

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ С УЧЕТОМ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ПРЕРЫВАНИЯ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ

Новиков Ф.В., докт. техн. наук

(Харьковский национальный экономический университет)

Полянский В.И. (ООО "Империя Металлов", Харьков)

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]:

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

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 $\Delta\tau$; $a^2 = \lambda / (c \cdot \rho)$ – 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_{max0} :

$$\Delta\tau = \left(\frac{1,414 \cdot a \cdot \sigma \cdot \Pi}{\lambda \cdot \theta_{max0}} \right)^2. \quad (2)$$

Как видно, уменьшить основное время обработки $\Delta\tau$ можно уменьшением параметров σ , Π и увеличением θ_{max0} . Очевидно, для заданных значений Π и θ_{max0} 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

$$\Delta\tau_n = \left(\frac{1,414 \cdot a \cdot \sigma \cdot \Pi}{\lambda \cdot \theta_{max0} \cdot n} \right)^2. \quad (3)$$

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):

$$\theta_{max} = n \cdot \theta_{max0}. \quad (4)$$

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)

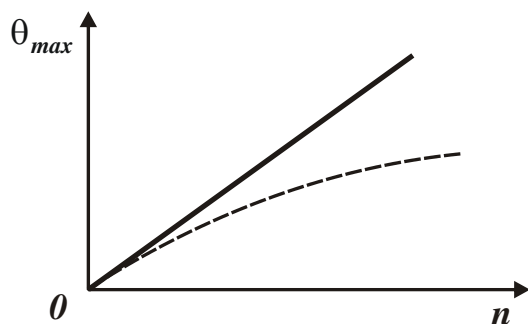


Рис. 1. Зависимость θ_{max} от n .

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 про-

цесса. 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 гаранти-

ровано 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.

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

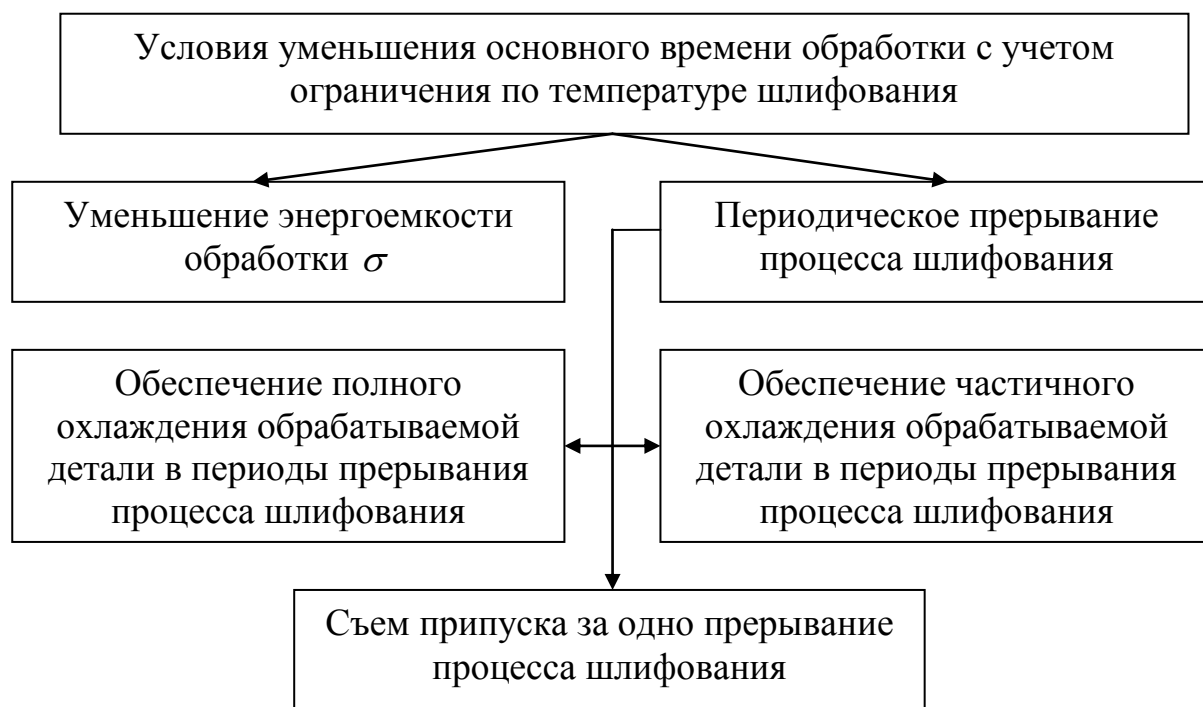


Рис. 2. Структурная схема условий уменьшения основного времени обработки с учетом ограничения по температуре шлифования.

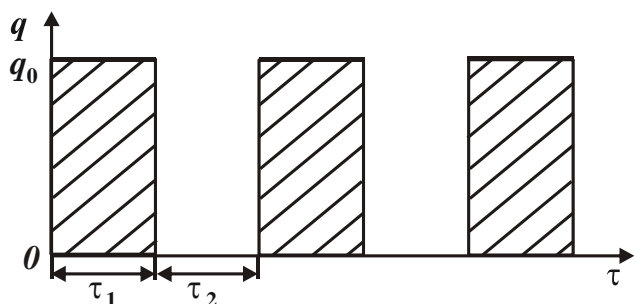


Рис. 3. Схема действия тепловых импульсов на обрабатываемый образец.

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 времени τ_1 от действия теплового потока с плотностью q_0 , Дж; S – площадь поперечного сечения образца, m^2 ;

$Q_2 = \alpha \cdot (\theta - \theta_0) \cdot S \cdot \tau_2$ – 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 $\Delta \tau_1$:

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

Максимальная температура образца после его охлаждения будет равна

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

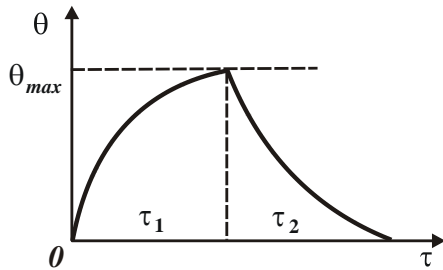


Рис. 4. Зависимость θ от τ .

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 $\tau_1 = \frac{2 \cdot \alpha^2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \tau_2^2$ 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): $q_0 = \sigma \cdot V_{рез}$ [4], где $V_{рез} = \Pi / \tau_1$, тогда

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

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

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

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

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

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

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 -го теплового импульса и охлаждения обрабатываемого образца:

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

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

Максимальная температура θ_{max} после действия n -го теплового импульса с учетом соотношения $q_0 = \sigma \cdot V_{рез} = \sigma \cdot (\Pi / m \cdot \tau_1)$ определится

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

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 $\tau_1 = \frac{2 \cdot \alpha^2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \tau_2^2$ 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 .

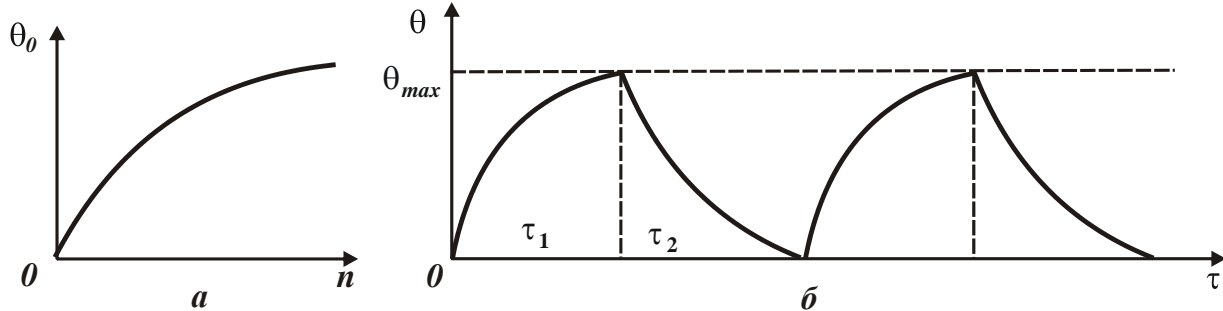


Рис. 5. Характер изменения температуры θ_0 от количества тепловых импульсов n (а) и температуры шлифования θ от времени τ (б).

С учетом $q_0 = \sigma \cdot V_{рез} = \sigma \cdot (\Pi / m \cdot \tau_1)$ зависимость (16) примет вид

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

где m – количество разбиений припуска Π на части.

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

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

С увеличением количества разбиений припуска Π на части m температура θ_0 уменьшается. При условии $\tau_1 = \frac{2 \cdot \alpha^2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \tau_2^2$ 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 Π на части m , а третье – в обеспечении равенства слагаемых подкоренного выражения

$$\frac{1}{\tau_1} = \frac{2 \cdot \alpha^2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{\tau_2^2}{\tau_1^2}. \text{ Очевидно, реализация третьего случая предполагает стабили-$$

зацию 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 $\tau_1 = \frac{2 \cdot \alpha^2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \tau_2^2$.

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 $n=1$: $\tau_1 = \left(\frac{\sigma \cdot \Pi}{\theta_{max} \cdot m} \right)^2 \cdot \frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda}$.

Соответственно зависимость (22) примет вид

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

Из зависимости (23) вытекает, что основное время обработки τ тем меньше, чем меньше величина $\left(\frac{\sigma \cdot \Pi}{\theta_{max}} \right)$ и больше количество прерываний про-

цесса 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;

$$\left(\frac{c \cdot \rho \cdot \lambda}{2} \right) \cdot \left(\frac{\theta_{max}}{\sigma} \right)^2 = 7 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}; \quad \frac{2 \cdot \alpha^2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} = 25 \text{ с}^{-1}; \quad \tau_2 = \sqrt{\frac{c \cdot \rho \cdot \lambda}{2 \cdot \alpha^2}} \cdot \tau_1.$$

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

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 увеличением 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 $\tau_* = \left(\frac{\sigma \cdot \Pi}{\theta_{max}} \right) \cdot \frac{1}{\alpha}$.

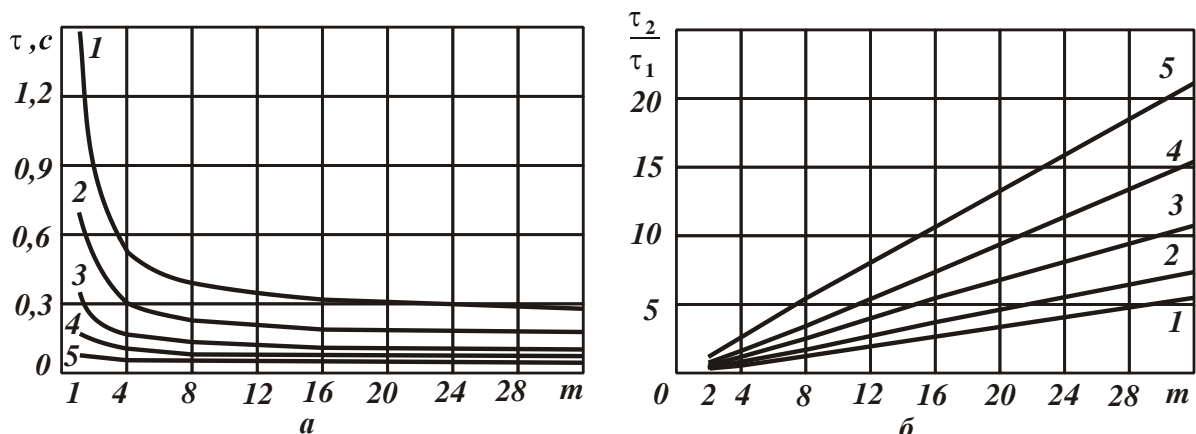


Рис. 6. Зависимости τ (а) и τ_2/τ_1 (б) от m : 1 – $\sigma=10^5$ Н/мм²; 2 – $\sigma=0,707 \cdot 10^5$ Н/мм²; 3 – $\sigma=0,5 \cdot 10^5$ Н/мм²; 4 – $\sigma=0,354 \cdot 10^5$ Н/мм²; 5 – $\sigma=0,25 \cdot 10^5$ Н/мм².

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.

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 Π за одно прерывание процесса шлифования температура θ определяется зависимостью (1) и с учетом текущего

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

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

В итоге пришли к зависимости (2).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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); $\theta_{max} = 1000$ °С;

$\sigma=10^5$ Н/мм²; $l=0,1$ мм. Из (27) вытекает, что при $\Delta\tau_1=0$ время $\tau_1=0,355$ с. Тогда в соответствии с зависимостью (28) время $\tau_2=0,12$ с. В этом случае, исходя из (26), температура $\theta_0=0$. График изменения θ во времени показан на рис. 7,а (кривая 1). 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 l за два прерывания процесса шлифования. По сравнению со съемом припуска l 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 $\tau_1=0,5$ с (кривая 3) θ первоначально увеличивается от нуля до 842⁰С, затем уменьшается до значения 530⁰С, после чего увеличивается до заданного значения 1000⁰С.

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
$\theta_{max1}, \text{ град}$	1000	842	769	1000
$\theta_0, \text{ град}$	0	530	638	–
$\theta_{max2}, \text{ град}$	1000	1000	1000	–

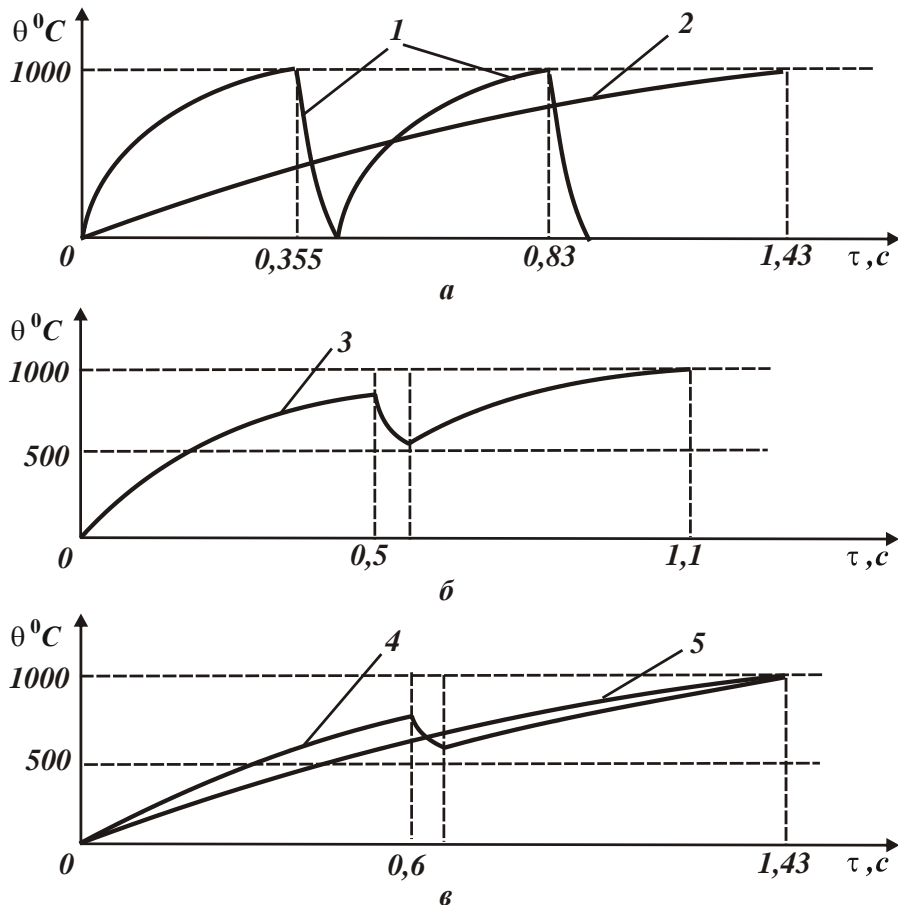


Рис. 7. Характер изменения θ от τ : 1 – $\tau_1=0,355$ с; 2 – $\tau_1=1,43$ с; 3 – $\tau_1=0,5$ с; 4 – $\tau_1=0,6$ с; 5 – $\tau_1=0,714$ с.

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

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

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

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

Температура θ_{max1} после 1-го прерывания процесса шлифования и температура θ_{01} после 1-го охлаждения образца соответственно выражаются

$$\theta_{max1} = 397,5 \cdot \sqrt{\frac{1}{\tau_1}}; \quad \theta_{01} = 397,5 \cdot \sqrt{\frac{1}{\tau_1^2} \cdot (\tau_1 - 25 \cdot \tau_2^2)}.$$

Температура θ_{max2} после 2-го прерывания процесса шлифования и температура θ_{02} после второго охлаждения образца выражаются

$$\theta_{max2} = 397,5 \cdot \sqrt{\frac{1}{\tau_1^2} \cdot (2 \cdot \tau_1 - 25 \cdot \tau_2^2)}; \quad \theta_{02} = 397,5 \cdot \sqrt{\frac{1}{\tau_1^2} \cdot (2 \cdot \tau_1 - 50 \cdot \tau_2^2)}.$$

Температура θ_{max3} после 3-го прерывания процесса шлифования равна

$$\theta_{max3} = 397,5 \cdot \sqrt{\frac{1}{\tau_1^2} \cdot (3 \cdot \tau_1 - 50 \cdot \tau_2^2)}.$$

Таблица 3

Расчетные значения параметров процесса шлифования

$\tau_1, \text{с}$	0,158	0,237	0,316	0,474
$\tau_2, \text{с}$	0,0795	0,0843	0,0795	0
τ_2/τ_1	0,503	0,2278	0,252	0
$\tau, \text{с}$	0,632	0,8794	1,107	1,43
$\theta_{max1}, \text{град}$	1000	816,5	707,1	1000
$\theta_{01}, \text{град}$	0	408,6	500	—
$\theta_{max2}, \text{град}$	1000	913	866	—
$\theta_{02}, \text{град}$	0	577,8	707,1	—
$\theta_{max3}, \text{град}$	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 , $\tau = 3 \cdot \tau_1 + 2 \cdot \tau_2$, θ_{max1} , θ_{01} , θ_{max2} , θ_{02} , θ_{max3} . 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 (1000^0C). В других случаях (с увеличением времени τ_1) имеет место частичное охлаждение обрабатываемого образца, и температура шлифования скачкообразно увеличивается от нуля до заданного значения (1000^0C). 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 .

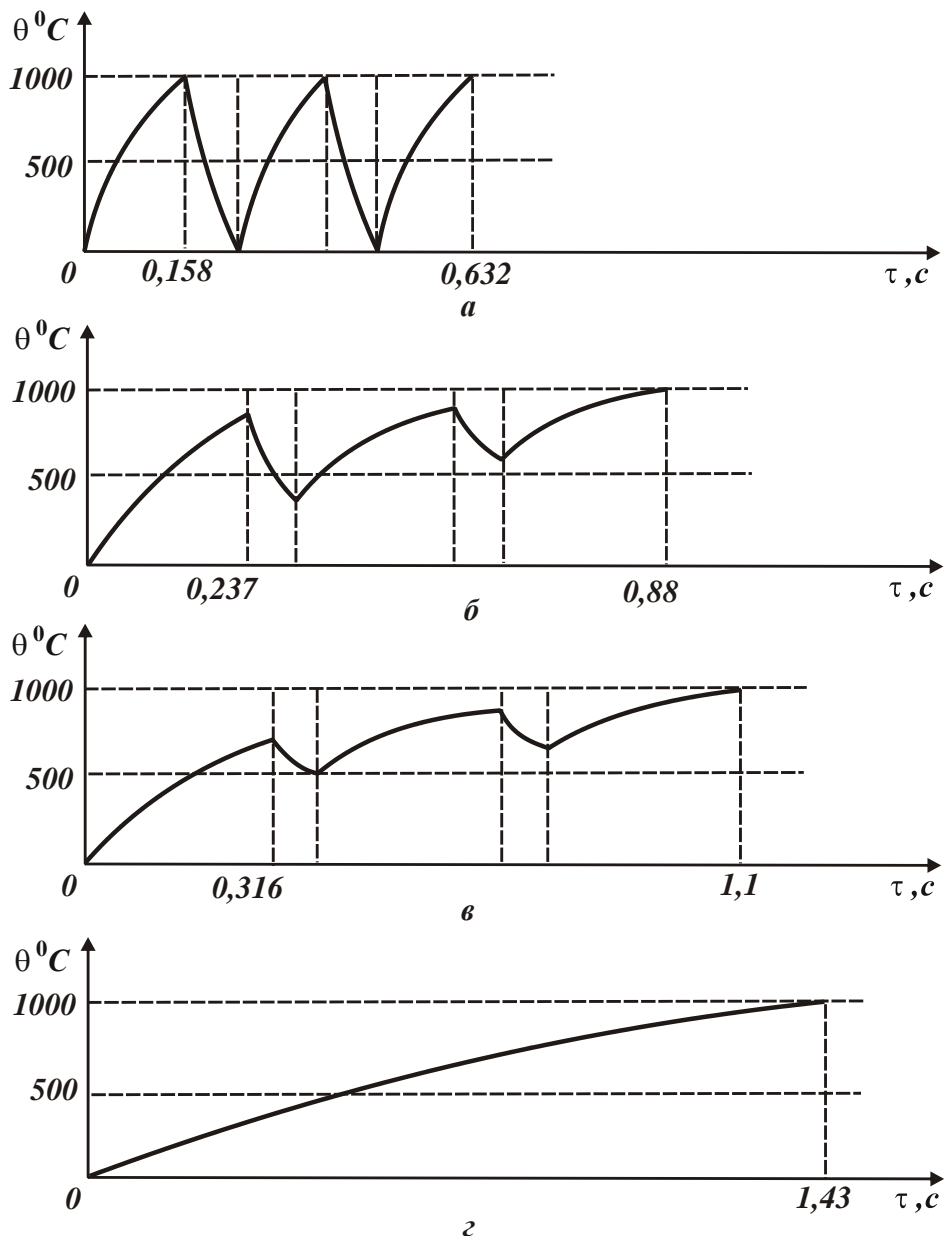


Рис. 8. Характер изменения температуры шлифования θ от основного времени обработки τ : а – $\tau_1=0,158$ с; б – $\tau_1=0,237$ с; в – $\tau_1=0,316$ с; г – $\tau_1=0,474$ с.

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

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

В этом случае $\frac{2 \cdot \alpha^2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} = 25 \text{ с}^{-1}$. Разрешая зависимость (30) относительно τ_2 ,

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

Температура θ_{max1} после 1-го прерывания процесса шлифования и температура θ_{01} после 1-го охлаждения образца выражаются зависимостями

$$\theta_{max1} = 298,3 \cdot \sqrt{\frac{1}{\tau_1}}; \quad \theta_{01} = 298,3 \cdot \sqrt{\frac{1}{\tau_1^2} \cdot (\tau_1 - 25 \cdot \tau_2^2)}.$$

Температура θ_{max2} после 2-го прерывания процесса шлифования и температура θ_{02} после 2-го охлаждения образца выражаются зависимостями

$$\theta_{max2} = 298,3 \cdot \sqrt{\frac{1}{\tau_1^2} \cdot (2 \cdot \tau_1 - 25 \cdot \tau_2^2)}; \quad \theta_{02} = 298,3 \cdot \sqrt{\frac{2}{\tau_1^2} \cdot (\tau_1 - 25 \cdot \tau_2^2)}.$$

Температура θ_{max3} после 3-го прерывания процесса шлифования и температура θ_{03} после 3-го охлаждения образца выражаются зависимостями

$$\theta_{max3} = 298,3 \cdot \sqrt{\frac{1}{\tau_1^2} \cdot (3 \cdot \tau_1 - 50 \cdot \tau_2^2)}; \quad \theta_{03} = 298,3 \cdot \sqrt{\frac{3}{\tau_1^2} \cdot (\tau_1 - 25 \cdot \tau_2^2)}.$$

Температура θ_{max4} после 4-го прерывания процесса шлифования равна

$$\theta_{max4} = 298,3 \cdot \sqrt{\frac{1}{\tau_1^2} \cdot (4 \cdot \tau_1 - 75 \cdot \tau_2^2)}.$$

Таблица 4

Расчетные значения параметров процесса шлифования

τ_1 , с	0,089	0,178	0,267	0,356
τ_2 , с	0,06	0,0689	0,06	0
τ_2/τ_1	0,674	0,387	0,225	0
τ , с	0,535	0,919	1,247	1,43
θ_{max1} , град	1000	706,3	577,3	1000
θ_{01} , град	0	408,16	470	—
θ_{max2} , град	1000	816,4	744,4	—
θ_{02} , град	0	577,2	664,7	—
θ_{max3} , град	1000	912,7	880,4	—
θ_{03} , град	0	707	814,1	—
θ_{max4} , 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 , $\tau = 4 \cdot \tau_1 + 3 \cdot \tau_2$, θ_{max1} , θ_{01} , θ_{max2} , θ_{02} , θ_{max3} , θ_{03} , θ_{max4} . 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 $m=1...3$). 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.

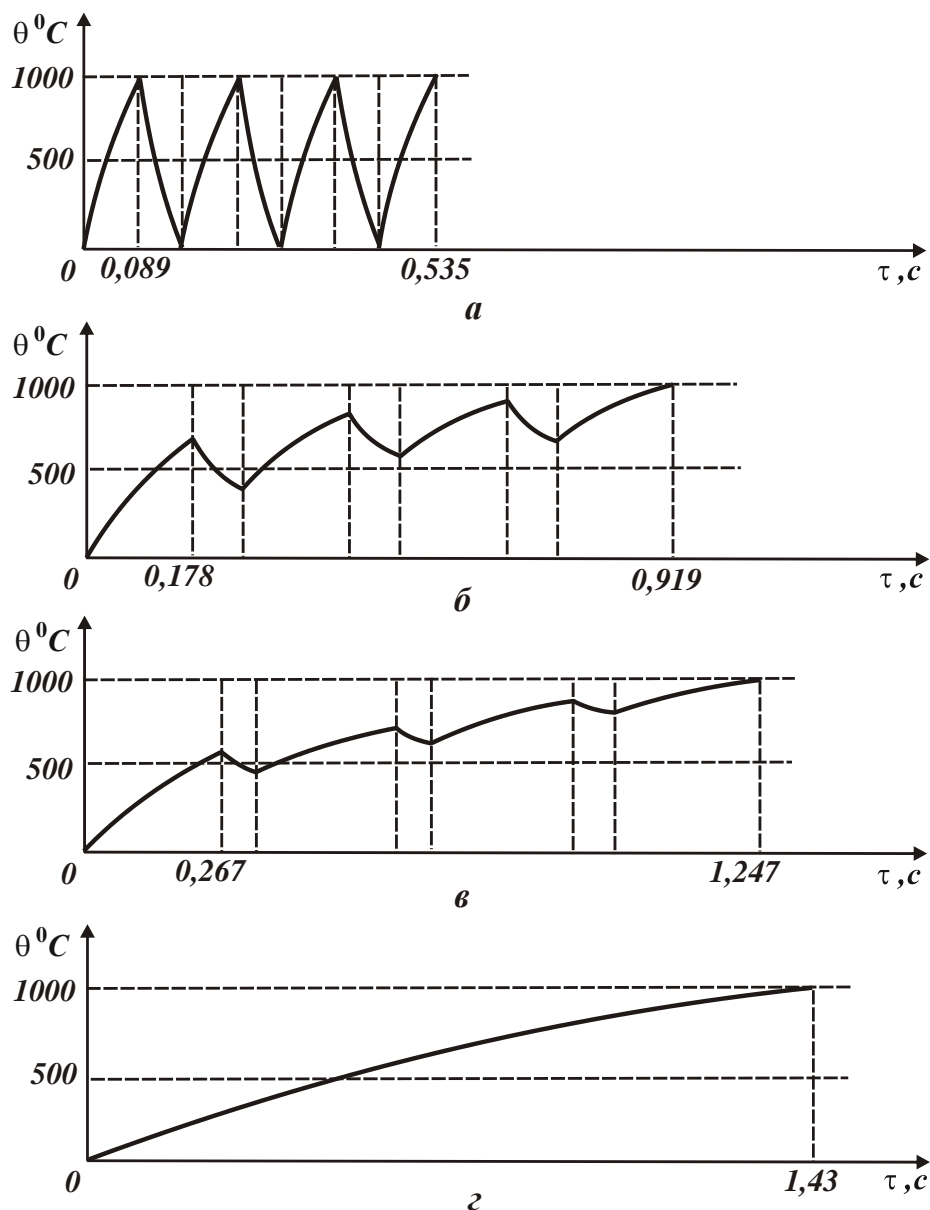


Рис. 9. Характер изменения температуры шлифования θ от основного времени обработки τ : а – $\tau_1=0,089$ с; б – $\tau_1=0,178$ с; в – $\tau_1=0,267$ с; г – $\tau_1=0,356$ с.

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.