau}{c \cdot \rho_m \cdot \Pi^2}} \quad (22)$$

Как видим, с течением времени обработки τ объем снятого материала V увеличивается по экспоненциальному закону, приближаясь к значению $\frac{2\lambda \cdot F \cdot V_{рез}}{c \cdot \rho_m \cdot \Pi^2}$.

Таким образом, в работе показаны закономерности объема припуска с учетом температурного фактора, обоснованы структура и параметры технологического процесса механической обработки с учетом температурного фактора.

Список литературы: 1. Маслов Е.Н. Теория шлифования металлов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с. 2. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования. – М.: Машиностроение, 1975. – 176 с. 3. Якимов А.В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с. 4. Теоретические основы резания и шлифования материалов: Учеб. пособие / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, Б.С. Серов, А.А. Якимов. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с. 5. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т.4. "Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов". – Одесса: ОНПУ, 2002. – 802 с. 6. Новиков Ф.В., Яценко С.М. Новый упрощенный подход к расчету температуры поверхностного слоя детали при ее механической обработке. – Труды 11-й Международной научно-технической конференции „Физические и компьютерные технологии“, 2-3 июня 2005 г. – Харьков: ХНПК „ФЭД“, 2005. – С. 137-146.

Поступила в редакцию 01.06.05