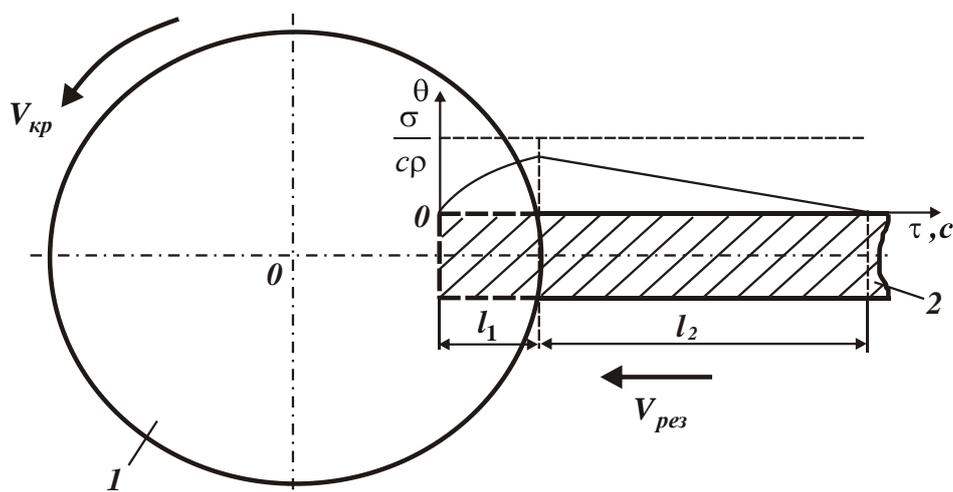


УСЛОВИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШЛИФОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО КРИТЕРИЯ

Новиков Ф.В., докт. техн. наук, **Дитиненко С.А.**, канд. техн. наук
(Харьковский национальный экономический университет)
Кленов О.С. (ООО "ДиМерус Инженеринг", г. Харьков)

Введение и постановка задачи. Температурный фактор при шлифовании во многих случаях является основным ограничением применения на практике этого эффективно-го метода финишной обработки [1, 2]. Поэтому определение путей уменьшения тепловой напряженности процесса шлифования имеет большое теоретическое и практическое значение, открывает новые технологические возможности высококачественной обработки деталей из закаленных сталей и других труднообрабатываемых материалов. Исследование тепловых процессов при шлифовании требует разработки математических моделей, позволяющих производить оптимизационные расчеты по определению наиболее эффективных вариантов обработки по температурному критерию. В связи с этим, целью настоящей работы является теоретическое обоснование условий уменьшения температуры шлифования и повышения производительности обработки.

Материалы и результаты исследований. Для определения температуры шлифования θ воспользуемся теоретическим подходом, предложенным в работе [3], применительно к шлифованию прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга с постоянной скоростью $V_{рез}$ (рис. 1):



$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot z, \quad (1)$$

где σ – условное напряжение резания, Н/м²; z – относительная величина температуры (0...1), определяется из уравнения:

$$\bar{l}_1 = \frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot l_1 \cdot V_{рез} =$$

$-\ln(1-z) - z$; \bar{l}_1 – безразмерная величина; l_1 – толщина слоя сошлифованного материала, м; c – удельная

Рис. 1. Расчетная схема процесса шлифования прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга: 1 – круг; 2 – образец.

теплоемкость материала, Дж/(кг·К); ρ – плотность материала, кг/м³; λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/м·К.

Необходимо отметить, что относительная величина температуры z по физической сути определяет долю тепла, уходящего в стружки при шлифовании. Очевидно, при

$z \rightarrow 0$ фактически все образующееся при резании тепло уходит в обрабатываемую деталь, а при $z \rightarrow 1$, наоборот, все тепло уходит в стружки.

Согласно приведенной зависимости, температура шлифования θ определяется относительной величиной температуры z , которая является функцией параметров шлифования. Таким образом, температура шлифования θ неявно выражена через параметры шлифования, что затрудняет проведение анализа и оптимизации процесса шлифования по температурному критерию. В связи с этим важно получить аналитическое решение, позволяющее в явном виде выразить θ относительно параметров шлифования. Для этого обратимся к исходному интегральному уравнению [3] для определения температуры шлифования $\theta(\tau)$, составленному на основе баланса тепла, уходящего в образующиеся стружки и обрабатываемый образец с площадью поперечного сечения стержня S :

$$c \cdot \rho \cdot S \cdot V_{рез} \cdot \int_0^{\tau} \theta(\tau) \cdot d\tau + \frac{0,5 \cdot c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot S^2}{N} \cdot [\theta(\tau)]^2 = N \cdot \tau, \quad (2)$$

где τ – время обработки, с; N – мощность теплового источника, Вт.

Упростим уравнение (2), приняв первое слагаемое в левой части равным нулю. С физической точки зрения это означает, что тепловой источник не перемещается вглубь поверхностного слоя обрабатываемой детали со скоростью $V_{рез}$ (рис. 1), а остается неподвижным в начальной точке в течение времени τ_1 . Тогда с учетом соотношений [3]: $q = N / S = \sigma \cdot V_{рез}$ температура шлифования θ определится

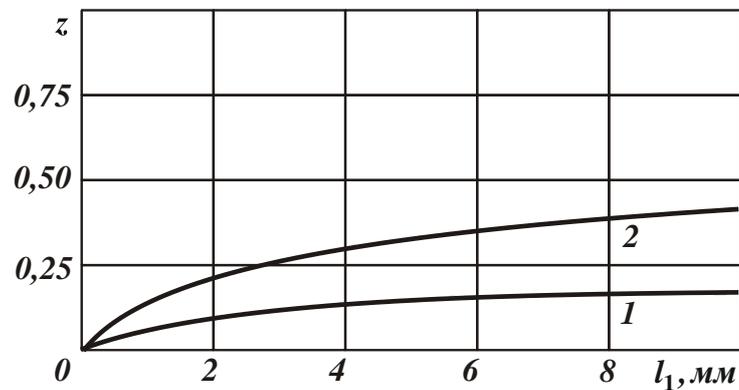
$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot V_{рез} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot c \cdot \rho}{\lambda} \cdot \tau_1} = \sigma \cdot V_{рез} \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \tau_1}, \quad (3)$$

где q – плотность теплового потока, Вт/м².

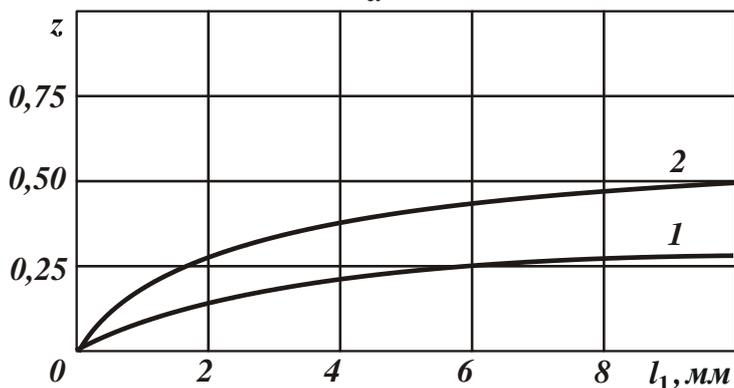
Принимая $z = \frac{\theta}{\left(\frac{\sigma}{c \cdot \rho}\right)}$, получим $z = V_{рез} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot c \cdot \rho}{\lambda} \cdot \tau_1}$. Откуда

$$\tau_1 = \frac{\lambda \cdot z^2}{2 \cdot c \cdot \rho \cdot V_{рез}^2}. \quad (4)$$

Зависимость (2.3) отличается от аналогичной зависимости $\tau = \frac{\lambda \cdot \bar{l}_1}{c \cdot \rho \cdot V_{рез}^2}$ [3], учитывающей движение теплового источника вдоль обрабатываемого образца со скоростью $V_{рез}$. Для оценки степени их отличия рассмотрим отношение τ_1 / τ :



а



б

Рис. 2. Зависимость z от величины снимаемого припуска l_1 при шлифовании твердого сплава ВК8 (а) и стали ШХ15 (б): 1 – $V_{рез} = 2$ мм/мин; 2 – $V_{рез} = 10$ мм/мин.

ки уходит значительно меньше тепла. Чем больше параметры l_1 и $V_{рез}$, тем больше z и соответственно больше доля тепла, уходящего в образующиеся стружки.

Для сравнения на рис. 2,б приведены расчетные значения z при шлифовании стали ШХ15 ($a = \lambda / c \cdot \rho = 8,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$). Как видно, при шлифовании стали значения z больше, чем при шлифовании твердого сплава. Это связано с меньшим коэффициентом температуропроводности a у стали ШХ15. Таким образом, расчетами установлено, что при шлифовании величина z изменяется в небольших пределах – 0,1...0,2 и лишь при высокопроизводительном шлифовании достигает значения 0,5. Этим показано, что в связи с небольшими значениями скорости $V_{рез}$ и величины z в первом приближении движение теплового источника вдоль обрабатываемого образца (рис. 1) можно не рассматривать и расчет температуры шлифования θ вести по зависимости (3). Это упрощает расчет, не нарушая физические закономерности распространения тепла и формирования температуры при шлифовании. Однако при этом в каждом конкретном случае необходимо оценивать z и соответственно точность расчета температуры шлифования.

$$\frac{\tau_1}{\tau} = \frac{z^2}{2 \cdot \bar{l}_1}. \quad (5)$$

Расчетами установлено, что при $z < 0,1$ расхождение значений τ_1 и τ составляет до 6%, при $0,1 < z < 0,2$ – до 14%, при $0,2 < z < 0,3$ – до 20%, при $0,3 < z < 0,4$ – до 27%, а при $0,4 < z < 0,5$ – до 35%. На рис. 2,а приведены расчетные значения относительной величины температуры z в зависимости от величины l_1 для разных значений $V_{рез}$ при шлифовании твердого сплава ВК8 ($c = 175,9 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$; $\rho = 15 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; $\lambda = 50 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$; коэффициент температуропроводности $a = \lambda / c \cdot \rho = 18,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$). Как видно, величина z принимает относительно небольшие значения, которые меньше единицы. Это свидетельствует о том, что основная часть выделяющегося тепла уходит в обрабатываемую деталь, в образующиеся стружки

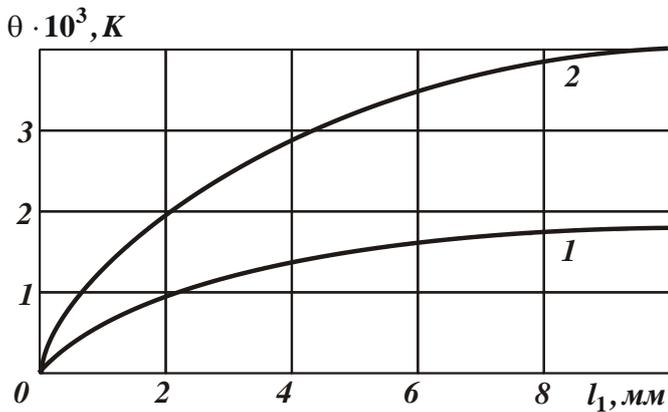


Рис. 3. Зависимость температуры θ от величины l_1 при шлифовании твердого сплава ВК8: 1 – $V_{рез} = 2$ мм/мин; 2 – $V_{рез} = 10$ мм/мин.

$$\sigma = 26,7 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2.$$

Из рис. 3 следует, что при $V_{рез} = 2$ мм/мин с увеличением величины l_1 температура шлифования θ увеличивается, достигая при $l_1 = 10$ мм значения 1500°C , при котором на обрабатываемых поверхностях еще не будут образовываться температурные дефекты. При $V_{рез} = 10$ мм/мин температура шлифования θ принимает значительно большие значения, при которых гарантированно на обрабатываемых поверхностях будут образовываться температурные дефекты. Чтобы их исключить, естественно необходимо уменьшить температуру шлифования θ . Это может быть достигнуто за счет уменьшения величины l_1 путем разбиения снимаемого припуска на части и осуществления многопереходной обработки, обеспечивающей периодическое прерывание процесса шлифования с целью создания условий для остывания обрабатываемой детали. Прерывание процесса шлифования во времени можно обеспечить путем отвода на определенное время круга от детали или же совершая перемещение детали по касательной к рабочей поверхности круга, т.е. обеспечивая продольную или круговую подачи. Данное условие реализовано, по сути, во всех схемах шлифования (круглое наружное, внутреннее и плоское шлифование).

На рис. 4 показан характер изменения температуры шлифования θ от времени обработки τ для разных условий нагревания и остывания образца. Как видно, при обработке в n переходов температура шлифования θ меньше, чем при обработке в один переход. Важным условием снижения температуры шлифования за счет периодического прерывания процесса следует рассматривать применение шлифовальных кругов с прерывистой рабочей поверхностью [1]. Как установлено экспериментально, периодический контакт круга с обрабатываемой поверхностью позволяет до 50% уменьшить температуру шлифования и тем самым повысить качество обработки.

Произведем теоретический анализ условий уменьшения температуры шлифования и экспериментальную оценку достоверности полученных решений. На рис. 3 показаны рассчитанные по зависимости (1) значения температуры шлифования θ твердого сплава ВК8 с учетом значений z , приведенных на рис. 2,а. Условное напряжение резания σ определено по известной зависимости [4]: $\sigma = 2 \cdot \sigma_{сж} / K_{рез}$, где $\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м^2 ; $K_{рез}$ – коэффициент резания, равный отношению тангенциальной и радиальной составляющих силы резания. В расчетах принято: $\sigma_{сж} = 4 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$; $K_{рез} = 0,3$;

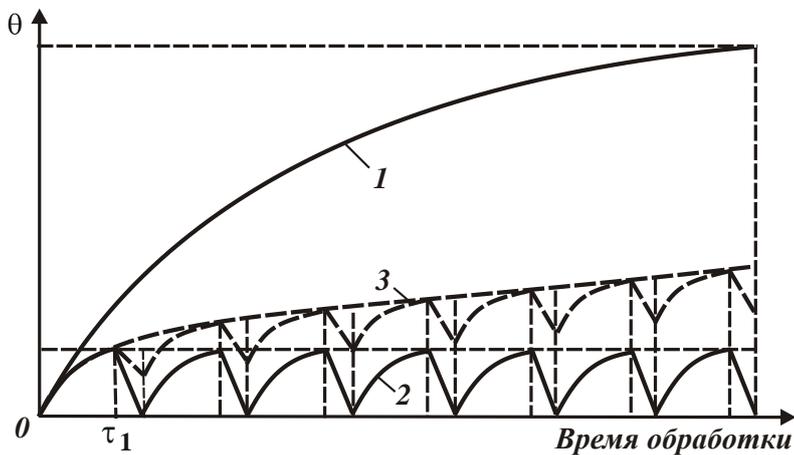


Рис. 4. Зависимость температуры шлифования θ от времени при обработке в один переход и отсутствии остывания обрабатываемого образца (1) и при обработке в n переходов при полном (2) и частичном (3) остывании образца.

Прерывание во времени процесса шлифования является важным, но не единственным путем уменьшения температуры шлифования. Исходя из приведенных зависимостей, основным параметром, влияющим на температуру θ , является условное напряжение резания σ . Чем меньше эта величина, тем меньше температура. По физической сути σ соответствует энергоемкости обработки, определяющей количество энергии, затрачиваемой на сьем единицы объема материала. Как известно, при шлифовании энергия расходуется на осуществление процесса резания зернами круга, а также на преодоление

силы трения связки круга с обрабатываемым материалом. При этом энергия, затрачиваемая на преодоление силы трения связки круга с обрабатываемым материалом, превосходит энергию, затрачиваемую на осуществление процесса резания. Исходя из этого, σ будет в большей мере обусловлено процессом трения связки круга с обрабатываемым материалом, чем процессом резания. Следовательно, появляется возможность уменьшения σ за счет снижения интенсивности трения в зоне шлифования, применяя для этого эффективные технологические среды и методы правки круга, оптимальные режимы шлифования и т.д.

Проведем анализ температуры шлифования по упрощенной зависимости (3), рассматривая в ней время $\tau_1 = l_1 / V_{рез}$, тогда

$$\theta = \sigma \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot V_{рез} \cdot l_1}{c \cdot \rho \cdot \lambda}} \quad (6)$$

Температура шлифования θ зависит от трех параметров: σ , $V_{рез}$ и l_1 . Наибольшее влияние на θ оказывает σ . Температура шлифования θ может быть описана известной из курса физики формулой теплопроводности тела:

$$\theta = \frac{q \cdot l_2}{\lambda} \quad (7)$$

С учетом соотношения $q = \sigma \cdot V_{рез}$ зависимость (7) примет вид

$$\theta = \frac{\sigma \cdot V_{рез} \cdot l_2}{\lambda} \quad (8)$$

Откуда толщина поверхностного слоя обрабатываемой детали l_2 , в котором концентрируется выделяющееся при шлифовании тепло (рис. 1), выразится

$$l_2 = \frac{\lambda \cdot \theta}{\sigma \cdot V_{рез}} \quad (9)$$

Подставляя в зависимость (9) зависимость (3), получим

$$l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho}} \cdot \tau_1 \quad (10)$$

Из зависимости (10) вытекает, что параметр l_2 вполне однозначно определяется временем τ_1 . Чем больше τ_1 , тем больше толщина поверхностного слоя образца, в который проникло тепло. Заслуживает особого внимания тот факт, что плотность теплового потока $q = \sigma \cdot V_{рез}$ не оказывает влияния на параметр l_2 . С учетом $\tau_1 = l_1 / V_{рез}$ зависимость (10) примет вид

$$l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{l_1}{V_{рез}}} \quad (11)$$

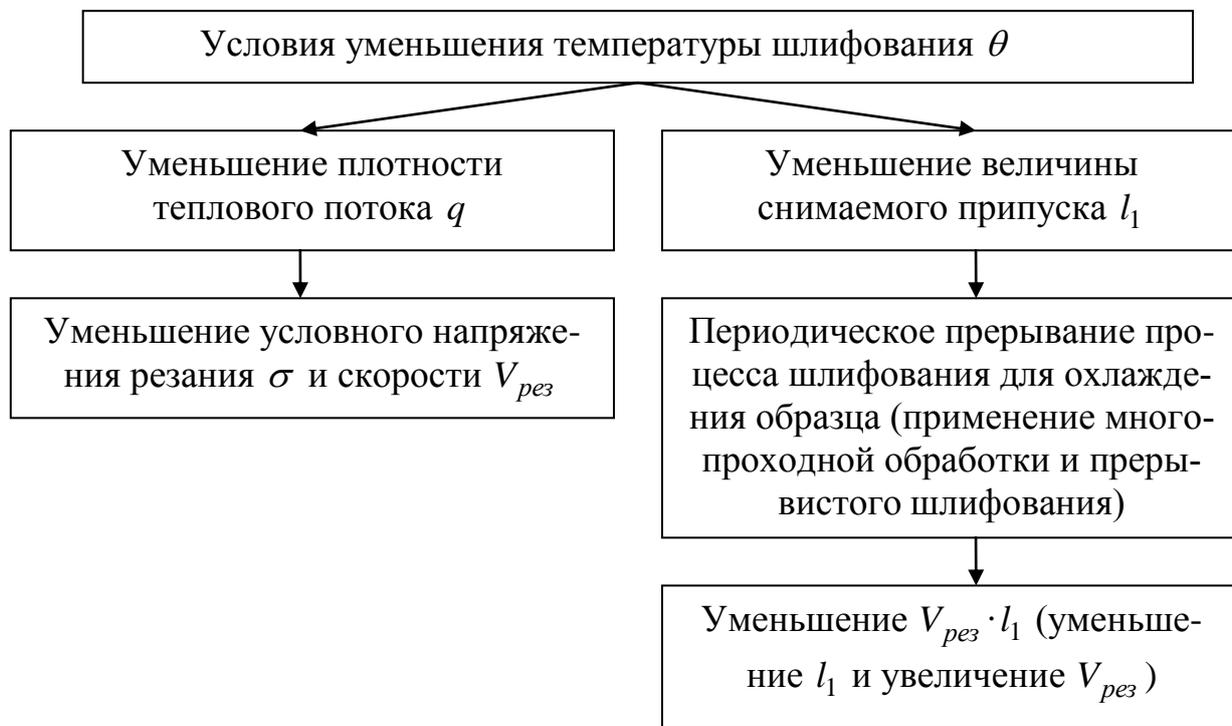


Рис. 5. Структурная схема условий уменьшения температуры шлифования θ .

Нетрудно видеть, что скорость $V_{рез}$ определяет параметры q и l_2 . С увеличением скорости $V_{рез}$ плотность теплового потока q увеличивается, а параметр l_2 , наоборот, уменьшается, причем с меньшей интенсивностью, что приводит к увеличению θ . Из этого можно заключить, что определяющим фактором в формировании температуры шлифования θ является плотность теплового потока q . Поэтому уменьшить θ можно, прежде всего, за счет уменьшения q , уменьшая условное напряжение резания σ и скорость $V_{рез}$. Несомненно, для снижения θ , исходя из зависимости (6), необходимо уменьшать и параметр l_1 , равный величине снимаемого припуска (рис. 5). Из этого вытекают два направления уменьшения температуры шлифования θ – это уменьшение параметров σ и $V_{рез} \cdot l_1$. Основным путем уменьшения σ состоит в повышении режущей способности шлифовального круга и уменьшении интенсивности трения связки и зерен круга с обрабатываемым материалом. Уменьшение произведения параметров $V_{рез} \cdot l_1$ требует проведения оптимизации структуры и параметров операции шлифования по наименьшему времени обработки с учетом ограничения по температуре шлифования, поскольку только уменьшения скорости $V_{рез}$ связано со снижением производительности обработки $Q = V_{рез} \cdot S$, что не эффективно.

С целью оценки достоверности полученных зависимостей для определения температуры шлифования θ была произведена их экспериментальная проверка на примере шлифования торцом алмазного круга на керамической связке 12A2 150x10x3 AC4 200/160 4 пластинки шириной $B=7$ мм из твердого сплава ВК6 с режимом: $V_{кр}=15$ м/с; $S_{non}=0,06$ мм/дв.ход ($t=0,06$ мм); $S_{np}=2$ м/мин [5]. Экспериментально установлено, что тангенциальная составляющая силы резания для данных условий шлифования равна $P_z=75$ Н. Тогда условное напряжение резания $\sigma = P_z \cdot V_{кр} / Q = 80,35 \cdot 10^3$ МПа, где $Q = B \cdot S_{np} \cdot t$ – производительность обработки, мм³/с. Как видно, величина σ принимает достаточно большое значение. Следовательно, формирование величины σ происходит как в результате процесса резания, так и процесса трения в зоне шлифования. Для заданных условий обработки по зависимости (6) была определена температура шлифования θ . В результате установлено, что $\theta=342,7$ К или $70,7^{\circ}\text{C}$. Это незначительно отличается от экспериментально установленного значения температуры, равного $\theta=362$ К или 90°C , и свидетельствует о достоверности полученных упрощенных зависимостей для определения температуры шлифования θ . Относительная величина температуры z равна 0,011. Весьма малые значения z указывают на то, что фактически все образующееся при шлифовании тепло уходит в обрабатываемую деталь. Параметр l_2 , определяемый зависимостью (11), равен 10,66 мм, т.е. при шлифовании нагревается вся обрабатываемая пластина. Именно этим можно объяснить то, что температура поверхностного слоя пластинки принимает относительно небольшое значение – 70°C . При уменьшении параметра l_2 вследствие уменьшения отвода тепла в обрабатываемую пластинку, температура была бы выше. Следовательно, с одной стороны, уменьшение скорости $V_{рез}$ позволяет увеличить параметр l_2 по зависимости (11), а с другой стороны, уменьшает плотность теплового потока $q = \sigma \cdot V_{рез}$, что в конечном итоге приводит к уменьшению температуры шлифования θ .

Как показано выше, уменьшение параметра l_1 при съеме заданного припуска $P > l_1$ связано с периодическим прерыванием процесса шлифования на время, достаточное для остывания обрабатываемого образца, и осуществлением обработки в несколько переходов. Уменьшение l_1 , исходя из зависимости (6), допускает увеличение скорости $V_{рез}$ (при заданной температуре шлифования θ) и производительности обработки.

Выводы. 1. В работе получила дальнейшее развитие математическая модель определения температуры при шлифовании прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга с постоянной скоростью. Доказано, что при шлифовании доля тепла, уходящего в обрабатываемый образец, значительно больше доли тепла, уходящего в образующиеся стружки. Поэтому с достаточной для практики точностью при расчете температуры шлифования движение теплового источника вдоль обрабатываемого образца можно не учитывать. Это значительно упрощает аналитические зависимости для определения температуры и открывает новые возможности в плане анализа и оптимизации структуры и параметров операций шлифования на основе температурного критерия.

2. Теоретически определены основные условия уменьшения температуры шлифования. Они состоят, главным образом, в уменьшении условного напряжения резания (энергоёмкости обработки) и в съеме припуска небольшими частями за счет пери-

одического прерывания процесса шлифования с целью охлаждения нагретых поверхностей обрабатываемого образца.

Список литературы

1. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с.
2. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А.Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
3. Новиков Ф.В. Повышение эффективности технологии финишной обработки деталей пар трения поршневых насосов / Ф.В. Новиков, С.М. Яценко // Физические и компьютерные технологии: междунауч. научн.-техн. конф., 19-20 апреля 2007 г.: труды – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2007. – С. 8-20.
4. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 1. ”Механика резания материалов” – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с.
5. Захаренко И.П. Алмазная заточка твердосплавного инструмента совместно со стальной державкой / И.П. Захаренко, А.А. Шепелев. – К.: Наук. думка, 1976. – 219 с.