

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ С УЧЕТОМ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ПРЕРЫВАНИЯ ПРОЦЕССА

Полянский В.И.

(ООО "Империя Металлов", г. Харьков)

Теоретически определены оптимальные условия шлифования по критерию наименьшего основного времени обработки с учетом ограничения по температуре шлифования

Введение и постановка задачи. При изготовлении ответственных деталей гидроагрегатов авиационного назначения из труднообрабатываемых материалов возникают проблемы повышения качества и производительности обработки. Их решение требует применения современных методов абразивной и лезвийной обработки (в особенности шлифования), обеспечивающих снижение силовой и тепловой напряженности процесса резания [1,2,3]. Для обоснования условий их эффективного использования и выбора оптимальных режимов шлифования важно знать физические закономерности формирования параметров качества обработки под воздействием теплового фактора.

Цель работы – определение оптимальных условий шлифования по критерию наименьшего основного времени обработки с учетом ограничения по температуре шлифования.

Результаты исследований. Температура при шлифовании прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга с постоянной скоростью $V_{рез}$, определяется зависимостью [4]:

$$\theta_{max} = \frac{q_0 \cdot a}{\lambda} \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta\tau} = 1,414 \cdot a \cdot \frac{\sigma}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{\dot{I}^2}{\Delta\tau}}, \quad (1)$$

где $q_0 = \sigma \cdot V_{рез}$ – плотность теплового потока, Вт/м²; σ – условное напряжение резания, Н/м² (энергоемкость обработки, Дж/м³); $V_{рез} = \Pi / \Delta\tau$; Π – величина снятого припуска за время $\Delta\tau$; $\dot{a}^2 = \lambda / (\tilde{n} \cdot \rho)$ – коэффициент температуропроводности обрабатываемого материала, м²/с; c – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К); λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/м·К; ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³.

Из (1) определим $\Delta\tau$ для предельной температуры шлифования θ_{max_0} :

$$\Delta\tau = \left(\frac{1,414 \cdot a \cdot \sigma \cdot \dot{I}}{\lambda \cdot \theta_{max_0}} \right)^2. \quad (2)$$

Как видно, уменьшить основное время обработки $\Delta\tau$ можно уменьшением параметров σ , Π и увеличением θ_{max_0} . Очевидно, для заданных значений

Π и θ_{max_0} уменьшить $\Delta\tau$ можно исключительно за счет уменьшения энергоемкости обработки σ путем повышения режущей способности круга и уменьшения интенсивности трения в зоне шлифования.

Из зависимости (2) вытекает еще один путь уменьшения $\Delta\tau$ – это уменьшение параметра Π за счет удаления снимаемого припуска частями (разбивая припуск Π на n частей и обеспечивая периодическое прерывание процесса шлифования). Так, рассматривая в (2) вместо Π параметр Π/n , имеем

$$\Delta\tau_n = \left(\frac{1,414 \cdot a \cdot \sigma \cdot \dot{I}}{\lambda \cdot \theta_{max_0} \cdot n} \right)^2. \quad (3)$$

Как видно, с увеличением n основное время обработки $\Delta\tau_n$ существенно уменьшается. Однако, для реализации данной закономерности необходимо обеспечить полное охлаждение обрабатываемой детали в период прерывания процесса шлифования. В противном случае данная закономерность выполняться не будет и температура шлифования θ_{max} с каждым последующим прерыванием процесса шлифования будет увеличиваться, что нивелирует эффект обработки. Это вытекает из зависимости (1), рассматривая в ней вместо $\Delta\tau$ время $\Delta\tau_n$, определяемое зависимостью (3):

$$\theta_{max} = n \cdot \theta_{max_0}. \quad (4)$$

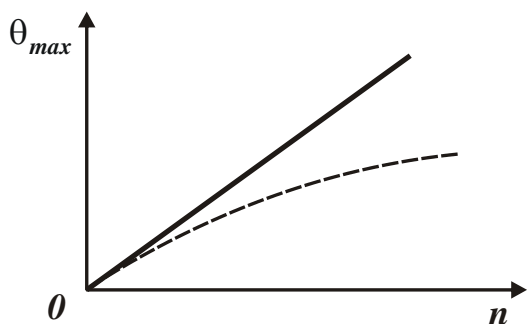


Рис. 1. Зависимость θ_{max} от n .

С увеличением количества прерываний процесса шлифования n температура шлифования θ_{max} пропорционально увеличивается (рис. 1). Следовательно, эффект обработки, связанный с прерывистостью процесса шлифования, как показано выше, может быть реализован лишь при условии

полного охлаждения обрабатываемой детали в период прерывания процесса. При неполном (частичном) охлаждении обрабатываемой детали температура шлифования θ_{max} с увеличением n также будет увеличиваться, однако с меньшей интенсивностью (на рис. 1 показано штриховой линией). Поэтому задача оптимизации условий обработки состоит, во-первых, в определении количества прерываний процесса шлифования n , при которых обеспечивается полное охлаждение обрабатываемой детали в период прерывания процесса. Во-вторых, в определении количества прерываний процесса шлифования n , при которых происходит ее частичное охлаждение, но температура шлифования не превышает предельного значения. Очевидно, и в первом, и во втором случае трудно обеспечить условия охлаждения детали. Поэтому вполне возможно, что температура шлифования будет превышать предельные значения и приводить к образованию прижогов и других температурных дефектов на обрабатываемой поверхности.

Чтобы этого не допустить и гарантированно обеспечить высокое качество обработки, необходимо, во-первых, с определенным запасом устанавливать количество прерываний процесса шлифования n , а, во-вторых, съём заданного припуска производить за одно прерывание процесса (рис. 2). В этом случае,

естественно, основное время обработки будет наибольшим, но будет гарантировано обеспечиваться высокое качество обработки. Скорость $V_{рез}$ будет наименьшей, также как наименьшей будет и производительность обработки $Q = V_{рез} \cdot S$, где S – площадь поперечного сечения обрабатываемой прямолинейной детали. Следовательно, для обеспечения высокого качества обработки необходимо уменьшать производительность обработки.

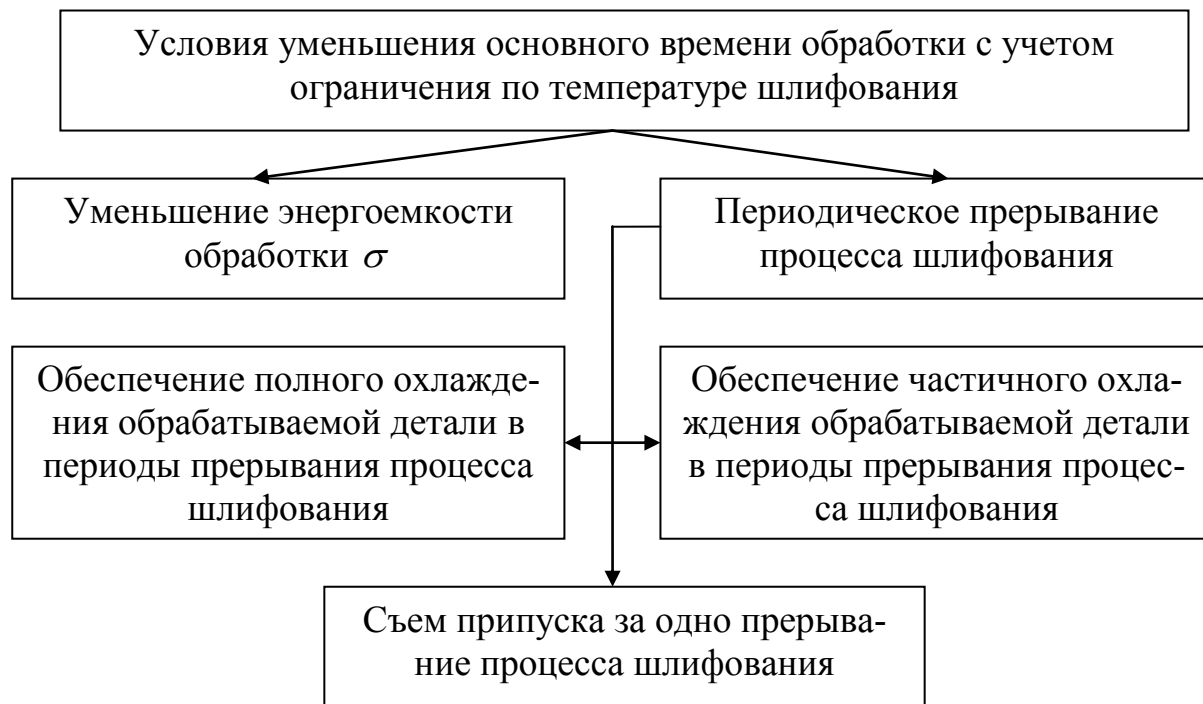


Рис. 2. Структурная схема условий уменьшения основного времени обработки с учетом ограничения по температуре шлифования.

Для количественной оценки данных решений получим аналитическую зависимость для определения температуры шлифования с учетом периодического нагревания и охлаждения обрабатываемого образца. Предположим, что в течение времени τ_1 на торце прямолинейного образца действует тепловой поток с постоянной плотностью q_0 , и образец нагревается, а в течение времени τ_2 происходит его охлаждение ($q_0=0$). Далее, процесс нагревания и охлаждения обрабатываемого образца периодически повторяется в соответствии со схемой, показанной на рис. 3.

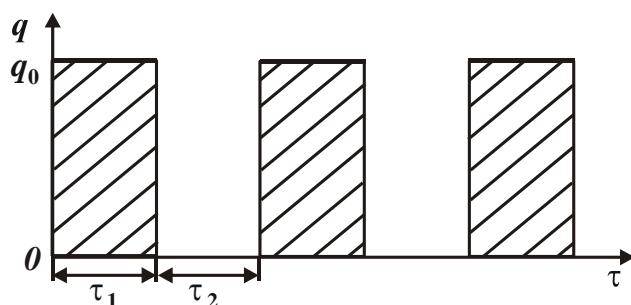


Рис. 3. Схема действия тепловых импульсов на обрабатываемый образец.

С физической точки зрения это означает, что на образец периодически действуют тепловые импульсы с плотностью q_0 .

Уравнение баланса тепла в течение времени $\tau_1 + \tau_2$ выражается

$$Q_1 - Q_2 = \Delta Q_1, \quad (5)$$

где $Q_1 = q_0 \cdot S \cdot \tau_1$ – количество тепла, вошедшее в образец в течение време-

ни τ_1 от действия теплового потока с плотностью q_0 , Дж; S – площадь поперечного сечения образца, м²; $Q_2 = \alpha \cdot (\theta - \theta_0) \cdot S \cdot \tau_2$ – количество тепла, выделившееся из образца за время τ_2 при его охлаждении, Дж; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); θ – температура нагревания образца за время τ_1 , К; θ_0 – температура образца после его охлаждения (в течение времени τ_2), К; ΔQ_1 – количество тепла, оставшееся в образце после охлаждения, Дж.

Величину ΔQ_1 , аналогично величине Q_1 , выразим $\Delta Q_1 = q_0 \cdot S \cdot \Delta \tau_1$, где $\Delta \tau_1$ – время нагревания образца до температуры θ_0 , с. Тогда (5) примет вид

$$q_0 \cdot (\tau_1 - \Delta \tau_1) = \alpha \cdot (\theta - \theta_0) \cdot \tau_2. \quad (6)$$

С учетом зависимости (1), представленной в виде

$$(\theta - \theta_0) = \frac{q_0}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho}} \cdot (\tau_1 - \Delta \tau_1), \quad (7)$$

определим $\Delta \tau_1$:

$$\Delta \tau_1 = \tau_1 - \frac{2 \cdot \alpha^2}{\tilde{n} \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \tau_2^2. \quad (8)$$

Максимальная температура образца после его охлаждения будет равна

$$\theta_0 = q_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda}} \cdot \Delta \tau_1 = q_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda}} \cdot \left(\tau_1 - \frac{2 \cdot \alpha^2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \tau_2^2 \right). \quad (9)$$

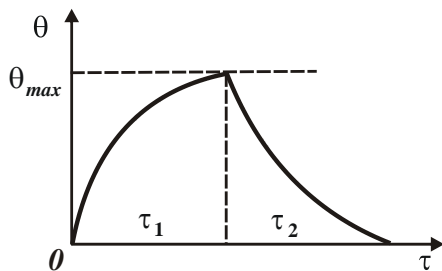


Рис. 4. Зависимость θ от τ .

После охлаждения образца его максимальная температура меньше, чем до охлаждения ($\tau_2 = 0$):

$$\theta_0 = q_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda}} \cdot \tau_1. \quad (10)$$

При условии $\tau_1 = \frac{2 \cdot \alpha^2}{\tilde{n} \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \tau_2^2$ температура

θ_0 , описываемая (9), равна нулю. Это означает,

что количество тепла, вошедшее в обрабатываемый образец за время τ_1 , и вышедшее из образца за время τ_2 , одинаковы (рис. 4).

Выразим в (9) и (10): $q_0 = \sigma \cdot V_{\partial \dot{a} \dot{c}} [4]$, где $V_{\partial \dot{a} \dot{c}} = \dot{I} / \tau_1$, тогда

$$\theta_0 = \sigma \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \dot{I}^2}{c \cdot \rho \cdot \lambda}} \cdot \left(\frac{1}{\tau_1} - \frac{2 \cdot \alpha^2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{\tau_2^2}{\tau_1^2} \right); \quad \theta = \sigma \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda}} \cdot \frac{\dot{I}^2}{\tau_1}.$$

После действия на образец второго теплового импульса (т.е. в момент времени $2 \cdot \tau_1 + \tau_2$, рис. 3) температура θ в соответствии с (10) выразится

$$\theta_0 = q_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda}} \cdot (\Delta \tau_1 + \tau_1) = q_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda}} \cdot \left(2 \cdot \tau_1 - \frac{2 \cdot \alpha^2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \tau_2^2 \right). \quad (11)$$

После охлаждения образца в момент времени $2 \cdot \tau_1 + 2 \cdot \tau_2$ (рис. 3) температура θ_0 , аналогично зависимости (10), определится

$$\theta_0 = q_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \Delta \tau_2} . \quad (12)$$

Для определения $\Delta \tau_2$ составим уравнение, аналогичное уравнению (6):

$$q_0 \cdot [(\Delta \tau_1 + \tau_1) - \Delta \tau_2] = \alpha \cdot (\theta - \theta_0) \cdot \tau_2 . \quad (13)$$

С учетом зависимости (7), представленной в виде

$$(\theta - \theta_0) = \frac{q_0}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho}} \cdot [(\Delta \tau_1 + \tau_1) - \Delta \tau_2], \text{ установим } \Delta \tau_2 :$$

$$\Delta \tau_2 = (\Delta \tau_1 + \tau_1) - \frac{2 \cdot \alpha^2}{\tilde{n} \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \tau_2^2 = 2 \cdot \tau_1 - 2 \cdot \frac{2 \cdot \alpha^2}{\tilde{n} \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \tau_2^2 = 2 \cdot \left(\tau_1 - \frac{2 \cdot \alpha^2}{\tilde{n} \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \tau_2^2 \right) . \quad (14)$$

Подставляя зависимость (14) в (12), температура θ_0 определится

$$\theta_0 = q_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot 2 \cdot \left(\tau_1 - \frac{2 \cdot \alpha^2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \tau_2^2 \right)} .$$

После действия на образец 3-го теплового импульса (т.е. в момент времени $3 \cdot \tau_1 + 2 \cdot \tau_2$, рис. 3) температура θ , аналогично зависимости (11), выразится

$$\theta = q_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot (\Delta \tau_2 + \tau_1)} = q_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \left(3 \cdot \tau_1 - 2 \cdot \frac{2 \cdot \alpha^2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \tau_2^2 \right)} .$$

После охлаждения образца в момент времени $3 \cdot \tau_1 + 3 \cdot \tau_2$ (рис. 3) температура θ_0 опишется $\theta_0 = q_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \Delta \tau_3} .$

Время $\Delta \tau_3$ определяется из уравнения, аналогичного уравнению (13):

$$q_0 \cdot [(\Delta \tau_2 + \tau_1) - \Delta \tau_3] = \alpha \cdot (\theta - \theta_0) \cdot \tau_2 .$$

С учетом зависимости $(\theta - \theta_0) = \frac{q_0}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho}} \cdot [(\Delta \tau_2 + \tau_1) - \Delta \tau_3]$, имеем

$$\Delta \tau_3 = (\Delta \tau_2 + \tau_1) - \frac{2 \cdot \alpha^2}{\tilde{n} \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \tau_2^2 = 3 \cdot \left(\tau_1 - \frac{2 \cdot \alpha^2}{\tilde{n} \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \tau_2^2 \right) . \quad (15)$$

С учетом зависимости (15) температура θ_0 определится

$$\theta_0 = q_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot 3 \cdot \left(\tau_1 - \frac{2 \cdot \alpha^2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \tau_2^2 \right)} . \quad (16)$$

Аналогично можно определить время $\Delta \tau_n$ и температуру θ_0 после действия n -ного теплового импульса и охлаждения обрабатываемого образца:

$$\Delta \tau_n = n \cdot \left(\tau_1 - \frac{2 \cdot \alpha^2}{\tilde{n} \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \tau_2^2 \right); \quad (17)$$

$$\theta_0 = q_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot n \cdot \left(\tau_1 - \frac{2 \cdot \alpha^2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \tau_2^2 \right)} . \quad (18)$$

Максимальная температура θ_{max} после действия n -ного теплового импульса с учетом соотношения $q_0 = \sigma \cdot V_{\delta\dot{a}c} = \sigma \cdot (\dot{I} / \delta \cdot \tau_1)$ определится

$$\theta_{max} = \sigma \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{\dot{I}^2}{m^2 \cdot \tau_1^2} \left(n \cdot \tau_1 - (n-1) \cdot \frac{2 \cdot \alpha^2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \tau_2^2 \right)}. \quad (19)$$

Из зависимости (18) вытекает, что при заданном значении плотности теплового потока q_0 температура θ_0 с увеличением количества тепловых импульсов n непрерывно увеличивается (рис. 5,а).

При условии $\tau_1 = \frac{2 \cdot \alpha^2}{\tilde{n} \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \tau_2^2$ температура θ_0 равна нулю независимо от количества тепловых импульсов n . Это означает, что характер изменения температуры шлифования θ подчиняется зависимости, графически показанной на рис. 5,б. В этом случае количество тепла, входящего в обрабатываемый образец за время действия теплового импульса τ_1 , равно количеству тепла, выходящего из образца за время его охлаждения за время τ_2 .

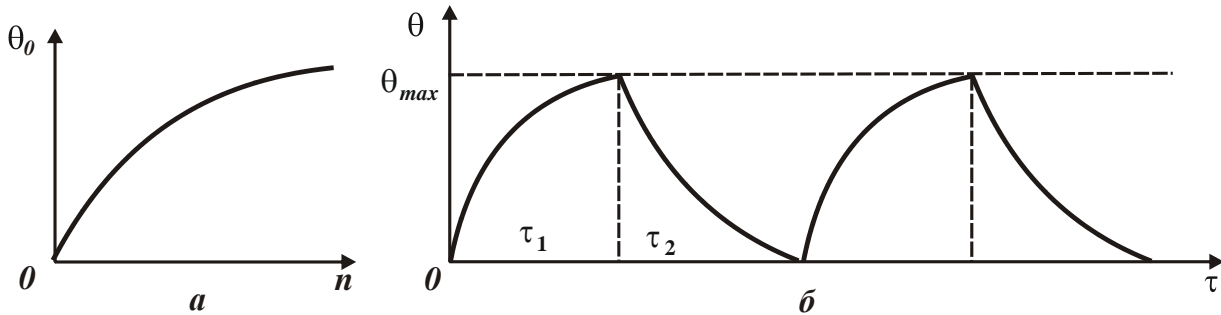


Рис. 5. Характер изменения температуры θ_0 от количества тепловых импульсов n (а) и температуры шлифования θ от времени τ (б).

С учетом $q_0 = \sigma \cdot V_{\delta\dot{a}c} = \sigma \cdot (\dot{I} / \delta \cdot \tau_1)$ зависимость (16) примет вид

$$\theta_0 = \sigma \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \dot{I}^2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{n}{m^2} \cdot \left(\frac{1}{\tau_1} - \frac{2 \cdot \alpha^2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{\tau_2^2}{\tau_1^2} \right)}, \quad (20)$$

где m – количество разбиений припуска \dot{I} на части.

Количество тепловых импульсов $n \leq m$. При $n = m$ зависимость (20) равна

$$\theta_0 = \sigma \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \dot{I}^2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{1}{m} \cdot \left(\frac{1}{\tau_1} - \frac{2 \cdot \alpha^2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{\tau_2^2}{\tau_1^2} \right)}. \quad (21)$$

С увеличением количества разбиений припуска \dot{I} на части m температура θ_0 уменьшается. При условии $\tau_1 = \frac{2 \cdot \alpha^2}{\tilde{n} \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \tau_2^2$ температура θ_0 равна нулю независимо от количества тепловых импульсов m , т.е. характер изменения температуры шлифования θ с увеличением n подчиняется закономерности, графически показанной на рис. 5,а.

Из зависимости (21) вытекают три основных условия уменьшения температуры θ_0 . Первое условие состоит в уменьшении энергоемкости обработки σ .

Второе условие состоит в увеличении количества разбиений припуска \dot{I} на части m , а третье – в обеспечении равенства слагаемых подкоренного выражения $\frac{1}{\tau_1} = \frac{2 \cdot \alpha^2}{\tilde{n} \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{\tau_2^2}{\tau_1^2}$. Очевидно, реализация третьего случая предполагает стабилизацию во времени (с увеличением n) максимального значения температуры θ_{max} (рис. 5,б), тогда как в первых двух случаях температура шлифования θ с течением времени обработки увеличивается (рис. 5,а), причем, тем интенсивнее, чем меньше время охлаждения обрабатываемого образца τ_2 . Следовательно, добиться уменьшения температуры θ_0 можно повышением режущей способности шлифовального круга и снижением интенсивности трения в зоне шлифования, применением многопроходного шлифования и обеспечением условий полного или частичного охлаждения обрабатываемого образца в периоды прерывания процесса шлифования.

Определим наименьшее основное время обработки τ с учетом ограничения по максимальной температуре шлифования θ_{max} для условий полного и частичного охлаждения обрабатываемого образца в период прерывания процесса шлифования. Первоначально рассмотрим случай полного охлаждения обрабатываемого образца, когда $\theta_0=0$. Тогда, исходя из (21), имеем $\tau_1 = \frac{2 \cdot \alpha^2}{\tilde{n} \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \tau_2^2$.

Основное время обработки τ в общем случае определяется

$$\tau = m \cdot \tau_1 + (m-1) \cdot \tau_2 = m \cdot \tau_1 + (m-1) \cdot \sqrt{\frac{c \cdot \rho \cdot \lambda}{2 \cdot \alpha^2}} \cdot \tau_1 \quad (22)$$

Время τ_1 определяется из (17) для $n=1$: $\tau_1 = \left(\frac{\sigma \cdot \dot{I}}{\theta_{max} \cdot m} \right)^2 \cdot \frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda}$.

Соответственно зависимость (22) примет вид

$$\tau = \left(\frac{\sigma \cdot \dot{I}}{\theta_{max}} \right)^2 \cdot \frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{1}{m} + \left(\frac{\sigma \cdot \dot{I}}{\theta_{max}} \right) \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{(m-1)}{m} \quad (23)$$

Из зависимости (23) вытекает, что основное время обработки τ тем меньше, чем меньше величина $\left(\frac{\sigma \cdot \dot{I}}{\theta_{max}} \right)$ и больше количество прерываний процесса шлифования m и коэффициент теплоотдачи α . В табл. 1 приведены расчетные значения параметров τ_1 , τ_2 , τ_1/τ_2 (соответственно τ_2/τ_1) и τ для различных значений $\sigma=10^5$ Н/мм²; $0,707 \cdot 10^5$ Н/мм²; $0,5 \cdot 10^5$ Н/мм²; $0,354 \cdot 10^5$ Н/мм²; $0,25 \cdot 10^5$ Н/мм² и исходных данных: $\rho=14,5 \cdot 10^3$ кг/м³; $c=40$ кал/(кг·град); $\lambda=14$ кал/(м·с·град); $\alpha=10^4$ кал/(м²·с·град); $\theta_{max}=1000^\circ\text{C}$; $\Pi=0,1$ мм; $\left(\frac{\tilde{n} \cdot \rho \cdot \lambda}{2} \right) \cdot \left(\frac{\theta_{max}}{\sigma} \right)^2 = 7 \cdot 10^{-9}$ м²/с; $\frac{2 \cdot \alpha^2}{\tilde{n} \cdot \rho \cdot \lambda} = 25$ с⁻¹; $\tau_2 = \sqrt{\frac{\tilde{n} \cdot \rho \cdot \lambda}{2 \cdot \alpha^2}} \cdot \tau_1$.

Из табл. 1 следует, что с увеличением m параметры τ_1 , τ_2 , τ_1/τ_2 и τ уменьшаются. Чем меньше σ , тем меньше τ и больше τ_2/τ_1 (рис. 6). С увеличе-

нием m время τ непрерывно уменьшается, асимптотически приближаясь к определенному значению. Исходя из зависимости (23), с учетом $m \rightarrow \infty$ это значение можно определить по зависимости $\tau_* = \left(\frac{\sigma \cdot \dot{I}}{\theta_{max}} \right) \cdot \frac{1}{\alpha}$.

Таблица 1

Расчетные значения основных параметров обработки (для $\sigma = 10^5$ Н/мм²)

m	1	2	3	4	8	16	32	64
$\tau_1, \text{с}$	1,43	0,355	0,158	0,089	0,0222	0,00554	0,00139	0,000347
$\tau_2, \text{с}$	–	0,12	0,08	0,06	0,03	0,015	0,0075	0,00375
τ_1/τ_2	–	2,96	1,98	1,48	0,74	0,37	0,185	0,092
τ_2/τ_1	–	0,338	0,505	0,676	1,351	2,7	5,4	10,87
$\tau, \text{с}$	1,43	0,83	0,63	0,535	0,388	0,313	0,277	0,258
$l, \text{м}$	–	10,65	4,74	2,67	0,666	0,166	0,042	0,01

Для $\sigma = 10^5$ Н/мм² отношение наибольшего значения τ_1 и значения τ_* равно $\tau_1/\tau_* = 1,42/0,24 = 5,9$. Для $\sigma = 0,707 \cdot 10^5$ Н/мм² – отношение $\tau_1/\tau_* = 0,71/0,17 = 4,18$; для $\sigma = 0,5 \cdot 10^5$ Н/мм² – отношение $\tau_1/\tau_* = 0,355/0,12 = 2,96$; для $\sigma = 0,354 \cdot 10^5$ Н/мм² – отношение $\tau_1/\tau_* = 0,1775/0,085 = 2,09$; для $\sigma = 0,25 \cdot 10^5$ Н/мм² – отношение $\tau_1/\tau_* = 0,8875/0,06 = 1,48$. Как видно, с уменьшением σ отношение τ_1/τ_* существенно уменьшается, что снижает эффект периодического прерывания процесса шлифования. Необходимо отметить, что данный эффект обработки достигается при условии полного охлаждения обрабатываемой детали в период прерывания процесса шлифования. При частичном охлаждении обрабатываемой детали в период прерывания процесса шлифования отношение τ_2/τ_1 будет меньше и, в зависимости от времени охлаждения τ_2 , будет изменяться от значения τ_1/τ_* до единицы. Условие $\tau_2/\tau_1 = 1$ выполняется при отсутствии прерывания процесса шлифования и охлаждении обрабатываемой детали.

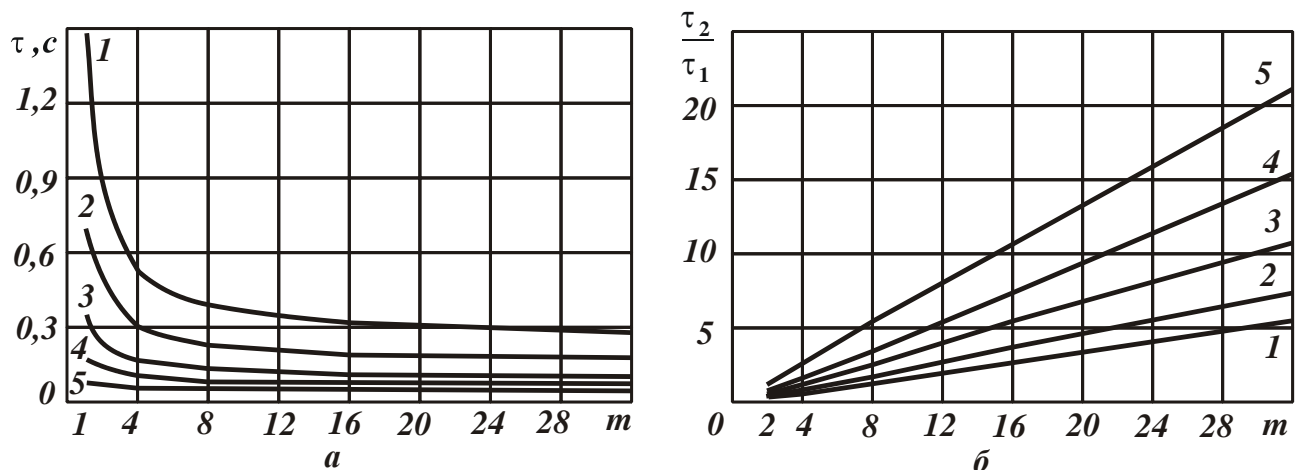


Рис. 6. Зависимости τ (а) и τ_2/τ_1 (б) от m : 1 – $\sigma = 10^5$ Н/мм²; 2 – $\sigma = 0,707 \cdot 10^5$ Н/мм²; 3 – $\sigma = 0,5 \cdot 10^5$ Н/мм²; 4 – $\sigma = 0,354 \cdot 10^5$ Н/мм²; 5 – $\sigma = 0,25 \cdot 10^5$ Н/мм².

Определим наименьшее основное время обработки τ для условия частичного охлаждения обрабатываемой детали в период прерывания процесса шлифования. Проведем анализ изменения τ для различных значений m .

Случай $m=1$. При съеме припуска \dot{I} за одно прерывание процесса шлифования температура θ определяется зависимостью (1) и с учетом текущего

времени обработки $\tau = \Delta\tau$ и $V_{\dot{a}\dot{c}} = \dot{I} / \tau_1$ описывается $\theta = \sigma \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{\dot{I}^2}{\tau_1^2} \cdot \tau}$.

При $\tau = \tau_1$ температура $\theta = \theta_{\max}$, тогда $\tau_1 = \left(\frac{\sigma}{\theta_{\max}}\right)^2 \cdot \frac{2 \cdot \dot{I}^2}{\tilde{n} \cdot \rho \cdot \lambda}$.

В итоге пришли к зависимости (2).

Случай $m=2$. При съеме припуска \dot{I} за два прерывания процесса шлифования образца θ_{\max} с учетом $q_0 = \sigma \cdot V_{\dot{a}\dot{c}} = \sigma \cdot \frac{\dot{I}}{2 \cdot \tau_1}$ определяется зависимостью (19). После первого ($n=1$) прерывания процесса θ_{\max} описывается

$$\theta_{\max} = \sigma \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{\dot{I}^2}{4 \cdot \tau_1}}. \quad (24)$$

Максимальная температура шлифования θ_{\max} после 2-го прерывания ($n=2$) процесса определяется преобразованной зависимостью (24):

$$\theta_{\max} = \sigma \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{\dot{I}^2}{4 \cdot \tau_1^2} \cdot (\tau_1 + \Delta\tau_1)} = \sigma \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{\dot{I}^2}{4 \cdot \tau_1} \cdot \left(1 + \frac{\Delta\tau_1}{\tau_1}\right)}. \quad (25)$$

Здесь время τ_1 определяет время съема припуска $\dot{I} / 2$, а время $\Delta\tau_1$ выражается (8). Соответственно после 1-го прерывания процесса и охлаждения образца температура θ_0 , определяемая (21) после преобразований выразится

$$\theta_0 = \sigma \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{\dot{I}^2}{4 \cdot \tau_1} \cdot \Delta\tau_1}. \quad (26)$$

Задавая значения θ_{\max} , из зависимости (25) можно определить время τ_1 и $\Delta\tau_1$ для заданного времени охлаждения обрабатываемого образца τ_2 :

$$\tau_1 = \left(\frac{\sigma}{\theta_{\max}}\right)^2 \cdot \frac{\dot{I}^2}{2 \cdot \tilde{n} \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \left(1 + \frac{\Delta\tau_1}{\tau_1}\right), \quad \text{откуда} \quad (27)$$

$$\Delta\tau_1 = \frac{\tau_1 \cdot (\tau_1 - D)}{D}, \quad \text{где} \quad D = \left(\frac{\sigma}{\theta_{\max}}\right)^2 \cdot \frac{\dot{I}^2}{2 \cdot \tilde{n} \cdot \rho \cdot \lambda}.$$

Время охлаждения образца τ_2 можно определить по зависимости

$$\tau_2 = \sqrt{\frac{c \cdot \rho \cdot \lambda}{2 \cdot \alpha^2} \cdot (\tau_1 - \Delta\tau_1)}. \quad (28)$$

Произведем численные расчеты для исходных данных: $\rho=14,5 \cdot 10^3$ кг/м³; $c=40$ кал/(кг·град); $\lambda=14$ кал/(м·с·град); $\alpha=10^4$ кал/(м²·с·град); $\theta_{\max}=1000^0\text{C}$;

$\sigma=10^5 \text{ Н/мм}^2$; $l=0,1 \text{ мм}$. Из (27) вытекает, что при $\Delta \tau_1=0$ время $\tau_1=0,355 \text{ с}$. Тогда в соответствии с зависимостью (28) время $\tau_2=0,12 \text{ с}$. В этом случае, исходя из (26), температура $\theta_0=0$. График изменения θ во времени показан на рис. 7,а (кривая 1).

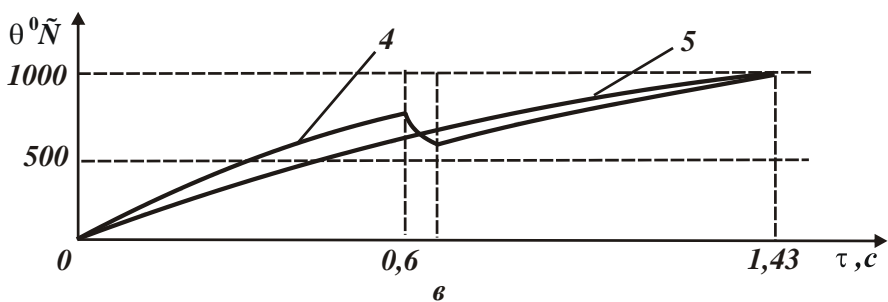
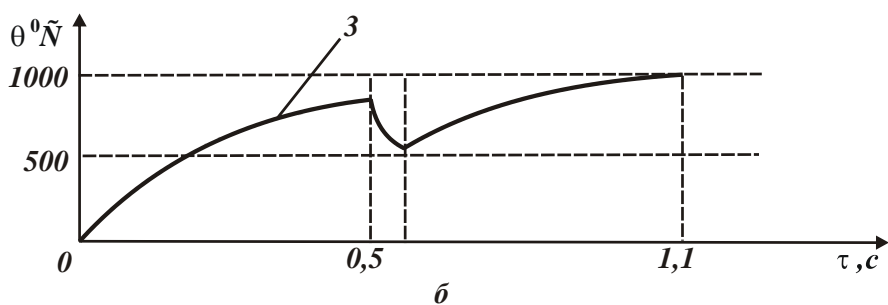
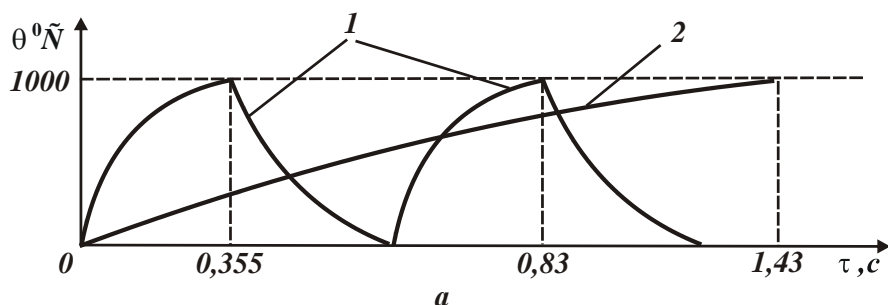


Рис. 7. Характер изменения θ от τ : 1 – $\tau_1=0,355 \text{ с}$; 2 – $\tau_1=1,43 \text{ с}$; 3 – $\tau_1=0,5 \text{ с}$; 4 – $\tau_1=0,6 \text{ с}$; 5 – $\tau_1=0,714 \text{ с}$.

Для сравнения на рис. 7,а приведен график изменения θ во времени для случая $m=1$ (кривая 2).
 В табл. 2 приведены расчетные значения основного времени обработки $\tau = 2 \cdot \tau_1 + \tau_2$ при съеме припуска \dot{I} за два прерывания процесса шлифования. По сравнению со съемом припуска \dot{I} за одно прерывание процесса шлифования, основное время обработки τ уменьшилось с 1,43 с до 0,83 с.
 Из табл. 2 следует, что с увеличением времени τ_1 с 0,355 с до 0,714 с время τ_2 уменьшилось с 0,12 с до нуля, $\tau = 2 \cdot \tau_1 + \tau_2$, наоборот, увеличилось с 0,83 с до 1,43 с. Графики изменения температуры шлифования θ во времени для разных значений τ_1 показаны на рис. 7. При $\tau_1=0,5 \text{ с}$ (кривая 3) θ первоначально увеличивается от нуля до 842°C , затем уменьшается до значения 530°C , после чего увеличивается до заданного значения 1000°C .

Таблица 2

Расчетные значения параметров процесса шлифования

$\tau_1, \text{ с}$	0,355	0,5	0,6	0,714
$\tau_2, \text{ с}$	0,12	0,11	0,0863	0
τ_2/τ_1	0,338	0,22	0,144	0
$\tau, \text{ с}$	0,83	1,11	1,286	1,43
$\theta_{\max 1}, \text{ град}$	1000	842	769	1000
$\theta_0, \text{ град}$	0	530	638	–
$\theta_{\max 2}, \text{ град}$	1000	1000	1000	–

При $\tau_1=0,6$ с (кривая 4) θ увеличивается от нуля до 769°C , затем уменьшается до значения 638°C , после чего увеличивается до значения 1000°C . При $\tau_1=0,714$ с (кривая 5) θ непрерывно увеличивается от нуля до значения 1000°C . В этом случае отсутствует охлаждение образца и поэтому график зависимости $\theta(\tau)$ такой же, как и зависимости, показанной на рис. 7,а (кривая 2).

На основе проведенного анализа установлено, что за счет прерывания процесса шлифования $\tau = 2 \cdot \tau_1 + \tau_2$ уменьшилось с 1,43 с до 0,83 с, т.е. на 42%.

Случай $m=3$. Из (19) температура θ_{\max} для $n=3$ определяется

$$\theta_{\max} = \sigma \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{\dot{i}^2}{9 \cdot \tau_1^2} \cdot \left(3 \cdot \tau_1 - 2 \cdot \frac{2 \cdot \alpha^2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \tau_2^2 \right)}. \quad (29)$$

В данном случае $\frac{2 \cdot \alpha^2}{\tilde{n} \cdot \rho \cdot \lambda} = 25 \text{ с}^{-1}$. Разрешая (29) относительно времени τ_2 ,

$$\text{имеем } \tau_2 = \sqrt{\frac{\tau_1 \cdot (0,474 - \tau_1)}{7,9}}.$$

Температура $\theta_{\max 1}$ после 1-го прерывания процесса шлифования и температура θ_{01} после 1-го охлаждения образца соответственно выражаются

$$\theta_{\max 1} = 397,5 \cdot \sqrt{\frac{1}{\tau_1}}; \quad \theta_{01} = 397,5 \cdot \sqrt{\frac{1}{\tau_1^2} \cdot (\tau_1 - 25 \cdot \tau_2^2)}.$$

Температура $\theta_{\max 2}$ после 2-го прерывания процесса шлифования и температура θ_{02} после второго охлаждения образца выражаются

$$\theta_{\max 2} = 397,5 \cdot \sqrt{\frac{1}{\tau_1^2} \cdot (2 \cdot \tau_1 - 25 \cdot \tau_2^2)}; \quad \theta_{02} = 397,5 \cdot \sqrt{\frac{1}{\tau_1^2} \cdot (2 \cdot \tau_1 - 50 \cdot \tau_2^2)}.$$

Температура $\theta_{\max 3}$ после 3-го прерывания процесса шлифования равна

$$\theta_{\max 3} = 397,5 \cdot \sqrt{\frac{1}{\tau_1^2} \cdot (3 \cdot \tau_1 - 50 \cdot \tau_2^2)}.$$

Таблица 3

Расчетные значения параметров процесса шлифования

τ_1 , с	0,158	0,237	0,316	0,474
τ_2 , с	0,0795	0,0843	0,0795	0
τ_2/τ_1	0,503	0,2278	0,252	0
τ , с	0,632	0,8794	1,107	1,43
$\theta_{\max 1}$, град	1000	816,5	707,1	1000
θ_{01} , град	0	408,6	500	—
$\theta_{\max 2}$, град	1000	913	866	—
θ_{02} , град	0	577,8	707,1	—
$\theta_{\max 3}$, град	1000	1000	1000	—

В табл. 3 и на рис. 8 приведены рассчитанные по данным зависимостям значения параметров τ_1 , τ_2 , τ_2/τ_1 , $\tau = 3 \cdot \tau_1 + 2 \cdot \tau_2$, $\theta_{\max 1}$, θ_{01} , $\theta_{\max 2}$, θ_{02} , $\theta_{\max 3}$. Как видно, при $\tau_1=0,158$ с и $\tau_2=0,0795$ с за время прерывания процесса шлифования происходит полное охлаждение обрабатываемого образца, и температура шлифования периодически изменяется от нуля до заданного значения (1000°C). В других случаях (с увеличением времени τ_1) имеет место частичное охлаждение обрабатываемого образца, и температура шлифования скачкообразно увеличивается от нуля до заданного значения (1000°C). При этом основное время обработки $\tau = 3 \cdot \tau_1 + 2 \cdot \tau_2$ увеличивается с $0,632$ с до $1,43$ с, т.е. почти на 56%. По сравнению с предыдущим случаем ($m=2$), основное время обработки τ уменьшилось более чем в 2 раза, т.е. чем больше количество прерываний процесса шлифования, тем меньше τ .

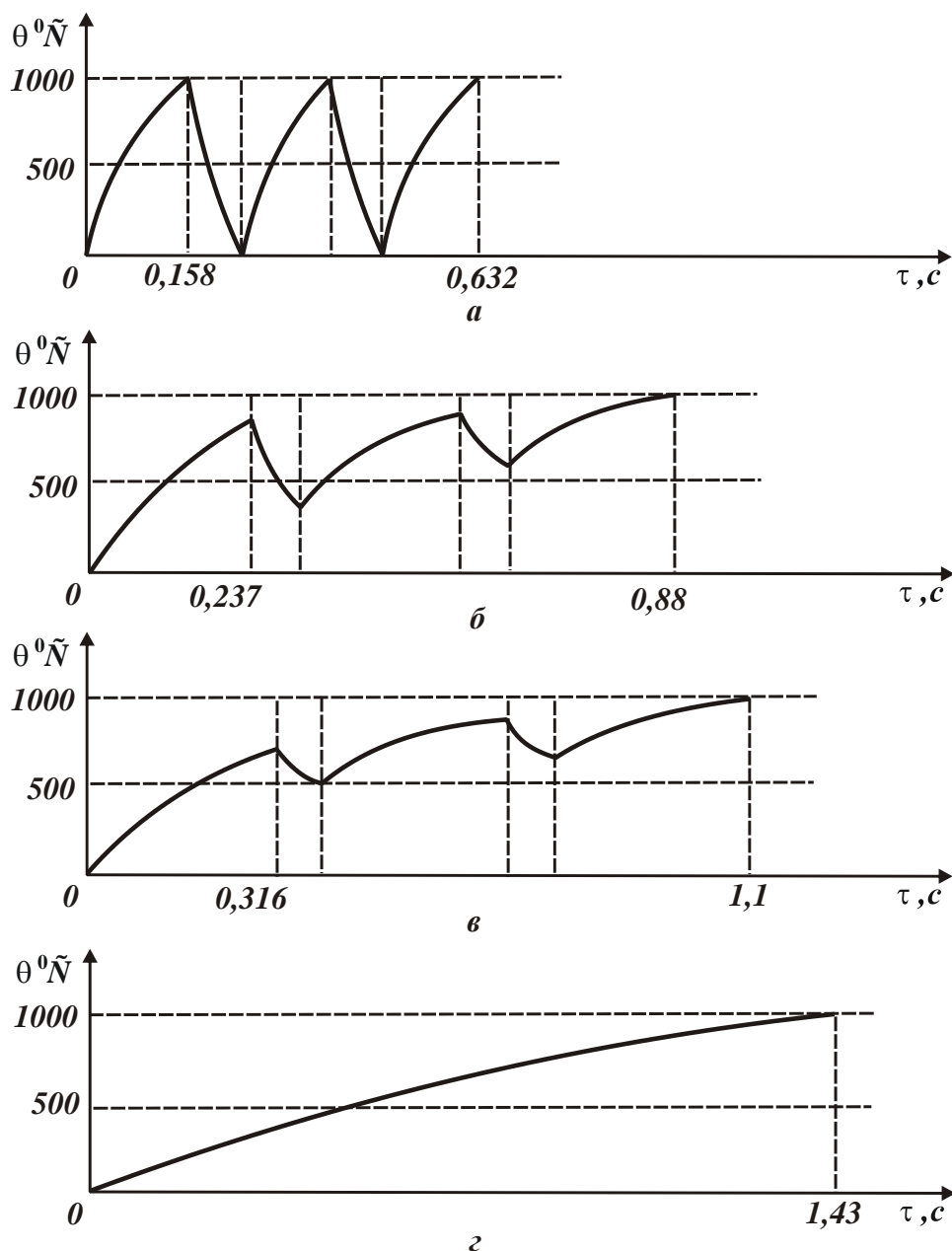


Рис. 8. Характер изменения температуры шлифования θ от основного времени обработки τ : а – $\tau_1=0,158$ с; б – $\tau_1=0,237$ с; в – $\tau_1=0,316$ с; г – $\tau_1=0,474$ с.

Случай $m=4$. Согласно зависимости (19), максимальная температура шлифования θ_{\max} для $n=4$ определяется

$$\theta_{\max} = \sigma \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{\dot{i}^2}{16 \cdot \tau_1^2} \cdot \left(4 \cdot \tau_1 - 3 \cdot \frac{2 \cdot \alpha^2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \tau_2^2\right)}. \quad (30)$$

В этом случае $\frac{2 \cdot \alpha^2}{\tilde{n} \cdot \rho \cdot \lambda} = 25 \text{ с}^{-1}$. Разрешая зависимость (30) относительно

$$\tau_2, \text{ имеем } \tau_2 = \sqrt{\frac{\tau_1 \cdot (4 - 11,236 \cdot \tau_1)}{75}}.$$

Температура $\theta_{\max 1}$ после 1-го прерывания процесса шлифования и температура θ_{01} после 1-го охлаждения образца выражаются зависимостями

$$\theta_{\max 1} = 298,3 \cdot \sqrt{\frac{1}{\tau_1}}; \quad \theta_{01} = 298,3 \cdot \sqrt{\frac{1}{\tau_1^2} \cdot (\tau_1 - 25 \cdot \tau_2^2)}.$$

Температура $\theta_{\max 2}$ после 2-го прерывания процесса шлифования и температура θ_{02} после 2-го охлаждения образца выражаются зависимостями

$$\theta_{\max 2} = 298,3 \cdot \sqrt{\frac{1}{\tau_1^2} \cdot (2 \cdot \tau_1 - 25 \cdot \tau_2^2)}; \quad \theta_{02} = 298,3 \cdot \sqrt{\frac{2}{\tau_1^2} \cdot (\tau_1 - 25 \cdot \tau_2^2)}.$$

Температура $\theta_{\max 3}$ после 3-го прерывания процесса шлифования и температура θ_{03} после 3-го охлаждения образца выражаются зависимостями

$$\theta_{\max 3} = 298,3 \cdot \sqrt{\frac{1}{\tau_1^2} \cdot (3 \cdot \tau_1 - 50 \cdot \tau_2^2)}; \quad \theta_{03} = 298,3 \cdot \sqrt{\frac{3}{\tau_1^2} \cdot (\tau_1 - 25 \cdot \tau_2^2)}.$$

Температура $\theta_{\max 4}$ после 4-го прерывания процесса шлифования равна

$$\theta_{\max 4} = 298,3 \cdot \sqrt{\frac{1}{\tau_1^2} \cdot (4 \cdot \tau_1 - 75 \cdot \tau_2^2)}.$$

Таблица 4

Расчетные значения параметров процесса шлифования

$\tau_1, \text{ с}$	0,089	0,178	0,267	0,356
$\tau_2, \text{ с}$	0,06	0,0689	0,06	0
τ_2/τ_1	0,674	0,387	0,225	0
$\tau, \text{ с}$	0,535	0,919	1,247	1,43
$\theta_{\max 1}, \text{ град}$	1000	706,3	577,3	1000
$\theta_{01}, \text{ град}$	0	408,16	470	—
$\theta_{\max 2}, \text{ град}$	1000	816,4	744,4	—
$\theta_{02}, \text{ град}$	0	577,2	664,7	—
$\theta_{\max 3}, \text{ град}$	1000	912,7	880,4	—
$\theta_{03}, \text{ град}$	0	707	814,1	—
$\theta_{\max 4}, \text{ град}$	1000	1000	1000	—

В табл. 4 и на рис. 9 приведены рассчитанные по данным зависимостям значения параметров τ_1 , τ_2 , τ_2/τ_1 , $\tau = 4 \cdot \tau_1 + 3 \cdot \tau_2$, $\theta_{\max 1}$, θ_{01} , $\theta_{\max 2}$, θ_{02} , $\theta_{\max 3}$, θ_{03} , $\theta_{\max 4}$. При $\tau_1=0,089$ с и $\tau_2=0,06$ с за время прерывания процесса шлифования происходит полное охлаждение обрабатываемого образца, и температура шлифования периодически изменяется от нуля до заданного значения (1000°C). С увеличением времени τ_1 происходит частичное охлаждение обрабатываемого образца, и температура шлифования скачкообразно увеличивается от нуля до заданного значения (1000°C). При этом основное время обработки $\tau = 3 \cdot \tau_1 + 2 \cdot \tau_2$ увеличивается с $0,535$ с до $1,43$ с, т.е. почти на 63%. Это больше, чем в предыдущих случаях (при $m=1\dots 3$). Отношение τ_2/τ_1 с увеличением времени τ_1 уменьшается от $0,674$ с до нуля, т.е. при $\tau_1=0,089$ с и $\tau_2=0,06$ с отношение τ_2/τ_1 приближается к единице.

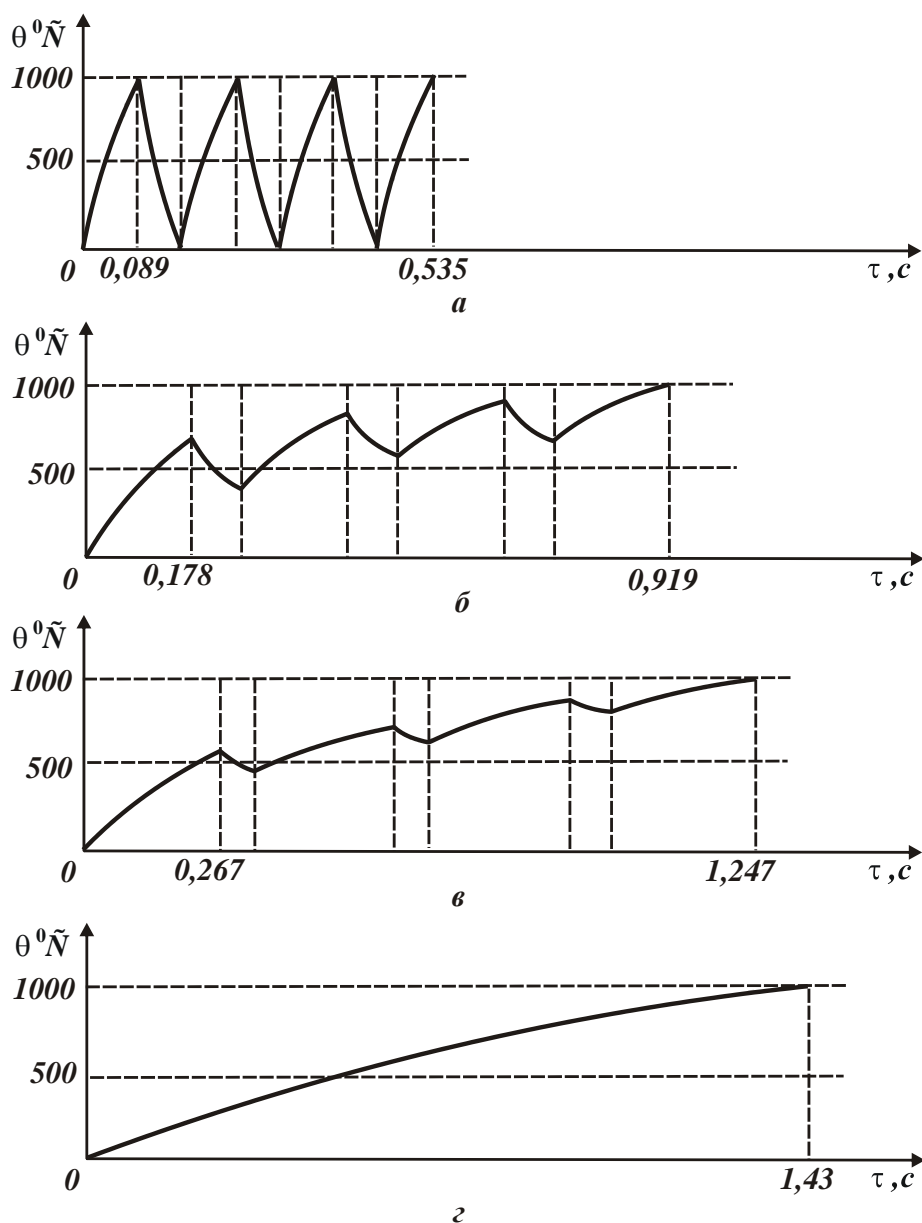


Рис. 9. Характер изменения температуры шлифования θ от основного времени обработки τ : а – $\tau_1=0,089$ с; б – $\tau_1=0,178$ с; в – $\tau_1=0,267$ с; г – $\tau_1=0,356$ с.

Выводы. В работе получила дальнейшее развитие математическая модель определения температуры шлифования с учетом прерывистости процесса и охлаждения обрабатываемой детали. Определены условия полного и частичного охлаждения обрабатываемой детали и установлена их связь с основным временем обработки. Обоснованы оптимальные условия обработки, которые могут быть использованы для совершенствования технологии механической обработки ответственных деталей гидроаппаратуры в плане повышения качества и производительности обработки.

Список литературы

1. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с.
2. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности / В.А. Сипайлов. – М.: Машиностроение, 1978. – 166 с.
3. Рябенков І.О. Підвищення ефективності фінішної обробки деталей гідроапаратури на основі вибору раціональної структури і параметрів операцій: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.02.08 “Технологія машинобудування” / І.О. Рябенков. – Одеса, 2009. – 21 с.
4. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 10. ”Концепции развития технологии машиностроения” – Одесса: ОНПУ, 2005. – 565 с.
5. Тепловые и механические процессы при резании металлов: учеб. пособие / Ф.В. Новиков, А.А. Якимов, Г.В. Новиков, С.Г. Зимин, В.А. Вайсман. – Одесса: ОГПУ, 1997. – 179 с.

Анотація

Теоретичне визначення температури при механічній обробці з урахуванням періодичного переривання процесу

Теоретично визначені оптимальні умови шліфування за критерієм найменшого основного часу обробки з урахуванням обмеження по температурі шліфування

Abstract

Theoretical definition of temperature at machining considering the periodic interruption of

Theoretically, the optimal conditions for the grinding of the basic criteria of the smallest processing time subject to the limitation of temperature grinding