

И.А. Рябенков, канд. техн. наук, Харьков, Украина

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОБЫЧНОГО И ПРЕРЫВИСТОГО ШЛИФОВАНИЯ

Аналітично встановлено, що сила й температура різання при переривчастому шліфуванні менше, ніж при шліфуванні суцільним кругом. У разі рівного розподілу довжин робочого виступу й западини переривчастого круга температура різання приймає мінімальне значення та зменшується зі зменшенням довжини робочого виступу круга. Це вказує на ефективність створення на робочій поверхні переривчастого круга великої кількості виступів і западин. Показано ефективність застосування переривчастого глибокого шліфування.

Ключові слова: шліфування, переривчастий круг, зв'язка круга, сила різання, температура різання, глибоке шліфування, якість обробки, продуктивність обробки

Аналитически установлено, что сила и температура резания при прерывистом шлифовании меньше, чем при шлифовании сплошным кругом. При равенстве длин рабочего выступа и впадины прерывистого круга температура резания принимает минимальное значение и уменьшается с уменьшением длины рабочего выступа круга. Это указывает на эффективность создания на рабочей поверхности прерывистого круга большого количества выступов и впадин. Показана эффективность применения прерывистого глубокого шлифования.

Ключевые слова: шлифование, прерывистый круг, связка круга, сила резания, температура резания, глубинное шлифование, качество обработки, производительность обработки

It has been analytically established that the cutting force and temperature are shorter with intermittent grinding than when grinding with a solid circle. When the lengths of the working protrusion and the hollow of the discontinuous circle are equal, the cutting temperature assumes a minimum value and decreases with decreasing length of the working protrusion of the circle. This indicates the effectiveness of creating a large number of protrusions and depressions on the working surface of the discontinuous circle. The effectiveness of intermittent deep grinding is shown.

Keywords: grinding, intermittent circle, bunch of a circle, cutting force, cutting temperature, deep grinding, processing quality, processing capacity

Постановка проблеми. Современные процессы шлифования материалов, обладая значительными технологическими возможностями, позволяют с высокими показателями качества, точности и производительности обрабатывать различные изделия, особенно изготовленные из труднообрабатываемых материалов. Перспективным направлением развития процессов шлифования является применение кругов с прерывистой рабочей поверхностью, которые благодаря периодическому кратковременному прерыванию процесса позволяют полностью или частично охладить зону шлифования и исключить образование на обрабатываемых поверхностях прижогов, микротрещин и других температурных дефектов, обеспечивая высококачественную и высокопроизводительную обработку. В

связи с этим актуальными являются исследования прерывистого шлифования с точки зрения выявления, обоснования и реализации его новых технологических возможностей, обеспечивающих существенное повышение качества, точности и производительности обработки.

Анализ последних исследований и публикаций. Исследованию перспектив развития процессов шлифования в научно-технической литературе уделено большое внимание. Так, в работах [1–4] приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований основных закономерностей повышения качества, точности и производительности обработки при шлифовании и показана эффективность применения алмазного шлифования. Работы [5; 6] посвящены исследованию параметров шлифования кругами с прерывистой рабочей поверхностью, в которых показана возможность снижения энергоемкости и повышения качества и производительности обработки за счет прерывистого характера контакта рабочих выступов круга с обрабатываемым материалом. Приведены конкретные практические рекомендации. Вместе с тем в этих работах недостаточно уделено внимания научно обоснованному выбору оптимальных условий обработки с учетом максимального использования технологических возможностей процессов обычного и прерывистого шлифования.

Цель работы – теоретическое определение условий уменьшения силы и температуры резания при обычном и прерывистом шлифовании на основе учета процессов резания и трения связки круга с обрабатываемым материалом и разработка практических рекомендаций по повышению качества и производительности обработки при шлифовании.

Основной материал исследования. Для решения поставленных задач использованы аналитические зависимости для определения тангенциальной P_z и радиальной P_y составляющих силы резания при шлифовании прямолинейного образца, движущегося по нормали к кругу с постоянной номинальной скоростью $V_{дет}$ (рис. 1), приведенные в работе [7]:

$$P_z = P_{z_{рез}} + P_{z_{тр}} = \frac{\sigma \cdot F \cdot V_{дет0}}{V_{кр}} + f_1 \cdot c \cdot (V_{дет} - V_{дет0}) \cdot \tau; \quad (1)$$

$$P_y = P_{y_{рез}} + P_{y_{тр}} = \frac{\sigma \cdot F \cdot V_{дет0}}{K_{рез} \cdot V_{кр}} + c \cdot (V_{дет} - V_{дет0}) \cdot \tau, \quad (2)$$

где $P_{z_{рез}}$, $P_{y_{рез}}$ – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, обусловленные процессом “чистого” резания, Н; $P_{z_{тр}}$, $P_{y_{тр}}$ – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, обусловленные процессом трения связки круга с материалом, Н; σ – условное напряжение резания, Н/м²; F – площадь поперечного сечения

обрабатываемого прямолинейного образца, m^2 ; $V_{\text{дем}0}$ – фактическая линейная скорость съема материала, м/с ($V_{\text{дем}0} < V_{\text{дем}}$); $V_{\text{кр}}$ – скорость круга, м/с; $K_{\text{рез}} = P_{z_{\text{рез}}} / P_{y_{\text{рез}}} = ctg(\psi + \gamma)$ – коэффициент резания; ψ – условный угол трения режущего зерна с обрабатываемым материалом ($tg\psi = f$ – коэффициент трения режущего зерна с обрабатываемым материалом); γ – условный (отрицательный) передний угол режущего зерна; f_1 – коэффициент трения связки круга с обрабатываемым материалом; c – жесткость технологической системы, Н/м; τ – время обработки, с.

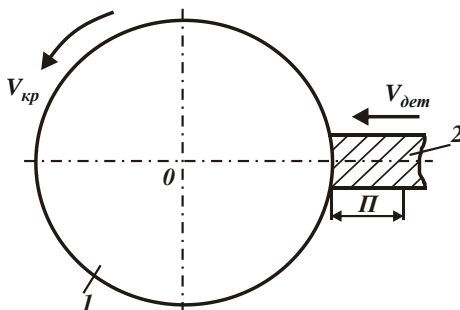


Рисунок 1 – Расчетная схема процесса шлифования: 1 – круг; 2 – деталь

Вторые слагаемые в зависимостях (1) и (2) обусловлены упругими перемещениями, возникающими в технологической системе, в связи с отличием номинальной $V_{\text{дем}}$ и фактической $V_{\text{дем}0}$ линейной скоростей съема материала. Поэтому с увеличением времени обработки τ вторые слагаемые в зависимостях (1) и (2) увеличиваются, вызывая существенное увеличение составляющих силы резания P_z и P_y , причем, независимо от износа зерен круга. Практическим подтверждением этому является то, что условное напряжение резания при шлифовании в несколько раз больше, чем при микрорезании единичным зерном [5]. Следовательно, наличие трения связки круга с обрабатываемым материалом приводит к значительному увеличению энергоемкости и силы резания при шлифовании. Исходя из этого, одним из основных условий уменьшения P_z и P_y является снижение интенсивности трения связки круга с материалом, что приводит к уменьшению вторых слагаемых в зависимостях (1) и (2). Это достигается обеспечением условия $V_{\text{дем}0} = V_{\text{дем}}$ за счет непрерывного поддержания в процессе шлифования

высокой режущей способности круга путем осуществления его работы в режиме самозатачивания или в режиме непрерывной (периодической) правки.

Важным фактором выполнения условия $V_{dem0} = V_{dem}$ может быть применение прерывистого шлифования [5; 6], которое благодаря ударно-циклическому взаимодействию круга с обрабатываемой деталью способствует уменьшению упругих перемещений, возникающих в технологической системе, вследствие запаздывания перемещений от действия кратковременной силы. Это приводит к уменьшению вторых слагаемых в зависимостях (1) и (2). Кроме того, ударно-циклическое взаимодействие круга с обрабатываемой деталью интенсифицирует процесс правки круга. В результате прерывистый круг в процессе шлифования обладает высокой режущей способностью, что приводит к снижению силы и температуры резания. Таким образом, при прерывистом шлифовании фактически исключаются вторые слагаемые в зависимостях (1) и (2), а отношение P_z / P_y становится равным отношению $P_{z_{рез}} / P_{y_{рез}} = ctg(\psi + \gamma)$. Уменьшая сумму углов $(\psi + \gamma)$, можно добиться повышения отношения P_z / P_y и, соответственно, качества и производительности обработки.

При обычном шлифовании с течением времени обработки τ вторые слагаемые в зависимостях (1) и (2) увеличиваются и значительно превышают первые слагаемые. Поэтому с достаточной для практики точностью расчет составляющих силы резания P_z и P_y можно производить без учета первых слагаемых в зависимостях (1) и (2). Тогда $P_z / P_y = f_1$.

Для сравнения в табл. 1 приведены расчетные значения отношения $P_z / P_y = ctg(\psi + \gamma)$ при прерывистом шлифовании. Как видно, они изменяются в пределах $0 \dots 1$ и при достаточно высокой остроте режущих зерен могут значительно превышать значение f_1 . Из этого вытекает, что при прерывистом шлифовании отношение P_z / P_y больше, чем при обычном шлифовании, а это создает возможность повышения качества и производительности обработки. Собственно этим и объясняется эффективность применения прерывистого шлифования на практике [5; 6].

Отсутствие в зависимостях (1) и (2) вторых слагаемых указывает на то, что P_z и P_y не зависят от времени обработки τ , т.е. процесс прерывистого шлифования может протекать стабильно во времени. При этом в зависимостях (1) и (2) фактическую линейную скорость съема материала V_{dem0} необходимо рассматривать в виде [8]: $V_{dem0} \cdot (1 + l_{02} / l_{01})$:

$$P_z = \frac{\sigma \cdot F \cdot V_{\text{дем0}}}{V_{\text{кр}}} \cdot \left(1 + \frac{l_{02}}{l_{01}}\right); \quad (3)$$

$$P_y = \frac{\sigma \cdot F \cdot V_{\text{дем0}}}{K_{\text{рез}} \cdot V_{\text{кр}}} \cdot \left(1 + \frac{l_{02}}{l_{01}}\right), \quad (4)$$

где l_{01} , l_{02} – длины рабочего выступа и впадины прерывистого круга, м.

Безразмерное выражение $(1 + l_{02} / l_{01})$ определяет степень увеличения фактической линейной скорости съема материала $V_{\text{дем0}}$ рабочим выступом прерывистого круга в связи с отсутствием съема материала в период прохождения впадиной круга зоны шлифования. По сути, выражение $(1 + l_{02} / l_{01})$ определяет степень увеличения производительности обработки рабочим выступом прерывистого круга по сравнению с производительностью обработки при обычном шлифовании сплошным кругом.

Таблица 1 – Расчетные значения отношения P_z / P_y для $f = 0,1$

γ , градус	45	60	65	70	75	80	90
P_z / P_y	0,82	0,45	0,35	0,25	0,16	0,075	0

Из зависимостей (3) и (4) следует, что составляющие силы резания P_z и P_y тем больше, чем больше отношение (l_{02} / l_{01}) . Наименьшие значения P_z и P_y достигаются при $l_{02} = 0$, т.е. при шлифовании сплошным кругом. Однако в этом случае расчет P_z и P_y следует производить по зависимостям (1) и (2) с учетом вторых слагаемых, обусловленных трением связки круга с обрабатываемым материалом. Поэтому P_z и P_y при обычном шлифовании сплошным кругом будут всегда больше, чем при прерывистом шлифовании. Дополнительным условием уменьшения P_z и P_y при прерывистом шлифовании следует рассматривать уменьшение условного напряжения резания σ за счет обеспечения высокой остроты зерен в связи с ударным характером взаимодействия рабочего выступа прерывистого круга с обрабатываемым материалом и непрерывным обновлением его режущей поверхности.

Температура шлифования определяется зависимостью [9]: $\theta = q \cdot l / \lambda$,

где $q = \frac{N}{F} = \frac{P_z \cdot V_{\text{кр}}}{F}$ – плотность теплового потока, Вт/м²; $l = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot \tau}{c_m \cdot \rho}}$ –

глубина проникновения образуемого при шлифовании тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, м; N – мощность теплового потока, Вт; λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/(м·К); c_m – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К); ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³. Подставляя зависимость (1) в (5), получено:

$$\theta = \left[\sigma \cdot V_{dem0} + \frac{f_1 \cdot c \cdot (V_{dem} - V_{dem0}) \cdot V_{kp} \cdot \tau}{F} \right] \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \tau}{c_m \cdot \rho \cdot \lambda}}. \quad (5)$$

Как видно, температура шлифования θ увеличивается с увеличением параметров σ , V_{dem0} , f_1 , c , V_{kp} , $V_{dem} - V_{dem0}$, τ и уменьшением F . Этим объясняются сложности увеличения скорости круга V_{kp} . Поэтому на практике при шлифовании в условиях интенсивного трения связки круга с обрабатываемым материалом приходится существенно уменьшать скорость круга V_{kp} , что снижает эффективность обработки.

Наибольшее влияние на температуру шлифования θ оказывает время обработки τ , которое приводит к ее непрерывному увеличению. В этих условиях процесс шлифования практически неосуществим, так как через некоторое время его необходимо прекращать из-за резкого увеличения температуры шлифования θ . Поэтому основным условием ее уменьшения следует рассматривать исключение из зависимости (5) второго слагаемого за счет выполнения условия $V_{dem0} = V_{dem}$ путем обеспечения высокой режущей способности круга и снижения интенсивности трения связки круга с обрабатываемым материалом. В этом случае температура шлифования θ не зависит от скорости круга V_{kp} и в меньшей мере зависит от времени обработки τ . Этим можно объяснить возможность существенного уменьшения температуры резания θ при прерывистом шлифовании, что имеет место на практике [5; 6]. Причем, за счет уменьшения времени τ контакта рабочего выступа прерывистого круга с обрабатываемым материалом можно дополнительно уменьшить температуру шлифования θ . Подставляя зависимость (3) в $\theta = q \cdot l / \lambda$, определена температура резания при прерывистом шлифовании:

$$\theta = \frac{\sigma \cdot V_{dem0}}{\lambda} \cdot \left(1 + \frac{l_{02}}{l_{01}} \right) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot \tau}{c_m \cdot \rho}}. \quad (6)$$

В этом случае время обработки τ значительно меньше влияет на температуру резания, чем при обычном шлифовании сплошным кругом. Причем, при условии полного охлаждения зоны шлифования за период

прерывания процесса шлифования время обработки τ – это время контакта рабочего выступа прерывистого круга с обрабатываемым материалом. Это время значительно меньше времени обработки, которое необходимо учитывать при определении температуры резания при обычном шлифовании сплошным кругом.

С учетом выражения $\tau = l_{01} / V_{кр}$ зависимость (6) принимает экстремальный характер от длины рабочего выступа прерывистого круга l_{01} :

$$\theta = \sigma \cdot V_{дем0} \cdot \left(\sqrt{l_{01}} + \frac{l_{02}}{\sqrt{l_{01}}} \right) \cdot \sqrt{\frac{2}{c_m \cdot \rho \cdot \lambda \cdot V_{кр}}}. \quad (7)$$

Подчиняя зависимость (7) необходимому условию экстремума, установлено, что в точке экстремума имеет место минимум температуры резания и выполняется условие: $l_{01} = l_{02}$. Минимум температуры резания θ_{min} при прерывистом шлифовании тем меньше, чем меньше время контакта рабочего выступа прерывистого круга с обрабатываемым материалом $\tau = l_{01} / V_{кр}$, т.е. чем меньше длина рабочего выступа прерывистого круга с обрабатываемым материалом l_{01} . Следовательно, с этой точки зрения на круге необходимо изготавливать максимально возможное количество рабочих выступов. Однако с уменьшением длины рабочего выступа круга ухудшаются условия охлаждения зоны шлифования в период прохождения впадины круга длиной $l_{02} = l_{01}$. В связи с этим целесообразно увеличивать длину рабочего выступа круга и, соответственно, длину впадины до значения, при котором возможно полное охлаждение зоны шлифования. О возможности существования такого значения $l_{02} = l_{01}$ свидетельствует тот факт, что с увеличением времени $\tau = l_{01} / V_{кр}$ (соответственно, длины рабочего выступа круга l_{01}) минимум температуры резания θ_{min} увеличивается по закону $\sqrt{\tau}$, а время охлаждения зоны шлифования увеличивается по закону $\tau = l_{02} / V_{кр}$, т.е. с большей интенсивностью, чем нагрев обрабатываемого материала. Исходя из этого, можно предположить, что при определенном значении $l_{02} = l_{01}$ произойдет полное охлаждение зоны шлифования за период прохождения впадины прерывистого круга.

При полном охлаждении зоны шлифования за время прерывания процесса прерывистого шлифования характер изменения множителя $\left(\sqrt{l_{01}} + l_{02} / \sqrt{l_{01}} \right)$ подчиняется зависимости (рис. 1,а). Минимум температуры резания с учетом условия $l_{01} = l_{02}$ определяется:

$$\theta_{\min} = \sigma \cdot V_{\text{дем}0} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \tau}{[0,25 \cdot (2 \cdot n - 1)] \cdot c_M \cdot \rho \cdot \lambda}} = \frac{\theta_0}{\sqrt{0,25 \cdot (2 \cdot n - 1)}}, \quad (9)$$

где $\theta_0 = \sigma \cdot V_{\text{дем}0} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \tau}{c_M \cdot \rho \cdot \lambda}}$ – температура резания при обычном

шлифовании m ; n – количество контактов рабочих выступов прерывистого круга с фиксированной точкой на обрабатываемом материале.

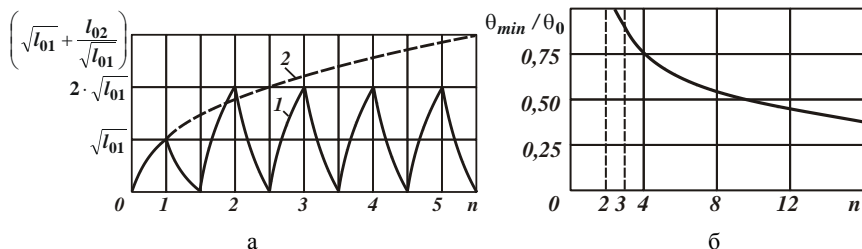


Рисунок 1 – Характер изменения множителя $(\sqrt{l_{01}} + l_{02} / \sqrt{l_{01}})$ при прерывистом (1) и обычном (2) шлифовании (а); зависимость θ_{\min} / θ_0 от n (б)

При прерывистом шлифовании отношение θ_{\min} / θ_0 , т.е. температуру резания, можно уменьшить более чем в 3 раза по сравнению с температурой резания при обычном шлифовании сплошным кругом (рис. 1, б). Это достигается за счет увеличения величины n путем уменьшения длины рабочего выступа и впадины прерывистого круга $l_{01} = l_{02}$, увеличения длины дуги контакта круга с обрабатываемой деталью при круглом наружном и плоском шлифовании и увеличении отношения $V_{kr} / V_{\text{дем}}$ (где $V_{\text{дем}}$ – скорость перемещения детали, м/с). Выполнение двух последних условий предполагает использование высокопроизводительного круглого и плоского глубинного шлифовании с относительно небольшой скоростью детали. Таким образом, применяя прерывистые круги, можно добиться существенного уменьшения температуры резания, что подтверждается практикой использования глубинного прерывистого шлифовании труднообрабатываемых материалов, особенно алмазными кругами на металлических связках, разрезанием материалов на части, вышлифовыванием глубоких пазов и канавок и т.д.

Выводы. Проведен теоретический анализ силы и температуры резания при прерывистом шлифовании с учетом процессов резания и трения связки круга с обрабатываемым материалом. Показано, что при прерывистом шлифовании благодаря ударно-циклическому взаимодействию рабочих выступов прерывистого круга с обрабатываемой деталью происходит уменьшение упругих перемещений, возникающих в технологической

системе, уменьшение интенсивности трения связки круга с обрабатываемым материалом и соответственно силы и температуры резания по сравнению с шлифованием сплошным кругом.

Аналитически установлено, что при условии равенства длин рабочего выступа и впадины прерывистого круга температура резания принимает минимальное значение и уменьшается с уменьшением длины рабочего выступа круга. Это указывает на эффективность создания на рабочей поверхности прерывистого круга большого количества выступов и впадин. Доказано, что наибольший эффект снижения температуры резания при прерывистом шлифовании достигается в условиях круглого и плоского глубинного шлифования, поскольку в этом случае увеличивается отношение скоростей круга и детали и соответственно количество контактов рабочих выступов прерывистого круга с фиксированной точкой на обрабатываемой поверхности. Это исключает образование температурных дефектов на обрабатываемых поверхностях и повышает производительность обработки. Разработаны практические рекомендации по повышению эффективности процесса шлифования.

Список использованных источников: 1. *Маслов Е. Н.* Теория шлифования металлов / *Е. Н. Маслов*. – М.: Машиностроение, 1974. – 319 с. 2. *Корчак С. Н.* Производительность процесса шлифования стальных деталей / *С. Н. Корчак*. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с. 3. *Сизый Ю. А.* Динамика и теплофизика шлифования / *Ю. А. Сизый, Д. В. Сталинский*. – Харьков: ГП УкрНТЦ "Энергосталь", 2016. – 448 с. 4. *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. 5. *Якимов А. В.* Оптимизация процесса шлифования / *А. В. Якимов*. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с. 6. *Якимов А. В.* Прерывистое шлифование / *А. В. Якимов*. – К.: Вища школа, 1986. – 175 с. 7. *Новиков Ф. В.* Фінішна обробка деталей різанням: монографія / *Ф. В. Новиков, І. О. Рябенков*. – Х.: Вид. ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2016. – 270 с. 8. *Рябенков І. А.* Закономерности снижения силовой и тепловой напряженности прерывистого шлифования / *І. А. Рябенков* // Перспективні технології та прилади: Збірник наукових праць. – Луцьк: Луцький НТУ, 2017. – №10 (1). – С. 193–198. 9. *Новиков Ф. В.* Основы повышения качества и производительности механической обработки: монография / *Ф. В. Новиков, В. А. Жовтобрух, Г. В. Новиков*. – Д.: ЛІРА, 2017. – 452 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Maslov Ye. N.* Teoriya shlifovaniya metallov / *Ye. N. Maslov*. – M.: Mashinostroyeniye, 1974. – 319 s. 2. *Korchak S. N.* Proizvoditel'nost' protsessha shlifovaniya stal'nykh detaley / *S. N. Korchak*. – M.: Mashinostroyeniye, 1974. – 280 s. 3. *Sizyy Yu. A.* Dinamika i teplofizika shlifovaniya / *Yu. A. Sizyy, D. V. Stalinskiy*. – Khar'kov: GP UkrNTTS "Energestal", 2016. – 448 s. 4. *Lavrinenko V. I.* Instrumenty iz sverkhтвердых материалов v tekhnologiyakh abrazivnoy i fiziko-tekhnicheskoy obrabotki: monografiya / *V. I. Lavrinenko, V. Yu. Solod*. – Kamenskoye: DGTU, 2016. – 529 s. 5. *Yakimov A. V.* Optimizatsiya protsessha shlifovaniya / *A. V. Yakimov*. – M.: Mashinostroyeniye, 1975. – 175 s. 6. *Yakimov A. V.* Preryvistoye shlifovaniye / *A. V. Yakimov*. – K.: Vishcha shkola, 1986. – 175 s. 7. *Novikov F. V.* Finishna obrobka detaley rizannyam: monografiya / *F. V. Novikov, I. O. Ryabenkov*. – Kh.: Vyd. KhNEU im. S. Kuznetsya, 2016. – 270 s. 8. *Ryabenkov I. A.* Zakonomernosti snizheniya silovoy i teplovoy napryazhennosti preryvistogo shlifovaniya / *I. A. Ryabenkov* // Perspektivni tekhnolohiyi ta prylyady: Zbirnyk naukovykh prats. – Luts'k: Luts'kyy NTU, 2017. – №10 (1). – S. 193–198. 9. *Novikov F. V.* Osnovy povysheniya kachestva i proizvoditel'nosti mekhanicheskoy obrabotki: monografiya / *F. V. Novikov, V. A. Zhovtobryukh, G. V. Novikov*. – D.: LIRA, 2017. – 452 s.

Поступила в редакцию 25.06.2018