

УДК 621.923

Ф. В. НОВИКОВ, И. А. РЯБЕНКОВ**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ОБЫЧНОМ И ПРЕРЫВИСТОМ ШЛИФОВАНИИ**

Наведено аналітичні залежності для визначення температури різання при звичайному і переривчастому шліфуванні, отримані на основі роздільного урахування енергії різання та енергії тертя зв'язки круга з оброблюваним матеріалом в загальному енергетичному балансі процесу шліфування. Це дозволило визначити оптимальні умови обробки, що забезпечують найменшу температуру різання при звичайному і переривчастому шліфуванні. Теоретично показано, що температура різання істотно залежить від тертя зв'язки круга з оброблюваним матеріалом в процесі шліфування. Доведено ефективність застосування глибокого переривчастого шліфування, що дозволяє багаторазово зменшити температуру різання в порівнянні з глибоким шліфуванням звичайним суцільним кругом.

Ключові слова: температура різання, переривчасте шліфування, енергія різання, тертя зв'язки круга з матеріалом, енергетичний баланс процесу шліфування, умовне напруження різання, глибоке переривчасте шліфування.

Приведены аналитические зависимости для определения температуры резания при обычном и прерывистом шлифовании, полученные на основе раздельного учета энергии резания и энергии трения связки круга с обрабатываемым материалом в общем энергетическом балансе процесса шлифования. Это позволило определить оптимальные условия обработки, обеспечивающие наименьшую температуру резания при обычном и прерывистом шлифовании. Теоретически показано, что температура резания существенно зависит от трения связки круга с обрабатываемым материалом в процессе шлифования. Доказана эффективность применения глубокого прерывистого шлифования, позволяющего многократно уменьшить температуру резания по сравнению с глубоким шлифованием обычным сплошным кругом.

Ключевые слова: температура резания, прерывистое шлифование, энергия резания, трение связки круга с материалом, энергетический баланс процесса шлифования, условное напряжение резания, глубокое прерывистое шлифование.

Analytical dependence for determining the temperature of the cutting at normal and intermittent grinding, obtained on the basis of separate accounting of cutting energy and energy range of bundles of friction with the material being processed in the overall energy balance of the grinding process. It is possible to determine the optimum processing conditions to ensure the lowest temperature during normal cutting and intermittent grinding. Theoretically, it is shown that the cutting temperature depends essentially on the friction circle ligaments work material during grinding. The efficiency of the use of deep discontinuous grinding has vastly reduce the cutting temperature compared to conventional deep grinding solid circle.

Keywords: cutting temperature, intermittent grinding, cutting energy, friction circle bundles with the material, the energy balance of the grinding process, conventional stress cutting, deep intermittent grinding.

Постановка проблеми. Как известно, температурный фактор является основным ограничивающим фактором при резании материалов, определяющим стойкость режущего инструмента, качество и производительность обработки. В особой мере температурный фактор проявляется при шлифовании материалов, резко снижая качество обработки в связи с образованием на обрабатываемых поверхностях прижогов, микротрещин и других температурных дефектов. Исходя из этого, по-прежнему актуальна проблема уменьшения температуры резания при шлифовании, несмотря на то, что в настоящее время на практике используется большой арсенал различных технологических средств и приемов, направленных на снижение температуры резания при шлифовании. Также актуальна проблема повышения производительности обработки при шлифовании в связи с ограничениями по качеству обработки, которые определяются температурным фактором. Поэтому в работе решается задача теоретического обоснования закономерностей изменения и условий уменьшения температуры резания при шлифовании и повышения качества и производительности обработки.

Анализ последних исследований и публикаций. В научно-технической литературе имеется большое количество работ, посвященных исследованию температуры резания при шлифовании [1–3]. Среди них следует особо выделить работы профессора Якова А. В. [4, 5], в которых в обобщенном виде представлены решения дифференциальных уравнений, описывающих тепловые поля, возникающие при

шлифовании, для различных случаев обработки. На основе этих решений сформулированы и обоснованы основные направления уменьшения температуры резания и показано, что при шлифовании труднообрабатываемых материалов целесообразно использовать круги с прерывистой рабочей поверхностью, которые получили широкое применение на практике. Используя полученные профессором Якимовым А. В. теоретические решения, появляется возможность дальнейшего анализа влияния различных неучтенных факторов на температуру резания при шлифовании. К ним следует отнести необходимость раздельного учета энергии резания и энергии трения связки круга с обрабатываемым материалом в общем энергетическом балансе процесса шлифования, поскольку при шлифовании имеют место значительные потери энергии на трение связки круга с обрабатываемым материалом, что приводит к резкому снижению качества обработки из-за образования на обрабатываемых поверхностях различных температурных дефектов. Поэтому необходимо установить влияние энергии резания и энергии трения связки круга с обрабатываемым материалом на температуру резания при обычном и прерывистом шлифовании.

Цель работы – определение закономерностей изменения и условий уменьшения температуры резания при обычном и прерывистом шлифовании на основе раздельного учета энергии резания и энергии трения связки круга с обрабатываемым материалом в общем энергетическом балансе процесса шлифования.

Изложение основного материала. Для определения температуры резания при шлифовании θ воспользуемся аналитической зависимостью [6]:

$$\theta = \frac{q \cdot l_2}{\lambda}, \quad (1)$$

где $q = N / F$ – плотность теплового потока, Вт/м²;

N – мощность шлифования, Вт;

P_z – тангенциальная составляющая силы резания, Н;

$V_{кр}$ – скорость круга, м/с;

F – площадь контакта круга с обрабатываемой деталью, м²;

$l_2 = \sqrt{2\lambda \cdot \tau / (c \cdot \rho)}$ – глубина проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, м;

τ – время контакта фиксированной точки, расположенной на поверхности обрабатываемой детали, с кругом, с;

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

λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/м·К;

ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³.

В общем случае $P_z = P_{zрез} + P_{zмп}$ [7], где

$P_{zрез}$, $P_{zмп}$ – составляющие силы резания, обусловленные “чистым резанием” абразивными зернами круга и трением связки круга с обрабатываемым материалом, Н; $P_{zрез} = \sigma \cdot S_{сум}$; σ – условное напряжение резания, Н/м²; $S_{сум} = Q / V_{кр}$ – мгновенная суммарная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зернами круга, м²; Q – производительность обработки, м³/с.

При плоском шлифовании периферией круга производительность обработки Q определяется зависимостью $Q = B \cdot V_{дем} \cdot t$, где B – ширина шлифования, м; $V_{дем}$ – скорость перемещения детали, м/с; t – глубина шлифования, м. Соответственно, $F = B \cdot L$, где $L = \sqrt{t \cdot D_{кр}}$ – длина дуги контакта круга с обрабатываемой деталью, м; $D_{кр}$ – диаметр круга, м.

После преобразований (1) принимает вид:

$$\theta = \left(\sigma \cdot V_{дем} \cdot \sqrt{\frac{t}{D_{кр}}} + \frac{P_{zмп} \cdot V_{кр}}{B \cdot \sqrt{t \cdot D_{кр}}} \right) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \tau}{c \cdot \rho \cdot \lambda}}. \quad (2)$$

Как видно, основным условием уменьшения температуры резания при шлифовании θ несомненно является исключение из зависимости (1) второго слагаемого, обусловленного трением связки круга с обрабатываемым материалом. Это достигается при условии $P_{zмп} = 0$. Однако на практике реализовать это условие фактически невозможно, так как в процессе

шлифования всегда имеет место трение связки круга с обрабатываемым материалом. Поэтому увеличение скорости круга $V_{кр}$, которая входит во второе слагаемое зависимости (1), приводит к увеличению температуры резания при шлифовании θ . Именно этим фактом можно объяснить увеличение температуры резания при шлифовании с увеличением скорости круга $V_{кр}$, которое имеет место на практике [8], хотя в ряде работ, посвященных алмазному шлифованию, показано, что с увеличением скорости круга $V_{кр}$ температура резания может оставаться фактически постоянной или уменьшаться. Это связано со спецификой работы алмазного круга, который характеризуется высокой остротой режущих зерен, способных полностью удалить металл, подводимый в зону резания, не доходя до уровня связки круга. В результате обрабатываемый металл фактически не контактирует со связкой круга, что резко снижает трение в зоне резания и тепловую напряженность процесса шлифования.

Если учесть, что $\tau = L / V_{дем} = \sqrt{t \cdot D_{кр}} / V_{дем}$, то зависимость (2) принимает вид:

$$\theta = \left(\sigma \cdot V_{дем} \cdot \sqrt{\frac{t}{D_{кр}}} + \frac{P_{zмп} \cdot V_{кр}}{B \cdot \sqrt{t \cdot D_{кр}}} \right) \times \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{\sqrt{t \cdot D_{кр}}}{V_{дем}}}. \quad (3)$$

Как видно, параметры режима шлифования $V_{дем}$ и t неоднозначно влияют на температуру резания при шлифовании θ .

При $P_{zмп} = 0$ зависимость (3) принимает вид:

$$\theta = \sigma \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot Q_{yд}}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{t}{D_{кр}}}, \quad (4)$$

где $Q_{yд} = V_{дем} \cdot t$ – удельная производительность обработки, м²/с.

В данном случае температура резания при шлифовании θ (при заданном значении $Q_{yд}$) с уменьшением глубины шлифования t однозначно уменьшается. Следовательно, эффективно применять многопроходное шлифование, характеризующееся увеличенными значениями скорости перемещения детали $V_{дем}$ и небольшими значениями глубины шлифования t .

При условии одинаковой удельной производительности обработки $Q_{yд}$ зависимость (3) опишется:

$$\theta = \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{t}{D_{кр}}} \times \left(\sigma \cdot \sqrt{Q_{yд}} + \frac{P_{zмп} \cdot V_{кр}}{B} \cdot \frac{1}{\sqrt{Q_{yд}}} \right). \quad (5)$$

Как видно, с уменьшением глубины шлифования t (при заданном значении $Q_{y\delta}$) температура резания при шлифовании θ однозначно уменьшается, т.е. целесообразно применять многопроходное шлифование. Особенно эффективно его применять при шлифовании, когда имеет место интенсивное трение связи круга с обрабатываемым материалом и в зависимости (5) преобладает второе слагаемое. Этим можно объяснить эффективность применения многопроходного шлифования для различных условий обработки, включая шлифование затупившимся кругом.

Как следует из зависимости (5), с увеличением удельной производительности обработки $Q_{y\delta}$ температура резания при шлифовании θ изменяется неоднозначно. Поэтому для определения экстремального значения $Q_{y\delta}$ функцию θ следует подчинить необходимому условию экстремума $\theta'_{Q_{y\delta}} = 0$. В результате получено:

$$Q_{y\delta} = \frac{P_{zmp} \cdot V_{кр}}{B \cdot \sigma}. \quad (6)$$

Расчетами установлено, что вторая производная функции θ от $Q_{y\delta}$ в точке экстремума положительна. Следовательно, в точке экстремума имеет место минимум функции θ .

Подставляя зависимость (6) в (5), определено минимальное значение температуры резания при шлифовании

$$\theta_{min} = 2 \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{P_{zmp} \cdot \sigma \cdot V_{кр}}{B}} \cdot \sqrt{\frac{t}{D_{кр}}}. \quad (7)$$

Согласно зависимости (7), уменьшить θ_{min} можно уменьшением параметров P_{zmp} , σ , t , $V_{кр}$ и увеличением B .

При условии $P_{zmp} = 0$ справедливо $\theta_{min} = 0$. В этом случае характер изменения температуры резания при шлифовании подчиняется зависимости (4).

Используя зависимость (2), можно оценить возможность уменьшения температуры резания при шлифовании θ кругом с прерывистой рабочей поверхностью. В работе [4] установлено, что в момент контакта рабочего выступа круга с обрабатываемым материалом фактическая производительность обработки (по сравнению с производительностью шлифования обычным сплошным кругом) увеличивается в $(1 + l_0 / l_1)$ раз, где l_0 , l_1 – соответственно длины впадины и рабочего выступа прерывистого круга, м. Время контакта шлифовального круга с фиксированной точкой на обрабатываемой поверхности, наоборот, уменьшается и определяется зависимостью $\tau = l_1 / V_{кр}$.

Подставляя в зависимость (2) эти изменения, получено:

$$\theta = \left(\sigma \cdot V_{\delta em} \cdot \sqrt{\frac{t}{D_{кр}}} \cdot \left(1 + \frac{l_0}{l_1} \right) + \frac{P_{zmp} \cdot V_{кр}}{B \cdot \sqrt{t \cdot D_{кр}}} \right) \times \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{l_1}{V_{кр}}}. \quad (8)$$

Как видно, параметр l_1 неоднозначно влияет на температуру резания при шлифовании, т.е. имеет место экстремальная зависимость $\theta - l_1$. Для определения экстремального значения l_1 следует подчинить функцию θ необходимому условию экстремума $\theta'_{l_1} = 0$. В результате после преобразований получено:

$$l_1 = \frac{l_0}{\left(1 + \frac{P_{zmp} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot B \cdot V_{\delta em} \cdot t} \right)} = \frac{l_0}{\left(1 + \frac{P_{zmp}}{P_{zрез}} \right)}. \quad (9)$$

Из зависимости (9) вытекает, что длина рабочего выступа прерывистого круга l_1 меньше длины впадины круга l_0 . Причем, чем больше отношение $P_{zmp} / P_{zрез}$, тем меньше должна быть длина рабочего выступа круга по сравнению с длиной впадины круга.

При $P_{zmp} = 0$ справедливо соотношение:

$$l_1 = l_0. \quad (10)$$

В этом случае минимум температуры резания при прерывистом шлифовании реализуется при условии равенства длин рабочего выступа и впадины прерывистого круга.

Подставляя зависимость (9) в зависимость (8), определено минимальное значение температуры резания при шлифовании

$$\theta_{min} = 2 \cdot \left(\sigma \cdot V_{\delta em} \cdot \sqrt{\frac{t}{D_{кр}}} + \frac{P_{zmp} \cdot V_{кр}}{B \cdot \sqrt{t \cdot D_{кр}}} \right) \times \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{l_1}{V_{кр}}}. \quad (11)$$

Из зависимости (11) следует, что уменьшить минимальную температуру резания θ_{min} при прерывистом шлифовании можно уменьшением длины рабочего выступа прерывистого круга l_1 и параметров σ , P_{zmp} / B .

Глубина шлифования t неоднозначно влияет на функцию θ_{min} . Для определения экстремального значения глубины шлифования t следует подчинить функцию θ_{min} необходимому условию экстремума $\theta'_t = 0$. В результате получено:

$$t_{экстр} = \frac{P_{zmp} \cdot V_{кр}}{B \cdot \sigma \cdot V_{\delta em}}. \quad (12)$$

Как видно, экстремальное значение глубины шлифования $t_{экстр}$ тем больше, чем больше сила трения связи круга с обрабатываемым материалом $P_{z_{мп}}$, скорость круга $V_{кр}$ и меньше параметры B , σ , $V_{дем}$.

С физической точки зрения зависимость (12) соответствует условию $P_{z_{рез}} = P_{z_{мп}}$, рассматривая $P_{z_{рез}} = B \cdot \sigma \cdot V_{дем} \cdot t_{экстр} / V_{кр}$. Следовательно, в точке экстремума функции θ_{min} реализуется условие равенства силы трения связи круга с обрабатываемым материалом $P_{z_{мп}}$ и силы “чистого резания” зернами круга $P_{z_{рез}}$.

Очевидно, при условии $P_{z_{мп}} = 0$ экстремум функции θ_{min} в зависимости от глубины шлифования t , исходя из зависимости (12), будет отсутствовать. Поэтому функция θ_{min} с увеличением глубины шлифования t будет непрерывно увеличиваться. Из этого можно сделать вывод о том, что экстремум функции θ_{min} , определяемый зависимостью (11), обусловлен

наличием в ней второго слагаемого, связанного с трением связи круга с обрабатываемым материалом.

Для определения характера экстремума функции θ_{min} в зависимости от глубины шлифования t необходимо подставить в зависимость (11) преобразованное выражение (12):

$$t = \alpha \cdot \frac{P_{z_{мп}} \cdot V_{кр}}{B \cdot \sigma \cdot V_{дем}}, \quad (13)$$

где α - безразмерный коэффициент, принимающий значения $0 \dots 1 \dots \infty$.

В результате получено:

$$\theta_{min} = 4 \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{P_{z_{мп}} \cdot \sigma \cdot V_{дем} \cdot l_1}{B \cdot D_{кр}}} \times \left(\sqrt{\alpha} + \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \right). \quad (14)$$

В табл. 1 показан характер изменения функции $\left(\sqrt{\alpha} + \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \right)$, входящей в зависимость (14), от безразмерного коэффициента α .

Таблица 1 – Расчетные значения функции $\left(\sqrt{\alpha} + \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \right)$

α	0,1	0,2	0,8	1	1,5	2	4
$\left(\sqrt{\alpha} + \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \right)$	3,48	2,68	2,012	2	2,04	2,121	2,5

Как видно, с увеличением безразмерного коэффициента α функция $\left(\sqrt{\alpha} + \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \right)$ первоначально уменьшается, а затем увеличивается, проходя точку минимума при $\alpha=1$. Это указывает на существование минимума в точке экстремума функции θ_{min} . Тогда минимальное значение функции θ_{min} при $\alpha=1$ опишется зависимостью:

$$(\theta_{min})_{min} = 8 \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{P_{z_{мп}} \cdot \sigma \cdot V_{дем} \cdot l_1}{B \cdot D_{кр}}}. \quad (15)$$

Как видно, уменьшить функцию $(\theta_{min})_{min}$ можно уменьшением параметров $P_{z_{мп}} / B$, σ , $V_{дем}$, l_1 и увеличением $D_{кр}$.

При условии $P_{z_{мп}} = 0$ функция $(\theta_{min})_{min} = 0$. В этом случае характер изменения функции θ_{min} будет подчиняться зависимости (11) при условии $P_{z_{мп}} = 0$:

$$\theta_{min} = 2 \cdot \sigma \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot Q_{уд}}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{V_{дем}}{V_{кр}} \cdot \frac{l_1}{D_{кр}}}. \quad (16)$$

Таким образом установлено, что при прерывистом шлифовании добиться уменьшения температуры резания θ_{min} (при заданном значении удельной производительности обработки $Q_{уд}$) можно уменьшением скорости перемещения детали $V_{дем}$ и соответственно пропорциональном увеличении глубины шлифования t , т.е. применением глубинного шлифования [9], а также за счет увеличения скорости круга $V_{кр}$, т.е. в конечном итоге за счет применения высокоскоростного глубинного шлифования.

Исходя из аналогичной зависимости (4), справедливой для шлифования обычным сплошным кругом, уменьшить температуру резания можно, наоборот, применением многопроходного шлифования, т.е. увеличением скорости перемещения детали $V_{дем}$ при пропорциональном уменьшении глубины шлифования t . В этом принципиальное отличие процессов шлифования прерывистым и обычным сплошным кругом.

Обозначая в зависимости (16) температуру шлифования прерывистым кругом $\theta_{прерыв} = \theta_{min}$, а в зависимости (4) температуру шлифования сплошным кругом $\theta_{сплошн} = \theta$, определим их отношение:

$$\frac{\theta_{\text{прерыв}}}{\theta_{\text{сплошн}}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{V_{\text{дем}}}{V_{\text{кр}}} \cdot \frac{l_1}{\sqrt{t \cdot D_{\text{кр}}}}} \quad (17)$$

Произведем расчет отношения $\theta_{\text{прерыв}} / \theta_{\text{сплошн}}$ для условий плоского многопроходного шлифования: $V_{\text{дем}} / V_{\text{кр}} = 1/60$; $l_1 = 20$ мм; $t = 0,02$ мм; $D_{\text{кр}} = 300$ мм. В результате расчетов установлено: $\theta_{\text{прерыв}} / \theta_{\text{сплошн}} = 0,74$. Следовательно, применение прерывистого многопроходного шлифования взамен обычного многопроходного шлифования сплошным кругом позволяет уменьшить температуру резания в 0,74 раза или на 26 %.

Сохраняя то же значение удельной производительности обработки $Q_{\text{уд}}$, расчетами установлено, что при плоском глубинном шлифовании прерывистым кругом ($V_{\text{дем}} / V_{\text{кр}} = 1/600$; $l_1 = 20$ мм; $t = 0,2$ мм; $D_{\text{кр}} = 300$ мм) отношение $\theta_{\text{прерыв}} / \theta_{\text{сплошн}} = 0,13$. Следовательно, в условиях плоского глубинного шлифования прерывистым кругом можно добиться более значительного уменьшения температуры резания, чем при использовании обычного сплошного круга [10]. Это согласуется с практикой применения прерывистых алмазных кругов, например, при разрезании заготовок на части, при вышлифовывании глубоких пазов и канавок, глубинном шлифовании труднообрабатываемых материалов и т.д. Экспериментально установлено, что в этих условиях обработки обеспечивается высокое качество обрабатываемых поверхностей (отсутствуют прижоги, микротрещины и другие температурные дефекты) при одновременном увеличении производительности обработки по сравнению с шлифованием обычными сплошными алмазными или абразивными кругами.

Выводы. В работе теоретически обоснованы новые технологические возможности прерывистого шлифования с точки зрения уменьшения температуры резания. Доказана эффективность применения глубинного прерывистого шлифования, позволяющего многократно уменьшить температуру резания по сравнению с глубинным шлифованием обычным сплошным кругом. Эффект достигается за счет уменьшения времени τ контакта фиксированной точки, расположенной на поверхности обрабатываемой детали, с кругом. Так, при прерывистом шлифовании $\tau = l_1 / V_{\text{кр}}$, а при шлифовании обычным сплошным кругом $\tau = \sqrt{t \cdot D_{\text{кр}}} / V_{\text{дем}}$, т.е. их отношение меньше единицы. Это решение является новым, т.к. традиционно считается, что эффект прерывистого шлифования состоит в возможности охлаждения обрабатываемой детали в момент прерывания процесса шлифования. В действительности, как показано в работе, при прерывистом шлифовании уменьшается время контакта фиксированной точки, расположенной на поверхности обрабатываемой детали, с кругом, что приводит к дополнительному снижению температуры резания. Исходя из зависимости (16), добиться суще-

ственного уменьшения температуры резания можно также за счет уменьшения длины рабочего выступа прерывистого алмазного или абразивного круга l_1 .

Список литературы

1. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А.Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
2. Ящерицын П.И. Тепловые явления при шлифовании и свойства обработанных поверхностей / П.И. Ящерицын, А.К. Цокур, М.Л. Еременко. – Минск: Наука и техника, 1973. – 184 с.
3. Евсеев Д.Г. Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке / Д.Г. Евсеев. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 127 с.
4. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с.
5. Якимов А.В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1984. – 212 с.
6. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 2. "Теплофизика резания материалов" – Одесса: ОНПУ, 2003. – 625 с.
7. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 4. "Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов" – Одесса: ОНПУ, 2002. – 802 с.
8. Захаренко И.П. Основы алмазной обработки твердосплавного инструмента / И.П. Захаренко. – К.: Наук. думка, 1981. – 300 с.
9. Глубинное шлифование деталей из труднообрабатываемых материалов / С.С. Силин, В.А. Хрульков, А.В. Лобанов, Н.С. Рыкунов. – М.: Машиностроение, 1984. – 62 с.
10. Рябенков И.А. Определение минимально возможной температуры резания при прерывистом шлифовании / И.А. Рябенков // Физические и компьютерные технологии : труды 21-й междунар. научн.-практ. конф. – Днепропетровск: ЛИРА, 2016. – С. 100–106.

References (transliterated)

1. Reznikov A. N. Teplofizika protsessov mekhanicheskoy obrabotki materialov / A. N. Reznikov. – M.: Mashinostroenie, 1981. – 279 s.
2. Yasherytsyn P. I. Teplovye yavleniya pri shlifovanii i svoystva obrabotannykh poverkhnostey / P. I. Yasherytsyn, A. K. Tsokur, M. L. Eremanko. – Minsk: Nauka i tekhnika, 1973. – 184 s.
3. Evseev D. G. Formirovanie svoystv poverkhnostnykh sloev pri abrazivnoy obrabotke / D. G. Evseev. – Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta, 1975. – 127 s.
4. Yakimov A. V. Optimizatsiya protsessa shlifovaniya / A. V. Yakimov. – M.: Mashinostroenie, 1975. – 175 s.
5. Yakimov A. V. Abrazivno-almaznaya obrabotka fasonnykh poverkhnostey / A. V. Yakimov. – M.: Mashinostroenie, 1984. – 212 s.
6. Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroeniya / Pod obsh. red. F. V. Novikova i A. V. Yakimova. – V 10 tomakh. – Odessa: ONPU, 2003. – T. 2. "Teplofizika rezaniya materialov". – 625 s.
7. Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroeniya / Pod obsh. red. F. V. Novikova i A. V. Yakimova. – V 10 tomakh. – Odessa: ONPU, 2002. – T. 4. "Teoriya abrazivnoy s almazno-abrazivnoy obrabotki materialov". – 802 s.
8. Zakharenko I. P. Osnovy almaznoy obrabotki tverdosplavnogo instrumenta / I. P. Zakharenko. – Kiev: Naukova dumka, 1981. – 300 s.
9. Glubinnoe shlifovanie detaley iz trudnoobrabatyvaemykh materialov / S. S. Silin, V. A. Khrulkov, A. V. Lobanov, N. S. Rykunov. – M.: Mashinostroenie, 1984. – 62 s.
10. Ryabenkov I. A. Opredelenie minimalno vozmozhnoy temperatury rezaniya pri preryvistom shlifovanii / I. A. Ryabenkov // Fizicheskie i kompiuternye tekhnologii : trudy 21-i mezhdunarodnoy nauchno.-prakticheskoy konferentsii. – Dnepropetrovsk: LIRA, 2016. – S. 100–106.

Поступила (received) 05.02.2014