

Литвиняк Я.М., Юрчишин І.І., Новіцький Ю.Я.  
Національний університет “Львівська політехніка”

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ГЛИБИННОГО ШЛІФУВАННЯ НАХИЛЕНИМИ ТОНКИМИ АБРАЗИВНИМИ КРУГАМИ ЗОВНІШНІХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ

© Я.М.Литвиняк, І.І.Юрчишин, Ю.Я.Новіцький. 2021

**Мета.** Експериментальне дослідження процесу глибинного шліфування зовнішніх циліндричних поверхонь деталей тонкими абразивними кругами нахиленими до обробленої поверхні. **Методика.** Дослідження здійснювались із застосуванням методів теорії різання, планування експериментів, статистичної обробки результатів експериментів. **Результати.** Запропоновано новий технологічно гнучкий спосіб глибинного шліфування нахиленими тонкими абразивними армованими кругами при підвищеній колдовій швидкості обробки зовнішніх циліндричних поверхонь деталей із покриттями підвищеної зносостійкості та твердості або деталей отриманих із важкооброблюваних матеріалів. Експериментально встановлено вплив режимів різання на величину ефективної потужності та головної складової сили різання при обробці зовнішніх циліндричних поверхонь деталей. Встановлені для попутного та зустрічного напрямків колдових швидкостей оброблюваної циліндричної деталі та тонкого абразивного круга емпіричні співвідношення між режимами обробки та енергосиловими параметрами процесу обробки. **Наукова новизна.** Експериментальними дослідженнями впливу режимів обробки тонкими нахиленими абразивними кругами зовнішніх циліндричних поверхонь деталей встановлено, що для попутної обробки зростання глибини різання та колдової швидкості обертання деталі супроводжується зростанням ефективної потужності та головної складової сили різання, а зростання поздовжньої подачі зменшенням, а для зустрічної обробки збільшення подачі та колдової швидкості деталі ефективна потужність та головна складова сили різання зростають, а при збільшенні глибини різання зменшуються. Для досліджуваного процесу обробки на важливим є сумісний, одночасний вплив декількох чинників режимів обробки. Процес обробки належить до процесів із низьким енергоспоживанням. Для всіх комбінацій режимів різання ефективна потужність різання не перевершує 0,2 кВт. Низька ефективна потужність різання разом із незначною площею контакту абразивного круга з оброблюваною деталлю визначають незначний вплив на оброблену поверхню температури нагріву в зоні обробки, що забезпечує збереження механічних характеристик поверхневого шару отриманого на попередніх стадіях виготовлення деталі. **Практична значущість.** Запропоновано використовувати на операціях чорнового круглого шліфування або на чорнових переходах токарної операції процес обробки нахиленими тонкими абразивними кругами циліндричних поверхонь деталей із важкооброблюваних матеріалів або з товстошаровими зносостійкими покриттями, що мають значні попередні поверхневі нерівності. Процес обробки може реалізовуватись на верстатах токарної групи, що оснащуються додатковим, змінним високошвидкісним електричним приводом обертання тонкого абразивного круга. Низькі енерговитрати процесу обробки циліндричних деталей нахиленими тонкими абразивними кругами визначають перспективність його практичного використання. Застосування цього способу обробки забезпечує: використання абразивних армованих кругів низької вартості, зменшення основного часу обробки за рахунок більших глибин різання та зменшення числа робочих проходів, зростання продуктивності, зниження собівартості обробки, підвищення універсальності процесу, завдяки можливості здійснювати обробку циліндричних поверхонь деталей, що утворені із різноманітних матеріалів із суттєво відмінними фізико-механічними властивостями.

**Ключові слова:** абразивний інструмент, тонкий абразивний круг, кругле шліфування, глибинне шліфування, математичне планування експериментів, кут нахилу абразивного круга, режими різання абразивними кругами, обробка шліфуванням на токарному верстаті, попутне шліфування, зустрічне шліфування, обробка деталей після відновлення.

**Вступ**

Функціональні характеристики сучасних машин різного призначення, виробничого обладнання залежить від точності і якості поверхонь деталей машин, які забезпечуються технологічними процесами механічного оброблення. Значний термін експлуатації машин і обладнання визначається застосовуваними для виготовлення деталей матеріалами або отриманим на поверхнях деталей покриттям з високими фізико-механічними властивостями, які в сукупності із термічною обробкою або без неї забезпечують високу твердість і зносотривкість поверхонь деталей. Важливим аспектом підтримки експлуатаційних характеристик машин і обладнання протягом їх життєвого циклу є відновлення деталей нанесенням різними способами (наприклад, наплавленням, напиленням тощо) на зношені поверхні зносотривкого покриття. Застосовувані, при виготовленні деталей або при їх відновленні, для підвищення зносотривкості поверхонь, покриття, що утворені із комбінацій матеріалів, сплавів, інтерметалідних сполук, маючи високий рівень опору стиранню та зношуванню, створюють значні проблеми при обробці деталей, зокрема, спричиняють підвищене зношування, викришування робочих частин і зниження стійкості металорізальних інструментів. Технологічні операції обробки таких деталей характеризуються підвищеною працемісткістю та низькою продуктивністю.

Доцільність удосконалення існуючих або створення нових ефективних технологій обробки циліндричних поверхонь деталей із важкооброблюваних матеріалів або із нанесеним покриттям високої зносотривкості і твердості визначається складністю процесів оброблення лезовими чи абразивними інструментами у нестационарних умовах різання обумовлених зношуванням інструментів, залежно від умов обробки, що спричинює зниження якості обробленої поверхні. Дослідження процесів обробки, які характеризуються застосуванням при змінених кінематичних схемах різання типових різальних інструментів, належать до актуальних для сучасних галузей машинобудування, що обумовлено практичною важливістю та перспективністю комплексного сумісного застосування процесів зміцнення або нанесення товстошарових покриттів разом із відповідними процесами механічної обробки циліндричних поверхонь деталей при ефективному застосуванні верстатного обладнання за рахунок встановлення раціональних режимів обробки.

#### *Аналіз літературних джерел за темою статті.*

Підвищення надійності деталей машин є важливим завданням у машинобудуванні. Для деталей, використовуваних у сучасних машинах, зниження геометричної точності виконавчих поверхонь в процесі експлуатації супроводжується підвищеним рівнем шуму, вібрацій та суттєво знижує довговічність відповідних вузлів машин. Забезпечення тривалого життєвого циклу машини досягається застосуванням прогресивних технологій виготовлення та відновлення деталей, що спрямовано здебільшого на підвищення зносотривкості поверхонь деталей, зокрема циліндричних. Досягається зносотривкість виконанням деталей із матеріалів, що характеризуються високими показниками міцності та твердості після виконання відповідних заходів із термооброблення деталей або застосуванням технологічних процесів модифікування поверхонь деталей чи нанесення покриття на стадії виготовлення або на стадії відновлення (ремонт) деталей [1, 2].

Найбільш ефективними технологічними методами нанесення зносостійкого покриття є наплавлення та напилення, що виділяються серед інших методів, відповідними техніко-економічними показниками. До деталей, що підлягають нанесенню покриття належать прокатні валки, які на металургійних підприємствах багаторазово відновлюються методами наплавлення. Використовуються для наплавлення метали із категорії теплостійких інструментальних сталей, які дозволяють отримати у поверхневому шарі твердість HRC 51...53 [3]. Катки, опорні підшипники кранів та інші деталі дорожньої будівельної техніки багаторазово відновлюють дуговим наплавленням порошковими дротом досягаючи високої зносостійкості відповідних вузлів [3]. На багатьох підприємствах різних галузей промисловості України, наприклад, Маріупольський металургійний комбінат, Металургійний комбінат «Азовсталь», Новокраматорський машинобудівний завод та інші, застосовують технології наплавлення при відновленні коліс кранів,

роликів правильних машин, валків прокатних станів, роликів машин безперервного розливу сталі, штоків, плунжерів гірничого устаткування. Твердість шару нанесеного покриття досягає HRC 57...60 [4, 5]. Матеріали, розроблені для покриттів, дозволяють здійснювати ефективне відновлення деталей збільшуючи їх міжремонтний ресурс. Висока зносостійкість покриття при терті пари метал-метал разом із їх абразивною зносостійкістю дозволяє в 2...3 рази збільшити час роботи швидкозношуваних вузлів і механізмів [2 – 6]. При виготовленні нових деталей надають робочим поверхням антифрикційних, теплостійких, зносостійких властивостей. В багатьох випадках значну кількість деталей виготовляють біметалічними: основа деталі виготовлена із конструкційних металів та покриття, якому надають особливі фізико-механічними властивості і утворюють із тугоплавких матеріалів, зносостійких сплавів, сплавів підвищеної твердості тощо. Наплавлення використовують при виготовленні різноманітних виробів - валів різного призначення, вкладиші підшипників ковзання турбогенераторів, поршні, штоки, підшипники тощо. Використання деталей або виробів із наплавленими покриттями має значні техніко-економічні переваги, хоча нанесені цими методами покриття мають неоднорідну структуру, значну висоту виступів і западин наплавленого шару, що може досягати 0,9 мм, високу твердість, що нерівномірно розподілена по товщині покриття [7-9].

Однак, прогрес досягнутий при розробленні технологій нанесення покриття, не супроводжується подібним прогресом при механічному обробленні відновлених поверхонь деталей, незважаючи на те, що досягнення високих експлуатаційних властивостей деталей з покриттями залежить загалом від застосовуваних технологічних процесів механічної обробки [4 - 9]. Використовувана при виготовленні деталей з покриттями безальтернативна обробка різанням, супроводжується інтенсивним зношуванням різального інструменту, виникненням великих зусиль і температур в зоні різання та ускладнюється потребою формування відповідного фізико-механічного стану поверхневого шару деталі, який повинен забезпечити високу працездатність деталей під час експлуатації за відсутності структурно-фазових перетворень, залишкових напружень розтягу, наявності відповідних параметрів шорсткості, які супроводжують процеси обробки [1, 9].

Застосовувані технології обробки поверхонь деталей із наплавленими покриттями, залежно від твердості покриття та величини припуску, поділяють на три групи: група 1 – твердість покриття менша 40 HRC (припуск – відносно великий, різний); група 2 – твердість покриття більша 40 HRC (припуск – менший 0,5 мм); група 3 – твердість покриття більша 40 HRC (припуск – більший 0,5 мм) [1]. Для обробки деталей групи 1 застосовують більшість відомих методів механічної обробки. Обробка деталей груп 2 та 3 найбільш складна і ставить високі вимоги до технологічних можливостей використовуваного процесу обробки: оброблюваний матеріал (покриття) має високі параметри міцності, неоднорідний за структурою та хімічним складом, має значні макронерівності поверхні. Аналіз способів механічної обробки показав, що обробку зовнішніх циліндричних поверхонь деталей із здебільшого наплавленими покриттями здійснюють використовуючи технологічні процеси точіння і шліфування [1, 4, 7, 8, 9, 10].

При точінні деталей з наплавленими і напиленими покриттями використовують різальні інструменти оснащені твердими сплавами і полікристалічними синтетичними надтвердими матеріалами, зокрема на основі кубічного нітриду бору, обробляючи покриття твердістю 40...60 HRC та отримують на чистових операціях шорсткість Ra 0,2...1,0 мкм. Однак, в процесі обробки наплавленого шару низької твердості, внаслідок наявності в наплавленому шарі значної кількості нітридів, оксидів заліза, шлаків, мікропорожнин, мікротріщин, що спричинює абразивно-механічне зношування, спостерігається інтенсивне зношування таких інструментів порівняно із їх зношуванням при обробці традиційних сталей і чавунів [1, 6, 9, 10]. Виправдане, за певних умов, застосування мінералокерамічних різців при точінні металів високої твердості виявляється малоефективним при обробці наплавленого шару покриття навіть на чистових проходах, оскільки спостерігається викришування, на утворених у покритті мікропорах і включеннях, різальної

частини різців внаслідок низької ударної в'язкості мінералокераміки. При обробці наплавленого шару точінням за два проходи твердосплавними і мінералокерамічними різцями досягається шорсткості поверхні  $Ra = 1,5...2,5$  мкм і точність розміру 11...12 квалітету [1, 10].

Другим поширеним при обробці циліндричних поверхонь деталей способом обробки є абразивне шліфування. Складність застосування процесу шліфування пояснюється тим, що покриття має фізико-механічні властивості які істотно відрізняються від властивостей вуглецевих і легованих сталей після термообробки. Отже, на відміну від обробки шліфуванням деталей із традиційних матеріалів, вплив твердості і зернистості круга на коефіцієнт різальної здатності, шорсткість і стан обробленої поверхні значно вищий та не завжди передбачуваний. Застосування шліфування обмежується значним питомим зношуванням абразивних кругів, що може досягати 100% і більше від об'єму знятого металу. При збільшенні твердості круга питоме зношування дещо зменшується, проте зростає радіальна сила шліфування та зростає термічна дія, що спричинює появу на обробленій поверхні мікротріщин, що можуть поширюватися на глибину до 0,6 мм, та отримання залишкових напружень розтягу [1, 11-16]. Застосування процесу шліфування при обробці циліндричних поверхонь із покриттям, може супроводжуватися отриманням дефектів, які мають технологічне походження, таких, як поверхневі припалення, що виникають внаслідок надмірного зростання теплового потоку, який поглинається шаром покриття і спричинює у ньому структурні перетворення; поверхневі тріщини в покритті і на межі покриття-основний матеріал деталі, що виникають внаслідок дії залишкових напружень розтягу; сколювання, вириви, що формуються у покриттях утворених із дрібнодисперсних включень карбідів, боридів, нітридів, які абразивним зерном не зрізаються, а вириваються із структури покриття [11]. Вказані особливості процесу шліфування циліндричних поверхонь деталей із покриттями визначають фізико-механічний стан поверхневого шару покриття від якого залежить якість оброблених деталей [1, 11, 13-16]. Отже, підвищення ефективності обробки шліфуванням циліндричних деталей із нанесеним покриттям або деталей із важкооброблюваних матеріалів можливе при такій конструкторсько-технологічній організації процесу шліфування, за якої забезпечується мінімальний силовий та температурний вплив абразивного круга на оброблювану поверхню [14,16].

### ***Мета.***

Експериментальне дослідження процесу глибинного шліфування зовнішніх циліндричних поверхонь деталей тонкими абразивними кругами нахиленими до обробленої поверхні.

### ***Методика проведення досліджень.***

Дослідження здійснювались із застосуванням методів теорії різання, планування експериментів, статистичної обробки результатів експериментів.

### ***Результати досліджень та їх обговорення.***

Циліндричні поверхні деталей із важкооброблюваних матеріалів або із нанесеного наплавленням зносотривкого покриття характеризуються фізико-механічними характеристиками, що визначають вимоги до процесу механічної обробки, які пов'язані із необхідністю забезпечення регламентованих параметрів точності розмірів і якості оброблених циліндричних поверхонь. Циліндричні деталі допускають обертання під час обробки навколо осі оброблюваної поверхні. Обробка циліндричних поверхонь деталей із нанесеним покриттям, що мають підвищені механічні властивості, зокрема значні в'язкість та твердість, значні відхилення форми, зокрема відхилення круглості та циліндричності, обмежує перелік методів та відповідних металорізальних інструментів для їх ефективного практичного застосування.

Обробка таких циліндричних поверхонь деталей точінням різцями, спорядженими сучасними інструментальними матеріалами, які характеризуються високою твердістю та крихкістю, або шліфуванням абразивними кругами відповідної зернистості, типу зв'язки і марки абразивного

матеріалу, обмежуються технологічними чинниками, а саме, малою глибиною різання (токарна обробка - 0,02...0,05 мм , шліфування - 0,005...0,02 мм ), малою величиною подачі (для токарної обробки), великою кількістю робочих ходів для досягнення кінцевого розміру обробленої поверхні, що спричинює значне збільшення часу виконання технологічної операції. Практичне застосування процесу шліфування, крім цього, обмежується незначною кількістю моделей круглошліфувальних верстатів, що можуть бути використані для обробки таких деталей.

Враховуючи наведені технологічні особливості традиційних способів обробки, запропоновано новий спосіб обробки циліндричних поверхонь деталей із підвищеною твердістю та зносотривкістю – глибоке шліфування зовнішніх циліндричних поверхонь деталей тонкими абразивними кругами нахиленими до обробленої поверхні (ШГТКН).

Пропонований процес обробки реалізується на токарних верстатах, які надають обертовий рух циліндричній оброблюваній деталі (заготовці) та рух подачі абразивному кругові вздовж оброблюваної циліндричної поверхні, при виконанні токарної операції, яка здійснюється за два переходи: чорнове оброблення (застосовується спосіб ШГТКН), чистове оброблення (застосовуються токарні різці, оснащені пластинами із твердого сплаву або пластинами із мінералокераміки тощо) (рис. 1).



(a)



(b)



(c)

Рис. 1. Глибоке шліфування тонкими абразивними кругами нахиленими до обробленої поверхні: (a) – реалізація процесу обробки; (b) – привід; (c) – встановлення кута нахилу абразивного круга.

Fig. 1. The deep grinding by thin abrasive wheels that are inclined to treated surface

Основним інструментом є абразивний армований круг малої товщини - ААК (використовується термін – «товщина абразивного круга» замість терміну - «висота абразивного

круга», як такий, що більш відповідно характеризує геометричну форму використовуваного інструмента).

Застосування ААК реалізує перспективний напрямок підвищення ефективності процесів обробки абразивними кругами, який ґрунтується на збільшенні швидкості шліфування.

Існуюча межа швидкостей шліфування знаходиться в межах 30...50 м/с, яка визначається міцністю абразивних кругів від дії відцентрових сил. Збільшення швидкості шліфування, що характерно для високошвидкісного шліфування (понад 60 м/с), позитивно відображається на процесі шліфування: зростає період стійкості шліфувального круга, зростає об'єм матеріалу знятого за період стійкості; знижується шорсткість обробленої поверхні; зменшуються складові сил різання та їх співвідношення ( $P_z/P_y$ ) за рахунок зниження опору різання та зменшення сил тертя; зростає температура в зоні шліфування; підвищується ефективність шліфування при чорновій та напівчистовій обробці заготовок із значним припуском. Однак, високошвидкісне шліфування може бути реалізоване лише за допомогою абразивних кругів підвищеної міцності та високошвидкісного приводу відповідної потужності [14].

Запропоновані ААК повністю відповідають згаданим вимогам – армовані абразивні круги можуть застосовуватись із граничною швидкістю 80 м/с, що значно перевищує граничну швидкість 60 м/с для високошвидкісного шліфування. Аналіз застосування ААК показав, що незважаючи на їх широке поширення, лише частково використовуються їх потенційні можливості, що відкриває перспективи повної реалізації фізико-механічних і ріжучих властивостей цих інструментів.

Головний обертовий рух ААК створюється кутовою електричною машиною, що встановлюється у спеціальному пристрої, який закріплюється у різцетримачі токарного верстата. Спеціальному пристрою на токарному верстаті надається таке положення, яке визначається кутом нахилу площини ААК до твірної обробленої циліндричної поверхні.

Нахил ААК до обробленої поверхні дозволяє реалізувати основну особливість запропонованого способу ШГТКН: за один робочий прохід припуск (рівний глибині різання) зрізається повною шириною тонкого абразивного круга при відсутності його контакту з обробленою циліндричною поверхнею деталі.

Нахил ААК дозволяє вести обробку із значної глибиною різання з відповідною поздовжньою подачею. Завдяки цьому, процес ШГТКН дещо нагадує процес токарної обробки. Частота обертання кутової електричної машини є такою, що забезпечує високу колову швидкість для ААК, а від так, достатню його розмірну стійкість. Невелика зона контакту ААК із оброблюваною поверхнею забезпечує незначні енергосилові витрати на процес різання та незначний вплив на фізико-механічні характеристики обробленої поверхні. Круги ААК належать до категорії низько вартісних та доступних інструментів. Процес ШГТКН дозволяє здійснювати обробку зовнішніх циліндричних поверхонь деталей при глибинах різання, які у декілька разів перевищують глибини різання при круглому шліфуванні, що збільшує продуктивність обробки та зменшує основний час, який витрачається на виконання технологічної операції. Значні глибини різання та рух подачі (переміщення) ААК вздовж циліндричної поверхні деталі відповідає ознакам глибинного колового шліфування [14].

Пропонований новий спосіб обробки має значну технологічну гнучкість, яка відображається у можливості здійснювати зустрічну та попутну обробку зовнішніх циліндричних поверхонь деталей при застосуванні ААК різних марок, зернистості та зв'язок. Завдяки цьому ШГТКН можна застосовувати для широкої номенклатури наплавлених покриттів різної товщини з різними фізико-механічними характеристиками.

Оцінка технологічних можливостей способу обробки ШГТКН здійснювалась експериментально при обробці заготовок циліндричної форми виготовленої із конструкційної сталі марки Сталь 45 (ДСТУ 7809-2015) в стані постачання. Отримані експериментальні результати можуть бути застосовані для обґрунтованого підтвердження доцільності інноваційного

використання способу ШГТКН для обробки циліндричних деталей виготовлених із важкооброблюваних матеріалів або із нанесеним зносотривким покриттям.

Застосування способу ШГТКН для обробки циліндричних деталей ААК залежить від можливості прогнозувати вплив режимів обробки на параметри обробки, що визначають енергетичні витрати на здійснення процесу обробки та силовий вплив інструмента на оброблювану поверхню.

Дослідження впливу режимів обробки виконувалось експериментально з використанням методики математичного планування експериментів [17, 18].

Планування експериментів здійснювалось із застосуванням плану побудованого на основі повного факторного плану типу  $2^3$ . Цей план складається із 8-ми різних дослідів з повторенням кожного дослідів двічі. В експерименті використовувались 3 фактори (чинники) кожен з яких відповідає окремому елементу режиму обробки. Кожен фактор (чинник) приймав одне із двох граничних значень. При реалізації дослідів всі три фактори змінювались одночасно у встановленій факторним планом комбінації. План факторного експерименту містить матрицю плану, що складається із кодіваних факторів та взаємодій кодіваних факторів. Матриця плану експериментів на основі встановлених для кожного дослідів параметрів використовується для визначення коефіцієнтів повного поліному складеному із суми кодіваних значень окремих факторів, суми подвійних добутоків та одного потрійного добутку кодіваних факторів. Отримана математична модель перевіряється за статистичними критеріями (критерій Кохрена –  $G$ , критерій Фішера –  $F$ ), які розраховують визначаючи відповідні дисперсії (дисперсія відтворюваності дослідів –  $S^2\{Y\}$ , дисперсія коефіцієнтів регресії  $S^2\{b_i\}$ , дисперсія адекватності моделі –  $S_{ad}^2$ ). Встановивши адекватність моделі проведеному експерименту, виконують переведення кодіваних змінних у натуральні змінні [17,18].

Експерименти проводились на токарно-гвинторізному верстаті – моделі 1Б625П. Використовуваний інструмент (абразивний тонкий армований круг тип 41-A24E-BF марки Kronenflex A24 Extra, абразивний матеріал – корунд, зернистість – 24, зв'язка – бакелітова, діаметр круга – 125 мм товщина – 3 мм) встановлювався на шліфувальну кутову електричну машину (Winkelshleifer EWS 115 SS, потужність 750 Вт, частота обертання шпинделя –  $11000 \text{ хв}^{-1}$ ). Кутова електрична шліфувальна машина у спеціальному пристрої закріплювалась у різцетримачі токарного верстата. Абразивний круг, разом із кутовою електричною шліфувальною машиною, повертався відносно осі токарного верстата і встановлювався під кутом нахилу  $65^\circ$  між площиною інструмента та віссю токарного верстата (твірною обробленою циліндричної поверхні).

Експерименти проводились двома серіями. Серії відрізнялись напрямком обертання інструмента та оброблюваного циліндричного зразка: попутній напрямок та зустрічний. Обробка проводилась на циліндричних зразках. Кожний зразок містив 8 ділянок – одна ділянка для одного дослідів. Початкові діаметри зразків – 48,51 мм та 48,10 мм. Циліндричним зразкам надавались дві граничні частоти обертання максимальна –  $100 \text{ хв}^{-1}$  та мінімальна –  $40 \text{ хв}^{-1}$ .

Прийнято три різних технологічні фактори, кожен з яких змінюється тільки на двох рівнях – верхньому, фактор приймає максимальне значення, та нижньому, фактор приймає мінімальне значення. Технологічні фактори: глибина різання  $t_{max}$  – 0,5 мм,  $t_{min}$  – 0,25 мм; подача  $S_{max}$  – 0,335 мм/об,  $S_{min}$  – 0,190 мм/об; колова швидкість обертання циліндричної поверхні зразка для зустрічної обробки  $V_{Wmax}$  – 15,24 м/хв,  $V_{Wmin}$  – 6,09 м/хв, для попутної обробки  $V_{Wmax}$  – 15,11 м/хв,  $V_{Wmin}$  – 6,04 м/хв.

Зміна технологічних факторів досліджувалась для встановлення ефективної потужності, що витрачається на обертання ААК. Вимірювання загальної потужності обертання кутової електричної машини здійснювалось за допомогою вимірювального комплексу К50 (забезпечує вимірювання сили струму, напруги та електричної потужності) для кожного дослідів при зміні технологічних факторів. Ефективну потужність  $N_e$  (Вт) для кожного дослідів визначаємо за залежністю:

$$Ne = N - W_0,$$

де  $N$  – загальна виміряна потужність (Вт);  $W_0$  – потужність холостого ходу кутової електричної шліфувальної машини (Вт).

Загальна потужність  $N$  та потужність холостого ходу  $W_0$  вимірювались безпосередньо для кожної комбінації режимів обробки за якими проводились відповідні досліді.

Головну складову сили різання  $P_z$  розраховуємо за виразом:

$$P_z = \frac{Ne}{V_{kr}},$$

де  $V_{kr}$  - колова швидкість ААК (м/с).

При експериментальному визначенні впливу технологічних факторів на досліджувані параметр використовуємо процедуру лінеаризації факторів, логарифмуючи граничні числові значення технологічних факторів. Тому, в отриманих рівняннях регресії використовуються співвідношеннями із логарифмів з натуральних змінних факторів.

За результатами виконаних експериментів отримані співвідношення впливу технологічних факторів на ефективну потужність процесу обробки та головну складову сили різання при обробці ААК циліндричних поверхонь способом ШГТКН:

Ефективна потужність обробки:

- зустрічна обробка

$$Ne = \exp (10,6833 + 3,2052 \ln t + 4,5994 \ln S - 0,8409 \ln V_w + 1,78402 \ln t \cdot \ln S - 0,9108 \ln S \cdot \ln V_w).$$

- попутна обробка

$$Ne = \exp (3,7799 - 1,8718 \ln t - 0,4588 \ln S - 0,0802 \ln V_w - 1,8773 \ln t \cdot \ln S).$$

Головна складова сили різання:

- зустрічна обробка

$$P_z = \exp (6,4632 - 3,2125 \ln t - 4,6161 \ln S - 0,8189 \ln V_w + 1,7841 \ln t \cdot \ln S - 0,9104 \ln S \cdot \ln V_w).$$

- попутна обробка

$$P_z = \exp (-0,4641 - 1,8665 \ln t - 0,4461 \ln S + 0,0958 \ln V_w - 1,8772 \ln t \cdot \ln S).$$

Вплив на досліджувані параметри деяких технологічних факторів, що описуються адекватними емпіричними моделями, відображено на рис.2 та рис. 3.

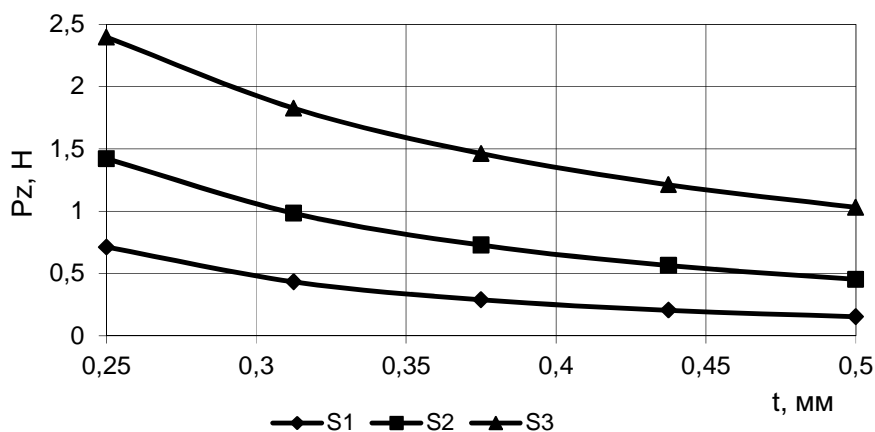


Рис. 2. Вплив глибини обробки та подачі на величину головної складової сили різання для зустрічної обробки :  $S_1 = 0,190$  мм/об;  $S_2 = 0,262$  мм/об ;  $S_3 = 0,335$  мм/об ;  $V_w = 15,24$  м/хв

Fig. 2. The influence of processing depth and feed on the value of the main component of cutting force for counter processing



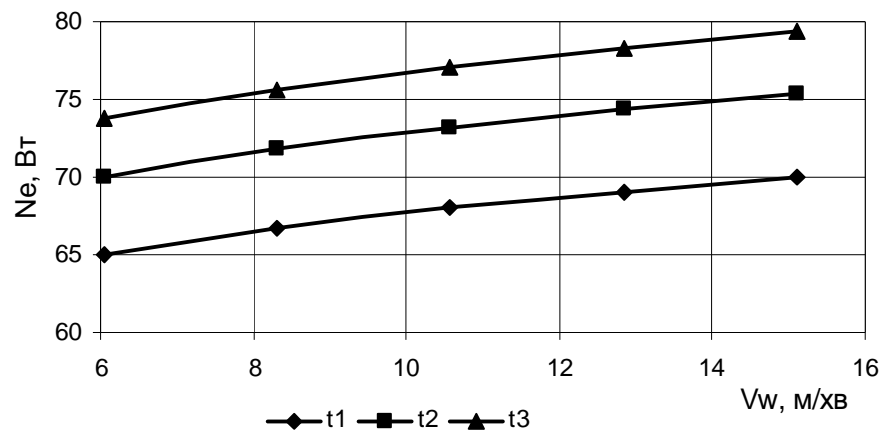


Рис. 3. Вплив колової швидкості обертання деталі та глибини обробки на ефективну потужність для попутної обробки:  $t_1 = 0,250$  мм;  $i_2 = 0,375$  мм;  $t_3 = 0,50$  мм;  $S = 0,335$  мм/об

Fig. 3. The influence of circular speed of detail's rotation and processing depth on the effective power for accompanying processing

Досліджений новий процес глибинного шліфування тонкими абразивними нахиленими кругами зовнішніх циліндричних поверхонь забезпечує експлуатаційні властивості деталей із підвищеною зносотривкістю і твердістю та характеризується важливими технологічними можливостями та гнучкістю, що дозволяють здійснити його впровадження на різних машинобудівних підприємствах.

**Висновки.** Запропоновано для обробки зовнішніх циліндричних поверхонь деталей із покриттями підвищеної зносостійкості та твердості або деталей отриманих із важкооброблюваних матеріалів використовувати тонкі армовані абразивні із нахилом круги яким надається підвищена колова швидкість. Експериментально встановлені співвідношення впливу режимів обробки тонкими нахиленими абразивними кругами на ефективну потужність різання та головну складову сили різання встановлюють, що для попутної обробки зростання глибини різання та колової швидкості обертання деталі супроводжується зростанням ефективної потужності та головної складової сили різання, а зростання поздовжньої подачі їх зменшенням, а для зустрічної обробки при збільшенні подачі та колової швидкості деталі ефективна потужність та головна складові сили різання зростають, а при збільшенні глибини різання зменшуються. Процес обробки належить до процесів із низьким енергоспоживанням. Низька ефективна потужність різання разом із незначною площею контакту абразивного круга з оброблюваною деталлю визначають незначний вплив на оброблену поверхню температури нагріву в зоні обробки, що забезпечує збереження механічних характеристик поверхневого шару отриманого на попередніх стадіях виготовлення деталі. Низькі енерговитрати процесу обробки циліндричних деталей нахиленими тонкими абразивними кругами визначають перспективність його практичного застосування.

#### Список літератури

1. Клименко С.А. Обработка резанием деталей с покрытиями/Клименко С.А., Коломиец В.В., Хейфец М.Л., Пилипенко А.М., Мельничук Ю.А., Бурькин В.В. Под общей редакцией С. А. Клименко. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2011. – 353 с. Режим доступа: <https://www.twirpx.com/file/936484/>.
2. Черняк Я.П. Опыт наплавки деталей и узлов строительной техники //Автоматическая сварка / Я.П.Чернык – 2013. - №3.-С.56-59. Режим доступа: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/as\\_2013\\_3\\_1](http://nbuv.gov.ua/UJRN/as_2013_3_1)

3. Баби́нец А.А. Исследование термической стойкости наплавленного металла предназначенного для восстановления прокатных валов //Автоматическая сварка /А.А.Баби́нец, И.А.Рябцев, И.А.Кондратьев и др. – 2014. - №5.-С.17-21. - Режим доступа: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/as\\_2014\\_5\\_1](http://nbuv.gov.ua/UJRN/as_2014_5_1).
4. Титаренко В.И. Установки на базе токарных станков для наплавки прокатных валков //Автоматическая сварка / В.И.Титаренко, В.Н.Лантух, А.С.Кашинский. – 2013. - №4.-С.50-55. - Режим доступа: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/as\\_2013\\_4\\_1](http://nbuv.gov.ua/UJRN/as_2013_4_1).
5. Голякевич А.А. Опыт применения электродуговой наплавки порошковой проволокой на предприятиях Украины//Автоматическая сварка / А.А.Голякевич, Л.Н.Орлов, Л.С.Малинов, В.И.Титаренко. – 2016. - №9.- С.37-41. Режим доступа: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/as\\_2016\\_9\\_1](http://nbuv.gov.ua/UJRN/as_2016_9_1).
6. Харламов Ю.А. Обробка деталей при відновленні і зміцненні / Ю.А. Харламов. – Луганськ : СНУ ім. Даля, 2007. – 500 с. Режим доступа: <https://books.google.com.ua/>.
7. Технологія ремонту та відновлення (Фінішна алмазно-абразивна обробка еластичними інструментами у ремонтному виробництві) / С.А. Клименко, В.В Бури́кін, Л.Г. Полонський, В.Г. Сніцар. – Житомир : ЖДТУ, 2014. – 122 с. Режим доступа: [http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis64r\\_81/cgiirbis\\_64.exe/](http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis64r_81/cgiirbis_64.exe/).
8. Бурыкин В.В., Харламов Ю.А., Ночвай В.М. Финишные технологии обработки деталей с покрытиями // Вісник ЖДТУ. Житомир. – 2017. - №2(80). - С.29-33. Режим доступа: DOI: [https://doi.org/10.26642/tn-2017-2\(80\)-29-33/](https://doi.org/10.26642/tn-2017-2(80)-29-33/).
9. Клименко С.А., Мельничук Ю.А. Шероховатость поверхности деталей с напыленными аморфно-кристаллическими покрытиями на основе железа обработанных инструментом с ПКНБ // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2018. - № 11 (72). - С. 32-38. Режим доступа: <https://doi.org/10.30987/issn.1999-8775/>.
10. Тонконогий В. М., Рибак О. В. Моделювання та експериментальне дослідження процесів теплопередачі при шліфуванні деталей з плазмовим покриттям // Різання та інструмент в технологічних системах. Харків: НТУ "ХП". – 2019. - Вип. 90. - С. 100-108. Режим доступа: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/43881>.
11. Красота М.В., Шепеленко И.В., Матвиенко А.А., Аль Соодани Салем М. Муташаир. Анализ эффективности существующих и перспективных методов обработки деталей с покрытиями // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Кіровоград., КНТУ. – 2014. – Вип. 27. – С.99-108. Режим доступа: <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/1322>.
12. Лебедев В.Г., Клименко Н.Н., Чумаченко Т.В. Рациональные температуры при шлифовании наплавленных и напыленных на рабочие поверхности деталей сталей сплавов и химических соединений // Вісник НТУ "ХП". - 2014. - № 7 (1050). - С.37-41. Режим доступа: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/8370>.
13. Кремень З.И. Технология шлифования в машиностроении/ З.И. Кремень, В.Г. Юрьев, А.Ф. Бабошкин; под общ. ред. З. И. Кременя.— СПб.: Политехника, 2007. — 424 с.: ил. Режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/2257586>.
14. Anatoly V. Usov, Vladimir M. Tonkonogyi, Predrag V. Daši'c and Olga V. Rybak. Modelling of Temperature Field and Stress–Strain State of the Workpiece with Plasma Coatings during Surface Grinding. Machines, 2019, 7, 20 ; Режим доступа: doi:10.3390/machines7010020.
15. Rowe, W. B. Principles of modern grinding technology / W. Brian Rowe. William Andrew is an imprint of Elsevier. First edition 2009. – 416 p. Режим доступа: <https://www.elsevier.com/books/principles-of-modern-grinding-technology/rowe/978-0-8155-2018-4>.
16. Пляскин И.И. Оптимизация технических решений в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1982. – 176 с. Режим доступа: <https://www.twirpx.com/file/872444/>.
17. Стоцько З.А. Моделювання технологічних систем: навч. посіб./М-во освіти і науки України, Нац. ун-т "Львів. політехніка".-2-ге вид., перероб. і допов.-Львів:Вид-во Львів. політехніки,2013 .-186 с. Режим доступа: <https://vlp.com.ua/node/10765/>.

Ya. M. Lytvyniak , I. I. Yurchyshyn , I.Ya. Novitskyi  
Lviv Politechnic National University

**EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF GRINDING OF EXTERNAL CYLINDRICAL SURFACES OF PARTS BY INCLINED THIN ABRASIVE WHEELS**

**Aim.** Experimental investigation of grinding of external cylindrical surfaces of parts by thin abrasive wheels that are inclined to working surface. **Methods.** The investigation was carried out using the methods of cutting theory, the planning of experiments, statistical processing of experimental results. **Results.** The thin reinforced abrasive wheels (heightened circular speed gives for these wheels) are proposed to use to work up outer cylindrical surfaces of parts with covering heightened wear resistance and hardness or the details that were received of hard-to-machine materials. The influence of the cutting modes in the production process by thin abrasive wheels on the amount of effective power and the main component of the cutting force during the processing of external cylindrical surfaces of parts were experimentally determined. The empirical relations between production modes and power parameters of the production process were defined for oncoming directions and passing directions of circular speed for the machined cylindrical part and thin abrasive wheel. **Scientific novelty.** The ratio of production mode by thin inclined abrasive wheels on the effective cutter power and the main component of the cutting force during the processing of external cylindrical surfaces of parts, which were experimentally received, determines that accompanying processing by the increase of cutting depth and circular speed of rotation is accompanied to increase of effective cutter power and the main component of cutting force, and the increase of the longitudinal feed is accompanied to reduce them, but effective cutter power and the main component of cutting force increase during the growth of a feed and circular speed of the part for counter processing, however, these values reduce during the increase of cutting depth. The compatible, paired influence of several factors of processing modes on the power parameters of the process is important during the production process by the inclined thin abrasive wheel. The production process concerns processes with low energy consumption. The effective cutting power does not exceed 0.45 kW for all combinations of cutting modes. Low effective cutting power together with a small contact area of the abrasive wheel with the workpiece determine a small effect on the treated surface of the heating temperature in the processing area that ensures the preservation of the mechanical characteristics of the surface layer, which was obtained in the previous stages of manufacturing the part. Low energy consumption of the production process of cylindrical parts by inclined thin abrasive wheels determines the availability of its practical use. **Practical significance.** The production process of cylindrical workpiece surface of hard-to-process materials or with thick-layer wear-resistant coatings, which have significant previous surface irregularities, by inclined thin abrasive wheels was proposed to use on operations of rough round grinding or on rough transitions of turning operation. The studied machining process can be implemented on lathes that are equipped with the additional, replaceable high-speed electric drive of rotation of a thin abrasive wheel. The use of the method of processing the outer cylindrical surfaces by thin abrasive wheels provides: the use of low cost cutting tools, reduction of the main processing time due to the greater depths of cutting, increase productivity and reduce the cost of processing and versatility of the process, due to the ability to process the cylindrical surfaces of parts that are formed from a variety of materials with significantly different physical and mechanical properties.

**Keywords:** abrasive tool, thin abrasive wheel, mathematical planning of experiments, grinding, inclination angle of abrasive wheel, cutting modes by abrasive circles, round grinding, grinding on a lathe, associated grinding, counter grinding, restoration of cylindrical parts, processing of details after restoration.

#### References

1. Klimenko S.A. Cutting of coated parts / Klimenko S.A., Kolomiets V.V., Kheifets M.L., Pilipenko A.M., Melnichuk Yu.A., Burykin V.V. Edited by S. A. Klimenko. - К.: ISM them. V. N. Bakul National Academy of Sciences of Ukraine, 2011. -- 353 p.
2. Chernyak Ya.P. Experience of surfacing of parts and assemblies of construction equipment // Automatic welding / Ya.P. Chernik - 2013. - No. 3.-P.56-59.
3. Babinets A.A. Investigation of thermal resistance of deposited metal intended for restoration of rolling shafts // Automatic welding / A.A.Babinets, I.A.Ryabtsev, I.A.Kondrat'ev et al. - 2014. - No. 5.-P.17-21.
4. Titarenko V.I. Installations based on lathes for surfacing of rolling rolls // Automatic welding / V.I. Titarenko, V.N. Lantukh, A.S. Kashinsky. - 2013. - No. 4.-C.50-55.
5. Golyakevich A.A. Experience of using electric arc surfacing with flux-cored wire at Ukrainian enterprises // Automatic welding / A.A. Golyakevich, L.N. Orlov, L.S.Malinov, V.I. Titarenko. - 2016. - No. 9.-C.37-41.
6. Kharlamov Yu.A. Processing of details at restoration and strengthening / Yu.A. Харламов. - Luhansk: SNO named after Dalia, 2007. - 500 p
7. Technology of repair and restoration (Finishing diamond-abrasive treatment with elastic tools in repair production) / S.A. Klimenko, VV Burikin, LG Polonsky, VG Спісар. - Житомир: ЖДТУ, 2014. - 122 с.

8. Burykin V.V., Kharlamov Yu.A., Nochvay V.M. Finishing technologies for processing parts with coatings // Bulletin of ZhDTU. Zhytomyr. - 2017. - No. 2 (80). - C.29-33.
9. Klimenko S.A., Melniychuk Yu.A. Surface roughness of parts with sprayed amorphous-crystalline coatings based on iron processed with a PCNB tool // Bulletin of the Bryansk State Technical University. - 2018. - No. 11 (72). - S. 32-38.
10. Tonkonogy VM, Rybak OV Modeling and experimental research of heat transfer processes during grinding of parts with plasma coating // Cutting and tools in technological systems. Kharkiv: NTU "KhPI". - 2019. - Vip. 90. - P. 100-108.
11. Krasota M.V., Shepelenko I.V., Matvienko A.A., Al Soodani Salem M. Mutashair. Analysis of the effectiveness of existing and promising methods of processing parts with coatings // Machinery in agricultural production, industrial engineering, automation. - Kirovograd., KNTU. - 2014. - Vip. 27. - P.99-108.
12. Lebedev V.G., Klimenko N.N., Chumachenko T.V. Rational temperatures during grinding of deposited and sprayed on the working surfaces of parts of steels of alloys and chemical compounds // Bulletin of NTU "KhPI". - 2014. - No. 7 (1050). - C.37-41.
13. Kremen' Z.I. Grinding technology in mechanical engineering / Z.I. Kremen', V.G. Yuriev, A.F. Baboshkin; under total. ed. 3. I. Kremnya. - SPb. : Polytechnic, 2007. - 424 p. : ill.
14. Anatoly V. Usov, Vladimir M. Tonkonogyi, Predrag V. Dašić and Olga V. Rybak. Modelling of Temperature Field and Stress–Strain State of the Workpiece with Plasma Coatings during Surface Grinding. Machines, 2019, 7, 20, ; doi:10.3390/machines7010020
15. Rowe, W. B. Principles of modern grinding technology / W. Brian Rowe. William Andrew is an imprint of Elsevier. First edition 2009. – 416 p.
16. Plyaskin I.I. Optimization of technical solutions in mechanical engineering. - M. : Mashinostroenie, 1982. -- 176 p.
17. Stotsko ZA Modeling of technological systems: textbook. manual./ Ministry of Education and Science of Ukraine, Nat. Lviv Polytechnic University. - 2nd ed., revised. and add.-Lviv: Lviv Publishing House. Polytechnic, 2013.-186 p..