

УДК 621.923

РЕШЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЗАДАЧИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ С УЧЕТОМ ИМПУЛЬСНОГО ХАРАКТЕРА ТЕПЛОВОГО ПОТОКА

В.А. Смирнов

Ижевский государственный технический университет, Воткинский филиал

E-mail: smivial@mail.ru

Приведено решение нестационарного нелинейного двумерного уравнения теплопроводности при плоском шлифовании периферией круга с учетом импульсного характера теплового потока. Предложено представлять тепловой поток в зоне контакта шлифовального круга и заготовки в виде суммы распределенной и импульсной частей. Полученные результаты позволяют прогнозировать изменение температуры заготовки при шлифовании.

Ключевые слова:

Шлифование, температурное поле, тепловой поток.

Key words:

Grinding, temperature field, heat-flow rate.

Исследование температурного поля заготовки является одной из центральных проблем теории шлифования. Такие ученые как А.И. Исаев, С.С. Силин, С.Г. Редько, А.Н. Резников, В.И. Островский, В.А. Сипайлов, А.В. Якимов, Е.П. Калинин, А.Ш. Хусаинов, Е.С. Киселев и др. посвятили данной проблеме множество своих работ [1–5 и др.]. В.А. Сипайловым и А.В. Якимовым получено аналитическое решение двумерного нестационарного линейного уравнения теплопроводности при действии равномерно распределенного полосового источника теплоты постоянной интенсивности, рассмотрены случаи шлифования сплошным и прерывистым кругом [3, 5]. Позже в работах [1, 4] получено численное решение нелинейной теплофизической задачи при шлифовании для тел различной конфигурации. В работах А.Н. Резникова [2] из теоретико-вероятностных соображений получены основные соотношения для расчета локальной и средней температуры при шлифовании. Результаты, полученные перечисленными учеными, внесли большой вклад в развитие теории теплофизики шлифования, однако остался ряд нерешенных проблем.

Существенный недостаток разработанных математических моделей — недостаточное внимание уделяется граничным условиям в зоне контакта шлифовального круга и заготовки. Как правило, в известных математических моделях проводится усреднение теплового потока по площадке контакта круга и заготовки. В результате не учитывается импульсная природа теплового потока из-за действия локальных источников теплоты (отдельных режущих зерен). С другой стороны в вероятностных моделях для расчета локальной температуры принимаются допущения, справедливость которых проверить не представляется возможным, вводятся переменные, о которых практически ничего не известно. В результате существующие расчетные схемы лишь частично соответствуют реальному процессу шлифования. В настоящей статье мы попытались устранить существующие недостатки.

Обзор проведенных исследований показал, что недостаточно внимания уделяется колебаниям температуры заготовки. Экспериментальные данные, полученные нами с помощью метода полумискусственной термопары, показывают, что колебания контактной температуры могут достигать 25...30 % от усредненного значения. Амплитуда колебаний температуры нарастает с увеличением времени шлифования. Как отмечает А.Н. Резников, локальная температура часто ограничивает режимы шлифования, поскольку именно под воздействием этих температур возникают структурные изменения и прижоги в поверхностных слоях заготовки. Локальная температура влияет на изнашивание и разрушение режущих зерен, а значит на работоспособность и стойкость режущего инструмента [2].

Колебания температуры обусловлены действием единичных зерен и изменением мгновенной производительности вследствие вибраций или неравномерного износа круга. Влияние колебаний силы резания на изменение контактной температуры были рассмотрены нами в [7]. В рамках данной статьи рассмотрим влияние единичных зерен на колебания температуры заготовки.

Рассмотрим плоское шлифование периферией круга. Обрабатываемую заготовку представим в виде пластины размерами $L_y \times L_z$ (рис. 1). Обозначим $\Theta(z, y, \tau)$ — температурное поле заготовки. Рассматривается нелинейное нестационарное двумерное уравнение теплопроводности:

$$c_3(\Theta) \rho_3 \frac{\partial \Theta(y, z, \tau)}{\partial \tau} = \text{div}(\lambda_3(\Theta) \nabla \Theta(y, z, \tau)),$$

где $\lambda_3(\Theta)$, $c_3(\Theta)$ — соответственно, коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость материала заготовки, зависящие от температуры Θ ; τ — время.

На рис. 1 P_z — тангенциальная составляющая силы резания; q — плотность теплового потока, поступающего в заготовку; V_3 — скорость подачи заготовки; $V_{\text{кр}}$ — окружная скорость вращения шлифовального круга.

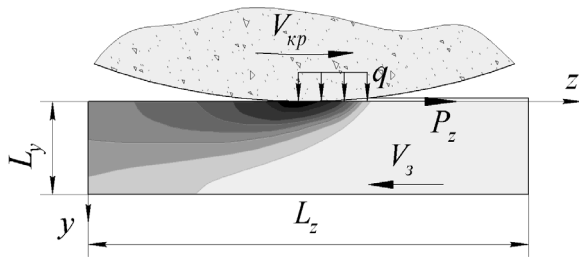


Рис. 1. Расчетная схема для теплофизической задачи

Нелинейное уравнение теплопроводности выбрано потому, что при шлифовании возникают значительные контактные температуры, при этом теплофизические свойства материала заготовки изменяются в значительной мере (до двух раз).

На верхней границе расчетной области зададим граничные условия. В зоне контакта круга с заготовкой задается граничное условие 2-го рода — известен тепловой поток через границу:

$$\lambda_3(\Theta) \frac{\partial \Theta}{\partial y} = q(z, \tau).$$

Предполагаем, что смазывающе-охлаждающая жидкость (СОЖ) практически не проникает в зону контакта шлифовального круга и заготовки. Подобная картина наблюдается при подаче СОЖ пульсом и при сухом шлифовании.

Вне зоны контакта задаем граничное условие 3-го рода — охлаждение потоком СОЖ с заданным коэффициентом теплоотдачи $\alpha_{\text{ж}}$ и температурой $\Theta_{\text{ж}}$:

$$\lambda_3(\Theta) \frac{\partial \Theta}{\partial y} = \alpha_{\text{ж}} (\Theta - \Theta_{\text{ж}}).$$

Закон распределения плотности теплового потока на площадке контакта шлифовального круга с заготовкой представим в следующем виде (рис. 2). Тепловой поток состоит из распределенной и импульсной частей (q_0 и q_1). Распределенная часть q_0 обусловлена работой резания, выполненной активными зернами, уже прошедшими через зону резания, а также работой трения в межзерновом пространстве между связкой круга и материалом заготовки. q_0 обеспечивает общее повышение температуры на площадке контакта шлифовального круга и заготовки. Распределенная часть q_0 перемещается в направлении оси z со скоростью подачи заготовки V_3 . Импульсная часть теплового потока q_1 возникает вследствие резания единичными зернами и перемещается относительно q_0 с окружной скоростью вращения круга $V_{\text{кр}}$. Величина импульсной части q_1 является случайной величиной, так как положение режущих зерен и величина их выступания из связки являются случайными величинами.

На рис. 2 d_n — средний диаметр площадки износа зерен круга; L_k — длина контакта шлифовального круга с заготовкой; B — ширина круга.

Для расчета величин q_0 и q_1 используем следующие условия. Во-первых, суммарная мощность, выделяемая источниками q_0 и q_1 , должна быть равна общей мощности теплового потока в зоне резания:

$$N = N_{q_0} + N_{q_1}. \quad (1)$$

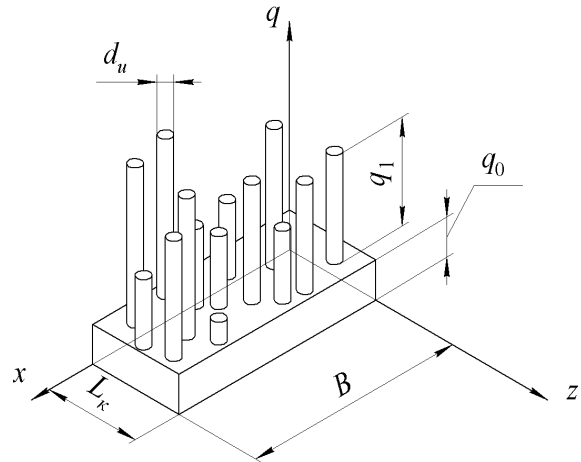


Рис. 2. Закон распределения плотности теплового потока по площадке контакта

Величину N рассчитаем как:

$$N = q_{\text{общ}} BL_k,$$

где $q_{\text{общ}} = \alpha_v \frac{P_z V_{\text{кр}}}{BL_k}$ — плотность теплового потока,

поступающего в заготовку; P_z — тангенциальная составляющая силы шлифования (рис. 1); α_v — коэффициент ввода, показывающий долю тепла, уходящей в заготовку (может быть рассчитан по формуле В.А. Сипайлова [3]).

Величину N_{q_0} находим аналогично N :

$$N_{q_0} = q_0 BL_k.$$

Для расчета величины N_{q_1} используем формулу:

$$N_{q_1} = q_1 \frac{\pi d_n^2}{4} n_{\text{о.р.}},$$

где $\bar{q}_1$ — среднее значение q_1 ; $n_{\text{о.р.}}$ — количество одновременно режущих зерен:

$$n_{\text{о.р.}} = n_{\text{реж}} \frac{L_k}{2\pi R},$$

где $n_{\text{реж}}$ — количество режущих зерен на периферии круга (может быть найдено по формуле А.Н. Резникова [2]), R — радиус шлифовального круга.

Средний диаметр площадок износа зерен круга d_n найдем по формуле:

$$d_n = \bar{x} \sqrt{\frac{8A\alpha^{3/2}}{3K(1-\varepsilon)}},$$

где $\bar{x} = 1,0176 \cdot 10^{-2} N$ — средневзвешенный размер зерна [2]; N — зернистость шлифовального круга по ГОСТ 3647-80; A — относительная опорная площадь поверхности круга, %; α — коэффициент формы зерна [2]; $K = 4(60 - 2C)$ — концентрация режущего материала [2]; C — номер структуры шлифовального круга по ГОСТ 3647-80; ε — относительная критическая глубина заделки зерен.

После преобразований условия (1) получим:

$$-\frac{d_n^2 n_{\text{рез}}}{q_1 8R} + q_0 B = q_{\text{общ}} B. \quad (2)$$

Во-вторых, введем безразмерный параметр k_n – наибольший коэффициент неравномерности распределения плотности теплового потока:

$$k_n = \frac{\max(q_1)}{q_0}.$$

По определению $k_n \geq 0$. Параметр k_n предлагается определять на основании экспериментальных исследований.

Учитывая случайный характер теплового потока q_1 , запишем:

$$q_1 = q_0 k_n \chi_q, \quad (3)$$

где χ_q – случайная величина, имеющая равномерное распределение в интервале $[0;1]$. Среднее значение $\bar{\chi}_q = 0,5$.

Для расчета q_0 используем среднее значение $\bar{\chi}_q = 0,5$ в уравнениях (2) и (3):

$$q_0 = q_{\text{общ}} \frac{16RB}{16RB + k_n d_n^2 n_{\text{рез}}}.$$

Далее из уравнения (3) находим q_1 .

Найдем частоту появления режущих зерен на площадке контакта. Рассматривать будем площадку шириной d_n . Необходимо определить среднее время между контактами режущих зерен с поверхностью заготовки. Среднее количество режущих зерен на ширине d_n :

$$n_{dn} = n_{\text{рез}} \frac{d_n}{B}.$$

Время одного оборота круга составляет $\tau_{\text{об}} = \frac{2\pi R}{V_{\text{кр}}}$. Следовательно, среднее время между

контактами зерен на ширине d_n определяется следующим образом:

$$\tau_1 = \frac{\tau_{\text{об}}}{n_{dn}} = \frac{2\pi RB}{n_{\text{рез}} V_{\text{кр}} d_n}.$$

Фактическое время между контактами зерен с заготовкой – величина случайная, поэтому для его расчета используем формулу:

$$\tau_1 = \chi_\tau \tau_1,$$

где χ_τ – случайная величина, имеющая равномерное распределение плотности вероятности в интервале $[0;2]$.

Для решения поставленной задачи используем численный метод конечных разностей, который подробно описан в [6]. Для аппроксимации уравнения теплопроводности используем явную двухслойную схему, которая является линейной комбинацией двух известных схем: явной шеститочечной и Алена–Чена. Производная $\partial\Theta/\partial u$ в граничных условиях заменяется конечной разностью третьего порядка точности. Используемый численный ме-

тод имеет высокую точность при наличии больших градиентов температуры, характерных для шлифования. На базе языков программирования C# и C++ нами разработана прикладная вычислительная система, реализующая используемый численный метод.

Результаты расчетов температуры на поверхности заготовки при различных значениях коэффициента k_n представлены на рис. 3. Исходные данные для расчета: обрабатываемый материал – 9ХС; шлифовальный круг – электрокорунд белый; $V_{\text{кр}} = 35$ м/с; $V_3 = 0,05$ м/с; глубина резания $t = 0,01 \cdot 10^{-3}$ м; $N = 40$; $C = 6$; $d_n = 0,2 \cdot 10^{-3}$ м.

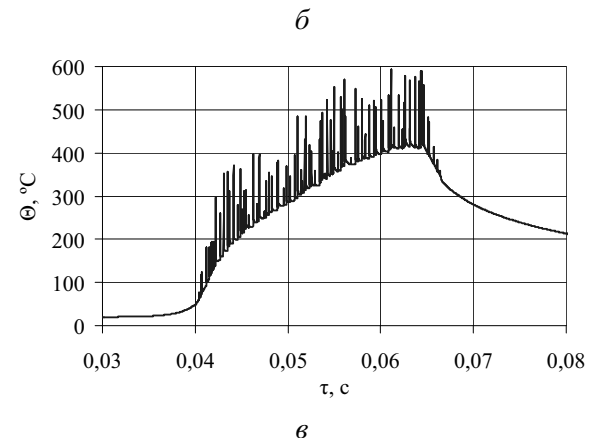
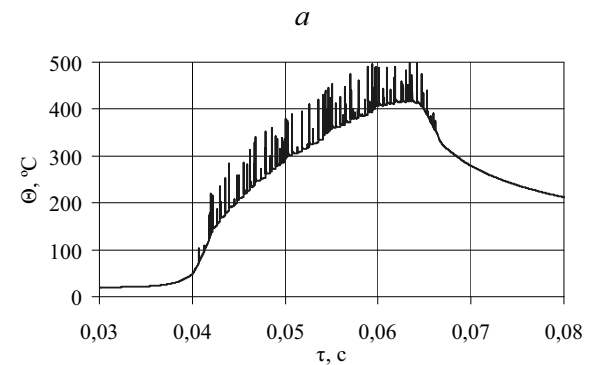
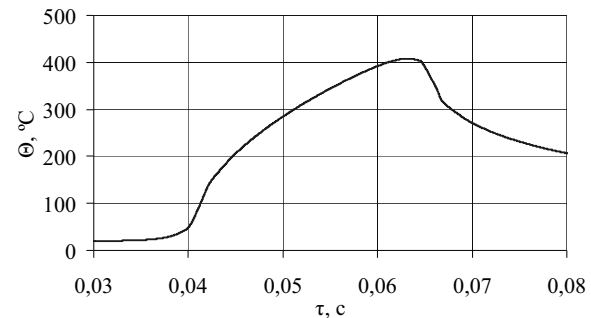


Рис. 3. Изменение температуры на поверхности заготовки при k_n : а) 0; б) 10; в) 20

В результате расчета получена одна из реализаций случайного процесса. По рис. 3 видно, что размах колебаний температуры нарастает с увеличением коэффициента k_n . Следует отметить, что график изменения средней контактной температуры

в целом соответствует результатам, полученным В.А. Сипайловым в работе [3].

В качестве критерия оценки колебаний температуры вследствие работы активных зерен используем величину R_Θ – размах колебаний температуры. На рис. 4 показана типичная зависимость R_Θ от коэффициента k_n .

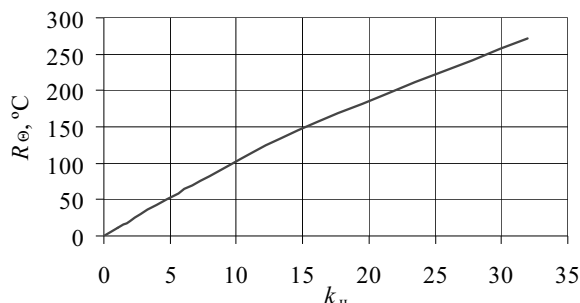


Рис. 4. Типичная зависимость $R_\Theta(k_n)$

Рис. 4 позволяет на основании экспериментальных данных определить значение k_n , характерное для рассматриваемой шлифовальной операции. Можно также проследить изменение k_n на протяжении периода стойкости круга.

Пример экспериментального графика температуры заготовки из стали 9ХС представлен на рис. 5.

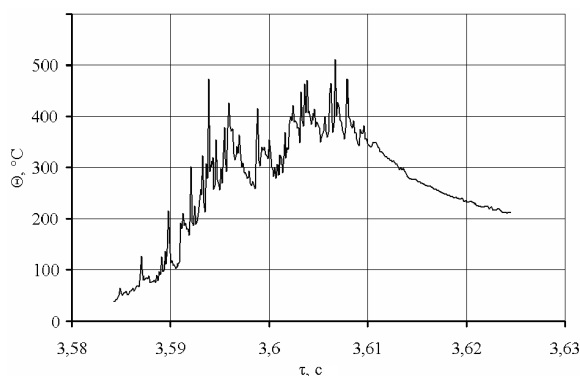


Рис. 5. Экспериментальные исследования температуры на поверхности заготовки

На экспериментальном графике, рис. 5, видны относительно низкочастотные колебания температуры вследствие изменения силы резания [7], а так-

же относительно высокочастотные колебания температуры вследствие работы активных зерен. На рис. 6 представлен теоретический график изменения температуры, полученный для тех же исходных данных (с учетом результатов [7]).

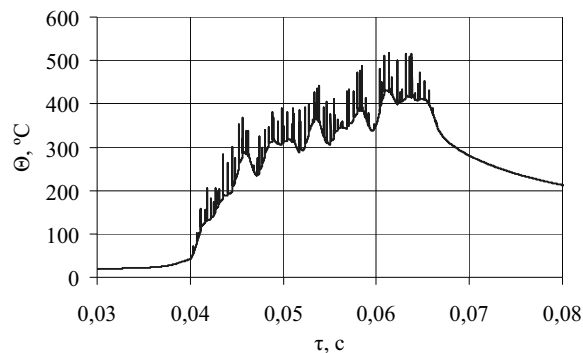


Рис. 6. Теоретический график изменения температуры на поверхности заготовки

Таким образом, математические модели, разработанные нами в [7] и данной статье, подтверждаются экспериментальными данными. Расхождение результатов экспериментальных и теоретических исследований не превышает 3 %.

Выводы

На основе нестационарного нелинейного двумерного уравнения теплопроводности разработана математическая модель для расчета температурного поля заготовки при шлифовании с учетом импульсного характера теплового потока. Показана возможность представлять тепловой поток в зоне контакта шлифовального круга и заготовки в виде суммы распределенной и импульсной частей. Математическая модель позволяет прогнозировать среднюю контактную и мгновенную температуру заготовки при шлифовании с учетом действия импульсных источников теплоты от активных зерен, благодаря чему обеспечивается требуемое качество шлифованных поверхностей.

Статья рекомендована Оргкомитетом V Международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения», г. Томск, 2010.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Киселев Е.С., Ковальников В.Н. Теплофизический анализ концентрированных операций шлифования. – Ульяновск: УлГТУ, 2002. – 140 с.
2. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с., ил.
3. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. – М.: Машиностроение, 1978. – 167 с., ил.
4. Хусаинов А.Ш. Повышение производительности бездефектного шлифования заготовок клиновидных изделий: дис. ... докт. техн. наук: 05.03.01. – Ульяновск, 2006. – 425 с.
5. Якимов А.В. Прерывистое шлифование. – Киев: Вища школа, 1986. – 175 с.
6. Смирнов В.А. Численный метод решения нелинейной двумерной задачи теплопроводности при шлифовании // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2010. – № 3. – С. 23–26.
7. Смирнов В.А. Влияние колебаний силы резания на контактную температуру при шлифовании // Современные проблемы машиностроения: Труды V Междуна. научн.-техн. конф.; ТПУ. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – С. 625–630.

Поступила 21.02.2011 г.