

УДК 621.923

Полянский В. И.**ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛООВОГО ПРОЦЕССА ПРИ ШЛИФОВАНИИ**

Температурный фактор является одним из основных при механической обработке материалов, поскольку определяет качество обрабатываемой поверхности и производительность. В особой мере это относится к обработке деталей, изготовленных из материалов с повышенными физико-механическими свойствами, когда на обрабатываемых поверхностях образуются температурные дефекты и для их недопущения требуется снизить производительность или применить другие более эффективные методы обработки и режущий инструмент. В связи с этим в работе решается актуальная научно-практическая задача определения условий уменьшения тепловой напряженности процесса резания и соответственно температуры резания на основе использования математического моделирования параметров теплового процесса при механической обработке материалов.

В работах [1–6] приведены классические решения теплофизических задач механической обработки материалов, на основе которых определены условия уменьшения температуры резания и оптимальные условия обработки, исходя из температурного критерия. Вместе с тем, в полученных классических решениях дифференциальных уравнениях теплопроводности температура по мере заглубления в поверхностный слой обрабатываемой детали непрерывно уменьшается, асимптотически приближаясь к нулю. С физической точки зрения теплота, возникающая в процессе резания, не может так быстро распространиться на бесконечное расстояние, т. е. должна существовать определенная глубина проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, при достижении которой температура принимает нулевое значение. Поэтому в работе поставлена задача теоретического анализа упрощенного решения [7], в котором выполняется это условие, позволяющее приблизить расчетную схему температуры резания к реальным условиям механической обработки и определить оптимальные параметры теплового процесса механической обработки.

Целью работы является определение условий уменьшения температуры резания и повышения качества и производительности обработки на основе математического описания параметров теплового процесса механической обработки с учетом достижения температурой нулевого значения при определенной глубине поверхностного слоя обрабатываемой детали.

Для достижения поставленной цели в работе использована математическая модель определения температуры шлифования, приведенная в работах [7–9], на основе учета движения теплового источника вглубь поверхностного слоя обрабатываемой детали (рис. 1) или вдоль адиабатического стержня, набором которых представлен снимаемый припуск. Принято, что в процессе шлифования происходит перерезание шлифовальным кругом адиабатического стержня со скоростью $V_{рез} = t / \tau$, где t – глубина шлифования, м; τ – время перерезания адиабатического стержня (время обработки), с; $V_{кр}$, $V_{дет}$ – скорости круга и детали, м/с.

В расчетной схеме (рис. 1) принято условие, что все выделяющееся при шлифовании тепло уходит на нагревание двух участков с длинами $l_1 = t$ и l_2 (определяющей глубину проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали). Исходя из этого условия, получено уравнение теплового баланса при шлифовании:

$$c \cdot \rho \cdot V_{рез} \cdot \theta + \frac{\lambda \cdot c \cdot \rho}{\sigma \cdot V_{рез}} \cdot \theta \cdot \frac{d\theta}{d\tau} = \sigma \cdot V_{рез}, \quad (1)$$

где θ – температура шлифования, град.;

c – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·град);

ρ – плотность материала, кг/м³;
 λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·град);
 σ – условное напряжение резания, Н/м².

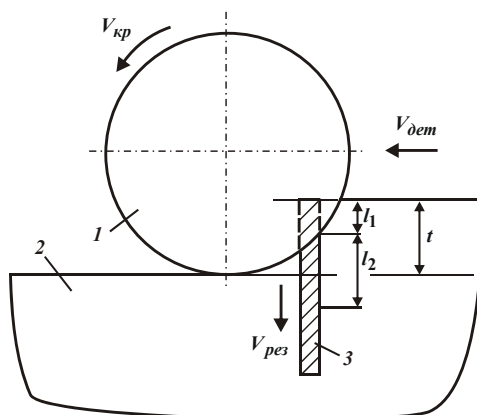


Рис. 1. Расчетная схема параметров теплового процесса при плоском шлифовании: 1 – шлифовальный круг; 2 – обрабатываемый материал; 3 – адиабатический стержень

Первое слагаемое уравнения (1) определяет количество тепла, затрачиваемое на нагревание образующихся стружек (на нагревание адиабатического стержня длиной l_1), а второе слагаемое определяет количество тепла, затрачиваемое на нагревание поверхностного слоя обрабатываемой детали, т.е. по сути, на нагревание адиабатического стержня длиной l_2 . Правая часть уравнения определяет количество тепла, выделяющегося в процессе шлифования. Решение дифференциального уравнения (1) [8]:

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}} = e^{-\frac{c \cdot \rho \cdot V_{рез}^2 \cdot \tau}{\lambda}}, \quad (2)$$

где $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho)$ – максимальная температура шлифования, град.

На рис. 2 показан характер изменения температуры шлифования θ от времени обработки τ . В данном случае температура шлифования θ изменяется в пределах $0 \dots \theta_{max}$. Поэтому после достижения определенного времени обработки τ температура шлифования θ остается фактически неизменной, что открывает возможности существенного повышения производительности обработки.

Для раздельного определения количества тепла, уходящего в образующиеся стружки и поверхностный слой обрабатываемой детали, необходимо исходное дифференциальное уравнение (1) представить в обобщенном виде:

$$\frac{\theta}{\theta_{max}} + \frac{\lambda}{\sigma \cdot V_{рез}^2} \cdot \frac{\theta}{\theta_{max}} \cdot \frac{d\theta}{d\tau} = 1. \quad (3)$$

Из уравнения (3) следует, что с увеличением температуры шлифования θ первое слагаемое увеличивается от 0 до максимального значения, равного 1, а второе слагаемое, наоборот, уменьшается от 1 до 0. Первое слагаемое определяет долю тепла, уходящего в образующиеся стружки, а второе слагаемое – долю тепла, уходящего в поверхностный слой обрабатываемой детали. Следовательно, с увеличением времени τ и соответственно температуры шлифования θ доля тепла, уходящего в образующиеся стружки, увеличивается, а доля тепла, уходящего в поверхностный слой обрабатываемой детали, наоборот, уменьшается. По сути, увеличение

температуры шлифования θ предопределяет увеличение доли тепла, уходящего в образующиеся стружки. Исходя из этого доля тепла, уходящего в образующиеся стружки, равна θ / θ_{max} , а доля тепла, уходящего в поверхностный слой обрабатываемой детали, равна $1 - \theta / \theta_{max}$.

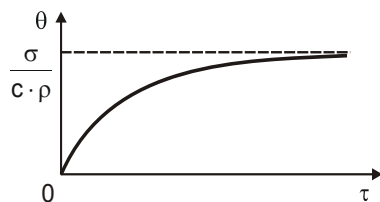


Рис. 2. Зависимость температуры шлифования θ от времени обработки τ

Уравнение баланса тепла при шлифовании можно представить иначе:

$$N \cdot (\tau - \tau_2) + N \cdot \tau_2 = N \cdot \tau \quad \text{или} \quad \frac{(\tau - \tau_2)}{\tau} + \frac{\tau_2}{\tau} = 1, \quad (4)$$

где τ_2 – время нагревания оставшейся части (после перерезания шлифовальным кругом) адиабатического стержня, с;

$\tau - \tau_2$ – время нагревания удаленной (в виде образующихся стружек) части адиабатического стержня, с;

τ – время контакта шлифовального круга с адиабатическим стержнем, с.

Сравнивая первые и вторые слагаемые уравнений (3) и (4), имеем:

$$\frac{\theta}{\theta_{max}} = \frac{(\tau - \tau_2)}{\tau} = 1 - \frac{\tau_2}{\tau} \quad \text{или} \quad \frac{\tau_2}{\tau} = 1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}. \quad (5)$$

Первое слагаемое уравнения (4), определяемое зависимостью (5), как следует из рис. 2, с увеличением времени τ увеличивается по закону увеличения температуры шлифования θ . Это приводит к увеличению доли тепла, уходящего в образующиеся стружки. При этом отношение τ_2 / τ , согласно зависимости (5), с увеличением времени τ уменьшается, поскольку отношение θ / θ_{max} увеличивается.

Для определения второго слагаемого уравнения (3) необходимо установить производную $\frac{d\theta}{d\tau}$, используя зависимость (2), представленную в виде:

$$e^{-\frac{c \cdot \rho \cdot V_{pez}^2 \cdot \tau}{\lambda}} = e^{\frac{c \cdot \rho \cdot \theta}{\sigma}} \cdot \left(1 - \frac{c \cdot \rho}{\sigma} \cdot \theta\right). \quad (6)$$

Дифференцируя по времени τ левую и правую части зависимости (6), получено:

$$-\frac{c \cdot \rho \cdot V_{pez}^2}{\lambda} \cdot e^{-\frac{c \cdot \rho \cdot V_{pez}^2 \cdot \tau}{\lambda}} = -e^{\frac{c \cdot \rho \cdot \theta}{\sigma}} \cdot \frac{c^2 \cdot \rho^2}{\sigma^2} \cdot \theta \cdot \frac{d\theta}{d\tau}, \quad (7)$$

откуда:

$$\frac{d\theta}{d\tau} = \frac{\sigma^2 \cdot V_{pez}^2}{c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \theta} \cdot e^{-\frac{c \cdot \rho \cdot V_{pez}^2 \cdot \tau}{\lambda}} \cdot \frac{c \cdot \rho \cdot \theta}{\sigma}. \quad (8)$$

После преобразований зависимости (8), имеем:

$$-\frac{d\theta}{d\tau} = \frac{\sigma^2 \cdot V_{рез}^2}{c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \theta} \cdot \left[\left(1 - e^{-\frac{c \cdot \rho \cdot V_{рез}^2}{\lambda} \cdot \tau - \frac{c \cdot \rho \cdot \theta}{\sigma}} \right) - 1 \right] \text{ или } -\frac{d\theta}{d\tau} = \frac{\sigma \cdot V_{рез}^2}{\lambda \cdot \theta} \cdot \left(\theta - \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \right), \quad (9)$$

откуда:

$$\frac{d\theta}{d\tau} = \frac{\sigma \cdot V_{рез}^2}{\lambda} \cdot \left(\frac{\theta_{max}}{\theta} - 1 \right). \quad (10)$$

Тогда второе слагаемое уравнения (3) равно:

$$\frac{\lambda}{\sigma \cdot V_{рез}^2} \cdot \frac{\theta}{\theta_{max}} \cdot \frac{d\theta}{d\tau} = 1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}. \quad (11)$$

В итоге уравнение (3) принимает вид:

$$\frac{\theta}{\theta_{max}} + \left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}} \right) = 1, \quad (12)$$

указывающий на достоверность полученного решения.

Отношение τ_2 / τ , определяемое зависимостью (5), а соответственно, и второе слагаемое уравнения (11) уменьшаются с увеличением времени τ , что свидетельствует об уменьшении доли тепла, уходящего в поверхностный слой обрабатываемой детали.

Поскольку с увеличением времени τ отношение θ / θ_{max} непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к значению 1, а отношение $(1 - \theta / \theta_{max})$, наоборот, непрерывно уменьшается, асимптотически приближаясь к нулю, то в реальных условиях шлифования нельзя добиться полного перехода образующегося при резании тепла в образующиеся стружки, т. е. обязательно определенная часть тепла будет переходить в поверхностный слой обрабатываемой детали.

Максимальное значение температуры шлифования, как показано выше, определяется зависимостью $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho)$. Поэтому уменьшить θ_{max} можно лишь уменьшением условного напряжения резания σ (энергоемкости обработки) за счет снижения интенсивности трения в зоне резания и повышения режущей способности инструмента.

Глубина проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали l_2 с учетом зависимостей для определения температуры шлифования $\theta = q \cdot l_2 / \lambda$ и плотности теплового потока $q = \sigma \cdot V_{рез}$ [7] выражается:

$$l_2 = \frac{\lambda \cdot \theta}{q} = \frac{\lambda \cdot \theta}{\sigma \cdot V_{рез}}. \quad (13)$$

Как видно, параметр l_2 тем больше, чем больше температура θ , т. е. с увеличением времени τ параметр l_2 непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к максимальному значению l_{2max} , которое достигается при условии $\theta = \theta_{max}$. Тогда с учетом зависимости $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho)$ имеем:

$$l_{2max} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{V_{рез}}. \quad (14)$$

Согласно зависимости (14), максимальное значение параметра $l_{2_{max}}$ определяется скоростью перемещения теплового источника вглубь поверхностного слоя обрабатываемой детали, т. е. вдоль адиабатического стержня.

Зная параметр l_2 , по зависимости $l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot \tau}{c \cdot \rho}}$ [8] можно определить время τ_2 – время нагревания оставшейся части (после перерезания шлифовальным кругом) адиабатического стержня, рассматривая его вместо времени контакта шлифовального круга с адиабатическим стержнем τ :

$$\tau_2 = \frac{c \cdot \rho}{2 \cdot \lambda} \cdot l_2^2. \quad (15)$$

С учетом параметра $l_{2_{max}}$ максимальное значение времени $\tau_{2_{max}}$ определится:

$$\tau_{2_{max}} = \frac{c \cdot \rho}{2 \cdot \lambda} \cdot l_{2_{max}}^2. \quad (16)$$

Подставляя зависимость (14) в (16), получено:

$$\tau_{2_{max}} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{2 \cdot V_{рез}^2}. \quad (17)$$

Как видно, время $\tau_{2_{max}}$ однозначно определяется скоростью перерезания адиабатического стержня шлифовальным кругом $V_{рез}$: чем больше $V_{рез}$, тем меньше время $\tau_{2_{max}}$.

Очевидно, отношение τ_2 / τ всегда меньше единицы. Этим определяется то, что расчетные значения параметрам θ и l_2 всегда меньше при движущемся тепловом источнике вглубь поверхностного слоя обрабатываемой детали, чем при неподвижном тепловом источнике. Отношение $\sqrt{\tau_2 / \tau}$ также меньше единицы. Следовательно, учет движения теплового источника вдоль адиабатического стержня (т. е. вглубь поверхностного слоя обрабатываемой детали) позволяет уточнить расчетные значения параметров θ , l_2 и привести в соответствие теорию и практику процесса шлифования.

Необходимо отметить, что предложенную расчетную схему параметров теплового процесса при шлифовании можно использовать и при механической обработке лезвийными инструментами. В этом случае изменятся значения условного напряжения резания σ (энергоемкости обработки), которые, как известно, при механической обработке лезвийными инструментами всегда меньше, чем при шлифовании. Изменятся (уменьшатся) также длина и время контакта режущего инструмента с обрабатываемым материалом. Очевидно, это приведет к уменьшению температуры резания θ и глубины проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали l_2 .

При этом, как и в случае шлифования, часть образующегося при резании тепла будет уходить в образующуюся стружку, а часть тепла – в поверхностный слой обрабатываемой детали. Подтверждением тому являются известные экспериментальные данные, приведенные в научно-технической литературе [9], согласно которым с увеличением скорости резания в образующуюся стружку уходит больше выделяемого при резании тепла, чем в поверхностный слой обрабатываемой детали, что позволяет повысить качество обрабатываемых поверхностей и производительность.

Согласно зависимости (17), добиться полного перехода образующегося при резании тепла в образующуюся стружку можно при условии $\tau_{2_{max}} \rightarrow 0$ или $V_{рез} \rightarrow \infty$, т. е. в условиях высокоскоростного резания и шлифования. Однако на практике такое условие в полном

объеме неосуществимо, поэтому и при высокоскоростной обработке все же небольшая часть образующегося тепла будет переходить в поверхностный слой обрабатываемой детали, изменяя структуру обрабатываемого материала. Поэтому важным условием дальнейших работ в этом направлении следует рассматривать повышение эффективности высокоскоростной обработки на основе разработки методики определения оптимальных условий обработки при высокоскоростном резании и шлифовании по температурному критерию с использованием аналитических решений, приведенных в настоящей работе.

ВЫВОДЫ

В работе проведен анализ теоретического решения определения параметров теплового процесса при механической обработке материалов, полученного с учетом достижения температурой нулевого значения на определенной глубине поверхностного слоя обрабатываемой детали. Теоретически установлено, что в этом случае температура резания, также как и доля тепла, уходящего в образующиеся стружки при шлифовании (или в образующуюся стружку при лезвийной обработке) с увеличением времени обработки непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к максимальному значению, определяемому условным напряжением резания и теплофизическими характеристиками обрабатываемого материала. Соответственно, доля тепла, уходящего в поверхностный слой обрабатываемой детали, с увеличением времени обработки непрерывно уменьшается, асимптотически приближаясь к нулевому значению. Показано, что чем больше скорость взаимного перемещения инструмента и обрабатываемой детали, тем больше тепла уходит в образующиеся стружки и меньше – в обрабатываемую деталь, соответственно, тем выше качество и производительность обработки. Исходя из этого, рекомендуется шире применять на практике эффективные процессы высокоскоростного резания и высокоскоростного шлифования, для которых характерен наименьший перенос образующегося тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали и обеспечение условий существенного повышения качества и производительности обработки. Перспективы дальнейших работ в этом направлении состоят в разработке методики определения оптимальных условий обработки при высокоскоростном резании и высокоскоростном шлифовании на основе температурного критерия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Резников А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А. Н. Резников. – М. : Машиностроение, 1981. – 279 с.
2. Якимов А. В. Оптимизация процесса шлифования / А. В. Якимов. – М. : Машиностроение, 1975. – 175 с.
3. Сипайлов В. А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности / В. А. Сипайлов. – М. : Машиностроение, 1978. – 166 с.
4. Сизый Ю. А. Динамика и теплофизика шлифования / Ю. А. Сизый, Д. В. Сталинский. – Харьков : ГП УкрНТЦ "Энергосталь", 2016. – 448 с.
5. Евсеев Д. Г. Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке / Д. Г. Евсеев. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 127 с.
6. Лавриненко В. И. Инструменты из сверхтвердых материалов в технологиях абразивной и физико-технической обработки: монография / В. И. Лавриненко, В. Ю. Солод. – Каменское : ДГТУ, 2016. – 529 с.
7. Новиков Ф. В. Повышение эффективности технологии финишной обработки деталей пар трения поршневых насосов / Ф. В. Новиков, С. М. Яценко // Физические и компьютерные технологии: труды 13 междунар. научн.-техн. конф., 19–20 апреля 2007, г. Харьков. – Харьков : ХНПК "ФЭД", 2007. – С. 8–20.
8. Новиков Ф. В. Оптимальные решения в технологии машиностроения : монография / Ф. В. Новиков, В. А. Жовтобрюх, В. Г. Шкурупий. – Д. : ЛИРА, 2018. – 424 с.
9. Новиков Ф. В. Основы математического моделирования технологических процессов механической обработки : монография / Ф. В. Новиков. – Д. : ЛИРА, 2018. – 400 с.