

## 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)

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

**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/м<sup>2</sup>;  $\sigma$  – условное напряжение резания, Н/м<sup>2</sup> (энергоемкость обработки, Дж/м<sup>3</sup>);  $V_{рез} = \Pi / \Delta\tau$ ;  $\Pi$  – величина снятого припуска за время  $\Delta\tau$ ;  $a^2 = \lambda / (c \cdot \rho)$  – коэффициент температуропроводности обрабатываемого материала, м<sup>2</sup>/с;  $c$  – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К);  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/м·К;  $\rho$  – плотность обрабатываемого материала, кг/м<sup>3</sup>.

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

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

Как видно, уменьшить основное время обработки  $\Delta\tau$  можно уменьшением параметров  $\sigma$ ,  $\Pi$  и увеличением  $\theta_{max_0}$ . Очевидно, для заданных значений  $\Pi$  и  $\theta_{max_0}$  уменьшить  $\Delta\tau$  можно исключительно за счет уменьшения энерго-

емкости обработки  $\sigma$  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  $\Pi$  за счет удаления снимаемого припуска частями (разбивая припуск  $\Pi$  на  $n$  частей и обеспечивая периодическое прерывание процесса шлифования). Так, рассматривая в (2) вместо  $\Pi$  параметр  $\Pi/n$ , имеем

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

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  $\theta_{max}$  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):

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

С увеличением количества прерываний процесса шлифования  $n$  температура шлифования  $\theta_{max}$  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)

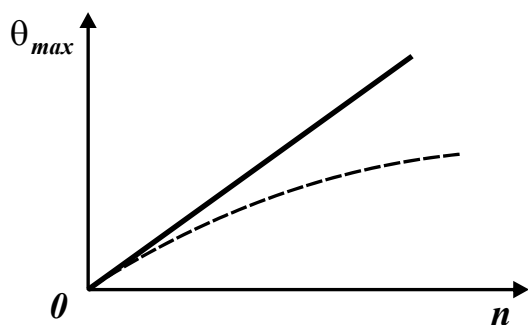


Рис. 1. Зависимость  $\theta_{max}$  от  $n$ .

охлаждении обрабатываемой детали температура шлифования  $\theta_{max}$  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 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.

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  $\tau_1$  на торце прямолинейного образца действует тепловой поток с постоянной плотностью  $q_0$ , и образец нагревается, а в течение времени  $\tau_2$  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  $q_0$ .

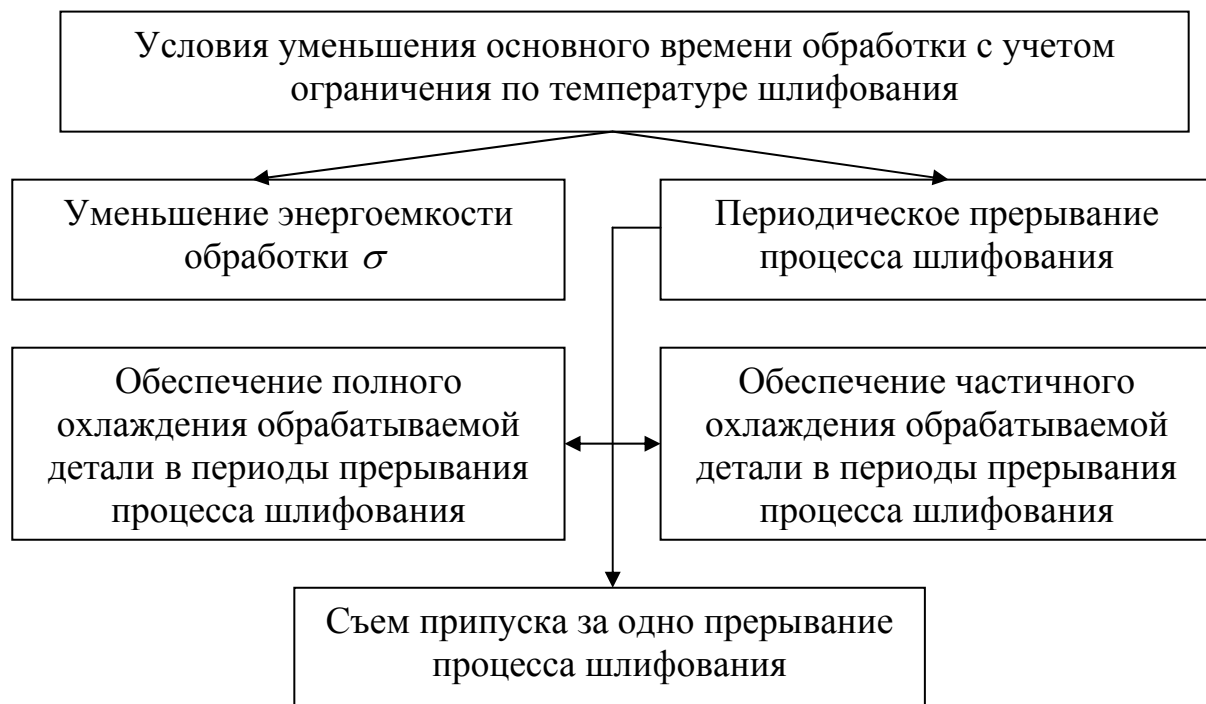


Рис. 2. Структурная схема условий уменьшения основного времени обработки с учетом ограничения по температуре шлифования.

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  $\tau_1$  от действия теплового потока с плотностью  $q_0$ , Дж;  $S$  – площадь поперечного сечения образца, м<sup>2</sup>;  $Q_2 = \alpha \cdot (\theta - \theta_0) \cdot S \cdot \tau_2$  – количество тепла, выделившееся из образца за время  $\tau_2$  при его охлаждении, Дж;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,

Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\theta$  – температура нагревания образца за время  $\tau_1$ , К;  $\theta_0$  – температура

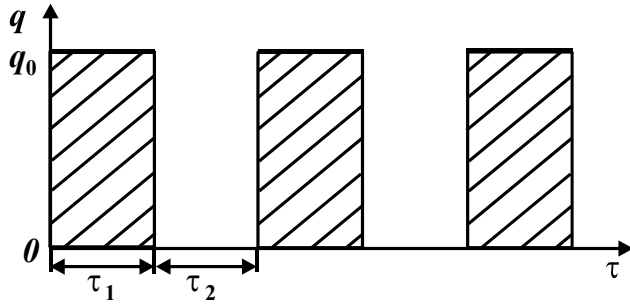


Рис. 3. Схема действия тепловых импульсов на обрабатываемый образец.

образца после его охлаждения (в течение времени  $\tau_2$ ), К;  $\Delta Q_1$  – количество тепла, оставшееся в образце после охлаждения, Дж.

Величину  $\Delta Q_1$ , 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  $\theta_0$ , 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

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

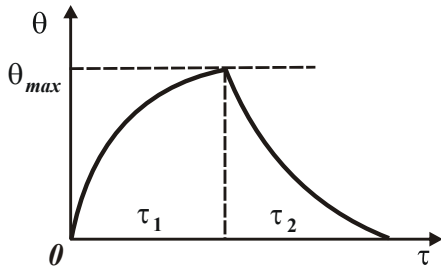


Рис. 4. Зависимость  $\theta$  от  $\tau$ .

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

$\theta_0$ , описываемая (9), равна нулю. Это означает,

что количество тепла, вошедшее в обрабатываемый образец за время  $\tau_1$ , и вышедшее из образца за время  $\tau_2$ , 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  $\theta$  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  $\theta_0$ , 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  $\theta_0$  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  $\theta$ , 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  $\theta_0$  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  $\theta_0$  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  $\theta_0$  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  $\theta_{max}$  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  $\theta_0$  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  $\theta_0$  равна нулю независимо от

количества тепловых импульсов  $n$ . Это означает, что характер изменения температуры шлифования  $\theta$  подчиняется зависимости, графически показанной на рис. 5,б. В этом случае количество тепла, входящего в обрабатываемый образец за время действия теплового импульса  $\tau_1$ , равно количеству тепла, выходящего из образца за время его охлаждения за время  $\tau_2$ .

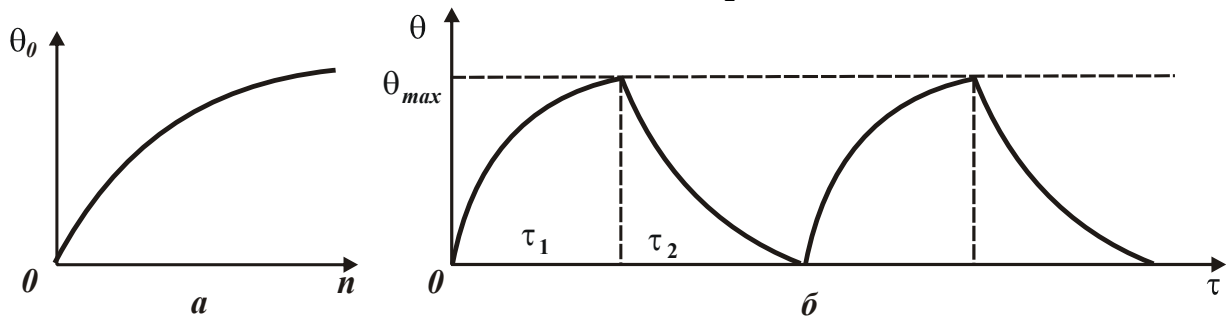


Рис. 5. Характер изменения температуры  $\theta_0$  от количества тепловых импульсов  $n$  (а) и температуры шлифования  $\theta$  от времени  $\tau$  (б).

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  $\Pi$  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  $\Pi$  на части  $m$  температура  $\theta_0$  уменьшается. При условии  $\tau_1 = \frac{2 \cdot \alpha^2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \tau_2^2$  температура  $\theta_0$  равна нулю независимо от количества тепловых импульсов  $m$ , т.е. характер изменения

температуры шлифования  $\theta$  с увеличением  $n$  подчиняется закономерности, графически показанной на рис. 5,а.

Из зависимости (21) вытекают три основных условия уменьшения температуры  $\theta_0$ . Первое условие состоит в уменьшении энергоемкости обработки  $\sigma$ . Второе условие состоит в увеличении количества разбиений припуска  $\Pi$  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  $\theta_{max}$  (рис. 5,б), тогда как в первых двух случаях температура шлифования  $\theta$  с течением времени обработки увеличивается (рис. 5,а), причем, тем интенсивнее, чем меньше время охлаждения обрабатываемого образца  $\tau_2$ . Следовательно, добиться уменьшения температуры  $\theta_0$  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  $\tau$  с учетом ограничения по максимальной температуре шлифования  $\theta_{max}$  для условий полного и частичного охлаждения обрабатываемого образца в период прерывания процесса шлифования. Первоначально рассмотрим случай полного охлаждения обраба-

тываемого 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  $\tau$  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  $\tau_1$  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  $\tau$  тем меньше, чем меньше величина  $\left( \frac{\sigma \cdot \Pi}{\theta_{max}} \right)$  и больше количество прерываний про-

цесса шлифования  $m$  и коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ . В табл. 1 приведены расчетные значения параметров  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_1/\tau_2$  (соответственно  $\tau_2/\tau_1$ ) и  $\tau$  для различных значений  $\sigma=10^5$  Н/мм<sup>2</sup>;  $0,707 \cdot 10^5$  Н/мм<sup>2</sup>;  $0,5 \cdot 10^5$  Н/мм<sup>2</sup>;  $0,354 \cdot 10^5$  Н/мм<sup>2</sup>;  $0,25 \cdot 10^5$  Н/мм<sup>2</sup> и исходных данных:  $\rho=14,5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;  $c=40$  кал/(кг·град);  $\lambda=14$

кал/(м·с·град);  $\alpha=10^4$  кал/(м<sup>2</sup>·с·град);  $\theta_{max}=1000^{\circ}\text{C}$ ;  $\Pi=0,1$  мм;  
 $\left(\frac{c \cdot \rho \cdot \lambda}{2}\right) \cdot \left(\frac{\theta_{max}}{\sigma}\right)^2 = 7 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $\frac{2 \cdot \alpha^2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} = 25 \text{ с}^{-1}$ ;  $\tau_2 = \sqrt{\frac{c \cdot \rho \cdot \lambda}{2 \cdot \alpha^2}} \cdot \tau_1$ .

Таблица 1  
 Расчетные значения основных параметров обработки (для  $\sigma=10^5 \text{ Н/мм}^2$ )

$m$	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
$\tau_1/\tau_2$	—	2,96	1,98	1,48	0,74	0,37	0,185	0,092
$\tau_2/\tau_1$	—	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  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_1/\tau_2$  и  $\tau$  уменьшаются. Чем меньше  $\sigma$ , тем меньше  $\tau$  и больше  $\tau_2/\tau_1$  (рис. 6). С увеличением  $m$  время  $\tau$  непрерывно уменьшается, асимптотически приближаясь к определенному значению. Исходя из зависимости (23), с учетом  $m \rightarrow \infty$  это значение можно определить по зависимости  $\tau_* = \left(\frac{\sigma \cdot \Pi}{\theta_{max}}\right) \cdot \frac{1}{\alpha}$ .

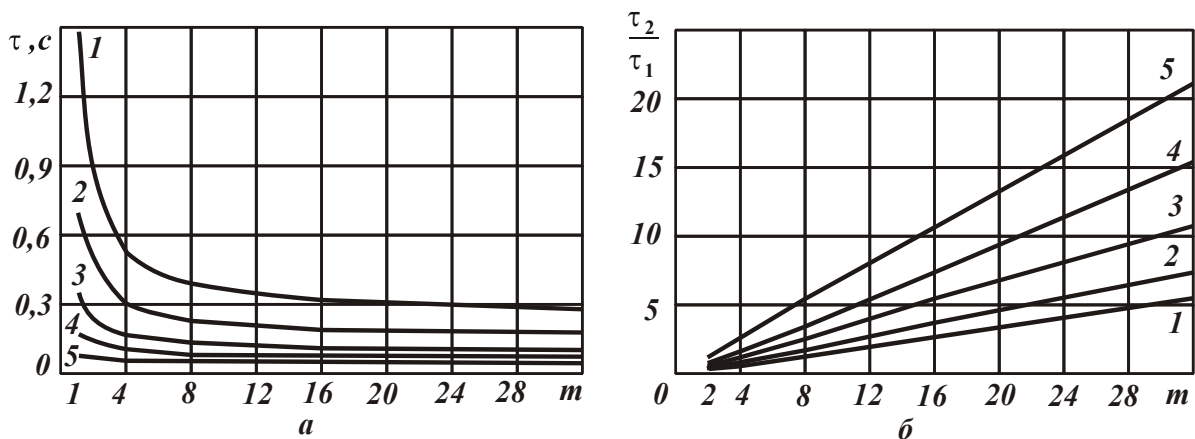


Рис. 6. Зависимости  $\tau$  (а) и  $\tau_2/\tau_1$  (б) от  $m$ : 1 –  $\sigma=10^5 \text{ Н/мм}^2$ ; 2 –  $\sigma=0,707 \cdot 10^5 \text{ Н/мм}^2$ ; 3 –  $\sigma=0,5 \cdot 10^5 \text{ Н/мм}^2$ ; 4 –  $\sigma=0,354 \cdot 10^5 \text{ Н/мм}^2$ ; 5 –  $\sigma=0,25 \cdot 10^5 \text{ Н/мм}^2$ .

Для  $\sigma=10^5 \text{ Н/мм}^2$  отношение наибольшего значения  $\tau_1$  и значения  $\tau_*$  равно  $\tau_1/\tau_*=1,42/0,24=5,9$ . Для  $\sigma=0,707 \cdot 10^5 \text{ Н/мм}^2$  – отношение  $\tau_1/\tau_*=0,71/0,17=4,18$ ; для  $\sigma=0,5 \cdot 10^5 \text{ Н/мм}^2$  – отношение  $\tau_1/\tau_*=0,355/0,12=2,96$ ; для  $\sigma=0,354 \cdot 10^5 \text{ Н/мм}^2$  – отношение  $\tau_1/\tau_*=0,1775/0,085=2,09$ ; для  $\sigma=0,25 \cdot 10^5 \text{ Н/мм}^2$  – отношение  $\tau_1/\tau_*=0,8875/0,06=1,48$ . Как видно, с уменьшением  $\sigma$  отношение  $\tau_1/\tau_*$  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  $\tau_2/\tau_1$  будет меньше и, в зависимости от времени охлаждения  $\tau_2$ , будет изменяться от значения  $\tau_1/\tau_*$  до единицы. Условие  $\tau_2/\tau_1=1$  выполняется при отсутствии прерывания процесса шлифования и охлаждении обрабатываемой детали.

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

Случай  $m=1$ . При съеме припуска  $\Pi$  за одно прерывание процесса шлифования температура  $\theta$  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  $\Pi$  за два прерывания процесса шлифования образца  $\theta_{max}$  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  $\theta_{max}$  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  $\theta_{max}$  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  $\tau_1$  определяет время съема припуска  $\Pi/2$ , а время  $\Delta\tau_1$  выражается (8). Соответственно после 1-го прерывания процесса и охлаждения образца температура  $\theta_0$ , 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  $\theta_{max}$ , из зависимости (25) можно определить время  $\tau_1$  и  $\Delta\tau_1$  для заданного времени охлаждения обрабатываемого образца  $\tau_2$ :

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

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

Время охлаждения образца  $\tau_2$  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/м<sup>3</sup>;  $c=40$  кал/(кг·град);  $\lambda=14$  кал/(м·с·град);  $\alpha=10^4$  кал/(м<sup>2</sup>·с·град);  $\theta_{max}=1000^0\text{C}$ ;  $\sigma=10^5$  Н/мм<sup>2</sup>;  $l=0,1$  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  $\theta$  во времени показан на рис. 7,а (кривая 1). Для сравнения на рис. 7,а приведен график изменения  $\theta$  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  $\tau$  уменьшилось с 1,43 с до 0,83 с.

Таблица 2

Расчетные значения параметров процесса шлифования

$\tau_1$ , с	0,355	0,5	0,6	0,714
$\tau_2$ , с	0,12	0,11	0,0863	0
$\tau_2/\tau_1$	0,338	0,22	0,144	0
$\tau$ , с	0,83	1,11	1,286	1,43
$\theta_{max1}$ , град	1000	842	769	1000
$\theta_0$ , град	0	530	638	–
$\theta_{max2}$ , град	1000	1000	1000	–

Из табл. 2 следует, что с увеличением времени  $\tau_1$  с 0,355 с до 0,714 с время  $\tau_2$  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  $\theta$  во времени для разных значений  $\tau_1$  показаны на рис. 7. При  $\tau_1=0,5$  с (кривая 3)  $\theta$  первоначально увеличивается от нуля до  $842^0\text{C}$ , затем уменьшается до значения  $530^0\text{C}$ , после чего увеличивается до заданного значения  $1000^0\text{C}$ .

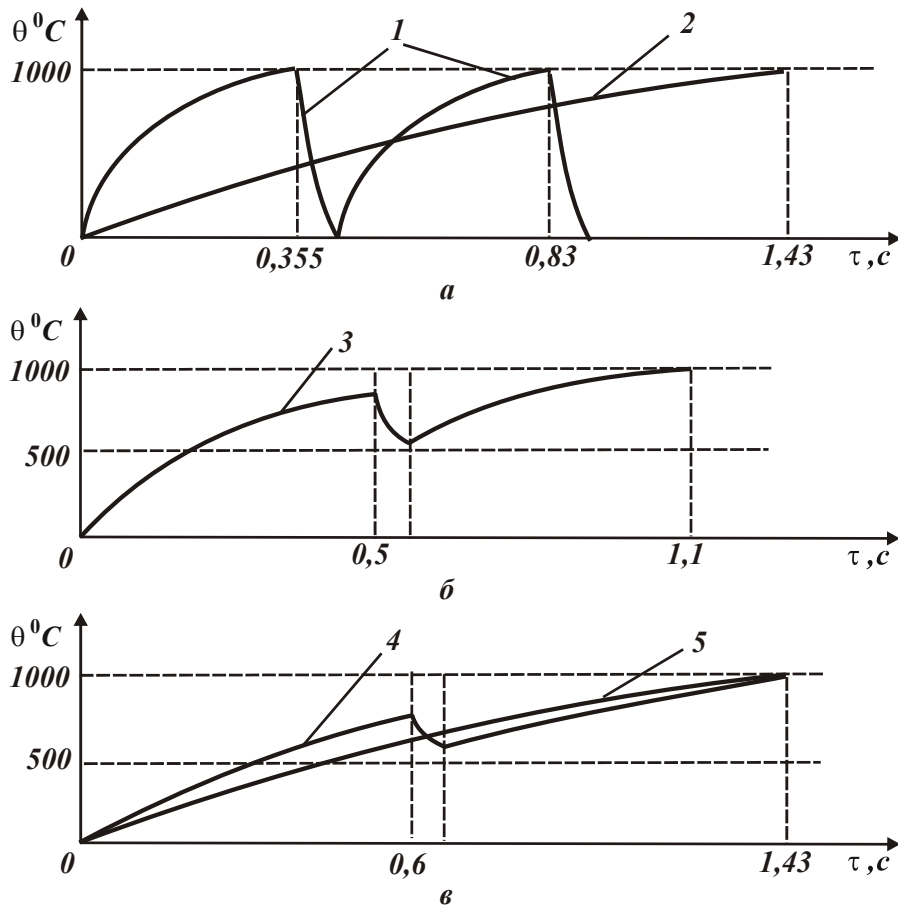


Рис. 7. Характер изменения  $\theta$  от  $\tau$ : 1 –  $\tau_1=0,355$  с; 2 –  $\tau_1=1,43$  с; 3 –  $\tau_1=0,5$  с; 4 –  $\tau_1=0,6$  с; 5 –  $\tau_1=0,714$  с.

При  $\tau_1=0,6$  с (кривая 4)  $\theta$  увеличивается от нуля до  $769^{\circ}\text{C}$ , затем уменьшается до значения  $638^{\circ}\text{C}$ , после чего увеличивается до значения  $1000^{\circ}\text{C}$ . При  $\tau_1=0,714$  с (кривая 5)  $\theta$  непрерывно увеличивается от нуля до значения  $1000^{\circ}\text{C}$ . 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  $\theta_{max}$  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  $\tau_2$ ,

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

Температура  $\theta_{max1}$  после 1-го прерывания процесса шлифования и температура  $\theta_{01}$  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  $\theta_{max2}$  после 2-го прерывания процесса шлифования и температура  $\theta_{02}$  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  $\theta_{max3}$  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
$\tau_2/\tau_1$	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  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_2/\tau_1$ ,  $\tau = 3 \cdot \tau_1 + 2 \cdot \tau_2$ ,  $\theta_{max1}$ ,  $\theta_{01}$ ,  $\theta_{max2}$ ,  $\theta_{02}$ ,  $\theta_{max3}$ . 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 ( $1000^0\text{C}$ ). В других случаях (с увеличением времени  $\tau_1$ ) имеет место частичное охлаждение обрабатываемого образца, и температура шлифования скачкообразно увеличивается от нуля до заданного значения ( $1000^0\text{C}$ ). 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  $\tau$  уменьшилось более чем в 2 раза, т.е. чем больше количество прерываний процесса шлифования, тем меньше  $\tau$ .

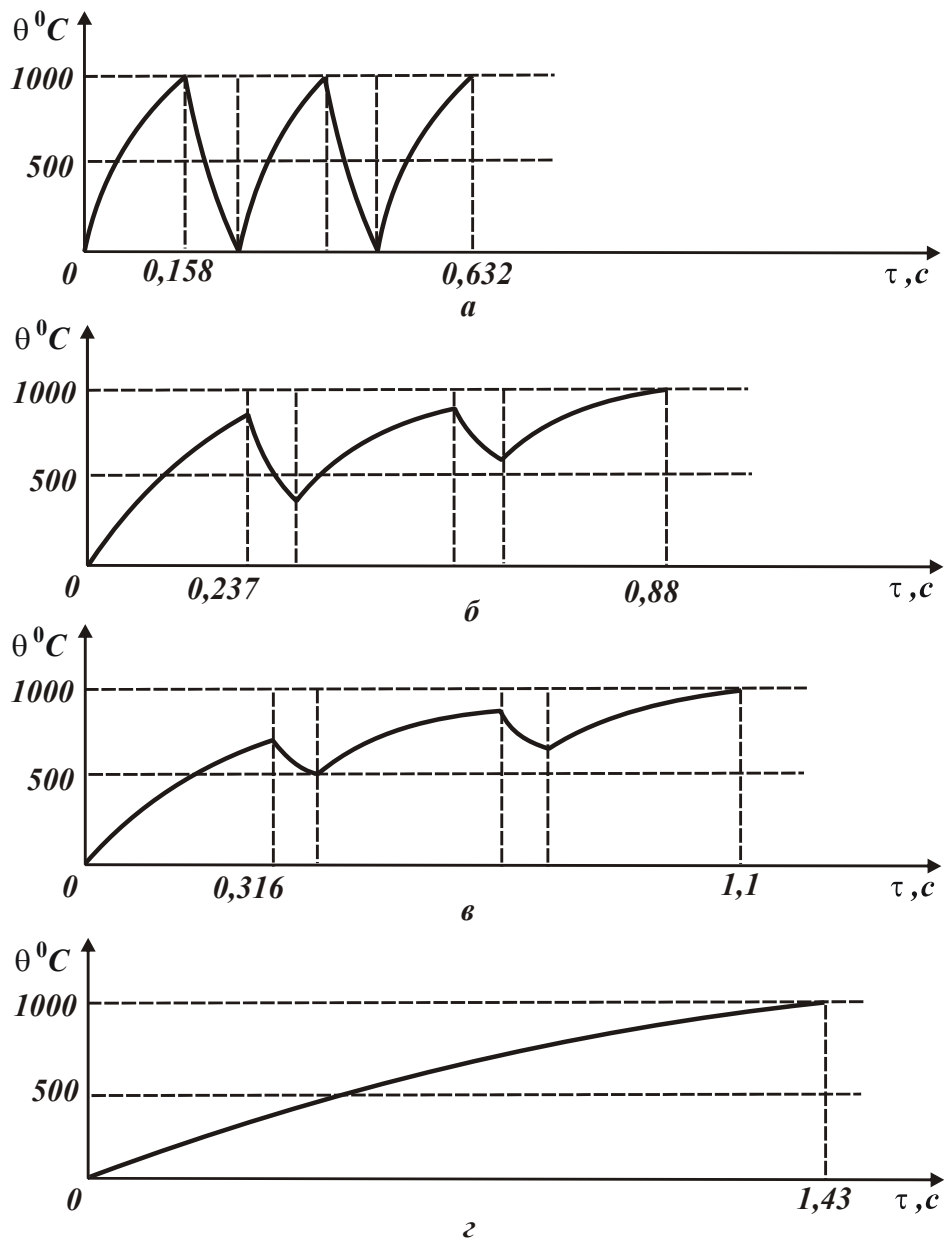


Рис. 8. Характер изменения температуры шлифования  $\theta$  от основного времени обработки  $\tau$ : а –  $\tau_1=0,158$  с; б –  $\tau_1=0,237$  с; в –  $\tau_1=0,316$  с; г –  $\tau_1=0,474$  с.

Случай  $m=4$ . Согласно зависимости (19), максимальная температура шлифования  $\theta_{max}$  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  $\tau_2$ ,

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

Температура  $\theta_{max1}$  после 1-го прерывания процесса шлифования и температура  $\theta_{01}$  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  $\theta_{max2}$  после 2-го прерывания процесса шлифования и температура  $\theta_{02}$  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  $\theta_{max3}$  после 3-го прерывания процесса шлифования и температура  $\theta_{03}$  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  $\theta_{max4}$  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

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

В табл. 4 и на рис. 9 приведены рассчитанные по данным зависимостям значения параметров  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_2/\tau_1$ ,  $\tau = 4 \cdot \tau_1 + 3 \cdot \tau_2$ ,  $\theta_{max1}$ ,  $\theta_{01}$ ,  $\theta_{max2}$ ,  $\theta_{02}$ ,  $\theta_{max3}$ ,  $\theta_{03}$ ,  $\theta_{max4}$ . 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 ( $1000^{\circ}\text{C}$ ). С увеличением времени  $\tau_1$  происходит частичное охлаждение обрабатываемого образца, и температура шлифования скачкообразно увеличивается от нуля до заданного значения ( $1000^{\circ}\text{C}$ ). 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  $\tau_2/\tau_1$  с увеличением

времени  $\tau_1$  уменьшается от 0,674 с до нуля, т.е. при  $\tau_1=0,089$  с и  $\tau_2=0,06$  с отношение  $\tau_2/\tau_1$  приближается к единице.

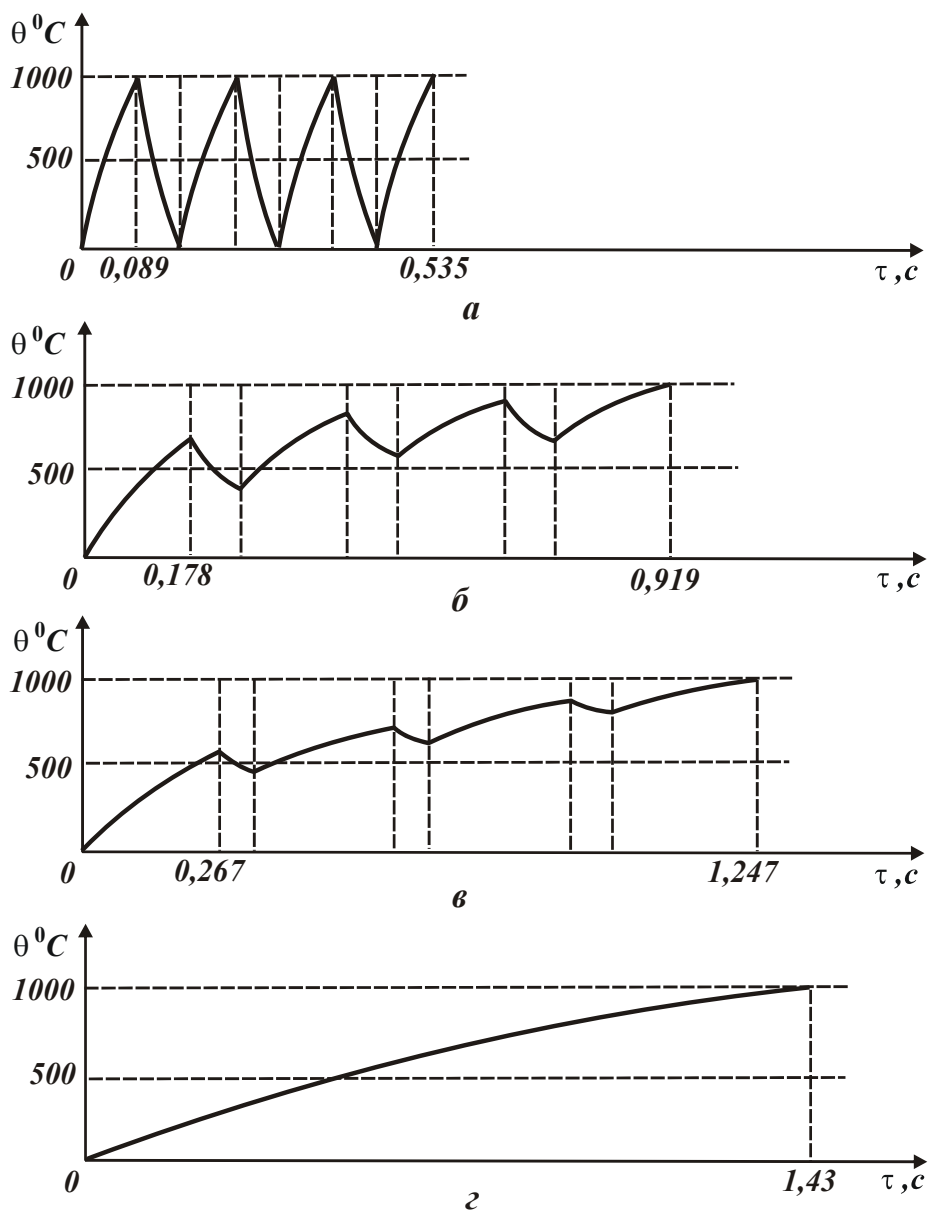


Рис. 9. Характер изменения температуры шлифования  $\theta$  от основного времени обработки  $\tau$ : а –  $\tau_1=0,089$  с; б –  $\tau_1=0,178$  с; в –  $\tau_1=0,267$  с; г –  $\tau_1=0,356$  с.

**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.