

УДК 621.923

Новиков Ф.В., докт. техн. наук

Харьковский национальный экономический университет имени Семена Кузнеця

Полянский В.И., канд. техн. наук

ООО «Империя металлов», г. Харьков

РОЛЬ РЕЖУЩЕГО РЕЛЬЕФА АЛМАЗНОГО КРУГА В ПОВЫШЕНИИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ И СНИЖЕНИИ ОТНОСИТЕЛЬНОГО РАСХОДА АЛМАЗА

Проведено теоретичний аналіз умов підвищення продуктивності обробки та зниження відносної витрати алмазу для різних кінематичних схем алмазного шліфування матеріалів підвищеної твердості, включаючи схеми круглого зовнішнього, внутрішнього і плоского шліфування з поздовжньою і радіальною подачами. Визначено оптимальні параметри режиму шліфування з урахуванням зміни параметрів ріжучого рельєфу алмазного круга в результаті зносу алмазних зерен. Теоретично встановлено наявність екстремуму (мінімуму) відносної витрати алмазу від параметрів режиму шліфування і визначено екстремальне значення узагальненого параметра шліфування, що враховує ступінь зносу алмазних зерен до моменту їх об'ємного руйнування і випадіння зі зв'язки круга або передчасного випадіння зі зв'язки круга без руйнування. Показано його переважний вплив на продуктивність обробки і відносну витрати алмазу. Аналітично встановлено, що основною умовою суттєвого підвищення продуктивності обробки є підтримка на робочій поверхні алмазного круга високорозвиненого ріжучого рельєфу, що характеризується високою гостротою ріжучих алмазних зерен. Показана ефективність застосування глибокого шліфування та електрофізикохімічних методів правки алмазних кругів на металевих зв'язках.

Ключові слова: алмазне шліфування, матеріали підвищеної твердості, продуктивність обробки, відносна витрата алмазу, ріжучий рельєф алмазного круга.

Проведен теоретический анализ условий повышения производительности обработки и снижения относительного расхода алмаза для различных кинематических схем алмазного шлифования материалов повышенной твердости, включая схемы круглого наружного, внутреннего и плоского шлифования с продольной и радиальной подачами. Определены оптимальные параметры режима шлифования с учетом изменения параметров режущего рельефа алмазного круга в результате износа алмазных зерен. Теоретически установлено наличие экстремума (минимума) относительного расхода алмаза от параметров режима шлифования и определено экстремальное значение обобщенного параметра шлифования, учитывающего степень износа алмазных зерен до момента их объемного разрушения и выпадения из связки круга или преждевременного выпадения из связки круга без разрушения. Показано его преобладающее влияние на производительность обработки и относительный расход алмаза. Аналитически установлено, что основным условием существенного повышения производительности обработки является поддержание на рабочей поверхности алмазного круга высокоразвитого режущего рельефа, характеризующегося высокой остротой режущих алмазных зерен. Показана эффективность применения глубокого шлифования и электрофизикохимических методов правки алмазных кругов на металлических связках.

Ключевые слова: алмазное шлифование, материалы повышенной твердости, производительность обработки, относительный расход алмаза, режущий рельеф алмазного круга.

Theoretical analysis of the conditions for increasing the processing capacity and reducing the relative diamond consumption for various kinematic schemes of diamond grinding of materials of increased hardness, including round external, internal and planar grinding schemes with longitudinal and radial feeds. The optimal parameters of the grinding mode are determined taking into account the change in the parameters of the diamond diamond's cutting relief as a result of wear of diamond grains. The presence of an extremum (minimum) of the relative diamond consumption from the parameters of the grinding mode is theoretically determined and the extreme value of the generalized grinding parameter, taking into account the degree of wear of diamond grains before the moment of their volumetric destruction and loss from the ligament of the circle or premature loss from the ligament of the circle without destruction, is determined. It shows its predominant influence on the processing capacity and the relative consumption of diamond. It has

been analytically established that the main condition for a significant increase in processing efficiency is the maintenance on the working surface of the diamond circle of a highly developed cutting relief characterized by high sharpness of cutting diamond grains. The effectiveness of the application of deep grinding and electrophysico-chemical methods for straightening diamond circles on metal bonds has been shown.

Key words: diamond grinding, materials of increased hardness, processing capacity, relative diamond consumption, diamond diamond cutting.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важнейшими научными и практическими задачами. Основным направлением эффективного применения алмазного шлифования является обработка изделий, изготовленных из металлических и неметаллических материалов повышенной твердости (твердые сплавы, износостойкие наплавки и покрытия, алмазы, керамики и ферриты, техническое стекло, хрусталь и др.). Благодаря высокой остроте и износостойкости режущих кромок алмазных зерен круга достигается снижение силовой и тепловой напряженностей процесса резания, повышение качества и производительности обработки. Причем, обработку, например, твердых сплавов можно производить на операциях как окончательного, так и предварительного алмазного шлифования, исключая из технологического процесса операции шлифования обычными абразивными кругами, характеризующимися относительно низкими показателями качества и точности обрабатываемых поверхностей. В настоящее время накоплен значительный опыт практического использования алмазного шлифования в промышленности. Однако с появлением новых труднообрабатываемых материалов возникают проблемы повышения производительности и качества их обработки. Поэтому важно и актуально дальнейшее определение наиболее эффективных условий повышения технико-экономических показателей алмазного шлифования и их применение в производстве. Исследования выполнены в соответствии с тематическими планами научно-практических работ Харьковского национального экономического университета имени Семена Кузнеця и ООО «Империя металлов» (г. Харьков).

Анализ последних достижений и публикаций. В многочисленных исследованиях [1-3], посвященных повышению производительности, качества обработки и снижению износа алмазного круга при алмазном шлифовании, определены рациональные параметры обработки и характеристики алмазных кругов для конкретных обрабатываемых материалов. Это позволило решить важные практические задачи обработки различных металлических и неметаллических материалов повышенной твердости. Однако, полученные результаты справедливы в основном для частных случаев обработки, так как основаны на экспериментальных исследованиях алмазного шлифования. В связи с этим важно установить более общие теоретические решения, охватывающие широкие диапазоны изменения основных параметров алмазного шлифования, что позволит расширить его технологические возможности при практическом использовании на операциях металлообработки. Для этого следует развить теоретические решения, приведенные в работах [4, 5], посвященные аналитическому описанию производительности обработки и относительного расхода алмаза и на их основе провести оптимизацию параметров алмазного шлифования.

Цель работы – определение условий повышения производительности обработки и снижения относительного расхода алмаза при алмазном шлифовании материалов повышенной твердости.

Материалы исследований. Рассмотрим расчетную схему процесса шлифования, согласно которой обрабатываемый прямолинейный образец движется с постоянной скоростью V'_{dem} по нормали к торцу круга (рис. 1). В результате взаимодействия режущих зерен круга с образцом, полный сьем подводимого в зону резания материала производится на уровне H , определяемом зависимостью [1]:

$$H = \sqrt[3]{\frac{9b \cdot V'_{dem}}{tg \gamma \cdot k \cdot V_{kp} \cdot (1 - \eta^2)}}, \quad (1)$$

где b – исходная максимальная высота выступания зерен над уровнем связки круга, м; k – поверхностная концентрация зерен круга, шт./м²; 2γ – угол при вершине конусообразного зерна; V_{kp} – скорость круга, м/с; $\eta=0...1$ – безразмерный коэффициент, определяющий степень затупления зерен (для острого зерна – $\eta = 0$, для затупленного зерна $\eta \rightarrow 1$); Δ – высота межзеренного пространства круга, занимаемая стружками и другими продуктами обработки (рис. 1).

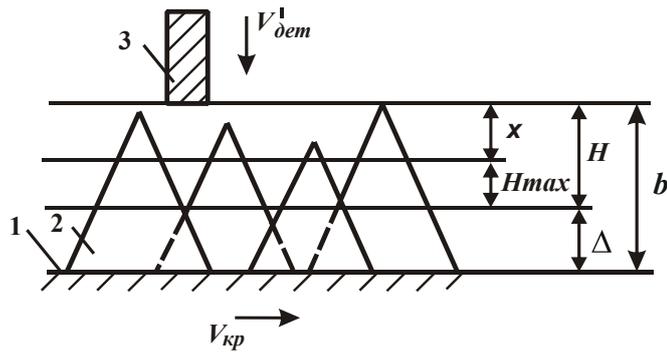


Рис. 1. Расчетная схема параметров процесса шлифования: 1 – уровень связки; 2 – режущее зерно; 3 – обрабатываемый образец

Следуя зависимости (1), с увеличением безразмерного коэффициента η , т.е. по мере затупления зерен, глубина внедрения обрабатываемого материала H в рабочую поверхность круга увеличивается и при определенном значении η обрабатываемый материал начнет контактировать со связкой круга. Это приведет или к интенсивному разрушению связки и обновлению рабочей поверхности круга за счет выпадения их из связки, или к вдавливанию образующихся стружек в связку, засаливанию круга и потере его режущей способности. Первый случай возможен при шлифовании алмазными кругами на относительно малопрочных органических и керамических связках, которые, как правило, работают в режиме самозатачивания, характеризующегося равномерным во времени износом. Второй случай возможен при шлифовании алмазными кругами на прочных связках, например металлических, которые не склонны к самозатачиванию, быстро затупляются и засаливаются и их необходимо править.

Таким образом, для нормальной работы алмазного круга необходимо в процессе шлифования управлять параметром H , обеспечивая полный сьем подводимого в зону резания материала на уровне $H \leq b$. Рассмотрим предельный случай $H = b$ с точки зрения анализа закономерностей изменения безразмерного коэффициента η . Для этого представим зависимость (1) в виде:

$$\eta = \sqrt{1 - \frac{9 \cdot V'_{дет}}{tg\gamma \cdot k \cdot V_{кр} \cdot b^2}} \quad (2)$$

Как видно, чем больше $V'_{дет}$ и меньше k , $V_{кр}$, b , тем меньше безразмерный коэффициент η , т.е. тем меньше величина линейного износа зерна x и больше высота его выступания над уровнем связки круга b . В этом случае для полного съема подводимого в зону резания материала необходимо иметь более полный (острый) режущий рельеф алмазного круга. Этим показано, что для каждого режима шлифования, каждой характеристики алмазного круга существует вполне конкретное значение η , которое определяет состояние режущего рельефа круга. Для эффективного ведения процесса шлифования данное значение η должно быть неизменным с течением времени обработки. Это достигается или режимом самозатачивания алмазного круга, или режимом его принудительной непрерывной правки (когда энергии трения обрабатываемого материала со связкой недостаточно для ее разрушения с интенсивностью, равной скорости износа зерен).

Установим производительность обработки $Q = S \cdot V'_{дет}$ с учетом параметров режущего рельефа алмазного круга η и b . Для этого разрешим зависимость (2) относительно:

$$Q = \frac{S \cdot b^2 \cdot tg\gamma \cdot k \cdot V_{кр} \cdot (1 - \eta^2)}{9}, \quad (3)$$

где S – площадь поперечного сечения обрабатываемого образца, м².

Из зависимости (3) следует, что основными условиями увеличения производительности обработки Q являются увеличение максимальной высоты выступания зерен b и уменьшение безразмерного коэффициента $\eta \rightarrow 0$, так как эти параметры входят в зависимость с наибольшей степенью. Зависимость (3) справедлива для шлифования по жесткой и упругой схемам.

Преобразуем зависимость (3) с учетом соотношений [6]: $b = (1 - \varepsilon) \cdot \bar{X}$; $k = \frac{3 \cdot m \cdot (1 - \varepsilon)}{200 \cdot \pi \cdot \bar{X}^2}$:

$$Q = \frac{S \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{кр} \cdot (1 - \varepsilon)^3 \cdot (1 - \eta^2)}{600 \cdot \pi}, \quad (4)$$

где \bar{X} – зернистость алмазного круга, м; m – объемная концентрация зерен круга; $(1 - \varepsilon)$ – безразмерный коэффициент, учитывающий степень выступания зерен над уровнем связки ($\varepsilon < 1$).

В общем случае производительность обработки Q не зависит от зернистости алмазного круга \bar{X} , а определяется безразмерным коэффициентом ε : чем он меньше ε , тем больше Q . Уменьшить безразмерный коэффициент ε можно, применяя высокопрочные металлические связки, металлизированные алмазные зерна и т.д.

Применительно к круглому наружному, внутреннему и плоскому шлифованию периферией круга с фиксированной глубиной шлифования зависимости (1) – (3) видоизменяются:

$$H = \sqrt[3]{\frac{9b \cdot V_{дем} \cdot \sqrt{2t \cdot \rho}}{\operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{кр} \cdot (1 - \eta^2)}}; \quad (5)$$

$$\eta = \sqrt{1 - \frac{9 \cdot V_{дем} \cdot \sqrt{2t \cdot \rho}}{\operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{кр} \cdot b^2}}; \quad (6)$$

$$Q = S_0 \cdot V_{дем} \cdot t = \frac{S_0 \cdot \operatorname{tg}^2 \gamma \cdot k^2 \cdot b^4 \cdot V_{кр}^2 \cdot (1 - \eta^2)^2}{162 \cdot V_{дем} \cdot \rho}, \quad (7)$$

где $V_{дем}$ – скорость вращения детали, м/с; $\rho = 1/R_{кр} + 1/R_{дем}$; $R_{кр}$, $R_{дем}$ – радиусы круга и детали, м; S_0 – продольная подача, м/об.

По сравнению с торцовым шлифованием производительность обработки Q при шлифовании периферией круга в большей степени зависит от параметров η и b , что указывает на эффективность управления режущим рельефом круга. Наряду с увеличением параметров k и $V_{кр}$, добиться увеличения производительности обработки Q можно путем уменьшения $V_{дем}$, а в соответствии с зависимостью (6) – увеличением глубины шлифования t . Чем меньше $V_{дем}$, тем значительно может быть увеличена глубина шлифования t при условии $\eta = const$ и тем больше производительность обработки, т.е. вторым по значимости условием увеличения Q необходимо рассматривать применение глубинного шлифования с весьма небольшой скоростью вращения детали $V_{дем}$.

Зависимость (6) может быть представлена

$$\eta = \sqrt{1 - \frac{9 \cdot \sqrt{2 \cdot V_{дем} \cdot Q \cdot \rho}}{\operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{кр} \cdot b^2 \cdot \sqrt{S_0}}}. \quad (8)$$

Учитывая то, что уменьшение $V_{дем}$ ограничено, рост производительности обработки Q также ограничен условием $0 < \eta < 1$. Поэтому добиться увеличения производительности глубинного шлифования (т.е. увеличения числителя подкоренного выражения) можно за счет увеличения знаменателя и, в первую очередь, параметра b , входящего в зависимость (8) с максимальной степенью. Следовательно, для реализации высокопроизводительного глубинного шлифования необходимо использовать прочные алмазные круги со значительным выступанием зерен над уровнем связки. Увеличить производительность обработки Q можно также за счет увеличения скорости круга $V_{кр}$, причем значительного увеличения, соизмеримого с увеличением множителя b^2 (например, применение сверхвысокоскоростного шлифования увеличивает $V_{кр}$ до значений 300 м/с).

Рассмотрим шлифование периферией круга с непрерывной поперечной подачей. Примем, что за время τ , равное одному обороту детали, алмазный круг в радиальном к детали направлении переместится на величину $t = S_{non} \cdot \tau$, где S_{non} – поперечная подача, м/с. Учитывая, что $\tau = \pi \cdot D_{дет} / V_{дет}$ глубина шлифования выразится: $t = S_{non} \cdot \frac{\pi \cdot D_{дет}}{V_{дет}}$, где $D_{дет}$ – диаметр детали, м.

Тогда зависимости (5) – (7) выразятся:

$$H = \sqrt[3]{\frac{9b \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot D_{дет} \cdot S_{non} \cdot V_{дет} \cdot \rho}}{tg\gamma \cdot k \cdot V_{кр} \cdot (1 - \eta^2)}}; \quad (9)$$

$$\eta = \sqrt{1 - \frac{9 \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{2t \cdot \rho}}{tg\gamma \cdot k \cdot V_{кр} \cdot b^2}}; \quad (10)$$

$$Q = \pi \cdot D_{дет} \cdot S_0 \cdot S_{non} = \frac{S_0 \cdot tg^2\gamma \cdot k^2 \cdot b^4 \cdot V_{кр}^2 \cdot (1 - \eta^2)^2}{162 \cdot V_{дет} \cdot \rho}. \quad (11)$$

В данном случае скорость детали $V_{дет}$ непосредственно не определяет расчетную производительность обработки, равную $Q = \pi \cdot D_{дет} \cdot S_0 \cdot S_{non}$. Ее роль, аналогично скорости круга $V_{кр}$ состоит в изменении количества работающих зерен, что проявляется в изменении параметров H и η . Как видно, зависимости (7) и (11) идентичны, т.е. добиться увеличения производительности обработки Q можно увеличением параметров S_0 , b , k , $V_{кр}$ и уменьшением η и $V_{дет}$. Чем больше S_{non} и меньше $V_{дет}$ при условии $\eta = const$, тем больше Q и выше эффективность шлифования. Для реализации более высоких значений S_{non} , следуя зависимости (10), необходимо увеличивать параметр b , используя оптимальные характеристики алмазных кругов и эффективные методы их правки. С учетом соотношений [6] для определения параметров b и k зависимость (11) примет вид:

$$Q = \frac{S_0 \cdot tg^2\gamma \cdot k^2 \cdot V_{кр}^2 \cdot (1 - \varepsilon)^6 \cdot (1 - \eta^2)^2}{72 \cdot 10^4 \cdot \pi^2 \cdot V_{дет} \cdot \rho}. \quad (12)$$

Как и в аналогичной зависимости (4), наибольшее влияние на производительность обработки Q оказывает безразмерный коэффициент $(1 - \varepsilon)$, что свидетельствует об эффективности управления высотой выступления зерен над уровнем связки круга.

Произведем расчет и анализ относительного расхода алмаза. В общем виде аналитическая зависимость для определения относительного расхода алмаза q (мг/т) приведена в работе [4]:

$$q = \frac{10^3 \cdot \rho_a \cdot \alpha \cdot \Delta_l \cdot V_{кр}}{\rho_m \cdot V_{дет} \cdot t \cdot \eta}, \quad (13)$$

где ρ_a , ρ_m – плотности алмаза и обрабатываемого материала, кг/м³; α – коэффициент, учитывающий плотность связки в зависимости от концентрации алмазных зерен в круге; Δ_l – линейный износ зерна за одно касание с обрабатываемым материалом, м.

С учетом производительности обработки $Q = S_0 \cdot V_{дет} \cdot t$ зависимость (13) видоизменится:

$$q = \frac{10^3 \cdot \rho_a \cdot \alpha \cdot \Delta_l \cdot V_{кр} \cdot S_0}{\rho_m \cdot Q \cdot \eta}. \quad (14)$$

При фиксированных значениях $V_{кр}$, S_0 и Q с увеличением безразмерного коэффициента η , т.е. по мере затупления зерен круга, относительный расход алмаза уменьшается. Это будет иметь место до тех пор, пока параметр H , определяемый зависимостью (1), не станет равным максимальной высоте выступления зерен над уровнем связки $H = b$. После чего, с увеличением η (вследствие неполного съема подводимого в зону резания материала) производительность обработки

Q начнет уменьшаться и при условии $\eta \rightarrow 1$ будет стремиться к нулю ($Q \rightarrow 0$). Исходя из этого, относительный расход алмаза q после превышения определенного значения η начнет увеличиваться и при $Q \rightarrow 0$ будет стремиться к бесконечности ($q \rightarrow \infty$). Этим показано, что в общем случае зависимость q от η носит экстремальный характер (проходит точку минимума).

Установленная зависимость позволяет объяснить противоречивые экспериментальные данные о характере изменения относительного расхода алмаза, которые приведены в многочисленных публикациях. Например, известны зависимости относительного расхода алмаза q от времени шлифования, когда q или уменьшается, или возрастает, или проходит точку минимума. Исходя из зависимости (14), непрерывное уменьшение q с течением времени шлифования свидетельствует о том, что параметр $H < b$, т.е. высота режущего рельефа круга достаточно для полного съема подводимого в зону резания материала (фактическая глубина шлифования примерно равна номинальной глубине шлифования). Производительность обработки Q в данном случае с течением времени остается приблизительно постоянной, а увеличивается безразмерный коэффициент η , который и приводит к уменьшению относительного расхода алмаза. В случае, если высоты режущего профиля алмазного круга недостаточно для полного съема подводимого в зону резания материала, т.е. $H < b$, то производительность обработки с течением времени шлифования будет уменьшаться, что приведет к увеличению относительного расхода алмаза.

Третий случай, когда относительный расход алмаза изменяется по экстремальной зависимости, обусловлен изменением параметра H от значений $H < b$ до значений $H > b$.

С учетом зависимости (12) зависимость (14), примет вид:

$$q = \frac{4 \cdot 10^8 \cdot \pi^2 \cdot \rho_a \cdot \alpha \cdot \Delta_i \cdot \rho \cdot V_{\text{дем}}}{\rho_m \cdot \text{tg} \gamma \cdot m^2 \cdot (1 - \varepsilon)^6 \cdot V_{\text{кр}} \cdot \eta \cdot (1 - \eta^2)^2}. \quad (15)$$

При изменении безразмерного коэффициента η в пределах $0 \dots 1$ относительный расход алмаза q изменяется по экстремальной зависимости, т.е. при условиях $\eta=0$ и $\eta=1$ относительный расход алмаза $q \rightarrow \infty$ (рис. 2). Для определения экстремального значения безразмерного коэффициента η следует подчинить функцию q необходимому условию экстремума: $q'_\eta = 0$, в результате получено: $\eta_{\text{экстр}} = 0,45$.

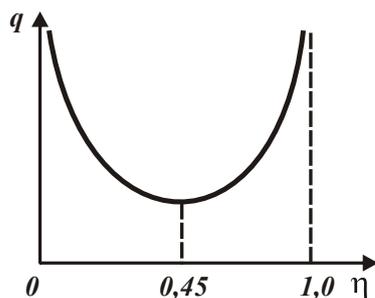


Рис. 2. Расчетная зависимость удельного расхода алмаза q от безразмерного коэффициента η

Таким образом установлено, что существует оптимальное значение безразмерного коэффициента η , определяющее оптимальный режущий рельеф алмазного круга. Очевидно, для поддержания в процессе шлифования оптимального значения η необходимо использовать алмазные круги, работающие в режиме самозатачивания, или методы электрофизикохимической правки алмазных кругов на металлических связках.

Выводы. Проведен теоретический анализ условий повышения производительности обработки и снижения относительного расхода алмаза для различных кинематических схем алмазного шлифования материалов повышенной твердости, включая схемы круглого наружного, внутреннего и плоского шлифования с продольной и радиальной подачами. Определены оптимальные параметры режима шлифования с учетом изменения параметров режущего рельефа алмазного круга в результате

износа алмазных зерен. Теоретически установлено наличие экстремума (минимума) относительного расхода алмаза от параметров режима шлифования и определено экстремальное значение обобщенного параметра шлифования, учитывающего степень износа алмазных зерен до момента их объемного разрушения и выпадения из связки круга или преждевременного выпадения из связки круга без разрушения. Показана эффективность применения глубинного шлифования и электрофизикохимических методов правки алмазных кругов на металлических связках.

Перспективы дальнейшей работы в данном направлении. В дальнейшей работе необходимо провести многопараметрическую оптимизацию алмазного шлифования, рассматривая в качестве критериев оптимизации наибольшую производительность обработки и наименьшую себестоимость обработки, а в качестве основных технологических ограничений – параметры качества и точности обрабатываемых поверхностей, мощность шлифовального станка.

Литература

1. Захаренко И.П. Основы алмазной обработки твердосплавного инструмента / И.П. Захаренко. – К.: Наук. думка, 1981. – 300 с.
2. Инструменты из сверхтвердых материалов / Под ред. Н.В. Новикова. – М.: Машиностроение, 2005. – 555 с.
3. 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.
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. Новіков Ф. В. Високопродуктивне алмазне шліфування: монографія / Ф. В. Новіков. – Х. : Вид. ХНЕУ, 2014. – 412 с.
6. Алмазно-абразивная обработка материалов: справочник / Под ред. проф. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 390 с.