

УДК 621.923

А.А. ГОРБАЧЕВ, М.А. КУРИН

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Украина*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ В ЗОНЕ КОНТАКТА ИНСТРУМЕНТА С ДЕТАЛЬЮ ПРИ ПЛАНЕТАРНОМ ШЛИФОВАНИИ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

*Сформулирована проблема необходимости исследования температурного поля при глубинном шлифовании плоских поверхностей. Получена зависимость времени шлифования от температуры в зоне контакта абразивного круга и детали, которая позволяет определить общие условия снижения температуры шлифования. Рассмотрена схема планетарного глубинного шлифования и определена зависимость температуры шлифования от конструктивных и технологических параметров процесса шлифования. Произведен расчет времени шлифования и времени остывания поверхности детали для конкретного случая.*

**Ключевые слова:** *тепловое насыщение, нестационарный режим, уравнение теплового баланса, время шлифования, время остывания.*

### Введение

Рост количества шлифовальных операций при производстве лопаток ГТД на таких авиадвигательных предприятиях как ОАО “Мотор-Січ”, ММПП “Салют”, ОАО “Рыбинские Моторы” ставит задачу совершенствования метода глубинного шлифования плоских поверхностей [1].

В работах [2, 3] отмечено, что эффективное управление процессом плоского планетарного шлифования возможно при условии прогнозирования силовых, тепловых и других характеристик процесса, которое нельзя осуществить без их аналитического описания.

Таким образом, исследования, посвященные поиску аналитических зависимостей для расчета температурного поля при планетарном глубинном шлифовании плоских поверхностей, являются актуальными и заслуживают внимания.

### 1. Формулирование проблемы

Согласно данным многих работ [4 – 6], посвященных исследованию температур при всевозможных видах шлифования, предельное состояние температурного поля (тепловое насыщение) наступает не сразу после начала процесса шлифования, а спустя некоторый промежуток времени, в течение которого процесс протекает в нестационарном режиме.

Существование нестационарного режима в начале процесса шлифования дает возможность эффективно снижать контактные температуры за счет периодического прерывания процесса. Одним из возможных вариантов практической реализации

прерывистого процесса обработки является планетарное шлифование, в связи с чем возникает необходимость в получении для данного метода обработки аналитической зависимости, связывающей время обработки и температуру в зоне резания.

### 2. Решение проблемы

Значительное влияние на формирование температурного поля оказывает температура резания в зоне контакта круга с деталью. В работе [4] Г.В. Новиков предложил энергетический подход к расчету температуры резания при шлифовании. Однако привел только приближенное частное решение уравнения теплового баланса при глубинном шлифовании, не указывая погрешности приближения. Ниже приведено точное решение уравнения теплового баланса и найдена зависимость для определения температуры в зоне контакта при глубинном шлифовании с помощью ПШГ.

Рассмотрим расчетную схему (рис. 1) шлифования прямолинейного образца 2, движущегося по нормали к кругу 1 со скоростью  $V_0$ . Пусть за время  $t$  снят слой материала толщиной  $h_1$ . Количество выделившегося при этом тепла равно

$$Q_0 = Q_1 + Q_2, \quad (1)$$

где  $Q_1$  – количество тепла, которое затрачено на нагревание снятого слоя материала толщиной  $h_1$ ;

$Q_2$  – количество тепла, которое затрачено на нагревание (вследствие теплопроводности материала) части образца толщиной  $h_2$ .

Параметры  $Q_1$  и  $Q_2$  определяются из следующих соотношений [4]:

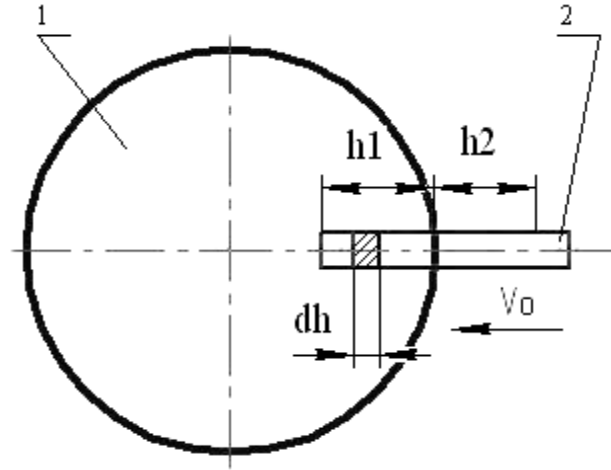


Рис. 1. Расчетная схема для определения температуры резания при шлифовании

$$Q_1 = c \cdot \rho \cdot S \cdot \int_0^{h_1} T(h) \cdot dh = c \cdot \rho \cdot S \cdot \int_0^{\tau} T(\tau) \cdot V_0 \cdot d\tau, \quad (2)$$

$$Q_2 = c \cdot \rho \cdot S \cdot h_2 \cdot T(\tau) \quad (3)$$

где  $c$  – теплопроводность обрабатываемого материала, Дж/(кг·град);

$\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;

$S$  – площадь поперечного сечения образца, м<sup>2</sup>;

$T(h)$  и  $T(\tau)$  – функции изменения температуры шлифованного слоя материала от толщины сошлифованного материала  $h$  и времени  $\tau$ ;

$dh = V_0 \cdot d\tau$  – элементарный участок сошлифованного слоя материала.

С учетом известного соотношения [5]:

$$Q_0 = q \cdot S \cdot \tau = \lambda \cdot S \cdot \frac{T(\tau)}{2 \cdot h_2} \cdot \tau. \quad (4)$$

параметр  $h_2$  выразится формулой:

$$h_2 = \frac{\lambda \cdot T(\tau)}{2 \cdot q}, \quad (5)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·град);

$\sigma$  – условное напряжение резания, Па;

$q$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>.

Плотность теплового потока определяется по формуле:

$$q = \frac{P_z \cdot V_{кр}}{S}. \quad (6)$$

Тангенциальная составляющая силы резания, Н:

$$P_z = \sigma \cdot \frac{Q_{обр}}{V_{кр}}. \quad (7)$$

Производительность обработки, м<sup>3</sup>/с:

$$Q_{обр} = S \cdot V_0. \quad (8)$$

Подставляем  $h_2$  в зависимость (3), тогда с учетом того, что  $Q_0$  тоже можно записать в виде  $Q_0 = q \cdot S \cdot \tau$ , уравнение (1) примет вид:

$$c \cdot \rho \cdot V_0 \cdot \int_0^{\tau} T(\tau) \cdot d\tau + \frac{c \cdot \rho \cdot \lambda}{2 \cdot q} \cdot [T(\tau)]^2 - q \cdot \tau = 0. \quad (9)$$

Для решения полученного интегрального уравнения с целью упрощения дальнейших выкладок введем обозначения:

$$a = c \cdot \rho \cdot V_0; \quad b = \frac{c \cdot \rho \cdot \lambda}{2 \cdot q}. \quad (10)$$

Тогда уравнение (9) преобразуется к виду

$$a \cdot \int_0^{\tau} T(t) \cdot dt + b \cdot T^2(\tau) - q \cdot \tau = 0. \quad (11)$$

Продифференцировав уравнение (11), после несложных преобразований получим дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными:

$$2 \cdot b \cdot T \cdot \frac{dT}{d\tau} = q - a \cdot T. \quad (12)$$

Разделив переменные уравнения (12), получим:

$$2 \cdot b \cdot \frac{T \cdot dT}{q - a \cdot T} = d\tau. \quad (13)$$

Проинтегрировав уравнение (13), получим:

$$\tau = 2 \cdot b \cdot \int \frac{T \cdot dT}{q - a \cdot T}. \quad (14)$$

Чтобы свести выражение (14) к виду, удобному для интегрирования, сделаем ниже следующие преобразования:

$$\begin{aligned} \tau &= 2 \cdot b \cdot \int \frac{T \cdot dT}{q - a \cdot T} = 2 \cdot b \cdot \int \frac{a \cdot T - q + q}{a \cdot (q - a \cdot T)} \cdot dT = \\ &= 2 \cdot b \cdot \left( -\frac{1}{a} \cdot \int dT + \frac{q}{a} \cdot \int \frac{dT}{q - a \cdot T} \right) = \\ &= -\frac{2 \cdot b}{a} \cdot T - \frac{2 \cdot b \cdot q}{a} \cdot \int \frac{dT}{a \cdot T - q} = \\ &= -\frac{2 \cdot b}{a} \cdot T - \frac{2 \cdot b \cdot q}{a^2} \cdot \int \frac{d(a \cdot T - q)}{(a \cdot T - q)}. \end{aligned} \quad (15)$$

Беря интеграл в выражении (15), получим зависимость:

$$\tau = -\frac{2 \cdot b}{a} \cdot T - \frac{2 \cdot b \cdot q}{a^2} \cdot \ln|a \cdot T - q| + c. \quad (16)$$

Для определения постоянной  $c$  воспользуемся начальными условиями: при  $\tau=0$ ,  $T=0$ . После подстановки этих условий в уравнение (16), получим:

$$c = \frac{2 \cdot b \cdot q}{a^2} \cdot \ln(q). \quad (17)$$

С учетом выражения (17) зависимость (16) приобретает вид:

$$\tau = -\frac{2 \cdot b}{a} \cdot T + \frac{2 \cdot b \cdot q}{a^2} \cdot \ln \left| \frac{q}{a \cdot T - q} \right|. \quad (18)$$

После подстановки условных обозначений (10) в уравнение (18) получим зависимость времени шлифования от температуры:

$$\tau = -\frac{\lambda}{q \cdot V_0} \cdot T + \frac{\lambda}{c \cdot \rho \cdot V_0^2} \cdot \ln \left| \frac{1}{T \cdot c \cdot \rho \cdot V_0 / q - 1} \right|. \quad (19)$$

Преобразовывая параметр  $q$  с учетом (6), (7), (8) окончательно получим зависимость времени шлифования от температуры в зоне контакта абразивного круга и образца:

$$\tau = \frac{\lambda}{c \cdot \rho \cdot V_0^2} \cdot \ln \left| \frac{1}{T \cdot c \cdot \rho / \sigma - 1} \right| - \frac{\lambda}{\sigma \cdot V_0^2} \cdot T. \quad (20)$$

Графическое представление зависимости (20) показано на рис. 2.

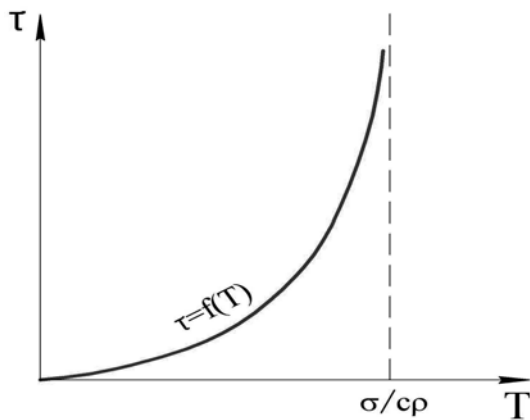


Рис. 2. Зависимость времени шлифования от температуры в зоне контакта

Максимальное значение температуры шлифования  $T_{\max}(\tau)$  можно определить по зависимости (20) из условия  $\tau \rightarrow \infty$ :

$$\ln \left| \frac{1}{T \cdot c \cdot \rho / \sigma - 1} \right| \rightarrow \infty, \text{ т.е. } T_{\max} \cdot c \cdot \rho / \sigma - 1 = 0,$$

откуда

$$T_{\max} = \frac{\sigma}{c \cdot \rho}. \quad (21)$$

Анализ зависимости (20) и рис. 2 показывает, что с увеличением времени обработки температура шлифования возрастает, приближаясь к максимальному значению  $\sigma/(c \cdot \rho)$ , определяющему тепловое

насыщение обрабатываемого материала. Значение температуры  $\sigma/(c \cdot \rho)$  обусловлено балансом тепла, уносимого стружками, и поглощаемого деталью. Чем больше параметры  $c$ ,  $\rho$ ,  $V_0$ , и меньше  $\lambda$ , тем интенсивнее рост температуры шлифования во времени. За счет отвода части тепла в обрабатываемый материал в начальный момент шлифования температура  $T$  меньше максимального значения  $\sigma/(c \cdot \rho)$ . Чем больше параметр  $\lambda$ , тем продолжительнее переходный процесс и меньше температура шлифования.

Полученная зависимость (20) позволяет определить общие условия снижения температуры шлифования. Они заключаются:

1) в уменьшении множителя  $\sigma/(c \cdot \rho)$ , т.е. уменьшении параметра  $\sigma$ ;

2) в снижении времени шлифования  $\tau_{\text{шл}}$  (принимая его меньше значения  $\tau$ , соответствующего условию стабилизации температуры).

Первое условие выполняется за счет повышения режущей способности круга, применения эффективных технологических сред и способов правки, уменьшающих или исключаящих трение материала со связкой.

Выполнение второго условия заключается в том, что чем меньше текущее значение температуры шлифования  $T$  от максимального значения температуры  $\sigma/(c \cdot \rho)$ , тем меньше должно быть время шлифования  $\tau_{\text{шл}}$ . Следовательно, уменьшить температуру шлифования можно путем прерывания процесса шлифования, не допуская теплового насыщения обрабатываемого материала, соответствующего максимальной температуре  $\sigma/(c \cdot \rho)$ . Задавая относительный уровень понижения температуры шлифования  $\frac{T \cdot c \cdot \rho}{\sigma} \cdot 100\%$ , по зависимости (20) опреде-

ляется время обработки  $\tau_{\text{шл}}$  (рис. 3). Далее процесс шлифования прерывается, и образец остывает до необходимой температуры  $T_{\text{ост}}$ . Причем время остывания образца  $\tau_{\text{ост}} \gg \tau_{\text{шл}}$  (в десятки раз) [5].

После остывания образца до заданной температуры  $T_{\text{ост}}$ , процесс шлифования возобновляется на время  $\tau_{\text{шл}}$ , а затем снова перерыв на время  $\tau_{\text{ост}}$ . На практике такое условие можно реализовать за счет цикличности шлифования. Например, путем применения абразивного круга с прерывистой поверхностью или некруглой формы, или применение пульсирующей подачи. Однако эти способы реализации цикличности шлифования имеют существенные недостатки:

1) необходимо применение специального дорогостоящего инструмента, который требует специальных методов правки;

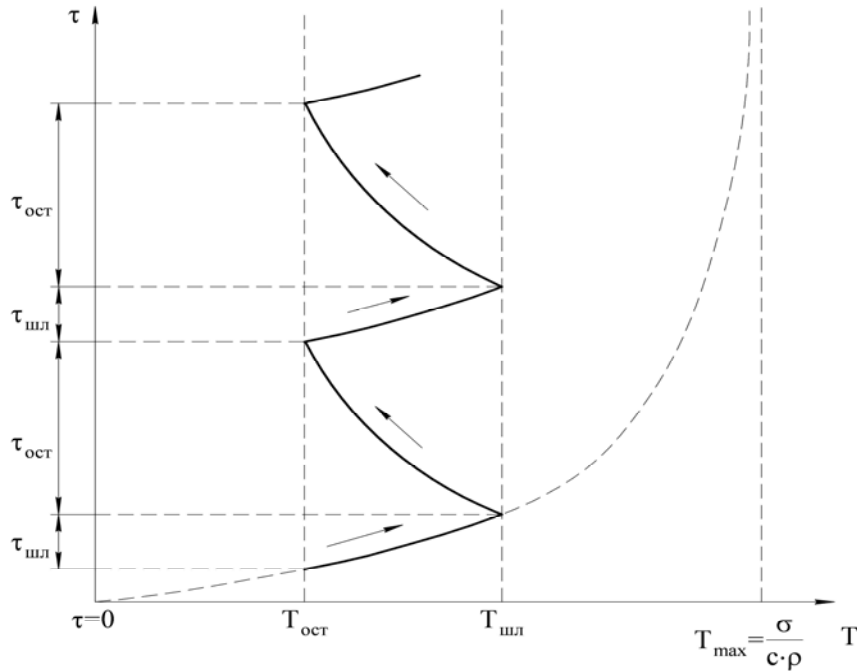


Рис. 3. График зависимости времени шлифования от температуры для циклического шлифования.

2) абразивные круги неправильной формы имеют повышенный износ в силу того, что в процессе шлифования участвуют только выступающие части периферии круга;

3) снижается производительность и точность обработки;

4) применение пульсирующей подачи связано со значительным усложнением кинематики станка и снижением точности обработки;

5) возникают значительные трудности в реализации условия  $\tau_{ост} \gg \tau_{шл}$  (в десятки раз).

Так, например, по утверждению автора работы [5], для случая использования прерывистых кругов без жидкостного охлаждения температура поверхности не снижается до исходной, а к последующему циклу добавляется некоторый остаток от предыдущего.

Всех этих недостатков лишен способ глубинного шлифования с применением планетарной шлифовальной головки (ПШГ) [7].

Рассмотрим расчетную схему планетарного глубинного шлифования, в котором снимаемый материал представлен в виде множества элементарных прямолинейных стержней длиной, равной глубине шлифования (рис. 4).

Определим зависимость температуры шлифования от конструктивных и технологических параметров процесса шлифования с помощью ПШГ.

В процессе шлифования стержни длиной, равной глубине резания  $t$ , прорезаются со скоростью  $V_o$ .

Время сошлифовывания стержней длиной, равной глубине резания  $t$ , со скоростью  $V_o$  равно времени перемещения детали на расстояние  $l_{дет}$  со скоростью подачи  $S_{дет}$ , т.е.:

$$\frac{t}{V_o} = \frac{l_{дет}}{S_{дет}}, \tag{22}$$

Откуда  $V_o = S_{дет} \cdot \frac{t}{l_{дет}}$ . (23)

Величина  $l_{дет}$  можно определить из  $\Delta OAB$  (рис. 5):

$$l_{дет} = \sqrt{OA^2 - OB^2} = \sqrt{R_r^2 - (R_r - t)^2} = \sqrt{2 \cdot R_r \cdot t} = \sqrt{D_r \cdot t}. \tag{24}$$

При диаметре ПШГ  $D_r \approx 400$  мм, и глубине резания  $t \approx 10$  мм, величиной  $t^2$ , по сравнению с  $D_r \cdot t$  можно пренебречь (погрешность меньше 1%), тогда

$$l_{дет} = \sqrt{D_r \cdot t}. \tag{25}$$

Подставляя значения (25) в выражение (23), получим:

$$V_o = S_{дет} \cdot \sqrt{\frac{t}{D_r}}. \tag{27}$$

Подставив выражение (27) в (20), окончательно получим зависимость времени шлифования от температуры в зоне контакта абразивного круга и образца

$$\tau = \frac{\lambda \cdot D_r}{c \cdot \rho \cdot S_{дет}^2 \cdot t} \cdot \ln \left| \frac{1}{(T \cdot c \cdot \rho / \sigma) - 1} \right| - \frac{\lambda \cdot D_r \cdot T}{\sigma \cdot S_{дет}^2 \cdot t}. \tag{28}$$



## Литература

1. Крымов В.В. Производство лопаток газотурбинных двигателей / В.В. Крымов, Ю.С.Елисеев, К.И. Зудин; под ред. В.В. Крымова. – М.: Машиностроение: Машиностроение-Полет, 2002. – 376 с.
2. Курин М.А. Траектория микрорезания шлифующего зерна при плоском планетарном шлифовании периферией круга / М.А. Курин // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – № 3 (50). – С. 47-50.
3. Курин М.А. Определение длины дуги контакта абразивного зерна с деталью при глубинном планетарном шлифовании плоских поверхностей / М.А. Курин // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – №5 (52). – С. 24-27.
4. Новиков Г.В. Расчет и анализ температуры резания при шлифовании / Г.В. Новиков // *Вестник Житомирского политехнического института*. – 1989. – С. 38-43.
5. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управлении качеством поверхности / В.А. Сипайлов. – М.: Машиностроение, 1978. – 167 с.
6. Филимонов Л.Р. Высокоскоростное шлифование / Л.Р. Филимонов. – Л.: Машиностроение, 1979. – 248 с.
7. Горбачев А.А. Параметры планетарного шлифования плоских поверхностей / А.А. Горбачев // *Интегрированные компьютерные технологии в машиностроении – ИКТМ-2005: тез. докл. Международная науч. конф. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» 2005г.* – Харьков, 2005. – С. 55.

Поступила в редакцию 10.11.2008

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., директор МИНТ ХАИ В.К. Борисевич, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

### ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ РІЗАННЯ В ЗОНІ КОНТАКТУ ІНСТРУМЕНТУ З ДЕТАЛЮ ПРИ ПЛАНЕТАРНОМУ ШЛІФУВАННІ ПЛОСКИХ ПОВЕРХОНЬ

*О.О. Горбачов, М.А. Курін*

Сформульована проблема необхідності дослідження температурного поля при глибинному шліфуванні плоских поверхонь. Одержано вираз, який зв'язує час шліфування та температуру у зоні контакту абразивного круга і деталі, та дозволяє визначити загальні умови зниження температури шліфування. Розглянута схема планетарного глибинного шліфування й визначена залежність температури шліфування від конструктивних та технологічних параметрів процесу шліфування. Виконаний розрахунок часу шліфування й часу охолодження поверхні деталі для конкретних умов.

**Ключові слова:** теплове насичення, нестационарний режим, рівняння теплового балансу, час шліфування, час охолодження.

### DETERMINATION OF THE CUTTING TEMPERATURE IN PART-TOOL CONTACT ZONE ON THE PLANETARY GRINDING FLAT SURFACE

*A.A. Gorbachov, M.A. Kurin*

The problem of necessity of research of a temperature field has formulated at deep grinding flat surfaces. Dependence of time of grinding on temperature in a zone of contact of an abrasive circle and a detail which allows define the general conditions of decrease in temperature of grinding is received. The circuit of planetary deep grinding is considered and dependence of temperature of grinding on constructive and technological parameters of process of grinding is determined. Calculation of time of grinding and time of cooling of a surface of a detail for a concrete case has made.

**Key words:** thermal saturation, a non-stationary mode, the equation of thermal balance, time of grinding, time of cooling.

**Горбачев Алексей Александрович** – ассистент кафедры технологии производства двигателей летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

**Курин Максим Александрович** – аспирант кафедры технологии производства двигателей летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.