

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ ПО ТЕМПЕРАТУРНОМУ КРИТЕРИЮ

Новиков Ф.В., докт. техн. наук, Рябенков И.А.

(Харьковский национальный экономический университет, ГП ХМЗ “ФЭД”)

Теоретически обоснованы условия повышения качества обработки за счет уменьшения толщины дефектного слоя обрабатываемой детали на основе использования разработанной математической модели определения температуры при шлифовании, учитывающей распределение тепла, уходящего в образующиеся стружки и обрабатываемую деталь

Введение. Происходящие при резании и шлифовании материалов тепловые процессы отрицательно влияют на основные показатели обработки, в особенности на качество обрабатываемых поверхностей, вызывая появление на них прижогов, микротрещин и других температурных дефектов. В настоящее время накоплен большой практический опыт по их устранению [1]. Однако в теоретическом плане недостаточно изучены вопросы образования дефектного слоя на обрабатываемой поверхности, что имеет важное значение по изысканию путей повышения качества обработки.

Цель работы. Целью работы является теоретическое обоснование условий повышения качества обработки при шлифовании по температурному критерию.

Материалы и результаты исследований. В работе [2] применительно к плоскому шлифованию получены аналитические зависимости для определения толщины слоя l_2 обрабатываемой детали, в котором концентрируется выделяемое при обработке тепло:

$$l_2 = \frac{\lambda}{c \cdot \rho \cdot V_{рез}} \cdot z = t \cdot \frac{z}{\bar{l}_1}, \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/(м·К); c – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К);

ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³; $V_{рез} = V_{дет} \cdot \sqrt{\frac{t}{D_{кр}}}$; $V_{дет}$ – скорость детали, м/с; t – глубина шлифования, м; $D_{кр}$ – диаметр

шлифовального круга, м; $\bar{l}_1 = -\ln(1-z) - z$; $z = \theta / \left(\frac{\sigma}{c \cdot \rho} \right)$ – относительная

величина температуры при шлифовании, изменяется в пределах 0...1; θ – температура при шлифовании, К; σ – условное напряжение резания, Н/м².

По физической сути параметр l_2 соответствует толщине дефектного слоя обработанной детали. Из зависимости (1) вытекает, что уменьшить параметр l_2 можно за счет уменьшения глубины шлифования t и отношения z/\bar{l}_1 . Уменьшение отношения z/\bar{l}_1 , как следует из рис. 1, связано с увеличением относительной величины температуры z , которая определяется безразмерной величиной \bar{l}_1 :

$$\bar{l}_1 = \frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot t \cdot V_{\text{дет}} \cdot \sqrt{\frac{t}{D_{\text{кр}}}} \quad (2)$$

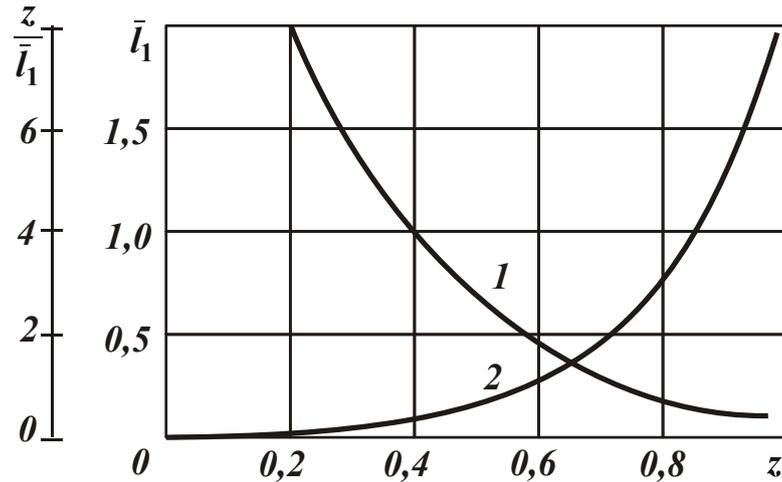


Рис. 1. Зависимости z/\bar{l}_1 (1) и \bar{l}_1 (2) от z .

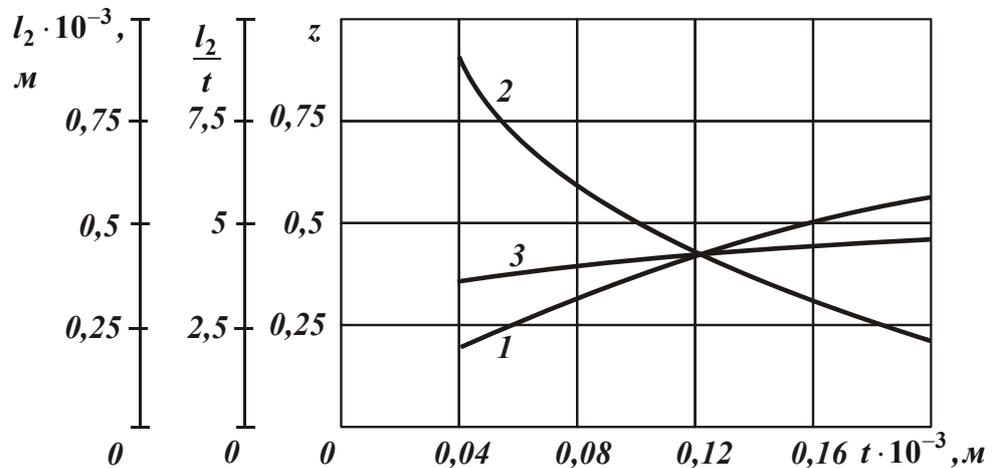


Рис. 2. Зависимости z (1), отношения l_2/t (2) и параметра l_2 (3) от глубины шлифования t : обрабатываемый материал – сталь ШХ15 (коэффициент теплопроводности $a = \lambda/c \cdot \rho = 8,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$); $D_{\text{кр}} = 0,45 \text{ м}$; $V_{\text{дет}} = 30 \text{ м/мин}$.

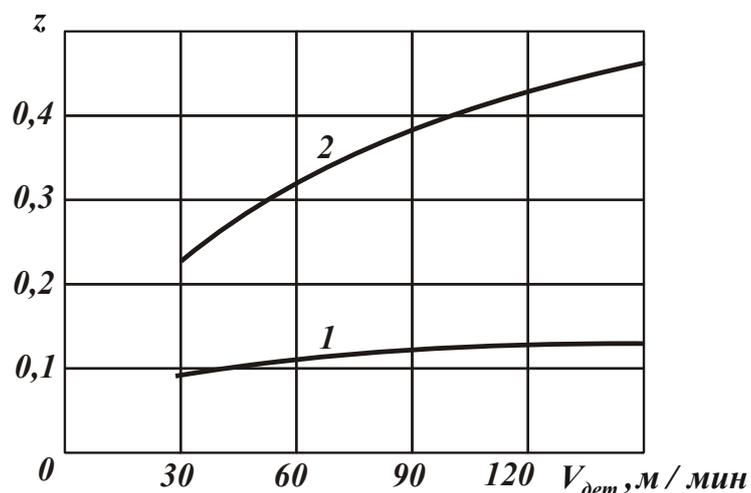


Рис. 3. Зависимости z от скорости детали $V_{дет}$: 1 – $t=0,02$ мм; 2 – $t=0,08$ мм; обрабатываемый материал – твердый сплав ВК8 ($c=175,9$ Дж/(кг·К); $\lambda=50$ Вт/(м·К); $\rho=15\cdot 10^3$ кг/м³); $D_{кр}=0,3$ м.

С увеличением z безразмерная величина \bar{l}_1 увеличивается, рис. 1. Из этого следует, что увеличить относительную величину температуры z можно за счет увеличения скорости детали $V_{дет}$ и глубины шлифования t . Однако, увеличение глубины шлифования t , согласно зависимости (1) и расчетных данных, показанных на рис. 2, ведет к увеличению параметра l_2 . Поэтому основным путем уменьшения параметра l_2 является увеличение скорости детали $V_{дет}$.

Из рис. 1 вытекает, что при $z \rightarrow 1$ отношение $z/\bar{l}_1 \rightarrow 0$. Следовательно, добиться существенного уменьшения параметра l_2 можно в условиях установившегося теплового процесса ($z \rightarrow 1$) [2] за счет значительного увеличения скорости детали $V_{дет}$. На рис. 3 графически показан характер изменения расчетных значений относительной величины температуры z в зависимости от скорости детали $V_{дет}$ и глубины шлифования t . При изменении параметров режима шлифования $V_{дет}$ и t в широких пределах относительная величина температуры z изменяется не столь существенно: всего в пределах $0 \dots 0,47$. Это свидетельствует о том, что при шлифовании имеет место неустановившийся тепловой процесс ($z < 1$) и отношение z/\bar{l}_1 принимает значения больше единицы. Согласно зависимости (1), параметр l_2 при этом превышает глубину шлифования t , т.е. образующееся при шлифовании тепло концентрируется в довольно большом поверхностном слое l_2 . На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что увеличение скорости детали $V_{дет}$ в реализуемых на практике диапазонах не позволяет решить задачу существенного уменьшения параметра l_2 , который определяет толщину дефектного слоя обрабатываемой детали. Уменьшить l_2 в этих условиях можно уменьшением глубины шлифования t . Однако это

малоэффективно в связи с необходимостью уменьшения производительности обработки.

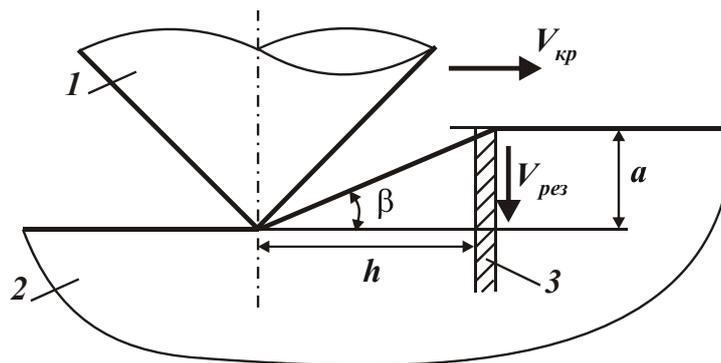


Рис. 4. Расчетная схема процесса микрорезания отдельным зерном: 1 – режущее зерно; 2 – обрабатываемый материала; 3 – адиабатический стержень.

Следует отметить, что зависимость (1) получена из условия равномерного распределения теплового источника по всей площади контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью. Данное условие может быть с определенными допущениями реализовано в случае сплошного контакта связки и зерен шлифовального круга с обрабатываемой деталью, например, при шлифовании затупленным кругом, характеризующимся незначительным выступанием режущих зерен над уровнем связки. При шлифовании вновь заправленным кругом, как правило, имеет место контакт режущих зерен с обрабатываемым материалом, контакт связки с обрабатываемым материалом незначителен. В этом случае более правильно расчет параметра l_2 производить из условия резания отдельным зерном, т.е. рассматривать в расчетной схеме контакт круга с обрабатываемой деталью не в виде “пятна” контакта, а в виде точечных контактов отдельных зерен с обрабатываемым материалом, используя схему стружкообразования при резании (рис. 4) [2]. В данной схеме снимаемый припуск условно представлен в виде множества бесконечно тонких адиабатических стержней, которые перерезаются со скоростью $V_{рез}$. Необходимо отметить, что для данной расчетной схемы также справедлива зависимость (1). Однако в ней вместо глубины шлифования t необходимо рассматривать толщину среза отдельным зерном a , а скорость перерезания адиабатического стержня $V_{рез}$ определять по зависимости:

$$V_{рез} = \frac{a}{\tau_1} = a \cdot \frac{V_{кр}}{h} = V_{кр} \cdot \operatorname{tg} \beta, \quad (3)$$

где a – толщина среза, м; τ_1 – время перерезания адиабатического стержня, с; $V_{кр}$ – скорость резания (скорость круга), м/с; β – условный угол сдвига обрабатываемого материала; h – длина зоны резания, охваченная плоскостью сдвига материала, м.

С учетом сказанного зависимость (1) примет вид:

$$l_2 = a \cdot \frac{z}{l_1}, \quad (4)$$

где
$$\bar{l}_1 = \frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot a \cdot V_{кр} \cdot \operatorname{tg} \beta = -\ln(1-z) - z. \quad (5)$$

Зависимость (5) аналогична зависимости (2). Роль глубины шлифования t в ней выполняет толщина среза a , роль скорости детали $V_{дет}$ – скорость круга $V_{кр}$, а роль отношения $\sqrt{t/D_{кр}}$ – тангенс угла сдвига обрабатываемого материала β . Расчеты показали, что количественно произведение параметров $a \cdot V_{кр} \cdot \operatorname{tg} \beta$ в зависимости (5) значительно больше произведения параметров $t \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{t/D_{кр}}$, входящих в зависимость (2). Это приводит к увеличению относительной величины температуры z до значений, близких единице, рис. 5, что, по сути, реализует при шлифовании установившийся тепловой процесс ($z \rightarrow 1$). Расчетные значения z , показанные на рис. 5, получены применительно к условиям микрорезания единичным алмазным зерном, рис. 6, рис. 7 [3]. Значения $\operatorname{tg} \beta$ определены по зависимости: $\operatorname{tg} \beta = K_{рез} / 2$, где $K_{рез} = P_z / P_y$; P_z, P_y – соответственно тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, Н. Исходя из рис. 7, в расчетах принято $K_{рез} = P_z / P_y = 0,5$; $\operatorname{tg} \beta = 0,25$.

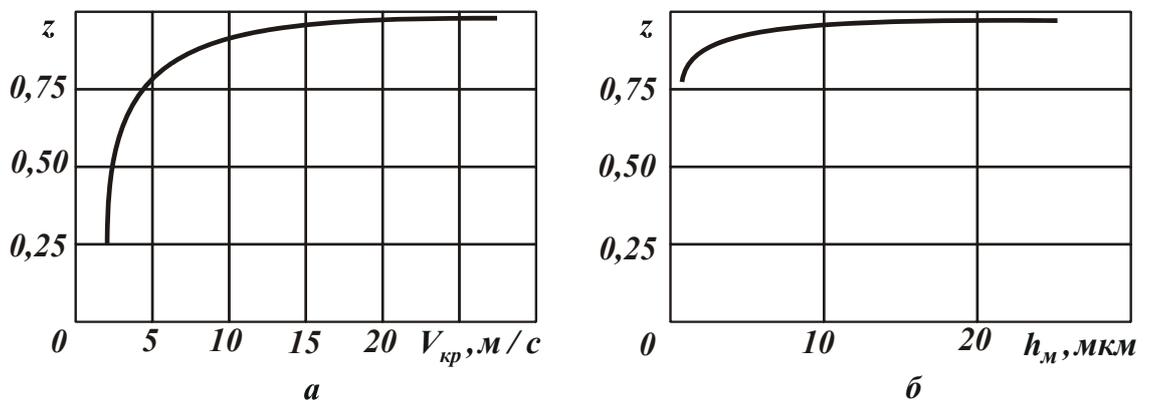


Рис. 5. Зависимости относительной величины температуры z от скорости круга $V_{кр}$ (а) и толщины среза $h_м$ (или a) (б) при микрорезании закаленной стали ШХ15: а – $h_м = 5$ мкм; б – $V_{кр} = 27,5$ м/с.

Таким образом показана возможность существенного уменьшения параметра $l_2 \rightarrow 0$ в соответствии с зависимостью (4) за счет увеличения скорости круга $V_{кр}$, в особенности в условиях высокоскоростного шлифования при $V_{кр} = 300$ м/с и более. Следовательно, увеличение скорости круга и осуществление высокоскоростного шлифования, наряду с повышением производительности обработки, позволяет уменьшить толщину слоя l_2 обрабатываемой детали, в котором концентрируется выделяемое при обработке тепло, т.е. толщину дефектного слоя, и тем самым повысить

качество обработки. Однако следует иметь в виду, что данный эффект будет проявляться при незначительном контакте связки круга с обрабатываемым материалом. В противном случае мы приходим к “пятну” контакта круга с обрабатываемым материалом и начальному решению (1), рис. 2, характеризующемуся повышенными значениями l_2 .

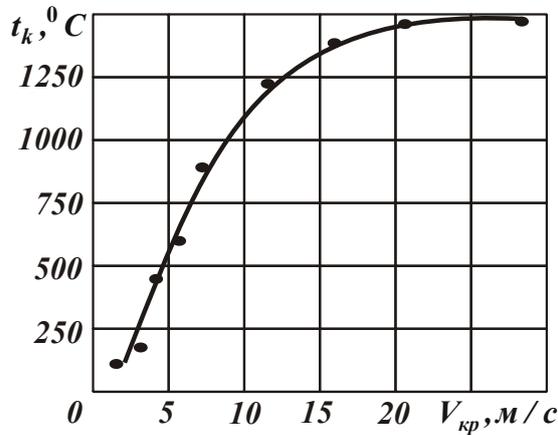


Рис. 6. Зависимость контактной температуры от скорости при микрорезании закаленной стали ШХ15 алмазным конусом $2\alpha=120^\circ$, $\rho=10$ мкм и толщиной среза $h_m=5$ мкм.

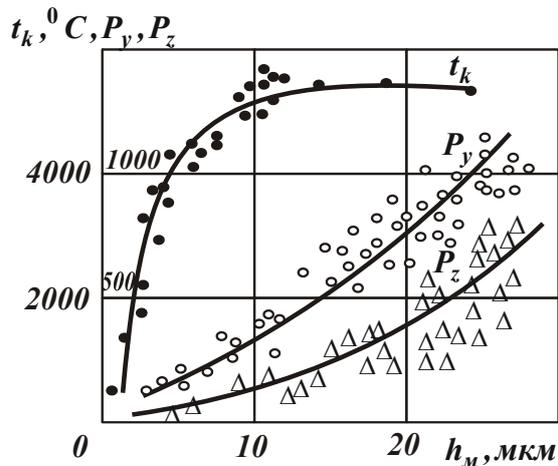


Рис. 7. Зависимости контактной температуры t_k , радиальной P_y и тангенциальной P_z составляющих силы резания от толщины среза h_m при микрорезании сырой стали ШХ15 алмазным конусом $2\alpha=120^\circ$, $\rho=15$ мкм со скоростью 27,5 м/с.

Как отмечалось выше, практически исключить контакт связки круга с обрабатываемым материалом можно за счет применения эффективных методов правки круга, обеспечивающих своевременное удаление с его рабочей поверхности изношенных зерен и увеличенное выступание зерен над уровнем связки. Весьма эффективны в этом направлении электрофизикохимические методы правки алмазных кругов на металлических связках, а также комбинированные методы шлифования,

исключающие засаливание алмазного круга и обеспечивающие поддержание его высокой режущей способности в процессе шлифования.

Из зависимости (5) также вытекает возможность увеличения относительной величины температуры z и соответственно уменьшения отношения z/\bar{l}_1 в зависимости (4) за счет увеличения толщины среза a отдельным зерном круга. Однако параметр a самостоятельно входит в зависимость (4) и приводит к увеличению l_2 . Очевидно параметр a , аналогично глубине шлифования t , входящей в зависимость (2), неоднозначно влияет на l_2 , но в итоге (как установлено расчетами) приводит к увеличению l_2 . Поэтому для уменьшения параметра l_2 толщину среза a целесообразно уменьшать, а скорость круга $V_{кр}$ – увеличивать.

Увеличение относительной величины температуры z приводит к росту температуры при шлифовании θ , определяемой зависимостью [2]:

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot z. \quad (6)$$

При этом увеличивается доля тепла, уходящего в образующиеся стружки $\frac{Q_1}{Q} = 1 - \frac{z^2}{2 \cdot \bar{l}_1}$, и уменьшается доля тепла, уходящего в обрабатываемую деталь $\frac{Q_2}{Q} = \frac{z^2}{2 \cdot \bar{l}_1}$ [2]. Таким образом, уменьшение толщины слоя l_2 обрабатываемой детали, в котором концентрируется выделяемое при обработке тепло, обусловлено увеличением доли тепла, уходящего в образующиеся стружки Q_1/Q , относительной величины температуры z и температуры при шлифовании θ . Иными словами, для того чтобы уменьшить параметр l_2 необходимо практически все образующееся при шлифовании тепло отвести в стружки и реализовать условие $z \rightarrow 1$, т.е. установившийся тепловой процесс. При этом важно увеличение температуры при шлифовании θ в связи с увеличением z в зависимости (6) компенсировать уменьшением условного напряжения резания σ (уменьшая интенсивность трения связки круга с обрабатываемым материалом и повышая режущую способность круга).

Таким образом установлено, что уменьшение параметра l_2 (толщины дефектного слоя обрабатываемой детали) связано с увеличением температуры при шлифовании. Поэтому уровень снижения параметра l_2 должен быть ограничен максимально допустимой температурой при шлифовании θ . Полученное решение соответствует закону теплопроводности

$$Q = \lambda \cdot S \cdot \frac{\theta}{l_2} \cdot \tau, \quad (7)$$

который при условии $Q = N \cdot \tau = q \cdot S \cdot \tau$ принимает более простой вид:

$$q = \lambda \cdot \frac{\theta}{l_2}, \quad (8)$$

где Q – количество образующегося при шлифовании тепла, Дж; $N = q \cdot S$ – мощность теплового источника, Вт; q – плотность теплового источника, Вт/м²; S – площадь поперечного сечения адиабатического стержня (рис. 4), м²; τ – время действия теплового источника на фиксированный адиабатический стержень, с.

Подставляя в (8) зависимости (1) и (6) с учетом $q = \sigma \cdot V_{рез}$ [2], нетрудно видеть, что левая и правая части (8) равны между собой, т.е. полученное решение правильно. Из зависимости (8) следует, что увеличить числитель, т.е. θ , и одновременно уменьшить знаменатель, т.е. l_2 , можно за счет увеличения плотности теплового потока $q = \sigma \cdot V_{рез}$. Скорость движения теплового источника вдоль адиабатического стержня $V_{рез}$ в зависимости от характера контакта круга с обрабатываемой деталью описывается зависимостями: $V_{рез} = V_{дет} \cdot \sqrt{\frac{t}{D_{кр}}}$ и $V_{рез} = V \cdot tg\beta$. Следовательно, увеличить q и соответственно $V_{рез}$ в первом случае можно путем увеличения скорости детали $V_{дет}$ и глубины шлифования t , а во втором случае – путем увеличения скорости круга $V_{кр}$.

Во втором случае плотность теплового потока равна $q = \sigma \cdot V_{кр} \cdot tg\beta$. В работах [4, 5] показано, что $tg\beta = \sigma_{сж} / \sigma$, где $\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м². Тогда, $q = \sigma_{сж} \cdot V_{кр}$ и согласно зависимости (8):

$$\theta = \sigma_{сж} \cdot V_{кр} \cdot \frac{l_2}{\lambda}. \quad (9)$$

Задавая значения θ и l_2 , по зависимости (9) можно определить оптимальную скорость круга. Очевидно, при условии $\theta = const$ увеличение скорости круга $V_{кр}$ ведет к уменьшению параметра l_2 . Это хорошо согласуется с полученным выше решением, основанным на использовании относительной величины температуры z . Таким образом, переход в область высокоскоростного шлифования является важным резервом повышения качества обработки с точки зрения уменьшения вероятности появления температурных дефектов на обрабатываемых поверхностях. Анализируя зависимость (9), видно, что она не содержит условное напряжение резания σ , т.е. одинакова для различных методов механической обработки лезвийными и абразивными инструментами, отличающихся между собой, как известно, значениями σ . Из этого вытекает, что независимо от методов обработки при одинаковой скорости резания $V_{кр}$ отношение параметров θ и l_2 будет оставаться постоянным. Данная закономерность имеет большое

практическое значение, т.к. позволяет прогнозировать оптимальные условия обработки для различных методов резания и шлифования материалов. Так, задавая необходимые значения параметров θ и l_2 , можно определить оптимальную скорость резания $V_{кр}$, затем выбрать оптимальный метод обработки, обеспечивающий заданную температуру θ и соответственно параметр l_2 . Установленная таким образом оптимальная скорость резания $V_{кр}$ является единой для всего многообразия существующих методов механической обработки.

Выводы. Проведен теоретический анализ условий уменьшения толщины слоя обрабатываемой детали, в котором концентрируется образующееся при шлифовании тепло, при действии равномерно распределенного по площади контакта круга с обрабатываемой деталью теплового источника и действии теплового источника при резании отдельно взятым зерном круга. Показано, что во втором случае толщина слоя обрабатываемой детали, в котором концентрируется образующееся при шлифовании тепло, существенно меньше, чем в первом случае, особенно при высокоскоростном шлифовании. Это позволяет за счет увеличения скорости круга улучшить качество обработки и уменьшить припуски, удаляемые на последующих финишных операциях. Однако для реализации данного условия шлифования необходимо обеспечить высокую режущую способность круга, фактически исключить трение обрабатываемого материала со связкой круга.

Список литературы:

1. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с.
2. Новиков Ф.В., Яценко С.М. Повышение эффективности технологии финишной обработки деталей пар трения поршневых насосов. – Физические и компьютерные технологии. – Труды 13-й Международной научно-технической конференции. – Харьков, ХНПК “ФЭД”, 2007. – С. 8-20.
3. Синтетические алмазы в машиностроении / Под ред. В.Н. Бакуля. – К.: Наук. думка, 1976. – 351 с.
4. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т.1. “Механика резания материалов” – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с.
5. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т.4. “Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов” – Одесса: ОНПУ, 2002. – 802 с.