

ФЕСЕНКО А. В., ЄВСЮКОВА Ф. М., СЛІПЧЕНКО С. Є., ЛИННИК О. І.

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФІНІШНОЇ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ.

Розглянуті питання фінішних операцій механічної обробки і забезпечення обґрунтованого вибору оптимальних варіантів з урахуванням розподілу між зніманням матеріалу інструментом і тертям зв'язки при контакті. При цьому треба забезпечити якомога більший виступ вершин зернин над рівнем зв'язки круга, а також своєчасного видалення з робочої поверхні круга затуплених зернин. Пропонується застосування інструментів з підвищеними фізико-механічними можливостями для обробки з відшаруванням поверхового шару заготовки. Суть процесу полягає в тому, що він концентрує все видалення матеріалу на вузькій контактній довжині, при цьому забезпечується максимальна швидкість з найменшою питомою енергією шліфування. При шліфуванні відшаруванням у зоні видалення припуску знімання на порядок вище, ніж при звичайному шліфуванні. Внесок енергії тертя та орання стає малою частиною загальної питомої енергії шліфування. Тепло, що виділяється під час шліфування, зменшується, умови його розсіювання в процесі точкового шліфування покращуються. Зазначені дослідження дозволяють усвідомити фізичну сутність процесу, визначити режими обробки, а також шляхи оптимізації технологічних параметрів точкового шліфування.

Ключові слова: фінішні механічні операції, абразивна обробка, інструмент, засоби механічної обробки відшаруванням матеріалу.

**FESENKO A. V., YEVSUKOVA F. M., SLIPCHENKO S. YE., LYNNYK O. I.
IMPROVING THE EFFICIENCY OF FINISHING.**

The issues of finishing operations of machining and providing a reasonable choice of optimal options, taking into account the distribution between the removal of material by the tool and the friction of the ligament at the contact. At the same time it is necessary to ensure the greatest possible protrusion of the tops of the grains above the level of ligament of the circle, as well as the timely removal of blunt grains from the working surface of the circle. The use of tools with increased physical and mechanical capabilities for processing with exfoliation of the surface layer of the workpiece is proposed. The essence of the process is that it concentrates all the removal of material on a narrow contact length, while providing maximum speed with the lowest specific grinding energy. When grinding by exfoliation in the area of removal of the removal allowance is an order of magnitude higher than when conventional grinding. The contribution of friction and plowing energy becomes a small part of the total specific energy of grinding. The heat released during grinding is reduced, its dissipation conditions in the process of spot grinding are improved. These studies allow us to understand the physical essence of the process, to determine the modes of processing, as well as ways to optimize the technological parameters of spot grinding.

Keywords: finishing mechanical operations, abrasive treatment, tool, means of mechanical processing by exfoliation of material

Вступ. Робота спрямована на вирішення актуальної науково-практичної проблеми підвищення ефективності фінішних операцій механічної обробки і забезпечення обґрунтованого вибору оптимальних варіантів. Показано, як на процес різання впливає розподіл між зніманням матеріалу інструментом і тертям зв'язки при контакті. Розглянуті питання підвищення ефективності обробки за рахунок використання інструментів з підвищеними фізико-механічними властивостями. Пропонується використовувати обробку з відшаруванням поверхового шару заготовки за один прохід при кутовому налаштуванні вузького шліфувального круга.

Аналіз стану питання. Сучасний рівень розвитку машинобудівного виробництва відкриває нові технологічні можливості для виготовлення конкурентоспроможної машинобудівної продукції та виходу на світові ринки. Особливо це стосується фінішних операцій механічної обробки, найбільш відповідальних за остаточне формування параметрів точності і якості виробленої продукції. Однак ці операції досить трудомісткі і різко знижують ефективність виробництва. Тому вдосконалення фінішних операцій механічної обробки є важливим і актуальним завданням.

Перспективним напрямком для вирішення даної проблеми є використання різальних інструментів із зносостійкими покриттями, а також інструментів з матеріалів, які мають підвищені фізико-механічні властивості.

При цьому високий потенціал цих інструментів не повною мірою використовується на практиці. Це в кінцевому підсумку перешкоджає науково обґрунтованому вибору раціональних методів обробки та умов, які знижують енергоємність, підвищують точність та якість оброблених поверхонь при підвищенні продуктивності. Тому подана робота спрямована на вирішення актуальної науково-практичної проблеми підвищення ефективності фінішних операцій механічної обробки і забезпечення обґрунтованого вибору оптимальних варіантів обробки.

Мета дослідження, постановка задачі. Вирішення завдань підвищення точності і якості оброблюваних поверхонь нерозривно пов'язане з проблемою оптимізації параметрів обробки, створення методів різання різними інструментами. В даний час накопичений значний досвід вирішення задач оптимізації в технології машинобудування [1,2,3]. Однак, отримані рішення неоднорідні. Насправді немає узагальнених рівнянь і залежностей, що описують об'єктивні функції (параметри точності і якості обробки) і технологічні обмеження. Це звужує можливості оптимального проектування технологічного процесу. Тому важливо провести аналіз параметрів обробки, а також розробити практичні рекомендації з виявлення і впровадження нових резервів обробки.

Останнім часом знаходить застосування новий вид шліфування відшаруванням. Відмінною особливістю розглянутого способу обробки є використання вузьких шліфувальних кругів шириною не більше за 5 мм.

Потрібно науково обгрунтовано підійти до розкриття (уточнення) фізичної сутності таких процесів обробки і встановлення їхніх технологічних можливостей з метою зниження енергоємності, підвищення якості, точності й продуктивності обробки.

Матеріали дослідження. Як відомо, шліфування є ефективним методом остаточної механічної обробки, що забезпечує високі показники точності та шорсткості [4]. Разом з тим, досягнення цих показників характеризується відносно високою трудомісткістю обробки. Тому питання підвищення продуктивності обробки на фінішних операціях шліфування видаються дуже актуальними. Для їх вирішення важливо спочатку розглянути схему шліфування прямолінійного зразка, що рухається за нормаллю до робочої поверхні круга з постійною швидкістю $V_{\text{різ}}$ (рис. 1) [5]. Тангенціальну і радіальну складові сили різання P_z і P_y слід подати у вигляді:

$$P_z = P_{z\text{різ}} + P_{z\text{тер}} \quad (1)$$

$$P_y = P_{y\text{різ}} + P_{y\text{тер}} \quad (2)$$

де $P_{z\text{різ}}$, $P_{y\text{різ}}$, $P_{z\text{тер}}$, $P_{y\text{тер}}$ - складові сили різання, що виникають у процесі різання та тертя зв'язки шліфувального круга з оброблюваним матеріалом, Н.

Відповідно

$$P_z = \sigma \cdot S_{\text{сум}} = \sigma \cdot \frac{Q}{V_{\text{кр}}} \quad (3)$$

$$P_{z\text{різ}} = \sigma_{\text{різ}} \cdot S_{\text{сум}} = \sigma_{\text{різ}} \cdot \frac{Q}{V_{\text{кр}}} \quad (4)$$

$$P_{z\text{тер}} = P_{y\text{тер}} \cdot f = c \cdot Y_{\text{тер}} \cdot f \quad (5)$$

$$P_{y\text{різ}} = \frac{P_{z\text{різ}}}{K_{\text{Шріз}}} = c \cdot Y_{\text{різ}} \quad (6)$$

де $S_{\text{сум}} = Q/V_{\text{кр}}$ - миттєва сумарна площа поперечного перерізу зрізу всіма одночасно працюючими зернами круга, м^2 ;

Q - продуктивність обробки, $\text{м}^3/\text{с}$;

$\sigma_{\text{різ}}$ - умовна напруга різання (враховує різання зернами круга, але не враховує тертя зв'язки круга з матеріалом), $\text{Н}/\text{м}^2$;

f - коефіцієнт тертя зв'язки круга з матеріалом; c - наведена жорсткість технологічної системи, $\text{Н}/\text{м}$;

$Y_{\text{тер}} = (V_{\text{різ}} - V_{\text{різо}}) \cdot \tau$ - пружне переміщення, що виникає в технологічній системі внаслідок неповного знімання підведеного в зону різання матеріалу, що обробляється, м ;

$V_{\text{різо}}$ - лінійна швидкість знімання матеріалу, $\text{м}/\text{с}$;

τ - час обробки, с ;

$K_{\text{Шріз}} = P_{z\text{різ}}/P_{y\text{різ}}$;

$Y_{\text{різ}}$ - пружне переміщення, що виникає в технологічній системі внаслідок заглиблення ріжучих зернин в оброблюваний матеріал, м .

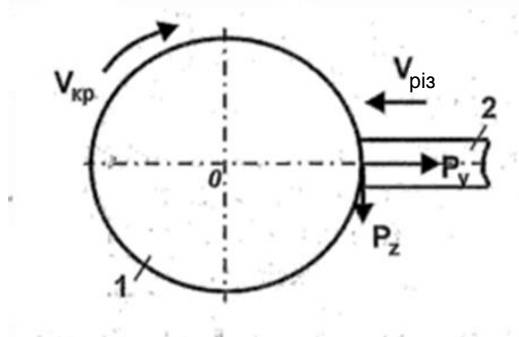


Рис. 1 - Розрахункова схема параметрів процесу шліфування:
1 - круг; 2 - оброблюваний зразок

З урахуванням співвідношення $Q = V_{\text{різо}} \cdot S$ маємо:

$$\sigma = \sigma_{\text{різ}} + \left(\frac{V_{\text{різ}}}{V_{\text{різо}}} - 1 \right) \cdot \frac{c \cdot f \cdot \tau \cdot V_{\text{кр}}}{S} \quad (7)$$

де S - площа поперечного перерізу оброблюваного зразка, м^2 .

Із залежності (7) випливає, що за умови $V_{\text{різ}} = V_{\text{різо}}$, тобто, якщо відбувається повне знімання матеріалу, підведеного в зону різання, другий доданок дорівнює нулю і умовна напруга різання σ викликана лише процесом різання. Якщо ж круг не забезпечує повне знімання оброблюваного матеріалу, підведеного в зону різання, то

$V_{різ} > V_{різо}$ і в контакт з матеріалом вступає зв'язка. В результаті другий доданок залежності (7) приймає значення, відмінне від нуля, і умовна напруга різання σ визначається сумою двох доданків.

Причому, зі збільшенням часу обробки τ другий доданок збільшується (у тому числі і при постійній швидкості $V_{різо}$), що призводить до збільшення умовної напруги різання σ і необхідності припинення процесу шліфування.

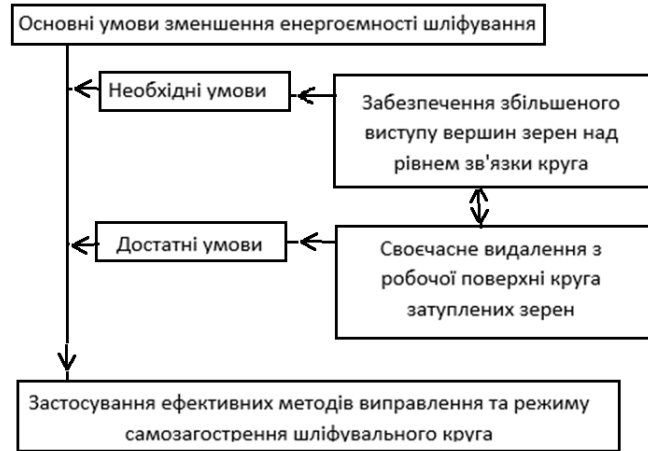


Рис. 2 - Структурна схема умов зменшення енергоємності шліфування

Структурна схема умов зменшення енергоємності наведена на рисунку 3. При чому треба забезпечити якомога більший виступ вершин зернин над рівнем зв'язки круга, а також своєчасного видалення з робочої поверхні круга затуплених зернин.

Останнім часом все більше застосовується обробка з відшаруванням поверхового шару заготовки за один прохід при кутовому налаштуванні вузького шліфувального круга, за аналогією з точінням, результативність якого визначається геометрією інструменту.

У порівнянні з зовнішнім круглим шліфуванням, при якому профіль шліфувального круга відповідає контуру заготовки, при шліфуванні вузьким кругом можливе виготовлення різних контурів заготовки одним профілем шліфувального круга.

Суть процесу полягає в тому, що він концентрує все видалення матеріалу на вузькій контактній довжині близько 1 мм, щоб забезпечити максимальну швидкість видалення матеріалу з найменшою питомою енергією шліфування [6].

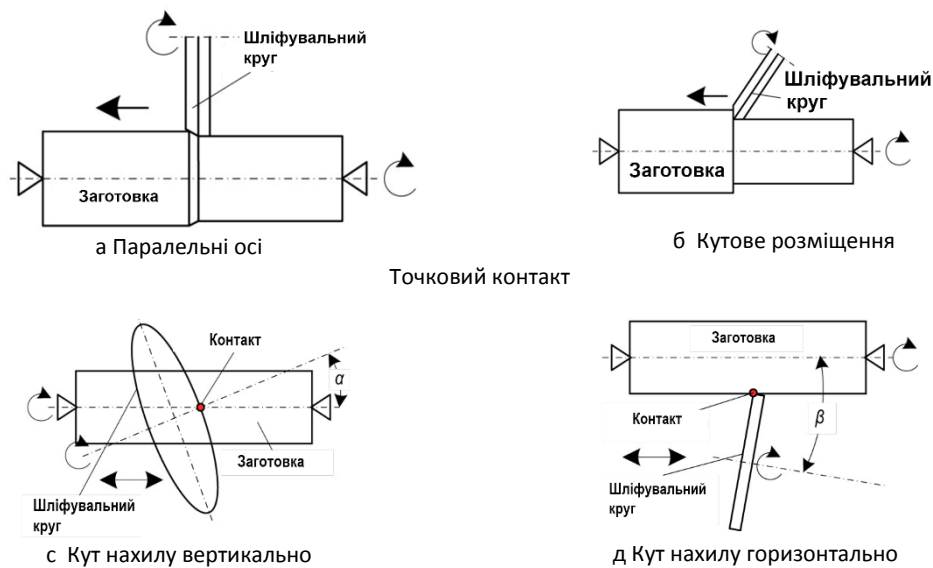


Рис. 3 - Технологічні схеми шліфування відшаруванням

Використовуючи глибинне шліфування, кругом з формованою кінчною ділянкою (рис. 3а) за один прохід знімають шар матеріалу на всю необхідну глибину. У ході обробки кінчна ділянка, яку можна назвати забірним конусом, видаляє основну частину шару, що зрізується, а циліндрична ділянка зачищає оброблену поверхню. Поперечна подача відсутня.

Кутове розташування круга при одночасному шліфуванні шийки валу та торця (рис. 3б) дозволяє знизити навантаження процесу. При такій технологічній схемі торець заготовки шліфується периферією круга, що зменшує контакт круга із заготовкою, забезпечуючи кращий доступ ЗОР, покращення якості обробленої поверхні та виключення можливості припалювання. Одночасне кутове шліфування поверхні обертання та торця не тільки збільшує продуктивність обробки, але й забезпечує підвищення точності їхнього взаємного розташування.

Нахил круга в вертикальній та горизонтальній площині [7] дозволяє значно зменшити площу контакту, теоретично перетворюючи її на точку завдяки кутовим α , β -налаштуванням круга, звідси і назва способу в технічній літературі – точковий (рис. 3 с, д).

Процес шліфування з відшаруванням є досить зручною системою різання, в якій існуючі вхідні технологічні параметри слід оптимізувати. У процесі, що проходить на паралельних осях круга та заготовки (рис. 4), до таких параметрів відносяться: окружні швидкості круга та деталі, осьова подача стола, ширина круга та його частин, кут χ та зернистість конусної частини, зернистість циліндричної частини круга, що здійснює чистову обробку.

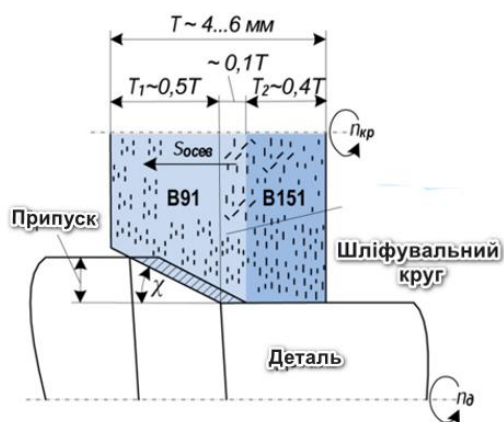


Рис. 4 - Схема шліфування відшаруванням шліфувальним кругом CBN із двох шарів зернин різного розміру [8]

Доцільно розглянути ряд фізичних параметрів, які б дозволили критично оцінити процес шліфування відшаруванням.

Так, коефіцієнт абразивного різання f_A [9] може бути критерієм ефективності процесу. Відомо, що робота стружкоутворення пропорційна дотичній складовій P_Z сили різання, а робота тертя - радіальній P_Y .

Звідси коефіцієнт абразивного різання $f_A = P_Z/P_Y$, що дозволяє визначати частку роботи стружкоутворення та тертя. Чим він вищий, тим нижчі питомі енерговитрати.

Слід пам'ятати, що для твердого точіння він дорівнює 0,8... 1,2.

Питома енергія складається з двох складових: $u = u_c + u_{si}$, де u_c - питома енергія утворення стружки, а u_{si} - питома енергія ковзання (включаючи енергію орання) [10]. Будь-яка модель видалення матеріалу має бути здатна кількісно визначити величину питомої енергії та її залежність від умов процесу.

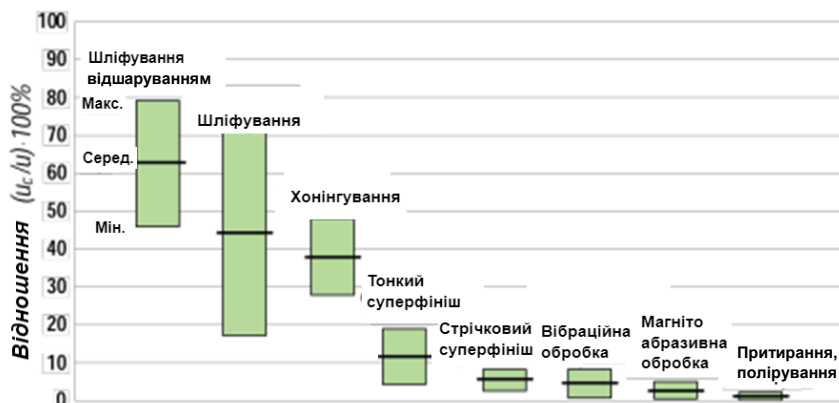


Рис. 5 - Відношення питомої енергії стружкоутворення u_c до загальної питомої енергії u за різних методів чистої обробки [10].

Шліфування відшаруванням характеризується середньою швидкістю знімання $200...1000 \text{ мм}^3/\text{с}$, високою швидкістю обертання круга - $90...160 \text{ м/с}$, достатньою глибиною різання - до $0,7 \text{ мм}$ та швидкістю подачі до 600 м/хв. , застосування суперабразивних інструментів, що зазвичай призводить до невисокої питомої енергії - $15...50 \text{ Дж/мм}^3$ (для чорних металів).

У роботі [11] підтверджується, що при шліфуванні відшаруванням у зоні видалення припуску знімання Q' на порядок вище, ніж при звичайному шліфуванні. Отже, внесок енергії тертя та орання стає малою частиною загальної питомої енергії шліфування, і u знижується до 80% .

Технологічна схема високошвидкісного точкового круглого шліфування відрізняється великою гнучкістю, крім традиційних параметрів круглого шліфування: окружних швидкостей круга, деталі, глибини різання та поздовжньої подачі - є кутові налаштування - кут конуса, або змінний кут χ поверхні тору, і кути нахилу круга α і β , що разом визначають розміри площини контакту «круг - заготовка».

Процес точкового шліфування подібний до гостріння заготовки вершиною різця з дуже невеликим зусиллям і нагріванням. На рис. 6 показано технологічну схему обробки, реалізовану на верстатах фірми JUNKER.

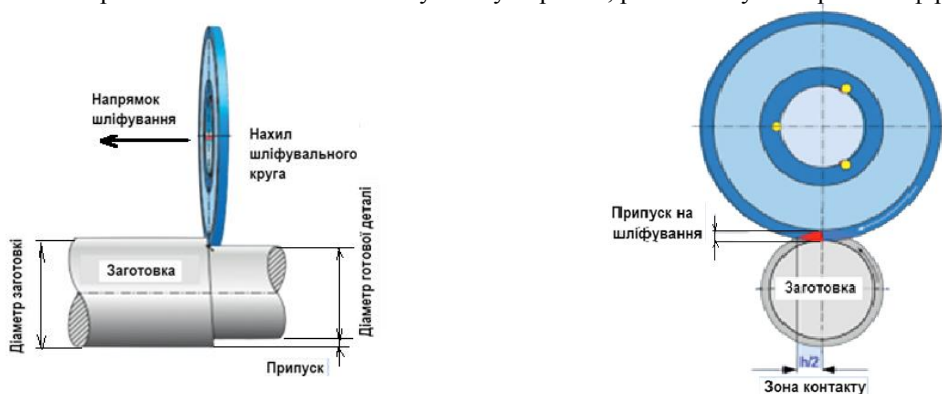


Рис. 6 - Технологічна схема високошвидкісного точкового круглого шліфування

На рис. 6 показано дві зони при високошвидкісному точковому шліфуванні: зона бічного та периферійного контакту, які відіграють різні ролі у процесі обробки [12]. Більший обсяг матеріалу видаляється в зоні бічного шліфування, тоді як чистова обробка поверхні завершується в зоні шліфування циліндричною кромкою. Зазвичай при шліфуванні циліндричної деталі кут β дорівнює нулю. Геометрично бічна контактна зона у вигляді еліпса $abcd$ (рис. 7) розташована в торцевій частині шліфувального круга, де круг стикається з робочою поверхнею деталі.

Якщо у вертикальній площині є кут нахилу круга або вертикальний кут точкового шліфування α , то при точковому шліфуванні вектору швидкості деталі та швидкості круга в контактному шарі не знаходяться в одній площині, а реальна бічна контактна зона є частиною еліпса $abcd$, розмір якого залежить від осьової швидкості подачі заготовки.

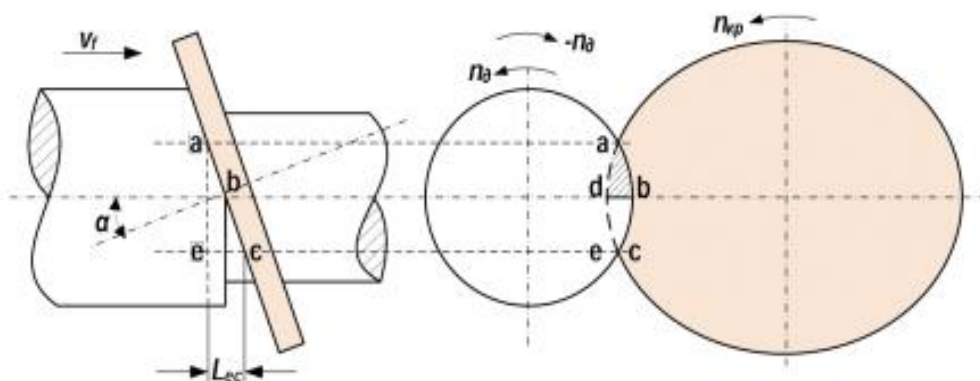


Рис. 7 - Зона бічного контакту при точковому шліфуванні [12]

На думку авторів [12], довжина контактної дуги значно впливає на продуктивність шліфування, особливо на тепло та силу шліфування, та визначає цілісність поверхні. При високошвидкісному точковому шліфуванні через знос шліфувального круга виникає перехідна зона між зоною бічного шліфування та зоною шліфування на циліндричній поверхні круга. Зазвичай, при використанні суперабразивних кругів ця зона дуже вузька. Якщо розглядати лінію С - С, проведену під кутом 45°, як лінію розділу, реальна зона бічного контакту може бути показана за допомогою штрихування (рис. 8).

Діапазон довжини контактної дуги становить від 0 до максимального значення L, що дорівнює довжині дуги ab.

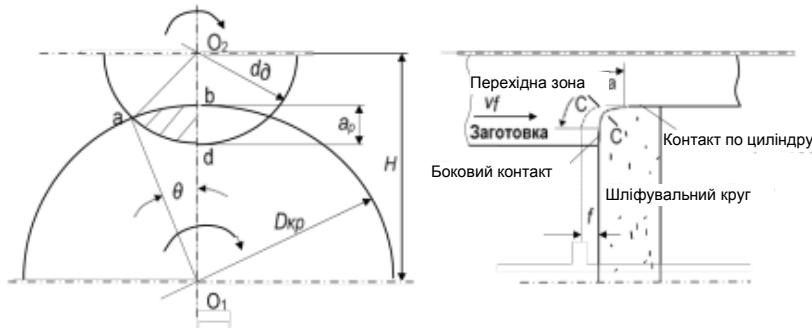


Рис. 8 – Довжина дуги контакту в бічній контактній зоні [12]

У роботі [13] в результаті оцінки геометрії контакту точкового шліфування було отримано емпіричний вираз для дотичної F_z , що становить зусилля шліфування за параметрами: кут в точці дотику при точковому шліфуванні α , швидкість деталі V_d , глибина різання a_p і подача вздовж осі заготовки f_{av} .

$$F_z = 453 \cdot a_p^{0.90} \cdot f_{av}^{0.6} \cdot V_d^{0.76} \cdot \cos^{0.76} \alpha \quad (8)$$

Встановлено, що температура шліфування (рис. 9) зменшується зі збільшенням кута конусної частини круга χ . Існування кута χ дозволяє легко виводити подрібнену стружку із зони шліфування, тим самим зменшуючи її накопичення в зоні обробки.

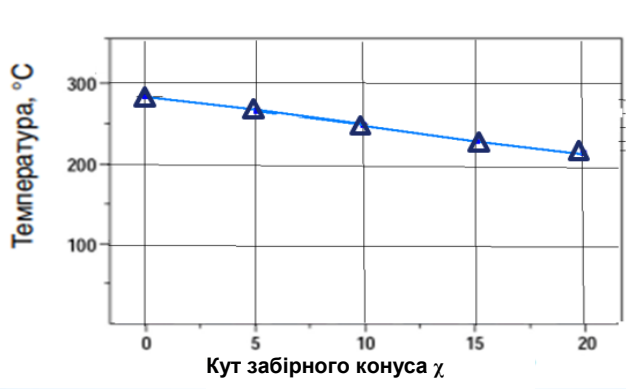
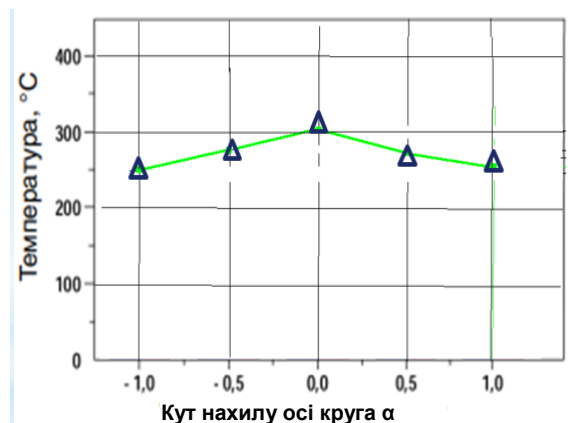


Рис. 9 - Вплив кута конусної частини круга χ на температуру шліфування [13]

Отже, певною мірою тепло, що виділяється під час шліфування, зменшується, умови його розсіювання в



процесі точкового шліфування покращуються, і тепло, що виділяється в цьому процесі, може бути краще розподілене. Крім того, зона контакту круга та заготовки стає меншою, процес шліфування стає більш плавним, а температура шліфування знижується.

Рис. 10 - Вплив кута нахилу осі круга α у вертикальній площині на температуру шліфування [13]

Вплив кута нахилу α на температуру шліфування (рис. 10) приблизно симетричний відносно $\alpha = 0^\circ$. Таким чином, показано, що знак кута нахилу α дуже мало впливає на температуру шліфування, яка в основному залежить від абсолютного значення. Кут нахилу α знижує температуру шліфування, і чим більше абсолютне значення α , тим нижче значення температури шліфування через зменшення розміру зони контакту круга та заготовки. Тим самим зменшується кількість зернин, що беруть участь у шліфуванні в одиницю часу.

Максимальна товщина недеформованої стружки окремого зерна зменшується, що призводить до зниження тепла, що виділяється у процесі шліфування. Крім того, існування α вигідне, оскільки воно покращує умови розсіювання тепла. У межах певного діапазону більше значення α може призвести до кращого відведення тепла. З цих причин температура точкового шліфування нижче, ніж у традиційного круглого шліфування.

За результатами визначення основних технологічних показників та аналізу [14] встановлені первинні та вторинні фактори, що впливають на температуру в зоні шліфування: кут зони чорнового шліфування $\chi >$ глибина шліфування $a_p >$ кут нахилу $\alpha >$ швидкість поздовжньої подачі $f_{av} >$ швидкість круга $v_{кр}$.

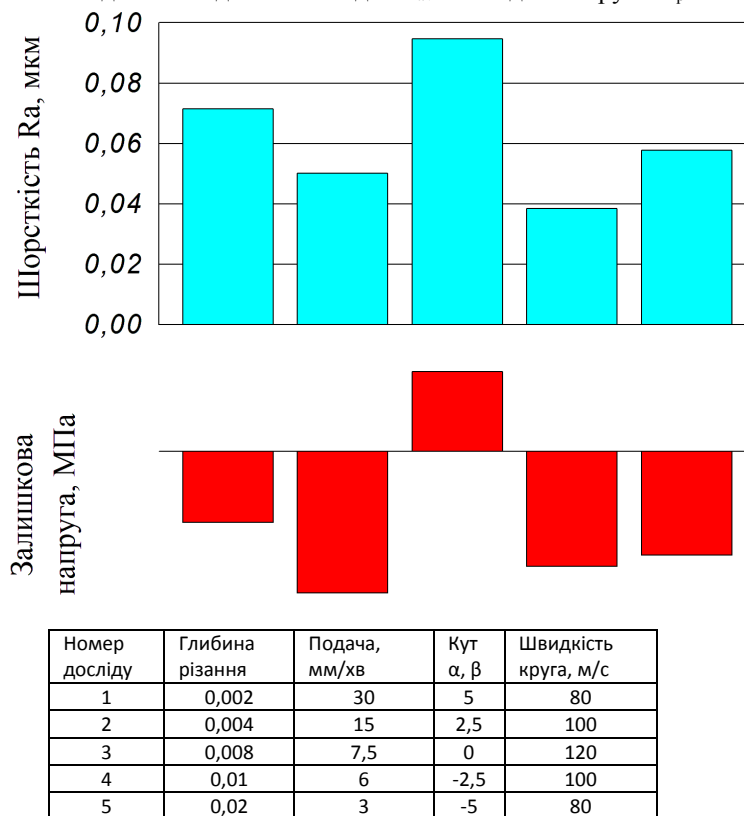


Рис. 11 – Залежність шорсткості та залишкової напруги від режиму обробки [18].

За результатами проведених експериментальних досліджень (рис. 11) видно, що значення шорсткості поверхні Ra має тенденцію до невеликого зниження при зменшенні швидкості подачі, збільшенні глибини різання і збільшенні швидкості шліфувального круга, коли змінні кути шліфування знаходяться в прийнятному діапазоні. Залишкова стискаюча напруга поверхні заготовки може бути отримана шляхом логічної комбінації між змінним кутом шліфування та параметрами шліфування після досягнення швидкості шліфування 80 м/с.

Крім того, сприятлива залишкова стискаюча напруга може бути отримана великою при відповідному збільшенні змінних кутів α, β . Сприятлива залишкова напруга стиснення може бути досягнута з кращою теплопровідністю шліфувального круга з CBN на керамічній зв'язці. Важливо, щоб змінні кути шліфування раціонально вибиралися при точковому шліфуванні для отримання прийнятної напруги залишкового стиснення.

Для забезпечення економного процесу виникає необхідність підтримки необхідного профілю круга протягом його роботи [15]. Це потребує використання абразивного зерна CBN через тривалу стійкість і високу

теплопровідність, що забезпечує відносно велику площу зносу без теплового пошкодження; використання високоміцних металевих зв'язок у шліфувальних кругах для забезпечення максимальної стійкості та необхідності проводити правку в автономному режимі. Використання масляної ЗОР значно збільшує термін служби круга у порівнянні з будь-якою охолодною рідиною на водній основі. Слід застосовувати високі швидкості обертання кругів, що перевищує в 2...5 разів швидкість обертання звичайних кругів у традиційних процесах.

Досягнення точкового контакту шляхом впровадження кутових поворотних налаштувань осі круга для подальшого обмеження нормальної сили та теплового пошкодження оброблюваної поверхні. Високі швидкості роботи дозволяють досягнути коефіцієнта перекриття при дуже вузькій чистовій ширині для отримання заданої шорсткості (зазвичай $Ra \sim 0,4$ мкм).

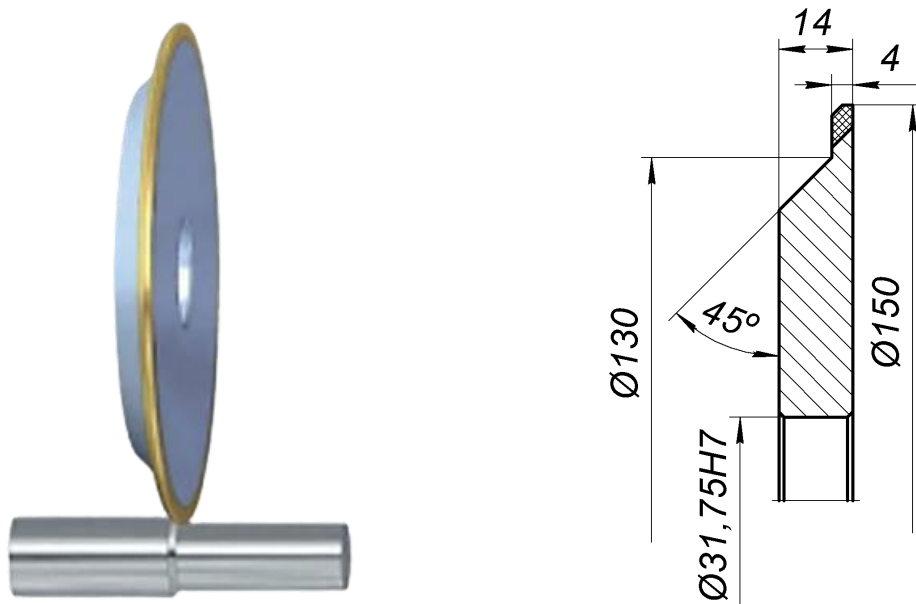


Рис. 12 - Зовнішній вигляд круга фірми CAFRO для шліфування відшаруванням

На рис. 12 показаний зовнішній вигляд абразивних інструментів для шліфування відшаруванням. Для верстатів, що реалізують процес шліфування відшаруванням, рекомендується круги з алмазу та CBN на гальванічній та паяній (спеченій) зв'язках. Тільки близько 25% кругів з суперабразивів використовують керамічні зв'язки. Доведено [16], що шліфування відшаруванням за допомогою кругів CBN на керамічній зв'язці набагато продуктивніше на важкооброблюваних матеріалах, таких як інконель і м'яка нержавіюча сталь. Це досягається застосуванням «гідроочищення» круга під час циклу шліфування за допомогою систем очищення кругів ЗОР під високим тиском.

Менша площа контакту при високошвидкісному точковому шліфуванні значно знижує теплоту та силу шліфування, а також покращує характеристики охолодження та ефект шліфувальної рідини. Окрім того, тонкий круг із CBN послаблює ефект бар'єру повітряного потоку.

У роботі [17] в ході експериментального дослідження високошвидкісного точкового шліфування визначено, що при тиску струменя рідини 2 МПа шорсткість поверхні оброблюваної деталі із загартованої сталі 45 має тенденцію до помітного зниження зі збільшенням витрати рідини в діапазоні 0...20 л/хв, але ступінь зниження дуже малий (рис. 13). Таким чином, встановлено, що витрата ЗОР не є основним фактором, що впливає на шорсткість поверхні за певного тиску струменя рідини. При тиску струменя рідини 2 МПа твердість поверхні деталі помітно знижується зі зменшенням витрат рідини в діапазоні 0...20 л/хв. При сухому шліфуванні твердість поверхні помітно падає, що свідчить про те, що певною мірою виникає термічне пошкодження поверхні.

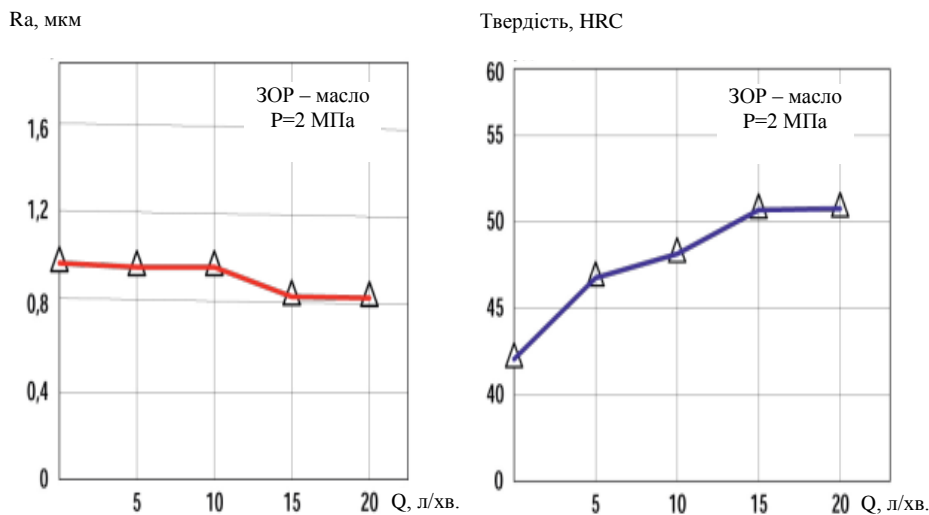


Рис. 13 - Результати експериментів щодо визначення характеристик якості поверхні при точковому шліфуванні з ЗОР [17]

Таким чином, раціональний вибір складу ЗОР, конструкції сопла, параметрів витрати та тиску, а також пристроїв, що послаблюють ефект бар'єру повітряного потоку, сприяє підвищенню ефективності процесу шліфування відшаруванням.

Високошвидкісні шліфувальні верстати, що використовують технологію шліфування відшаруванням, хоч і дороги самі по собі, проте знижують капітальні внески за рахунок виключення безлічі операцій, включаючи шліфування, токарну обробку та полірування.

Використання суперабразивів, зокрема CBN, та кутових налаштувань абразивного круга створюють умови, за яких вартість виробу стає меншою, ніж сукупна при використанні традиційних методів: твердого точіння, шліфування та полірування.

Висновки

1. Енергоємність шліфування в цілому визначається співвідношенням радіальної складової сили різання за рахунок тертя зв'язки круга з матеріалом, що обробляється, і загальною радіальною складовою сили різання. Збільшення цього співвідношення викликає збільшення умовної напруги різання (технологічної енергоємності), що є причиною надзвичайно високих значень енергоємності обробки шліфування, досягнутих на практиці.

2. Визначено основні напрями підвищення ефективності фінішної обробки деталей шляхом різання на основі використання сучасних абразивних інструментів, що дозволяють здійснювати високоточну обробку деталей з однієї установки з найменшими виробничими витратами.

3. Рекомендовано впроваджувати шліфування кругом, з використанням вузьких супер абразивів, що дозволяє контролювати контактну зону круга і заготовки і досягати високих продуктивності і якості обробки

4. Результати теоретичних та експериментальних досліджень процесу високошвидкісного точкового шліфування показують, що наявність кутових налаштувань круга та їх раціональний вибір сприяють зниженню температури, стабілізації мікротвердості поверхні оброблюваної деталі, зменшенню шорсткості та створенню сприятливих залишкових напруг стиснення. Крім того, зазначені дослідження дозволяють усвідомити фізичну сутність процесу, визначити оптимальні режими обробки та налаштування верстата, а також шляхи оптимізації технологічних параметрів точкового шліфування.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ.

9. Иновационное развитие современных технологий: монография/ Ф.В. Новиков, В.А. Жевтобрюх, В.С. Гусарев, В.Б. Наддачин, А.А. Якимов, А.А. Андилахай, А.С. Сергеев, Д.Ф. Новиков. – Днепр. ЛИРА, 2021. – 480 с.
10. Новиков Ф.В. Разработка эффективных технологий механической обработки деталей машин / Ф.В. Новиков, В.А. Жовтобрюх // Автомобильный транспорт: сборник научных трудов. – Х.: ХНАДУ, вып. 29, 2011. – С. 212-215.
11. Новиков Ф.В. Определение оптимальных условий механической обработки деталей машин по критерию наименьшей себестоимости / Ф.В. Новиков, В.А. Жовтобрюх, Е.Ю. Бенин // Вісник Приазовського державного технічного університету. Сер.: Технічні науки: Зб. наук. праць.– Маріуполь: ДВНЗ “Приазов. держ. техн. ун-т”, 2012. – №1 (24). – 2012. – С. 241-247. 6.

12. Королев А. В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке / А. В. Королев. - Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1975. – 212 с.
13. Новіков Ф. В. Теоретичні основи механічної обробки високоточних деталей: монографія / Ф. В. Новіков, І. О. Рябенков. – Харків: Вид. ХНЕУ, 2013. – 352 с.
14. John A. Webster. Technology Assessment Report on Current Global Advanced Research Projects in Fixed Abrasive Grinding. January 2005. AMT — The Association for Manufacturing Technology.
15. Junker, Erwin. Патент SU № 1452466 А3. Способ скоростного профильного шлифования осесимметричных поверхностей вращения. 12.03.1985.
16. Klocke F, Hegener G, Deacu L. Continuous path-controlled grinding. Innovative manufacturing process combines high flexibility and productivity [J]. ZWF, 1996, 91 (4): 164-167. (in German).
17. Ермолаев В. К. Развитие профильного шлифования // РИТМ машиностроения. 2019. No 4. С. 40-48.
18. Fukuo Hashimoto, Hitomi Yamaguchi, Peter Krajnik, Konrad Wegener, Rahul Chaudhari, Hans-Werner Hoffmeister, Friedrich Kuster. Abrasive finishing technology. CIRP Annals — Manufacturing Technology. Vol. 65, Issue 2. 2016. Pp 597-620.
19. Michael P Hitchiner. Current status of peel grinding technology. Saint-Gobain Abrasives. 2010 by ASME.
20. Shichao Xiu, Guangqi Cai and Changhe Li. Study on Side Contact Layer Model and Parameters in Quick-point Grinding. Materials Science Forum. Volumes 532-533. Pp 781-784. 2006
21. Suoxian Yuan, Dongna Xie, Yadong Gong. Study on Abrasive Geometry of Quick-point Grinding. Key Engineering Materials. Vols 389-390. 2009. Pp 235-239.
22. Guoqiang Yin, Yadong Gong, Youwei Li, Fei Wang. Investigation of the grinding temperature and sub-surface quality of a novel point grinding wheel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. 97. Pp. 1565-1581.
23. Michael P Hitchiner. Current status of peel grinding technology. Saint-Gobain Abrasives. 2010 by ASME.
24. <https://www.sme.org/powerful-potential-peel-grinding>
25. S. C. Xiu, Y. D. Gong and G. Q. Cai. Study on Effect of Grinding Fluid Supply Parameters on Surface Integrity in Quick-point Grinding for Green Manufacturing. Advanced Materials Research. Vols. 53–54. 2008. Pp 209–214.

References (transliterated)

1. Iovatsionnoe razvitie sovremennykh tekhnologii: monografiia / F.V. Novikov, V.A. Zhovtobryukh, V.S. Husarev, V.B. Naddachin, A.A. Yakimov, A.A. Andilakhay, A.S. Serheev, D.F. Novikov. – Dnepr. LIRA, 2021. – 480 s.
2. Novikov F.V. Razrabotka effektivnykh tekhnologii mekhanicheskoi obrabotki detalei mashin / F.V. Novikov, V.A. Zhovtobryukh // Avtomobilnyi transport: sbornik nauchnykh trudov. – Kh.: KhNADU, vyp. 29, 2011. – S. 212-215.
3. Novikov F.V. Opredelenie optimalnykh uslovii mekhanicheskoi obrabotki detalei mashin po kriteriiu naimenshei sebestoimosti / F.V. Novikov, V.A. Zhovtobryukh, Ye.Yu. Benin // Visnyk Pryazovskoho derzhavnogo tekhnichnogo universitetu. Ser.: Tekhnichni nauki: Zb. nauk. prats.– Mariupol: DVNZ “Priazov. derzh. tekhn. un-t”, 2012. – №1 (24). – 2012. – S. 241-247. 6.
4. Korolev A. V. Issledovanie protsessov obrazovaniia poverkhnostei instrumenta i detail pri abrazivnoi obrabotke / A. V. Korolev. - Saratov: Izd-vo Sarat. un-та, 1975. – 212 s.
5. Novikov F.V. Teoretichni osnovi mekhanichnoi obrobki visokotochnikh detalei: monografiia / F.V. Novikov, I. O. Riabenkov. – Kharkiv: Vyd. KhNEU, 2013. – 352 s.
6. John A. Webster. Technology Assessment Report on Current Global Advanced Research Projects in Fixed Abrasive Grinding. January 2005. AMT — The Association for Manufacturing Technology.
7. Junker, Erwin. Patent SU № 1452466 А3. Sposob skorostnoho profilnoho shlifovaniia osesimmetrichnykh poverkhnostei vrashcheniia. 12.03.1985.
8. Klocke F, Hegener G, Deacu L. Continuous path-controlled grinding. Innovative manufacturing process combines high flexibility and productivity [J]. ZWF, 1996, 91 (4): 164-167. (in German).
9. Yermolaiev V. K. Razvitie profilnoho shlifovaniia // RITM mashinostroeniia. 2019. No 4. S. 40-48.
10. Fukuo Hashimoto, Hitomi Yamaguchi, Peter Krajnik, Konrad Wegener, Rahul Chaudhari, Hans-Werner Hoffmeister, Friedrich Kuster. Abrasive finishing technology. CIRP Annals — Manufacturing Technology. Vol. 65, Issue 2. 2016. Pp 597-620.
11. Michael P Hitchiner. Current status of peel grinding technology. Saint-Gobain Abrasives. 2010 by ASME.
12. Shichao Xiu, Guangqi Cai and Changhe Li. Study on Side Contact Layer Model and Parameters in Quick-point Grinding. Materials Science Forum. Volumes 532-533. Pp 781-784. 2006
13. Suoxian Yuan, Dongna Xie, Yadong Gong. Study on Abrasive Geometry of Quick-point Grinding. Key Engineering Materials. Vols 389-390. 2009. Pp 235-239.
14. Guoqiang Yin, Yadong Gong, Youwei Li, Fei Wang. Investigation of the grinding temperature and sub-surface quality of a novel point grinding wheel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. 97. Pp. 1565-1581.

15. Michael P Hitchiner. Current status of peel grinding technology. Saint-Gobain Abrasives. 2010 by ASME
16. <https://www.sme.org/powerful-potential-peel-grinding>
17. S. C. Xiu, Y.D. Gong and G.O. Cai. Study on Effect of Grinding Fluid Supply Parameters on Surface Integrity in Quick-point Grinding for Green Manufacturing. Advanced Materials Research. Vols. 53-54. 2008. Pp 209-214.

Поступила (received) 07.04.2022

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Фесенко Анатолій Володимирович (Fesenko Anatoly) – професор кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (057)-720-66-25, моб. +380675772887; e-mail: anfesenko73@gmail.com; ORCID: 0000-0003-0626-0180

Євсюкова Фатима Магометбіївна (Yevsiukova Fatyma) – доцент кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (057)-720-66-25, моб. +380979412299; e-mail: evsyukova_fatima@mail.ru; ORCID: 0000-0002-9764-4106

Сліпченко Сергій Євгенович (Slipchenko Serhii) – старший викладач кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (0572) 707-66-25; e-mail: serg.slip@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0593-3750

Линник Олена Іванівна (Lynnyk Olena Ivanivna) – кандидат економічних наук, доцент кафедри «Економіка бізнесу і міжнародні економічні відносини» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; email: linnik.khpi@gmail.com ORCID: 0000-0003-0877-8047.