

УДК 621.623

Ф. В. Новиков, д-р техн. наук, Ю. Г. Гуцаленко,
И. А. Рябенков, канд. техн. наук, Харьков, Украина

ПРОГРЕССИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЙ И ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ

В роботі наведено теоретичні рішення щодо визначення умов підвищення продуктивності, параметрів якості та точності механічної обробки лезовими та абразивними інструментами. Показано ефективність застосування силового та високошвидкісного різання, обґрунтовано умови зменшення енергоємності обробки, яка при лезовій обробці менше, ніж при шліфуванні. Доведено перспективність підвищення точності обробки за рахунок застосування шліфування без поперечної подачі з заданим початковим натягом в технологічній системі.

Ключові слова: механічна обробка, шліфування, продуктивність обробки, умовне напруження різання, температура різання, технологічна система, пружне переміщення

В работе приведены теоретические решения по определению условий повышения производительности, параметров качества и точности механической обработки лезвийными и абразивными инструментами. Показана эффективность применения силового и высокоскоростного резания, обоснованы условия уменьшения энергоёмкости обработки, которая при лезвийной обработке меньше, чем при шлифовании. Доказана перспективность повышения точности обработки за счет применения шлифования без поперечной подачи с заданным начальным натягом в технологической системе.

Ключевые слова: механическая обработка, шлифование, производительность обработки, условное напряжение резания, температура резания, технологическая система, упругое перемещение

The paper presents theoretical solutions for determining the conditions for increasing productivity, quality parameters and the accuracy of machining with blade and abrasive tools. The efficiency of the use of high-speed and high-speed cutting is shown, the conditions for reducing the energy intensity of the treatment, which are less than the grinding treatment, are justified. The prospects of increasing the accuracy of processing due to the use of grinding without transverse feed with a given initial tension in the technological system are proved.

Keywords: machining, grinding, processing capacity, conditional cutting stress, cutting temperature, technological system, elastic displacement

1. Постановка проблеми. Обработка металлов резанием благодаря низкой энергоёмкости процесса и высоким показателям качества, точности и производительности широко используется на практике. В настоящее время на смену устаревшему оборудованию и режущим инструментам приходят новые более совершенные высокооборотные металлорежущие станки с ЧПУ типа «обрабатывающий центр» и сборные твердосплавные и керамические лезвийные инструменты с износостойкими покрытиями. Это открывает новые технологические возможности повышения параметров качества, точности и производительности обработки, особенно материалов с повышенными физико-механическими свойствами. Однако для эффективного

осуществления процесса резания в каждом конкретном случае необходимо использовать оптимальные условия обработки, обеспечивающие снижение силовой и тепловой напряженности процесса. Это требует создания теоретических основ механической обработки, позволяющих аналитически решать оптимизационные задачи по обоснованию наиболее перспективных методов и условий обработки без привлечения традиционно применяемых эмпирических подходов, требующих выполнения трудоемких и продолжительных экспериментальных исследований.

2. Анализ последних исследований и публикаций. В настоящее время вопросам теоретического определения и оптимизации параметров механической обработки уделяется большое внимание в связи с высокими требованиями к показателям качества, точности и производительности обработки [1–3]. В одинаковой мере это относится к лезвийной и абразивной обработкам. Поэтому важно с единых позиций производить оценку технологических возможностей различных методов обработки и на этой основе определять оптимальные режимы резания, обеспечивающие наибольшую производительность и требуемые параметры качества и точности обработки. Значительные успехи в этом направлении достигнуты профессором Якимовым А. В. и его научной технологической школой [4–6]. Разработанные им теоретические (физико-математические) основы механической обработки и технологии машиностроения позволяют проектировать высокопроизводительные и высококачественные процессы обработки деталей резанием, а разработанный им процесс прерывистого шлифования является наиболее эффективным с точки зрения уменьшения температуры резания и энергоемкости обработки материалов повышенной твердости. Поэтому настоящая работа посвящена дальнейшему развитию научного направления профессора Якимова А. В. и направлена на повышение показателей качества, точности и производительности обработки.

3. Цель исследования. Аналитическое определение наиболее эффективных направлений развития методов обработки металлов резанием, обеспечивающих наибольшую производительность и требуемые параметры качества и точности обработки.

4. Теоретический анализ основных параметров лезвийной обработки и процесса шлифования. Для определения производительности обработки следует воспользоваться аналитической зависимостью, справедливой как для лезвийной обработки, так и для процесса шлифования [7]:

$$Q = S \cdot V = \frac{P_z}{\sigma} \cdot V, \quad (1)$$

где S – площадь поперечного сечения среза, м²; V – скорость резания, м/с; P_z – тангенциальная составляющая силы резания, Н; σ – условное напряжение резания, Н/м².

Как видно, увеличить производительность обработки Q можно увеличением параметров S и V или увеличением P_z , V и уменьшением σ . Увеличение тангенциальной составляющей силы резания P_z – это осуществление силового резания, а увеличение скорости резания V – осуществление скоростного (высокоскоростного и сверхвысокоскоростного) резания. Уменьшение условного напряжения резания σ (или энергоёмкости обработки) – это осуществление управления процессом стружкообразования при резании и в первую очередь контактными процессами, происходящими на рабочих поверхностях инструмента. Условное напряжение резания σ (или энергоёмкость обработки) описывается аналитической зависимостью:

$$\sigma = 2 \cdot \sigma_{сж} \cdot tg(\psi - \gamma), \quad (2)$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м²; ψ – условный угол трения на передней поверхности инструмента ($tg\psi = f$ – коэффициент трения); γ – передний угол инструмента.

Исходя из зависимости (2), уменьшить условное напряжение резания σ можно уменьшением угла $\psi - \gamma$, т.е. уменьшением условного угла трения ψ (коэффициента трения f) и увеличением переднего угла режущего инструмента γ . При определенных условиях $\psi - \gamma \rightarrow 0$, что позволяет существенно уменьшить условное напряжение резания σ и увеличить площадь поперечного сечения среза S и производительности обработки Q . Однако увеличение S при резании лезвийными инструментами ограничено прочностью его режущей части. Поэтому эффективно увеличивать производительность обработки Q путем увеличения скорости резания V , согласно зависимости (1).

Как известно, с увеличением скорости резания V уменьшается коэффициент трения f на передней поверхности инструмента, что способствует уменьшению условного напряжения резания σ и увеличению производительности обработки Q . Средняя температура образующейся стружки θ определяется приближенной зависимостью:

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho \cdot \left(1 + \frac{h}{a}\right)}, \quad (3)$$

где c – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/кг·К; ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³; a – толщина среза, м; h – толщина нагретого слоя обрабатываемой поверхности, м;

$$\frac{h}{a} = \sqrt{\frac{\lambda}{c \cdot \rho \cdot a \cdot V \cdot tg\beta}}, \quad (4)$$

λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/м·К; β – условный угол сдвига обрабатываемого материала.

С увеличением скорости резания V условный угол сдвига обрабатываемого материала β увеличивается, а отношение h/a уменьшается. Следовательно, уменьшается количество тепла, уходящего в обрабатываемую деталь, и увеличивается количество тепла, уходящего в образующуюся стружку. Средняя температура стружки θ (равная приблизительно температуре поверхностного слоя обрабатываемой детали) с увеличением скорости резания V увеличивается, асимптотически приближаясь к значению $\sigma/c \cdot \rho$ (рис. 1), т.к. согласно зависимости (3) множитель $(1+h/a) \rightarrow 1$. В этом состоит суть физического эффекта высокоскоростного и сверхвысокоскоростного резания, осуществляемого со скоростями резания свыше 100 м/с, поскольку в этом случае температура поверхностного слоя обрабатываемой детали остается фактически постоянной с увеличением скорости резания V .

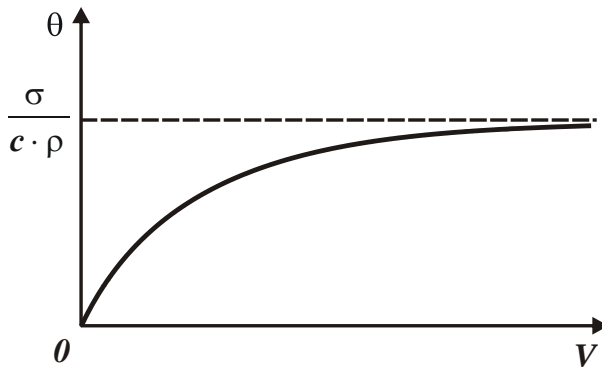


Рисунок 1 – Зависимость температуры поверхностного слоя обрабатываемой детали θ от скорости резания V

Необходимо отметить, что традиционные методы обработки лезвийными инструментами реализуют скорости резания, как правило, не более 2 м/с. Как показывает опыт ведущих иностранных станкостроительных фирм, переход в область высокоскоростного резания позволяет более чем в 10 раз увеличить производительность обработки при одновременном повышении качества и точности обрабатываемых поверхностей, что является кардинальным решением проблемы механической обработки материалов. Для практической реализации этих процессов обработки необходимо создание отечественных станков, работающих со скоростями резания порядка 10 000 м/мин. Это станет важным шагом подъема производства, повышения

конкурентоспособности машиностроительной продукции и увеличения производительности труда.

Вывявленные закономерности справедливы при резании металлических материалов. При резании неметаллических материалов практически все тепло уходит на нагревание режущего инструмента. В этом случае увеличение скорости резания ограничено и определяется уровнем силовой напряженности процесса и условиями теплоотвода из зоны резания, т.е. теплопроводностью инструментального материала.

При шлифовании материалов, в связи с отрицательными передними углами режущих зерен круга, зависимость (2) принимает вид:

$$\sigma = 2 \cdot \sigma_{сж} \cdot tg(\psi + \gamma). \quad (5)$$

При условии $(\psi + \gamma) \rightarrow 90^\circ$ справедливо условие $tg(\psi + \gamma) \rightarrow \infty$ (рис. 2). Следовательно, для уменьшения условного напряжения резания σ необходимо уменьшить углы ψ и γ , применяя эффективные технологические среды (снижающие коэффициент трения), а также обеспечивая высокую остроту режущих зерен и т.д. Сравнивая зависимости (2) и (5), видно, что при лезвийной обработке условное напряжение резания σ меньше, чем при шлифовании. При шлифовании меньше суммарная мгновенная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зернами $S = Q/V_{кр}$ и, соответственно, производительность обработки Q (где $V_{кр}$ – скорость круга, м/с). Поэтому увеличить производительность Q можно увеличением скорости круга $V_{кр}$.

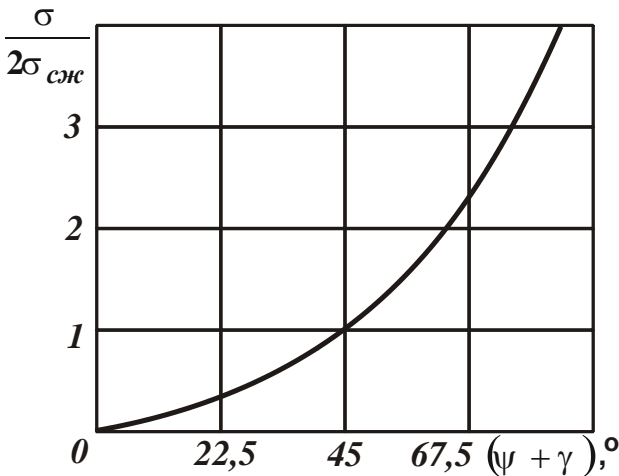


Рисунок 2 – Зависимость отношения $\sigma / 2\sigma_{сж}$ от угла $(\psi + \gamma)$

В общем виде при шлифовании материалов производительность обработки Q определяется зависимостью:

$$Q = \frac{P_y \cdot V_{кр} \cdot K_{ш}^2}{2 \cdot \sigma_{сж}}, \quad (6)$$

где P_y – радиальная составляющая силы резания, Н; $K_{ш} = P_z / P_y$ – коэффициент шлифования.

Исходя из зависимости (6), увеличить производительность обработки Q можно, прежде всего, увеличением коэффициента шлифования $K_{ш}$ за счет повышения режущей способности круга ($K_{ш}$ изменяется в пределах $f \dots 1$, где f – коэффициент трения зерен круга с обрабатываемым материалом). Параметры P_y и $V_{кр}$ оказывают одинаковое влияние на производительность обработки Q , т.е. эффективно применение как силового (глубинного), так и высокоскоростного (сверхвысокоскоростного) шлифования. Эффект усиливается в случае совмещения глубинного и высокоскоростного шлифования. Необходимо отметить, что в настоящее время ведущими иностранными станкостроительными фирмами освоено производство шлифовальных станков, работающих со скоростями резания на уровне 300 м/с.

Процессы механической обработки чрезвычайно сложны и мало изучены. К сожалению, и в настоящее время отсутствует четкое научное представление о механике поведения технологической системы при обработке. Это ограничивает возможности проектирования новых станков и создания высокоэффективных методов обработки. Для выработки новых решений необходимо перейти от традиционных эмпирических к научным аналитическим подходам, используя огромные достижения науки в области механики деформируемых систем. Например, рассчитывая упругое перемещение y и производительность обработки Q при круглом наружном шлифовании, получено интересное решение:

$$Q = Q_{ном} - (Q_{ном} - Q_0) \cdot e^{(-\bar{\beta} \cdot \tau)}; \quad (7)$$

$$y = y_{уст} - (y_{уст} - y_0) \cdot e^{(-\bar{\beta} \cdot \tau)}, \quad (8)$$

где $Q_{ном}$ – номинальная производительность обработки, м³/с;

$Q_0 = \frac{y_0 \cdot V_{кр} \cdot K_{ш} \cdot c}{\sigma}$ – производительность обработки при достижении

начального натяга в технологической системе y_0 , м³/с; c – жесткость

технологической системы, Н/м; $\bar{\beta} = \frac{V_{кр} \cdot K_{ш} \cdot c}{\pi \cdot D_{дет} \cdot l_{дет} \cdot \sigma}$; $y_{уст} = \frac{\sigma \cdot Q_{ном}}{V_{кр} \cdot K_{ш} \cdot c}$ –

установившаяся величина упругого перемещения в технологической системе, м; $D_{дет}$, $l_{дет}$ – диаметр и длина обрабатываемой детали, м; τ – время обработки, с.

Характер изменения Q и y с течением времени обработки показан на рис. 3а,б. При $Q_{ном} < Q_0$ и $y_{уст} < y_0$ выполняются условия $Q > Q_{ном}$ и $y > y_{уст}$ (кривая 1). При $Q_{ном} > Q_0$ и $y_{уст} > y_0$ выполняются условия $Q < Q_{ном}$ и $y < y_{уст}$ (кривая 3). При $Q_{ном} = Q_0$ и $y_{уст} = y_0$ выполняются условия $Q = Q_{ном}$ и $y = y_{уст}$ (кривая 2).

Средняя производительность обработки за время τ_1 для трех кривых, представленных на рис. 3а, будет различна. Так, если через фиксированную точку с координатами Q , τ_1 провести семейство кривых $Q-\tau$, то наибольшая средняя производительность обработки будет иметь место при условии $y_{уст} < y_0$, а наименьшая – при условии $y_0 = 0$ (рис. 3б). Очевидно, чем больше начальный натяг в технологической системе y_0 , тем больше средняя производительность обработки.

Из преобразованной зависимости (8): $y = y_{уст} \cdot [1 - e^{(-\beta \cdot \tau)}] + y_0 \cdot e^{(-\beta \cdot \tau)}$ следует, что наибольшее значение y_0 (для заданных значений y и $\tau = \tau_1$) достигается при условии $y_{уст} = 0$. Следовательно, наиболее производительной схемой обработки с учетом ограничения по точности обработки (определяемой величиной упругого перемещения y) является схема шлифования без поперечной подачи ($Q_{ном} = 0$) с начальным натягом y_0 в технологической системе. Текущие значения Q и y в данном случае определяются зависимостями (рис. 3в,г):

$$Q = Q_0 \cdot e^{-\frac{V_{сп} \cdot K_{ш} \cdot c \cdot \tau}{\pi \cdot D_{дет} \cdot l_{дет} \cdot \sigma}}; \quad (9)$$

$$y = y_0 \cdot e^{-\frac{V_{сп} \cdot K_{ш} \cdot c \cdot \tau}{\pi \cdot D_{дет} \cdot l_{дет} \cdot \sigma}}. \quad (10)$$

Чем больше значения $V_{сп}$, $K_{ш}$, c и меньше y_0 , $D_{дет}$, $l_{дет}$, σ , тем быстрее достигается заданная точность обработки. Очевидно, наибольшее значение y_0 может быть равно величине снимаемого припуска Π . Для выполнения этого условия, исходя из зависимости (9), необходимо, чтобы максимально возможная производительность обработки Q , обусловленная режущими свойствами шлифовального круга, была равна или соизмерима со значением Q_0 при условии $\tau = 0$ [6].

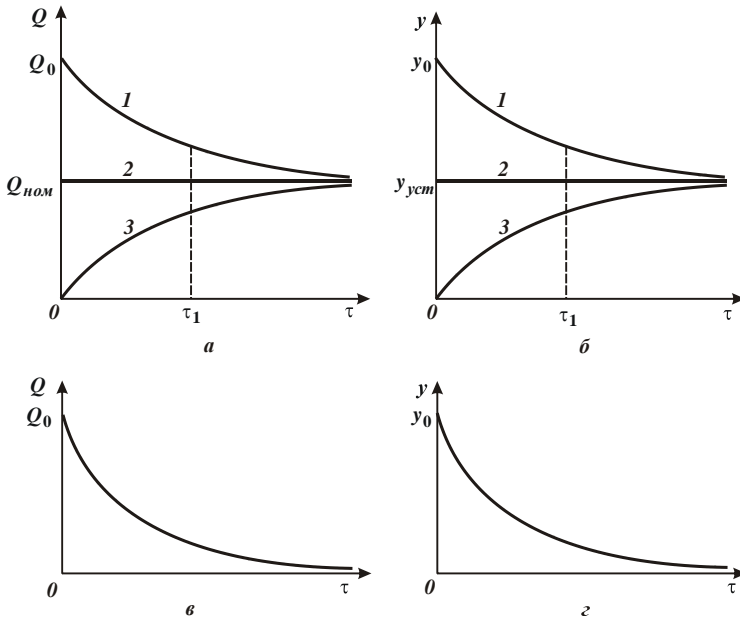


Рисунок 3 – Зависимости производительности обработки Q (а, в) и упругого перемещения y (б, г) от времени обработки τ

Зависимости (9) и (10) описывают "идеальную" схему резания с точки зрения обеспечения точности и производительности обработки, т.е. схему резания, которая в будущем может стать основной при механической обработке материалов. Из приведенных данных вытекает, что, создавая в технологической системе предварительный натяг y_0 , можно реализовать условие $Q > Q_{ном}$.

С учетом устойчивости процесса шлифования во времени эффективно также реализовать случай $Q = Q_{ном}$, т.е. условие $Q_{ном} = \frac{y_0 \cdot V_{кр} \cdot K_{ш} \cdot c}{\sigma}$.

Существуют два пути его осуществления:

1. Ускоренное врезание шлифовального круга в обрабатываемую деталь до создания требуемого натяга y_0 в технологической системе, а затем шлифование с номинальной производительностью обработки $Q = Q_{ном}$ (этап черного шлифования). Для обеспечения требуемой точности обработки, равной величине y , необходимо уменьшить начальный натяг в технологической системе от значения y_0 до значения y . Это достигается введением этапа выхаживания (шлифования с отключенной поперечной

подачей, т.е. $Q_0 = 0$). В результате реализуется известный автоматизированный цикл круглого наружного шлифования (кривая 1, рис. 4 [8]), включающий этап ускоренного врезания шлифовального круга в обрабатываемую деталь (участок АВ), затем этап чернового шлифования (участок ВС) и этап выхаживания (участок СЕ). На рис. 4 показан также характер изменения упругого перемещения с течением времени обработки для неустановившегося процесса шлифования (кривая 2).

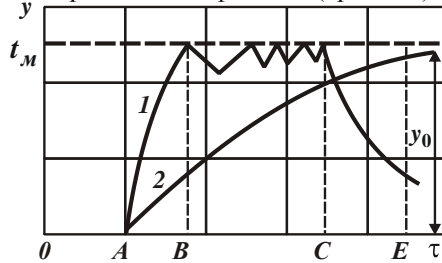


Рисунок 4 – Характер изменения упругого перемещения с течением времени обработки: 1 – автоматизированный цикл шлифования; 2 – неустановившийся процесс шлифования

На практике рассматриваемый автоматизированный цикл круглого наружного шлифования применяется при съеме относительно небольших припусков на доводочных операциях. В действительности его возможности значительно шире и он может быть использован при съеме больших припусков, которые, например, остаются после предварительной лезвийной и окончательной абразивной обработки. Эффект этого цикла шлифования состоит в обеспечении максимально возможной производительности для заданной точности обработки, а основным его ограничением является создание начального натяга в технологической системе, равного величине снимаемого припуска, который может достигать больших значений 1 ... 2 мм и более. В этих условиях на практике принято основную часть припуска удалять по жесткой схеме с заданной радиальной или продольной подачей инструмента и лишь небольшую часть припуска – по рассматриваемой схеме (с начальным радиальным перемещением y_0).

2. Шлифование по упругой схеме с фиксированным радиальным

усилием $P_{y_0} = c \cdot y_0 = \frac{Q_0 \cdot \sigma}{V_{кр} \cdot K_{ш}}$, которое позволяет стабилизировать во времени

процесс шлифования и обеспечить заданную производительность обработки.

Таким образом, кардинальным решением проблемы повышения производительности обработки при недостаточной жесткости технологической системы является применение автоматизированных циклов

шлифования по жесткой схеме с предварительным созданием натяга y_0 , а также применение упругой схемы шлифования с фиксированным радиальным усилием.

Выводы. В работе приведены аналитические зависимости для определения основных параметров механической обработки: производительности обработки, условного напряжения резания (энергоёмкости обработки), температуры резания, толщины нагретого слоя обрабатываемого материала при лезвийной обработке и шлифовании. На основе полученных аналитических зависимостей установлена эффективность применения силового и высокоскоростного резания с точки зрения снижения силовой и тепловой напряженностей процесса резания благодаря возможности уменьшения условного напряжения резания за счет снижения интенсивности трения в зоне обработки и повышения режущей способности инструмента. Теоретически показано, что при лезвийной обработке энергоёмкость обработки меньше, чем при шлифовании, а наиболее производительной схемой обработки с учетом ограничения по точности обработки, определяемой величиной упругого перемещения в технологической системе, является схема шлифования без поперечной подачи с заданным начальным натягом в технологической системе.

Список использованных источников: 1. *Силин С. С.* Метод подобию при резании материалов / С. С. Силин. – М.: Машиностроение, 1979. – 152 с. 2. Обработка резанием деталей с покрытиями / С. А. Клименко, В. В. Коломиец, М. Л. Хейфец и др.; под общей редакцией С. А. Клименко. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2011. – 353 с. 3. Робочі процеси високих технологій в машинобудуванні: навч. посібник / За редакцією А. І. Грабченко. – Харків: ХДПУ, 1999. – 436 с. 4. Якимов А. В. Оптимизация процесса шлифования / А. В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с. 5. Якимов А. В. Прерывистое шлифование / А. В. Якимов. – К.: Вища школа, 1986. – 175 с. 6. Теоретические основы резания и шлифования материалов: учеб. пособие / А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, Г. В. Новиков и др. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с. 7. Новиков Ф. В. Современные экологически безопасные технологии производства: монография / Ф. В. Новиков, В. А. Жовтобрюх, Г. В. Новиков. – Д.: ЛІРА, 2017. – 372 с. 8. Лурье Г. Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования / Г. Б. Лурье. – Изд. 2-е, перераб. доп. – Л.: Машиностроение, Ленинград. отд-ние, 1984. – 103 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Silin S. S.* Metod podobiya pri rezanii materialov / S. S. Silin. – M.: Mashinostroyeniye, 1979. – 152 s. 2. Obrabotka rezaniyem detaley s pokrytiyami / S. A. Kli-menko, V. V. Kolomyiets, M. L. Kheyfets i dr.; pod obschey redaktsiyey S. A. Klimenko. – K.: ISM im. V. N. Bakulya NAN Ukrainy, 2011. – 353 s. 3. Robochi protsesi visokikh tekhnologiy v mashinobuduvanni: navch. posibnik / Za redaktsiyeyu A. I. Grabchenko. – Kharkiv: KHDPU, 1999. – 436 s. 4. *Yakimov A. V.* Optimizatsiya protsessa shlifovaniya / A. V. Yakimov. – M.: Mashinostroyeniye, 1975. – 175 s. 5. *Yakimov A. V.* Preryvistoye shlifovaniye / A. V. Yakimov. – K.: Vishcha shkola, 1986. – 175 s. 6. Teoreticheskiye osnovy rezaniya i shlifovaniya materialov: ucheb. posobiye / A. V. Yakimov, F. V. Novikov, G. V. Novikov i dr. – Odessa: OGPU, 1999. – 450 s. 7. *Novikov F. V.* Sovremennyye ekologicheski bezopasnyye tekhnologii proizvodstva: monografiya / F. V. Novikov, V. A. Zhovtobryukh, G. V. Novikov. – D.: LIRA, 2017. – 372 s. 8. *Lur'ye G. B.* Progressivnyye metody kruglogo naruzhnogo shlifovaniya / G. B. Lur'ye. – Izd. 2-ye, pererab. dop. – L.: Mashinostroyeniye, Leningrad. otd-niye, 1984. – 103 s.

Надійшла до редколегії 25.06.2018