

А.П. Гавриш, Т. А. Роїк, О. А. Гавриш,
П. О. Киричок, Ю. Ю. Віщук, В. Г. Олійник

ШЛІФУВАННЯ І ДОВОДКА ЗНОСОСТІЙКИХ АНТИФРИКЦІЙНИХ КОМПОЗИТНИХ ДЕТАЛЕЙ ДРУКАРСЬКИХ МАШИН

Частина 3



УДК 681.61.06

Ш69

Рецензенти С. А. Клименко, доктор технічних наук, професор, Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, заступник директора з наукової роботи Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України
Ю. М. Подрезов, доктор фізико-математичних наук, с. н. с., завідувач відділом Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України

А. П. Гавриш, Т. А. Роїк, О. А. Гавриш, П. О. Киричок,
Ю. Ю. Віщук, В. Г. Олійник.

Ш69 Шліфування і доводка зносостійких антифрикційних композитних деталей друкарських машин: Монографія. "Видавничий дім АртЕк", Київ, 2021. 202с.

Частина 3 монографії, що складається з трьох нерозривно поєднаних між собою розділів, присвячена висвітленню широкого кола питань в царині створення та використання нових композиційних антифрикційних деталей для вузлів пост-друкарської техніки. Особливістю досліджуваних деталей є те, що вони виготовлені за розробленими авторами технологіями з композиційних матеріалів на основі промислових шліфувальних відходів алюмінієвих сплавів. У ч. 3 монографії подається аналіз існуючих методів надтонкої фінішної обробки робочих поверхонь деталей з композиційних антифрикційних матеріалів, що були розроблені і промислово апробовані авторами монографії., розгалужено представляються методологічні аспекти проведення широкого комплексу експериментальних досліджень, та висвітлюються особливості методологічного забезпечення параметрів якості поверхонь тертя деталей з нових антифрикційних композиційних матеріалів на основі промислових відходів кольорових металів. Для фахівців машинобудівного та матеріалознавчого профілю, що займаються розробленням нових деталей тертя для експлуатації поліграфічного обладнання. Може бути корисною для студентів, аспірантів вищих технічних навчальних закладів та спеціалістів видавничо-поліграфічної галузі.

ISBN 978-617-7814-80-0

А.П. Гавриш, Т. А. Роїк, О. А. Гавриш,
П. О. Киричок, Ю. Ю. Віщюк, В. Г. Олійник

Шліфування і доводка зносостійких антифрикційних композитних деталей друкарських машин

Частина 3

КИЇВ 2021

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1 НОВІ МЕТОДИ АБРАЗИВНОГО ОБРОБЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ТЕРТЯ ЗІ ЗНОСОСТІЙКИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ	10
1.1. Особливості тонкого абразивного шліфування поліграфічних деталей з композитів на основі алюмінію	10
1.2 Вплив мастильно-охолоджуючих рідин на якість поверхонь деталей тертя друкарських машин з композиційних сплавів при тонкому абразивному шліфуванні	24
1.3 Спосіб тонкого шліфування високолегованих композитних матеріалів з ефективним використанням мастильно-охолоджуючої рідини	35
1.3.1 Мастильно-охолоджуюча рідина для абразивної обробки підшипників ковзання з високолегованих композитів	35
1.3.2 Спосіб підготовки мастильно-охолоджуючої рідини для абразивної обробки підшипників ковзання з високолегованих композитів	39
1.4 Спосіб тонкої абразивної обробки циліндричних отворів деталей обертання з високолегованих композитів	45
1.5 Спосіб фінішної прецизійної оздоблювальної обробки отворів деталей обертання з високолегованих композитів	50
1.6 Спосіб абразивного оброблення плоских поверхонь зносостійких деталей тертя друкарської техніки з легованих композитів на основі алюмінію	55
1.7 Спосіб прецизійного оброблення поверхонь отворів підшипників ковзання з композитних сплавів на основі алюмінію	60
1.8 Спосіб тонкого кубонітового оброблення циліндричних поверхонь зносостійких деталей обертання з композиційних сплавів на основі нікелю для друкарських машин	

1.9 Спосіб надтонкої абразивної обробки суперфінішуванням зовнішніх циліндричних поверхонь деталей обертання поліграфічної техніки з високолегованих композитних сплавів на основі заліза	72
РОЗДІЛ 2 ТОНКЕ АЛМАЗНЕ ШЛІФУВАННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ КОМПОЗИТНИХ ДЕТАЛЕЙ ТЕРТЯ ПОЛІГРАФІЧНОЇ ТЕХНІКИ	79
2.1 Вплив параметрів тонкого алмазного шліфування на якість поверхонь деталей тертя поліграфічних машин	80
2.1.1 Вплив складу алмазних інструментів та режимів різання на шорсткість поверхонь композитних підшипників ковзання	80
2.1.2 Силове поле при тонкому алмазному шліфуванні поверхонь тертя композитних підшипників ковзання поліграфічної техніки	90
2.1.3 Миттєві контактні температури при тонкому алмазному шліфуванні деталей з композитних матеріалів на основі відходів інструментальних сталей	96
2.2 Параметри наклепу поверхневого шару композитних підшипників ковзання при тонкому алмазному шліфуванні	102
2.3 Специфіка тонкого алмазного шліфування композитних деталей тертя з алюмінію для друкарських машин	110
2.4 Способи прецизійного оброблення зносостійких поверхонь деталей тертя з високолегованих композитів тонким алмазним шліфуванням	123
2.5 Спосіб оздоблювально-викінчувального оброблення отворів підшипників ковзання з високолегованих композитних сплавів для друкарських машин	124
2.6 Спосіб алмазного хонінгування отворів деталей тертя з високолегованих композитних матеріалів на основі алюмінію з використанням ультразвуку	129
Висновки до розділу 2	135
РОЗДІЛ 3 ЯКІСТЬ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ ТЕРТЯ ПОЛІГРАФІЧНИХ МАШИН, ОБРОБЛЕНИХ НОВИМИ МЕТОДАМИ ФІНІШНОЇ ОБРОБКИ	137
3.1 Мікрогеометрія поверхні та стан поверхневого шару зносостійких	138

деталей тертя з високолегованих композитів за умови абразивного суперфінішування

3.2 Прецизійна машинна доводка плоских поверхонь зносостійких деталей тертя з композитів на основі високолегованих сталей для технологічних комплексів 147

3.3 Стрічкове алмазно-абразивне полірування деталей обертання зі зносостійких композитів на основі алюмінію для поліграфічних машин 156

3.4 Поверхні зносостійких композитних деталей тертя поліграфічних машин при прецизійній доводці 171

Висновки до 3 розділу 179

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 181

СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ 183

ВСТУП

У сучасних машинах легкої та харчової промисловості, а також у конструкціях новітнього обладнання поліграфічної галузі широкого застосовують зносостійкі композиційні матеріали, які одержані з цінної та дешевої сировини – промислових шліфувальних відходів кольорових металів, насамперед, алюмінієвих сплавів, які, на жаль, навіть на сьогодні, здебільше вивозяться у відвали і не використовуються у повторному циклі виробництва.

На основі розгалужених робіт з регенерації та повторного використання у виробничому циклі цих сировинних ресурсів [1 – 6] в останні роки були створені оригінальні високозносостійкі композиційні сплави на основі алюмінію АК12М2МгН, АМ4,5Кд, АК8МЗч та АК12ММгН + (9–12 %) MoS_2 . Відомо [1, 2], що композитні сплави на основі алюмінію застосовують у різних машинних комплексах і були створені для деталей тертя, які працюють у в умовах жорстких режимів експлуатації.

Для забезпечення найкращих показників зносостійкості та довговічності робочих поверхонь деталей тертя важливе значення мають параметри якості поверхонь оброблення деталей (шорсткість поверхні, ступінь наклепу, глибина його проникнення у тіло деталі). Вони здебільше, забезпечуються технологічними процесами тонкого абразивного оброблення (шліфування, прецизійна доводка, суперфінішування та хонінгування).

Згідно загальноприйнятим уявленням [2, 7 – 11] якість поверхні при абразивній обробці формується як результат сумісної дії силового та температурного полів безпосередньо у зоні зрізання стружки. При цьому сили в процесі різання зміцнюють поверхневий шар, а температури сприяють його розміцненню (відпочинку). Ці процеси відбуваються одночасно і від того, як вони збалансовані, залежать кінцеві результати параметрів якості поверхневого шару. Очевидно, що рівень миттєвих контактних температур на лезі абразивного зерна шліфувального круга, безумовно, сприяє збереженню високих антифрикційних властивостей спеціально створених композитних сплавів.

Проте питання виникнення теплових джерел контактної взаємодії абразивних зерен з поверхнею зносостійких композитних деталей вивчено недостатньо. Є лише окремі спроби експериментального дослідження у цьому напрямку [13 – 15]. Узагальнених теоретичних досліджень у цьому плані до цього часу не було. Це не дозволяє оптимізувати режими різання та викликає поширення у виробництві різних технологій, часто суттєвого протиріччя, і які здебільшого створені відповідно до можливостей того чи іншого підприємства.

Ефективність функціонування техніки у поліграфічній галузі у значній мірі залежить від стабільності роботи контактних пар, які визначають як зносостійкість конкретного вузла тертя, так і машини у цілому.

Зношування деталей контактних з'єднань, зокрема антифрикційного призначення, є причиною розбалансування вузла внаслідок зміни розмірів зношених деталей, що призводить до нестабільності роботи устаткування, втрати продуктивності і зниження якості продукції [1, 2]. Авторами [3, 4] доведено, що саме кількість та термін міжремонтних робіт на 70 % залежить від третювих сполучень.

Аналогічні причини виходу з ладу брошуровально-палітурного обладнання, а саме фальцапаратів, різальних машин, машин для вклеювання окремих елементів в упаковку, автоматичних кашировальних машин та ін. Постдрукарське обладнання займає одне з провідних місць в поліграфічній промисловості і є невід'ємною ланкою в технологічному процесі виготовлення друкарської продукції [1].

Більшість відмов (до 80 %) такого роду обладнання відбувається через зношування третювих деталей. Вказане є наслідком, перш за все, недосконалості ливарних технологій виготовлення, що викликає постійні несправності такої техніки. Обладнання потребує великої кількості запасних частин, збільшує матеріальні витрати на ремонт та призводить до зростання браку друкарської продукції.

За даними фахівців з експлуатації вказаної техніки, головним фактором, що обумовлює вихід її з ладу і спричинює зростання браку продукції, є знос антифрикційних елементів контактних пар [3].

Так, за даними Державного видавництва «Преса України», Державного підприємства Поліграфічний комбінат «Україна» та ТОВ «Завод експериментальних промислових технологій» (м. Київ) за 2016-2018 р.р. термін роботи антифрикційних деталей тертя з литих алюмінієвих сплавів АК12, АМ4,5Кд, АК12ММгН, АК8, Д16 та ін. у ножових різальних машинах типу Wohlenberg Trim-tec 560, Wohlenberg Trim-tec 607, у фальцапаратах типу Heidelberg-IF-50-ST, у фальцювальних машинах типу «Bobst Mistral 110 A2», машинах для вклеювання елементів в упаковку «Heiber & Schroeder wp 800 d» та ін. складає лише до 1,5 років, що пов'язано з недосконалістю існуючих технологій виготовлення, наслідком чого є збільшення браку друкарської продукції.

Тому, завдання підвищення зносостійкості і довговічності деталей тертя постдрукарських машин шляхом створення нових технологій виготовлення ефективних матеріалів з високими характеристиками зносостійкості є актуальним і потребує виконання комплексу досліджень.

Об'єктивною вимогою подальшого розвитку поліграфії є постійне підвищення якості друкарської продукції, що безумовно залежить від якості поліграфічного устаткування [1].

Враховуючи високу конкуренцію у галузі виробництва поліграфічного і постполіграфічного обладнання, фахівці приділяють особливу увагу високим вимогам до функціонального призначення, точності та продуктивності таких машин. Першочерговими є питання підвищення надійності вузлів означеної техніки і окремих деталей, зокрема, антифрикційних [2, 3].

Вдосконалення роботи тертьових пар є важливим питанням, тому що саме вони є відповідальними за стабільність експлуатації поліграфічного обладнання в цілому і постдрукарського зокрема [2, 3].

В галузі триботехнічних досліджень в роботах [1–3] залишилося не висвітленими питання технологічних особливостей виготовлення деталей поліграфічного обладнання. Це знайшло підтвердження у роботах [4–6], в яких, зокрема, йдеться про низький рівень експлуатаційних властивостей розроблених матеріалів для вузлів тертя.

З одного боку, розповсюджене застосування литих антифрикційних деталей, зокрема на основі алюмінію, неухильно зростає завдяки суттєвим перевагам, про що свідчать дослідження, висвітлені у роботі [6]. Проте технологія виготовлення литтям обмежує рівень антифрикційних характеристик майже вдвічі через використання рідкого мастила. Наприклад, у роботах [3] наведено результати різкого зниження втомної міцності деталей тертя при роботі з рідкими мастилами, що містять розчинені органічні кислоти, та спричиняють корозію.

Інший підхід до розробки деталей тертя – це використання порошкової технології виготовлення. Автори робіт [7, 8] доводять можливості додавання до складу вихідної шихти різних функціональних речовин, які призначені для надання композиту експлуатаційних характеристик, що неможливо досягти традиційними металургійними методами. У роботі [7] встановлено, що введення твердої змащувальної речовини у фрикційний контакт підвищує рівень антифрикційних властивостей завдяки утворенню мастильної плівки на поверхні розділу. З підвищенням навантаження ефективність змащувальної дії зростає, що пояснюється зменшенням напруження на зсув. Численні дослідження властивостей композитних матеріалів на основі міді, нікелю, алюмінію з включенням різних видів твердих мастил наведено у працях [7–9].

Проте обмежені дані щодо використання алюмінієвих сплавів для виготовлення з них нових композитних деталей будь-якого призначення внаслідок існуючих технологічних складнощів у виготовленні порошкових матеріалів та високої ціни вихідної сировини (порошків) і обладнання для її виготовлення. Одним з напрямків вирішенням вказаних складнощів на сьогодні є застосуванням вторинних процесів переробки матеріалів, про що свідчать

технологічно та економічно обґрунтовані дослідження робіт [10–12]. Цей підхід відповідає політиці Європейського Союзу щодо навколишнього середовища у царині поводження з відходами.

Як відомо, промислові шліфувальні відходи металів машинобудівного, приладобудівного виробництв, що утворюються на кінцевих операціях шліфування різних конструкційних деталей та після відповідної переробки можуть бути використані у повторному виробничому циклі. Проте на сьогодні відсутні дослідження з поєднання ресурсозберігаючих технологій з методами порошкової металургії, що дозволять підвищити властивості деталей у складних умовах роботи та спростити технологію виготовлення.

Перспективним напрямком дослідження є технологія регенерації вторинної сировини та введення додаткових композицій внаслідок відсутності досконалих методів порошкової металургії [11, 12].

Вищезазначене дозволяє стверджувати, що одним із шляхів вирішення науково-технічної проблеми є розроблення технології відновлення шліфувальних відходів сплавів методами порошкової металургії. Це дозволить застосовувати цінну відновлену металеву основу для виготовлення якісних антифрикційних деталей складної геометричної форми, зокрема, для вузлів фальцювально-склеювальних машин і машин для клеювання елементів в упаковку [7, 13].

Виходячи із загальних положень теорії абразивного оброблення матеріалів [10 – 14] та враховуючи специфічні властивості композиційних сплавів на основі алюмінію, було б вельми корисним для формування необхідних параметрів шорсткості поверхонь тертя при їх обробленні застосовувати шліфувальні круги з надтвердих синтетичних матеріалів з кубічного нітриду бору, що набув поширення у промисловості під торговою маркою «Ельбор» (ЛО) [15 – 17]. Нажаль, досліджень у цьому напрямку до сьогодні не велось. Це, безумовно, є перешкодою до повного використання усіх резервів підвищення зносостійкості за рахунок використання, притаманних лише їм, властивостей найновітніх марок композитів на основі алюмінію і, у

тому числі, зростання параметрів зносостійкості, надійності та довговічності шляхом формування найкращих параметрів шорсткості методами тонкого ельборового шліфування.

В науково-технічній літературі є багато публікацій по застосуванню інструментів з надтвердих синтетичних матеріалів для обробки деталей різних галузей виробництва [10 – 20]. Науковцями та практикою провідних машинобудівних підприємств доведено, що застосування ельборового шліфування (перш за все, завдяки особливостям інструменту) дозволяє отримати найкращі показники якості оброблюваних поверхонь.

Втім відсутність технологічних рекомендацій з ельборового шліфування високолегованих та важкооброблюваних композитних сплавів призводить до застосування на практиці різних технологічних схем шліфування, далеко не завжди оптимальних. Вказане викликає поширення різних технологій, часто суттєво протирічних, і які здебільшого створені відповідно до можливостей того чи іншого підприємства.

Тому дослідження технологічних процесів тонкого шліфування композиційних матеріалів на основі алюмінію є актуальним питанням, що має безсумнівне як наукове, так і, що не менш важливо, практичне значення для технологів-виробничників.

РОЗДІЛ 1 НОВІ МЕТОДИ АБРАЗИВНОГО ОБРОБЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ТЕРТЯ ЗІ ЗНОСОСТІЙКИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ШЛІФУВАЛЬНИХ ВІДХОДІВ

1.1. Особливості тонкого абразивного шліфування поліграфічних деталей з композитів на основі алюмінію

Створення нових високопродуктивних машин для різних галузей народногосподарського комплексу України щільно пов'язане з синтезом нових композиційних сплавів, які створюються для забезпечення безперервно зростаючих вимог до якості деталей, механізмів та в цілому обладнання. З цієї точки зору доцільно звернути увагу на створення за останні роки широкої гами композиційних сплавів на основі нікелю, міді відходів штампових та інструментальних сталей [7, 8]. Слід зауважити, що найбільш ефективно ці матеріали працюють при жорстких умовах експлуатації, коли температурне середовище забезпечує рівень нагрівання поверхонь деталей тертя у межах 350 – 800 °C і питомих тисках 2 – 8 МПа .

Для роботи в зоні дії відносно невеликих температур (~ 100 – 120 °C) раціонально застосовувати нові композиційні сплави, що створені на основі використання силумінових шліфувальних відходів, зокрема авіаційного машинобудування в яких присутні цінні легуючі елементи, і які є дешевою та вельми корисною сировиною для виготовлення конструкційних деталей [9 – 11]. В результаті всебічних досліджень [11] було розроблено технологію синтезу заготовок деталей тертя для поліграфічного обладнання зі шламових відходів силумінів, де одним з найважливіших параметрів є забезпечення вимог надійності, а саме – зносостійкості, довговічності та ремонтоздатності. У процесі виготовлення матеріалів була сформована складна гетерофазна металографічна структура композитних сплавів, насамперед, на основі відходів сплаву АК12М2МгН, яка складається з високолегованого α -твердого розчину на основі алюмінію при наявності евтектики, що утворюється завдяки присутності кремнію (у межах до 11,6 %) і залягає за стільниковим рисунком зерен твердого розчину [12]. При цьому велика кількість легуючих елементів у матеріалі спричинює утворення в його структурі чималої частки

дрібнодисперсних фаз – інтерметалідів. Усе це забезпечує отримання високих фізико-механічних та антифрикційних властивостей матеріалів (табл. 1.1). Як відомо параметри зносостійкості деталей тертя у машинах і механізмах визначаються не тільки функціональними можливостями матеріалів, з яких ці деталі виготовлено, але і параметрами якості їх поверхонь, що сформовані внаслідок механічного оброблення [7 – 10].

Таблиця 1.1 Фізико-механічні та антифрикційні властивості композиційних сплавів на основі алюмінію

Матеріал	Тимчасовий опір розриву, МПа	Твердість, НВ	Уд. в'язкість, кДж/м ²	Коеф. тертя	Інтенсивність зношування зразка, мкм/км	Інтенсивність зношування контртіла, мкм/км
Композит АК12М2МгН [4]	180 - 185	85 - 100	0,18 – 0,30	0,00 80	3,9	Сліди
Композит АК12ММгН [3]	170 - 180	85 – 95	0,20 – 0,32	0,00 85	4,0	
Композит АМ4,5Кд [5]	180 - 185	90 - 105	0,20 – 0,33	0,00 85	4,1	
Композит АК8М3ч [6]	180 - 190	92 - 100	0,022 – 0,35	0,00 87	4,0	
Литий сплав АК12М2МгН	186	90	0,30 – 0,40	0,02 50	6,0	2,5

Як відомо параметри зносостійкості деталей тертя у машинах і механізмах визначаються не тільки функціональними можливостями матеріалів, з яких ці деталі виготовлено, але і параметрами якості їх поверхонь, що сформовані внаслідок механічного оброблення [13, 14].

З цієї точки зору деталі з композитів на основі відходів штампових та інструментальних сталей рекомендовано оброблювати методами тонкого абразивного шліфування з застосування інструментів з карбіду кремнію зеленого (63С) на еластичній гліфталевій зв'язці (Гл) [14, 15].

На жаль, на сьогоднішній день розгалужених досліджень тонкого абразивного шліфування деталей з композитних сплавів на основі алюмінію не існує. Це створює умови для розробки і впровадження у виробництво різних по своєму технічному рівню (і далеко не завжди оптимальних) технологічних процесів, які базуються на досвіді технологів-практиків різних виробничих

підприємств і які, найчастіше, створені для забезпечення конкретних потреб діючого виробництва без гарантій досягнення найкращих показників якості виготовлення деталей і відповідних умов їх надійності та зносостійкості.

Отже, дослідження технологічних процесів тонкого абразивного шліфування композитів на основі алюмінію є важливою задачею, яка має незаперечне наукове і практичне значення. Це ілюструє актуальність обраної теми досліджень.

Метою даної роботи було дослідження параметрів шорсткості поверхонь оброблення деталей тертя друкарських машин та вивчення впливу на них складу шліфувального інструменту та режимів різання при тонкому плоскому, зовнішньому круглому та внутрішньому круглому шліфуванні.

Експериментальні дослідження з означеної науково-технічної задачі виконувались на прикладі тонкого шліфування підшипників ковзання згідно з методикою, наведеною у роботах [1–7, 11–14]. Їх результати наведені у табл. 1.2.

Таблиця 1.2 Параметр шорсткості R_a при тонкому плоскому шліфування підшипникового композитного сплаву на основі АК12М2МгН [14]

Поперечна подача $S_{\text{поп}}$ мм/подв. хід	Швидкість виробу (поздовжня подача) V_v м/хв.	Глибина шліфування t , мм		
		0,002	0,01	0,05
		R_a , мкм		
0,1	2	0,300	0,450	0,510
	5	0,353	0,500	0,570
	10	0,370	0,570	0,610
0,2	2	0,400	0,650	0,710
	5	0,430	0,720	0,790
	10	0,440	0,810	0,830
0,5	2	0,550	0,930	0,950
	5	0,600	1,010	0,990
	10	0,710	1,120	1,150
1,0	2	0,895	1,180	1,210
	5	1,040	1,250	1,350
	10	1,140	1,310	1,400

Примітки: Верстат – FF-350 “Abawerk” (ФРН), абразив – 53СМ14СМ25 на гліфталевій зв’язці, швидкість кругу – 22 м/с, обробка без охолодження.

Аналіз даних табл. 1.2 показує, що параметр шорсткості R_a змінюється зі зміною режимних факторів оброблення – глибини шліфування, поперечної та поздовжньої подач.

Обробка експериментів за допомогою статистичних методів, зокрема, із застосуванням методу Ст'юдента для випадку залежних змінних оброблених зразків при фіксованих значеннях двох варіюючих величин (наприклад, V_v , t) та при змінній третій величині (наприклад, $S_{\text{поп.}}$), показала, що досліджені сукупності суттєво різні.

Аналогічні результати отримані при порівнянні будь-яких вибірок для подач 0,1 – 1,0 мм/подв. хід та швидкостей 2 – 10 м/хв. Доречі, зі збільшенням різниці між подачами порівнюваних вибірок і різниці між швидкостями відмінності між табличним та розрахунковим розподілом Ст'юдента зростають. Це дозволяє зробити висновок, що існує зв'язок між параметром шорсткості поверхні R_a та глибиною різання t : $R_a = f(t)$, $S_{\text{поп.}} = \text{const}$, $V_v = \text{const}$.

Використовуючи методи математичної статистики, неважко показати, що існує зв'язок між параметром R_a та поперечною подачею $S_{\text{поп.}}$: $R_a = f(S_{\text{поп.}})$, $V_v = \text{const}$, $t = \text{const}$.

Аналогічний статистичний зв'язок існує між параметром шорсткості R_a та швидкістю V_v : $R_a = f(V_v)$, $S_{\text{поп.}} = \text{const}$, $t = \text{const}$.

Дослідження фактичного зв'язку між шорсткістю поверхні та режимними факторами шліфування методами кореляційного аналізу дозволило встановити кількісні співвідношення між досліджуваними факторами.

Для отримання рівняння множинної кореляції на основі наведених експериментальних даних були знайдені коефіцієнти кореляції парних залежностей $R_a - t$; $R_a - S_{\text{п.}}$; $R_a - V_v$; $S_{\text{поп.}} - V_v$; $S_{\text{поп.}} - t$; $t - V_v$.

Проведені розрахунки показують, що між факторами R_a , $S_{\text{поп.}}$, V_v , t існує щільний лінійний зв'язок. Формальний математичний аналіз показує, що між факторами $S_{\text{поп.}} - t$, $t - V_v$, $S_{\text{поп.}} - V_v$ зв'язок відсутній, хоча це видно із загальних технічних міркувань. Отримані коефіцієнти кореляції r_k далекі від 1. Це свідчить про те, що крім даного фактору (для якого визначено r_k), на R_a

впливають й інші фактори. Значення коефіцієнтів кореляції вказує на ступінь впливу на шорсткість поверхні досліджуваних факторів.

Найбільший вплив на параметр шорсткості R_a чинять глибина різання t та поперечна подача $S_{\text{поп.}}$, найменше – швидкість випробу V_b .

Рівняння множинної кореляції для досліджуваних факторів має вигляд:

$$Ra = 0,271S_{\text{п}} + 5,3t + 0,0061V_b - 0,0510 \quad (1.1)$$

Аналіз формули (1.1) показує, що на параметр шорсткості R_a чинять найбільший вплив глибина шліфування t та поперечна подача $S_{\text{п}}$, а найменший – швидкість виробу V_b .

Точність цієї моделі можна підвищити, якщо розділити весь діапазон режимів плоского шліфування на дві групи:

I – а група:

- поперечна подача $S_{\text{п}} = 0,01 - 0,02$ мм/подв.хід;
- глибина шліфування $t = 0,002 - 0,100$ мм;
- швидкість виробу $V_b = 2,0 - 4,0$ м/хв.

II – а група:

- поперечна подача $S_{\text{п}} = 0,5 - 1,0$ мм/подв.хід;
- глибина шліфування $t = 0,02 - 0,05$ мм;
- швидкість виробу $V_b = 5,0 - 15,0$ м/хв.

Після деяких перетворень рівняння (1.1) може бути трансформоване і набуде вигляду:

I - група:

$$R_a = 0,2715S_{\text{п}} + 5,2t + 0,0062V_b - 0,0505 \quad (1.2)$$

II – група:

$$R_a = 0,2723S_{\text{п}} + 5,2t + 0,0059V_b - 0,05315 \quad (1.3)$$

Розраховані за формулами (1.2) і (1.3) значення R_a відрізняються від експериментальних на 12 – 15%, що дозволяє використовувати дані формули для практичних розрахунків. Наприклад, знаючи конкретні значення $S_{\text{поп.}}$, t , V_b для даного абразивного інструменту, можна орієнтовно визначити яким буде параметр R_a та оцінити (з точки зору вимог, що висуваються до підшипників) прийнятність вибраних режимів шліфування.

Слід зазначити, що отримані висновки підтверджуються також при тонкому абразивному шліфуванні кругами зернистістю M50, M28, M14, M7. Відповідні експериментальні дані наведені у табл. 1.2.1.

Таблиця 1.2.1 Вплив матеріалу зерна інструменту на параметр шорсткості поверхні R_a при тонкому плоскому абразивному шліфувальні заготовок композитних підшипників на основі алюмінію

Характеристика шліфувального інструменту	Тип абразиву	Матеріал зразків		
		AK12M2MгН [4]	AK12MMгН [3]	AK8M3ч [6]
		R_a , мкм		
53C5Гл	Карбід кремнію чорний	0,300	0,320	0,330
63C5Гл	Карбід кремнію зелений	0,350	0,370	0,375
23A5Гл	Електрокорунд білий	0,410	0,420	0,425
37A5Гл	Електрокорунд титановий	0,390	0,410	0,415
44A5Гл	Монокорунд	0,400	0,425	0,430
53CM28Гл	Карбід кремнію чорний	0,200	0,210	0,215
63CM28Гл	Карбід кремнію зелений	0,230	0,235	0,240
23AM28Гл	Електрокорунд білий	0,250	0,260	0,265
53CM14Гл	Карбід кремнію чорний	0,180	0,185	0,190
63CM14Гл	Карбід кремнію зелений	0,200	0,215	0,220
23ACM14Гл	Електрокорунд білий	0,220	0,230	0,235
44ACM14Гл	Монокорунд	0,210	0,220	0,228
53CM7Гл	Карбід кремнію чорний	0,170	0,180	0,186
63CM7Гл	Карбід кремнію зелений	0,180	0,190	0,197
23AM7Гл	Електрокорунд білий	0,190	0,200	0,205

Примітки: Верстат – FF-350 «Abawerk» (ФРН); режими шліфування: швидкість круга – 25 м/с; поздовжня подача (швидкість виробу) – 2 м/хв; поперечна подача – 0,1 мм/подв.хід; глибина різання – 0,002 мм; обробка – без охолодження.

Аналіз даних табл. 1.2.1 дозволяє зробити важливі висновки з приведених досліджень. Перш за все, необхідно зазначити, що для всієї гами досліджуваних композитних матеріалів на основі алюмінію найменша шорсткість поверхонь оброблення отримана при тонкому шліфуванні деталей інструментами на основі карбіду кремнію чорного (53C). Це підтверджується для широкого діапазону зернистостей абразивів від 50 мкм до 7 мкм. І хоча зерна шліфувальних кругів з карбіду кремнію зеленого (63C) мають найгострішу форму (табл. 1.2.1), застосування абразивів з карбіду кремнію чорного (53C) забезпечує отримання параметрів шорсткості поверхні обробки підшипника

ковзання R_a на 10 – 15% менші, ніж при застосуванні зерен з карбіду кремнію зеленого і на 50 – 70% менше, ніж при використанні шліфувальних кругів з електрокорунду білого (23А), електрокорунду титанового (37А) та монокорунду (44 А). Зазначене може бути пояснено тим, що карбід кремнію чорний (53С) є більш крихкішим матеріалом у порівнянні з карбідом кремнію зеленим (63С) і тому його переваги найбільш суттєво проявляються при тонкому шліфуванні матеріалів з низькою межею міцності та в'язких металів і сплавів (алюміній, мідь, латунь). Крім того, зерна карбіду кремнію чорного мають найменшу здатність до адгезійного схоплювання з надтонкими стружками алюмінієвих сплавів, які схильні до активного окиснення в агресивному середовищі (кисень, повітря) безпосередньо при зрізанні стружки ріжучим зерном абразиву [15, 16]. Корисно підкреслити, що зерна карбіду кремнію чорного (53С) значно дешевші, ніж абразиви з карбіду кремнію зеленого. Це також є важливим фактором технологічного процесу тому, що забезпечує отримання мінімальної собівартості операції шліфування композитного сплаву.

Важливою складовою проектування технологічних процесів абразивного оброблення є вибір зернистості шліфувального інструменту. Цей фактор суттєво впливає на досягнення необхідних значень параметрів шорсткості поверхні R_a . Результати досліджень у новому напрямку наведені у табл. 1.3.

Таблиця 1.3 Середні значення геометрії кута ріжучих зерен у різних абразивних матеріалах

Абразивний матеріал	Зернистість, Мкм	Геометрія вершини зерна	
		Радіус заокруглення ρ , мкм	Кут при вершині, град
Карбід кремнію зелений (63С)	100	7,5	95,1
	50	5,2	94,2
	28	2,3	92,2
	14	2,0	90,6
Карбід кремнію чорний (53С)	100	7,9	95,5
	50	5,5	94,9
	28	2,5	92,6
	14	2,2	91,3
Електрокорунд білий (23А)	50	8,5	95,8
	28	2,7	95,1
	14	2,4	92,5
Монокорунд (44А)	50	9,0	96,4
	28	3,1	95,7
	14	2,5	93,2

Таблиця 1.4 Вплив зернистості шліфувальних інструментів на шорсткість поверхонь оброблення R_a при тонкому плоскому шліфуванні заготовок композитних підшипників на основі алюмінію

Характеристика шліфувального круга	Матеріал зразків		
	AK12M2MгН	AK12MMгН	AK8M3ч
	Параметр шорсткості R_a , мкм		
53C5Гл	0,300	0,320	0,330
63C5 Гл	0,350	0,370	0,375
53CM28Гл	0,200	0,210	0,215
63CM28Гл	0,230	0,235	0,240
53CM14Гл	0,180	0,185	0,190
63CM14Гл	0,200	0,215	0,220
53CM10Гл	0,190	0,193	0,200
63CM10Гл	0,195	0,197	0,207
53CM7Гл	0,170	0,180	0,186
63CM7Гл	0,180	0,190	0,197

Примітки: Верстат – FF-350 «Abawerk» (ФРН); режими різання: швидкість круга – 25 м/с; поздовжня подача (швидкість виробу) – 2 м/хв; поперечна подача – 0,1 мм/подв.хід; глибина різання – 0,002 мм; шліфування – без охолодження.

Експериментальні дані табл. 1.4 показують, що найменшу шорсткість при обробці композиту на основі алюмінію у досліджуваному діапазоні (7 – 100 мкм) забезпечують шліфувальні круги зернистістю 7 – 10 мкм.

Ці результати можуть бути пояснені загальними положеннями теорії шліфування.

Дійсно, збільшення шорсткості поверхонь зі зростанням зернистості обумовлюється збільшенням перерізу a_z зрізу шару металу. Покращення шорсткості для інструментів з карбіду кремнію зеленого пояснюється тим, що зерна карбіду кремнію мають найгострішу форму (мінімальний кут загострення при вершині зерна) та найменший (у порівнянні з електрокорундовими та монокорундовими зернами) радіус округлення одиночного зерна (табл. 1.4).

В результаті математичної обробки експериментальних даних було отримано кореляційне рівняння зв'язку параметру шорсткості R_a з зернистістю A абразивного інструменту з карбіду кремнію зеленого (63C), що має вигляд:

$$R_a = 0,0081S_n - 0,0093(5.52)$$

Таким чином, знаючи зернистість шліфувального круга A можна розрахувати параметр шорсткості R_a і впевнитись у тому, що вибраний інструмент забезпечить вимоги до якості робочих поверхонь підшипників

ковзання. Це значно спрощує зусилля технологів – практиків при раціональному виборі шліфувального інструменту під час проектування технологічних процесів.

Суттєвим питанням є і те, як впливає склад зв'язки абразивного круга на параметр шорсткості поверхні R_a , результати дослідження якого наведені у табл. 1.4.

Слід зауважити, що основні експерименти проводились на зразках композитів на основі алюмінію АК12М2МгН і дещо обмежена кількість дослідів виконувалась на зразках композитів інших марок, зокрема АК12ММгНта АК8МЗч(для встановлення загальних закономірностей).

Вирішення питань, пов'язаних з досягненням певних умов за параметром шорсткості R_a поверхонь деталей тертя друкарських машин та забезпечення вимог досягнення відповідних характеристик зносостійкості вузлів і механізмів, у значному ступені залежить від технічного рівня технологічних процесів тонкого абразивного оброблення деталей з новітніх композитних сплавів на основі алюмінію. Це перш за все, стосується вибору для тонкого шліфування раціонального типу зв'язки абразивного інструменту. Відомо, що шорсткість поверхонь шліфування суттєво залежить не тільки від зернового складу абразиву, а і від зв'язки шліфувального круга, що до певного ступеню є одним із вирішальних факторів процесу тонкого абразивного шліфування композитних матеріалів [16].

У зв'язку з тим, що технологічні процеси тонкого шліфування поверхонь деталей тертя з композитних сплавів на основі алюмінію [16] до сьогодні вивчені недостатньо, дослідження впливу зв'язки абразивного інструменту на параметри шорсткості R_a є значущим питанням. Воно має як наукове так і практичне значення для промислової практики і, в першу чергу, для технологів-виробників, що проектують нові технологічні процеси і створюють нові технологічні комплекси машин та механізмів.

У табл. 1.5 наведено основні результати досліджень цього питання для випадку тонкого абразивного шліфування нових композитних сплавів на основі

алюмінію. Для експериментального вивчення були використані шліфувальні круги на еластичній гліфталевій (Гл) та жорсткій керамічній (К) зв'язках, що набули найбільшого поширення у виробничій практиці.

Аналізуючи дані табл. 1.5, необхідно зазначити, що найкращі значення параметрів шорсткості R_a поверхонь оброблення деталей з нових композитних сплавів на основі алюмінію забезпечують абразивні круги на гліфталевій зв'язці (Гл). Це може бути пояснено її більш еластичною здатністю і, таким чином, при шліфуванні (під час врізання абразивного зерна у метал) під дією складових сил різання кожне зерно начебто демпфується в напрямку пружньо-еластичного середовища зв'язки. Це обумовлює фактичне зменшення глибини різання. Отже, змінюються умови формування шорсткості поверхні оброблення і, як наслідок, зменшується параметр шорсткості R_a , який є одним із найголовніших факторів, що характеризує якість поверхні після тонкого абразивного шліфування.

Слід зауважити, що ці висновки зроблені на підставі аналізу фактичних даних, отриманих під час експериментального дослідження із застосуванням широкої гами зв'язок (гліфталева, керамічна) та зернистостей шліфувального круга (100, 50, 28 та 14 мкм).

Таблиця 1.6 Вплив матеріалу зв'язки абразиву на параметр шорсткості обробленої поверхні R_a зразків з композитів АК12М2МгН на основі алюмінію

Характеристика абразивного інструменту	Матеріал зв'язки круга	Параметр шорсткості R_a , мкм
53С10Гл	Гліфталева	0,800
53С10К	Керамічна	0,910
63С10Гл	Гліфталева	0,830
53С5Гл	Гліфталева	0,300
53СМ28Гл	Гліфталева	0,200
53 СМ28К	Керамічна	0,270
53 СМ14Гл	Гліфталева	0,180
53 СМ14К	Керамічна	0,200
63СМ14ГЛ	Гліфталева	0,225

Примітки: Верстат – FF-350 «Abawerk» (ФРН); режими різання: швидкість круга – 25 м/с; поздовжня подача (швидкість виробу) – 2 м/хв; поперечна подача – 0,1 мм/подв.хід; глибина різання – 0,002 мм; шліфування – без охолодження.

Зазначено також, що ці висновки підтверджуються і для інших марок абразивних зерен, зокрема, карбіду кремнію зеленого (63С).

Приймаючи до уваги те, що фізичні явища у процесі різання металів принципово подібні для плоского, зовнішнього круглого та внутрішнього шліфування, експериментальне дослідження процесів зовнішнього круглого і внутрішнього абразивного шліфування композитних зносостійких сплавів на основі алюмінію виконувалось з урахуванням вищенаведених результатів. Зокрема, для дослідів використовувались інструменти з карбіду кремнію чорного (53С) зернистістю 14 – 28 мкм, які сформовані у шліфувальні круги гліфталевою зв'язкою (Гл). Зазначимо, що зовнішнє тонке кругле шліфування виконувалось на прецизійному верстаті AS-250 «Werkzajt» (ФРН), а для внутрішнього шліфування застосовувався прецизійний внутрішньошліфувальний верстат надвисокої точності SS – 125 «Studder» (Швейцарія). Основні результати досліджень наведені на рис. 1.1, 1.2.

Аналіз експериментів (рис. 1.1) показує, що на шорсткість поверхонь деталей з нових композитних матеріалів на основі алюмінію при тонкому зовнішньому круглому шліфуванні (як і при плоскому абразивному шліфуванні) суттєво впливають режими різання: швидкість виробу V_b , поздовжня подача S_n та глибина різання t , а також розмір зерна абразиву, та склад зв'язки алмазного інструменту.

Аналогічно з плоским шліфуванням найкращу якість оброблених зовнішніх поверхонь композитних циліндричних деталей (за параметром шорсткості R_a) тонким абразивним круглим зовнішнім шліфуванням забезпечує застосування інструментів на основі карбіду кремнію чорного (53С) на гліфталевій зв'язці (Гл), зернистістю 14–28 мкм (M14 – M28) та застосування тонких режимів шліфування ($V_b \rightarrow \min$; $S_n \rightarrow \min$; $t \rightarrow \min$).

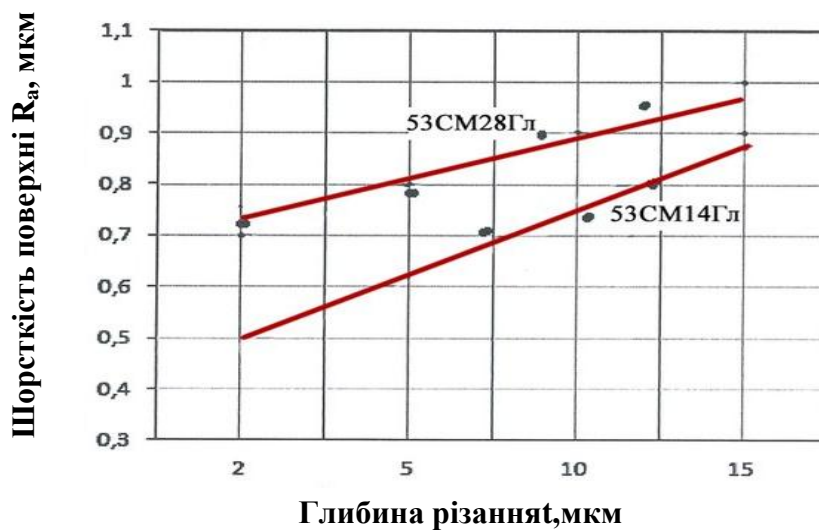
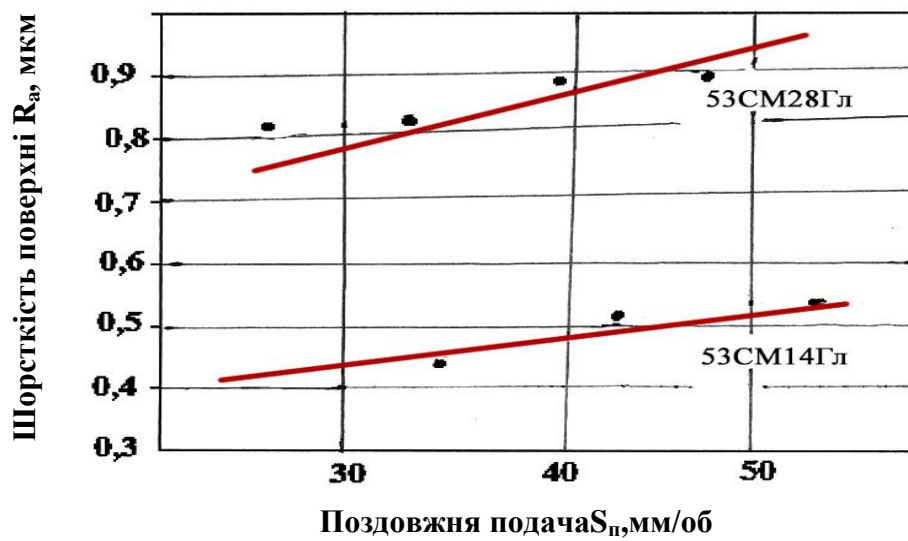
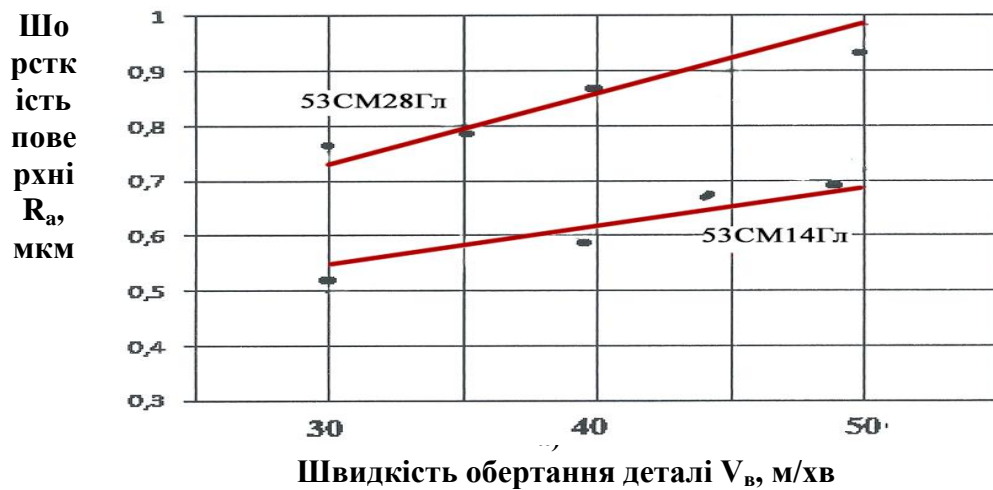


Рисунок 1.1. Залежність параметрів шорсткості поверхні R_a від режимів ірнкого абразивного шліфування V_b , S_p , t при зовнішньому круглому шліфуванні (швидкість круга – $V_{кр} = 35$ м/с): а) $S = 5$ мм/об.; $t = 2$ мкм; б) $V_b = 30$ м/хв.; $t = 2$ мкм; в) $V_b = 30$ м/хв.; $S_p = 5$ м/об.

Схожі результати отримані при тонкому круглому внутрішньому абразивному шліфуванні робочих поверхонь деталей тертя з нових композитних сплавів на основі шліфувальних відходів силумінів.

Результати експериментів наведені на графіках (рис. 1.2).

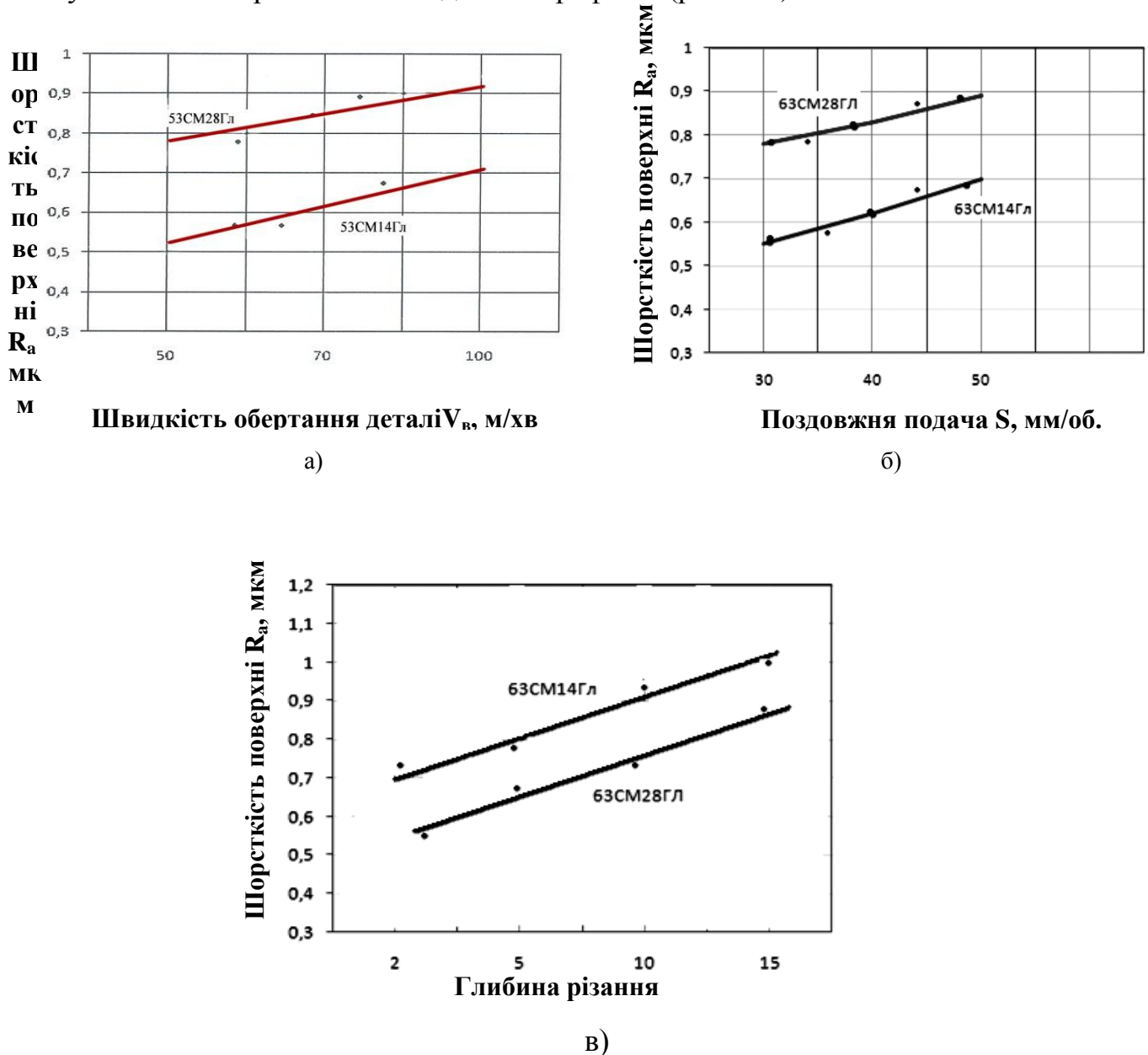


Рис. 1.3. Залежність параметрів шорсткості поверхні R_a від режимів тонкого абразивного шліфування V_b , S , t при тонкому круглому внутрішньому шліфуванні (швидкість круга – $V_{кр.} = 30$ м/с): а) $S_{п.} = 30$ мм/об.; $t = 2$ мкм; б) $V_b = 45$ м/хв.; $t = 2$ мкм; в) $V_b = 50$ м/хв.; $S_{п.} = 30$ мм/об.

Узагальнюючи комплекс виконаних досліджень, необхідно зробити важливі як наукові, так і практичні висновки.

1. Вперше досліджено процеси абразивного оброблення нових композиційних сплавів на основі алюмінію типу АК12М2МгН, АК12ММгН, АК8МЗч та АМ4,5Кд, що відкриває можливості одержання високоякісних деталей тертя з нових композитів для поліграфічних машин.

2. Показано, що основні закономірності тонкого прецизійного абразивного шліфування нових композиційних сплавів співпадають при плоскому, круглому зовнішньому та внутрішньому шліфуванні.

3. Доведено, що на параметр якості поверхні оброблення R_a суттєво впливають тип зерна абразиву, зернистість, матеріал зв'язки абразивного круга та режими шліфування.

4. Найкращі показники параметру R_a , які задовольняють високі вимоги до поверхонь тертя деталей поліграфічних машин на основі відходів силуміну, забезпечують шліфувальні круги з карбіду кремнію чорного(53С) зернистістю 14 – 28 мкм на гліфталевій зв'язці та тонкі режими різання, а саме:

- для плоского шліфування: швидкість круга – 25 м/с, поздовжня подача – 2 м/хв., поперечна подача – 0,1 мм/подв.хід; глибина різання – 2 мкм;

- для зовнішнього круглого абразивного шліфування: швидкість абразивного круга – 25 м/с, швидкість виробу (деталі) – 30 м/хв., поздовжня подача – 30 мм/об., глибина різання – 2 мкм;

- для круглого внутрішнього абразивного шліфування: швидкість круга – 30 м/с, швидкість виробу – 45 м/хв., поздовжня подача – 30 мм/об., глибина різання – 2 мкм.

Подальші дослідження будуть спрямовані на виконання експериментів та встановлення закономірностей формування параметрів якості поверхонь оброблення нових композитних деталей тертя поліграфічних машин на основі відходів алюмінієвих сплавів, зокрема параметрів шорсткості та фізичних властивостей поверхневого шару оброблення при тонкому шліфуванні із застосуванням найновітніх шліфувальних інструментів – кругів на основі синтетичного алмазу кубічного нітриду бору та борозону, що обумовить

реалізацію подальших кроків для підвищення зносостійкості деталей такого типу та поліграфічної машини у цілому.

1.2 Вплив мастильно-охолоджуючих рідин на якість поверхонь деталей тертя друкарських машин з композиційних сплавів при тонкому абразивному шліфуванні

Вимоги до деталей тертя, які працюють в умовах інтенсивного зношування у вузлах поліграфічного обладнання, постійно зростають, що призводить до необхідності створення нових та удосконалення існуючих технологій виготовлення такого типу деталей.

Як показує досвід спеціалістів з експлуатації техніки, що працює у важких умовах, основна причина її незадовільної роботи – це інтенсивне зношування робочих поверхонь тертя, зокрема, підшипників ковзання [17, 18].

Так, за даними Державного видавництва «Преса України» за 2010 рік термін роботи підшипників з литої бронзи БрАЖ9-4 у вузлах тертя офсетних друкарських машин KBA Rapida – 105, “PLAMAG Rondoset RO-170”, “STAR BINDER 1509” та ін., які працюють на повітрі при високих швидкостях обертання (до 1000 об./хв.), та підвищених навантаженнях (до 7 МПа), коли на контактних поверхнях виникають температури до 400 °С, складає лише 0,5 – 1,0 рік [19].

Це пов'язано передусім з недосконалістю не тільки існуючих матеріалів вузлів тертя такого обладнання і технологій їх виготовлення, але й браком найраціональніших технологічних заходів наступної фінішної механічної обробки робочих контактних поверхонь деталей такого типу, що забезпечували б високий рівень їх параметрів якості.

Тому встановлення закономірностей формування параметрів якості контактних поверхонь тертя підшипників ковзання друкарських машин з нових композиційних матеріалів у залежності від типу застосовуваних мастильно-охолоджуючих рідин (МОР) при тонкому абразивному шліфуванні є надзвичайно важливим питанням з точки зору пошуку подальших шляхів

удосконалення технологічних процесів виготовлення високоякісних деталей тертя сучасного поліграфічного обладнання для суттєвого підвищення його надійності і довговічності.

Для забезпечення параметрів довговічності поліграфічної техніки науковцями були створені нові склади зносостійких високолегованих самозмащувальних антифрикційних композитних матеріалів та розроблено нові технологічні режими їх виготовлення [19, 20], які пройшли промислову апробацію.

Проте забезпечення високої зносостійкості підшипнику ковзання, що працює без змащування рідким мастилом, неможливе без досягнення такого рівня параметрів якості робочих поверхонь, який був би здатний сприяти у процесі експлуатації деталей формуванню на поверхнях тертьової пари плівок тертя (вторинних структур) з максимальним рівнем антифрикційних характеристик, які, у свою чергу, забезпечуватимуть високу зносостійкість та довговічність вузла тертя, а, відтак, і всієї машини.

У той же час, як відомо, кінцеві значення параметрів якості поверхонь тертя підшипників залежать від фінішних операцій технологічного процесу їх надтонкої абразивної обробки із забезпеченням відповідних високих вимог до якості оброблення (мінімальних значень параметрів шорсткості поверхонь R_a , мінімальних спотворень, знаку та значень залишкових напружень, дефектів тонкого поверхневого шару, глибини залягання наклепу, ступеню деформації металу у зоні зрізання стружки поодиноким абразивним зерном інструменту) [21].

Ці якості формують умови придатності поверхні оброблення підшипників для забезпечення високих функціональних вимог експлуатації, зокрема, суттєвого підвищення термінів служби вузлів тертя машин та механізмів друкарської техніки.

На жаль, наразі не всі з наведених питань достатньо досліджені, оскільки нові антифрикційні композиційні сплави (на основі нікелю та шліфувальних відходів інструментальних сталей з домішками твердого мастила CaF_2), які

працюють у жорстких умовах експлуатації, лише нещодавно були створені і почали застосовуватись у промисловості [21].

Деякі параметри (шорсткість поверхні, характеристики наклепу, залишкові напруження поверхневих шарів, сил різання та миттєвих контактних температур), які суттєво впливають на зносостійкість та довговічність друкарської техніки (особливо підшипників ковзання високошвидкісних поліграфічних машин) та котрі формуються на етапах тонкої фінішної абразивної обробки були всебічно досліджені авторами даної статті і набули рівня рекомендацій для промисловців [22].

Проте вплив мастильно-охолоджуючих рідин (МОР) на особливості процесу тонкого абразивного шліфування та на параметри якості поверхонь оброблення до цього часу достатньо не визначено. Адже відомо [23, 24], що застосування мастильно-охолоджуючих рідин в процесі різання абразивним зерном призводить до перерозподілу теплових потоків на ріжучому лезі зерна, змінює величину складових сил різання та рівень миттєвих контактних температур. Усе це у сукупності суттєво впливає на параметри якості поверхні оброблення.

Тому виявлення особливостей впливу різних типів мастильно-охолоджуючих рідин (МОР) на формування показників якості робочих поверхонь композиційних антифрикційних деталей тертя з нових високолегованих композиційних матеріалів при тонкому абразивному шліфуванні є **актуальним** питанням, що має наукове та практичне значення.

Вирішення цього питання дозволить цілеспрямовано обирати такі мастильно-охолоджуючі рідини, які у поєднанні з встановленими технологічними режимами тонкої фінішної обробки робочих поверхонь композиційних підшипників забезпечать їх стабільно високі параметри якості, що надасть змогу одержувати нові високоякісні деталі тертя сучасного друкарського устаткування для підвищення його надійності і довговічності.

Враховуючи вищевикладені аргументи **метою** досліджень у даному напрямку було встановлення закономірностей впливу мастильно-

охолоджуючих рідин на параметри якості робочих поверхонь самозмащувальних композиційних підшипників ковзання на основі нікелю та шліфувальних відходів інструментальних сталей, призначених для оснащення вузлів тертя офсетних друкарських машин.

Якість поверхні деталей після шліфування залежить від теплових і силових факторів, які діють у зоні обробки. Інтенсивність цих факторів можна суттєво зменшити, а, отже, і стабілізувати якісні параметри матеріалів, що шліфуються, за допомогою раціонального використання мастильно-охолоджуючих рідин (МОР).

Для виявлення резервів підвищення продуктивності та якості обробки шліфуванням поверхонь проведені дослідження ефективності нових МОР (табл. 1.7).

Експериментальні дослідження процесу круглого зовнішнього тонкого шліфування із поздовжньою подачею зразків, які імітують робочу поверхню тертя, проводили на модернізованому верстаті 3В642. Верстат було оснащено гідроприводом поздовжньої подачі стола, механізованим приводом кочення оправки зі зразками, системою подачі та очищення МОР.

Як показали попередні випробування (ряди ранжування у табл. 1.7), кращі результати за одним з основних критеріїв якості обробки поверхонь (R_a) забезпечують нові вітчизняні МОР № 5 і 3, які і були відібрані для проведення подальших досліджень.

Таблиця 1.8 Характеристика МОР при експериментальних дослідженнях процесу шліфування нових антифрикційних матеріалів

Умовний номер МОР	Клас МОР	Вихідний продукт	Концентрація вихідного продукту, %
1	Емульсія	ЕТ – 2	16,7
2	Емульсія	НГЛ-205	16,7
3	Емульсія	“Укринол-1”	5,0
4	Синтетична	“Аквол-10”	2,0
5	Синтетична	“Аквол-10”	5,0
6	Синтетична	“Аквол-10”	7,0
7	Синтетична	“Cindolibe 173 Ep”	1,7
8	Синтетична	“Укринол-12”	5,0
9	Вуглеводна (масло)	“Укринол-14”	100,0

Шліфуванню піддавались зразки однакових розмірів з нових самозмащувальних антифрикційних композиційних матеріалів з домішками твердого мастила CaF_2 на основі порошкового сплаву нікелю - $\text{EP975}+6\%\text{CaF}_2$, $\text{EP975}+8\%\text{CaF}_2$, а також нових композитних матеріалів на основі цінної вторинної сировини – шліфувальних відходів інструментальних сталей $86\text{X6HFT}+5\%\text{CaF}_2$ та $4\text{XMNFC}+5\%\text{CaF}_2$ згідно методики, наведеній у роботах [24, 25]. Шліфування виконували абразивними кругами з карбіду кремнію зеленого зернистістю 14 мкм на еластичній гліфталевій зв'язці зі швидкістю $V = 30 - 35$ м/с при частоті коливання оправки зі зразками $n_0 = 60$ кол./хв. і поздовжній подачі стола верстату $S_{\text{позд}} = 2$ м/хв.

Поперечну подачу круга $S_{\text{поп}}$ змінювали від 0,0025 до 0,01 мм/подв. хід. МОР подавали в зону оброблення шляхом поливу із розрахунку 2 л/хв.

Таблиця 1.9 Ряди ранжування МОР

Матеріал зразка, мас. %	Критерій ефективності МОР	Умовний номер МОР за табл. 1				Ряд ранжування МОР
		1	3	5	7	
$\text{EP975}+6\text{CaF}_2$	Ra, мкм	0,220	0,350	0,240	0,230	5, 1, 7, 3
	Ry, мм/хв.	0,034	0,026	0,023	0,019	
$4\text{XMNFC}+5\text{CaF}_2$	Ra, мкм	0,210	0,270	0,210	0,220	5, 3, 1, 7
	Ry, мм/хв.	0,049	0,032	0,032	0,011	
$86\text{X6HFT}+5\text{CaF}_2$	Ra, мкм	0,170	0,270	0,220	0,260	1, 5, 3, 7
	Ry, мм/хв.	0,027	0,032	0,031	0,012	
$\text{EP975}+8\text{CaF}_2$	Ra, мкм	0,190	0,230	0,200	0,200	1, 3, 7, 5
	Ry, мм/хв.	0,042	0,038	0,019	0,023	

Основними критеріями, за якими робили висновки про ефективність МОР, була шорсткість шліфованої поверхні (середнє відхилення профілю Ra, мкм); мікротвердість поверхневого шару H_q , що вимірювали на приладі ПМТ-3 при навантаженні 0,5 Н; ступінь наклепу поверхневого шару $K_n = H_q / H_0$, де H_0 – вихідна мікротвердість зразка. Додатково оцінку ефективності МОР виконували за оптичним розмірним зношуванням круга ΔR_y , радіальною R_y та тангенціальною R_z складовими сили різання, контактною температурою у зоні шліфування Q , коефіцієнтом $K = R_y / R_z$. Складові сили різання R_z та R_y вимірювались за допомогою динамометричних центрів і записували на

шлейфовому осцилографі. Одночасно на стрічку осцилографа записували теплові імпульси, що виникли у зоні обробки.

Подальшу оптимізацію складу вибраних МОР проводили за вимірюваннями складових сил різання, контактної температури і ступеню наклепу поверхневого шару шліфованих поверхонь досліджуваних композитів.

З точки зору практичного значення мали дослідження впливу концентрації початкового продукту у рідині на ефективність процесу шліфування матеріалів, що продемонстровано, зокрема, на рис. 1.1, для матеріалу ЕП975+6%CaF₂.

Дослідження показали, що при роботі кругом на еластичній зв'язці (рис. 1.2) з використанням майже всіх застосовуваних МОР при збільшенні подачі круга S_n відмічене збільшення шорсткості шліфованої поверхні зразків, при цьому кращі результати забезпечує МОР № 5.

Контактну температуру при шліфуванні кругом 63СМ14СМ2Гл із застосуванням МОР записати за допомогою напівштучної термопари технічно складно внаслідок незадовільно утворюваного контакту “константан – оброблюваний зразок”, що пов'язано з особливостями гліфталевої зв'язки. Запис вдалося отримати лише при шліфуванні із застосуванням МОР № 1 та № 5 для досліджуваних матеріалів. При шліфуванні зразків всіх досліджуваних матеріалів з використанням МОР № 5 контактна температура дещо вища, ніж при шліфуванні з МОР № 1 (рис. 1.3). Але необхідно відзначити, що у розглядуваних режимах шліфування контактна температура незначна і несуттєво впливає на зниження вихідних властивостей матеріалів, в результаті чого мікроструктура поверхневого шару суттєво не змінюється під впливом силового фактору, а, відтак, зберігаються вихідні властивості матеріалів. Одержані дані підтверджуються експериментами з дослідження мікротвердості (параметру ступеня наклепу) поверхневого шару зразків (рис. 1.3 в).

При шліфуванні з подачею $S_n = 0,0025$ мм/подв. хід кращі результати за мікротвердістю поверхневого шару (рис. 1.3 в) показали МОР № 7 та № 5. Ступінь наклепу із застосуванням МОР № 7 дорівнює 4% ($K_n = 1,04$), при

шліфуванні з МОР № 5 - 6% ($K_H = 1,06$), МОР № 1 забезпечує ступінь наклепу 9 % ($K_H = 1,09$).

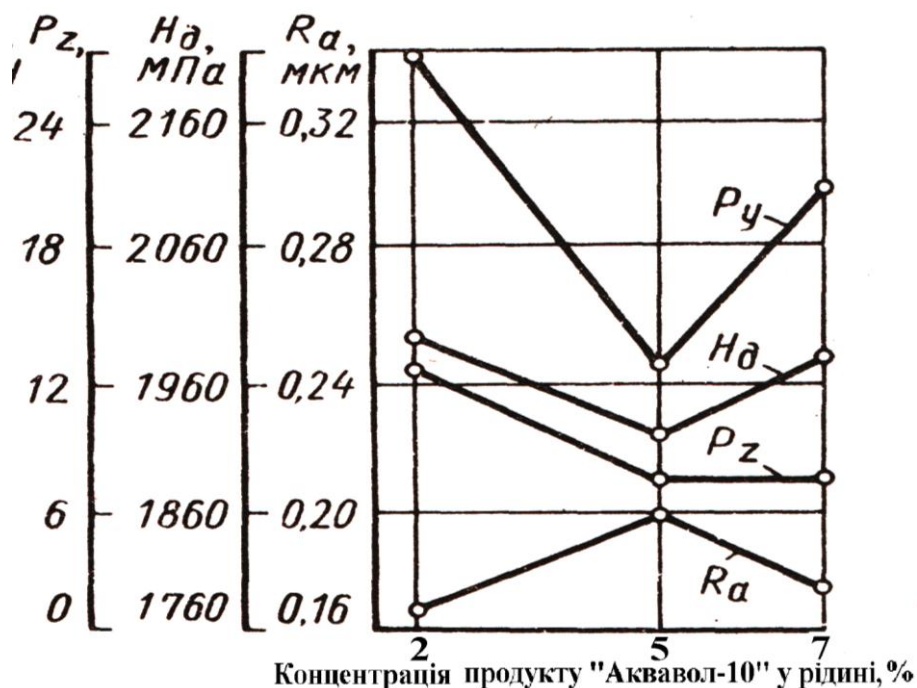


Рисунок 1.3 Вплив концентрації вихідного продукту «Аквал-10» на показники процесу шліфування зразків з матеріалу ЕП975+6%CaF₂ кругом 63СМ14СМ2ГЛ: $V_{кр} = 30$ м/с; $S_{поп} = 0,005$ мм/подв. хід; $n_0 = 60$ кол./хв.; $S_{позд} = 2$ м/хв.

Було виявлено, що зміни концентрації вихідного продукту «Аквал-10» у воді від 2 до 7% несуттєво впливають на шорсткість оброблюваної поверхні зразків. Втім мінімальні рівні наклепу поверхневого шару і сили різання P_z та P_y відмічені при 5%-й концентрації. Тому для фахівців-практиків можна рекомендувати саме цю концентрацію МОР як найбільш раціональну.

Аналогічна картина спостерігалась і для МОР на основі емульсолу «Укринол-1».

У процесі досліджень був також вивчений вплив режимів шліфування та характеристик кругів на шорсткість, мікротвердість поверхневого шару і теплосилову напруженість процесу (рис. 1.3, 1.4).

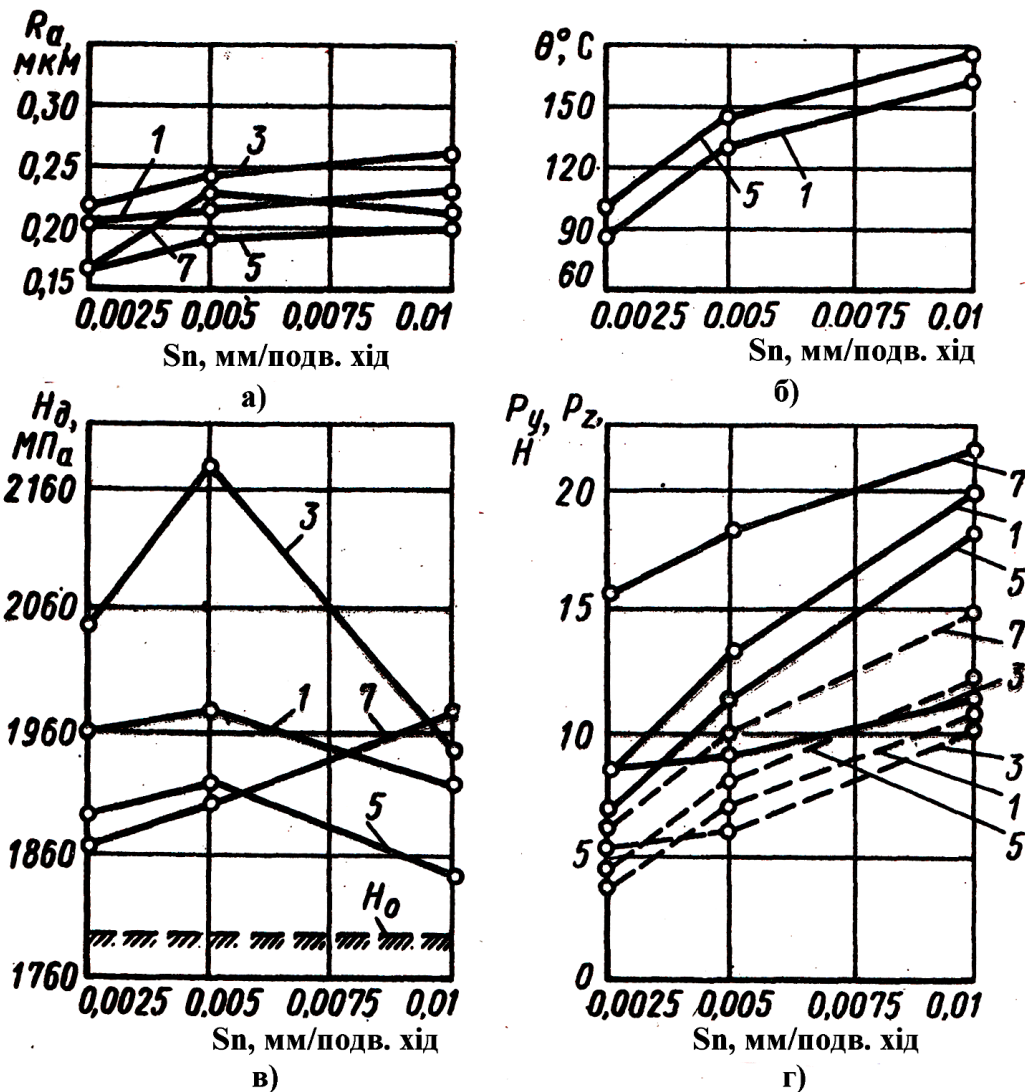


Рисунок 1.3 – Вплив $S_{\text{поп}}$ кругів 63СМ14СМ2Гл на показники шліфування зразків з матеріалу 86Х6НФТ+5%СаF₂ з використанням різних МОР: а – на шорсткість поверхні; б – на контактну температуру; в – на мікротвердість поверхневого шару; г – на сили різання (P_y ; P_z). 1, 3, 5, 7 – номер МОР за табл. 1.9; $n_0 = 60$ кол./хв.; $S_{\text{позд}} = 2$ м/хв.

У процесі експериментів при шліфуванні з подачею $S_{\text{поп}} = 0,05$ мм/подв.хід МОР № 7 та МОР № 5 показали практично однакові результати (відповідно $K_n = 1,06$ та $K_n = 1,07$), а при використанні МОР № 1 ступінь наклепу підвищився до 10 % ($K_n = 1,1$). Слід відзначити, що при збільшенні подачі круга до 0,01 мм/подв.хід кращі результати за ступенем наклепу одержано при використанні МОР № 5 ($K_n = 1,03$). Застосування у тих самих умовах МОР № 7 і № 1 дає ступінь наклепу, рівний відповідно 10 та 7 %.

При дослідженнях виявлено, що на всіх подачах круга максимальний наклеп поверхневого шару досліджуваних матеріалів відмічений при

шліфуванні з МОР № 3 ($K_n = 1,1 - 1,2$), хоча за силами різання P_y та P_z (рис. 1.3 г) ця рідина дає кращі результати. Слід також відмітити, що при збільшенні подачі круга до 0,01 мм/подв.хід (рис. 1.3, в) мікротвердість поверхневого шару зразків при шліфуванні з МОР № 7 – збільшується. Це пов'язано з меншим впливом синтетичної МОР на перерозподіл сил різання, що призводить до зростання питомого тиску на поверхню оброблення, а, відтак, до збільшення параметрів наклепу.

Таким чином, при шліфуванні досліджуваних зразків абразивним кругом на еластичній зв'язці за шорсткістю, ступенем наклепу поверхневого шару і температурно-силовим критерієм кращі результати досягнуто при застосуванні МОР № 5 на основі «Аквол-10». Її використання та базової МОР № 1 дозволяє збільшити подачу круга з 0,0025 до 0,005 – 0,01 мм/подв.хід без погіршення якості поверхневого шару зразків з досліджуваних композиційних матеріалів.

При шліфуванні зразків в аналогічних умовах з використанням високопористих кругів кращі результати за ступенем наклепу і температурно-силовим критерієм також отримані при застосуванні МОР № 5.

За результатами експериментів встановлено (рис. 1.4, а), що збільшення подачі круга від 0,0025 до 0,01 мм/подв.хід веде до „вирівнювання” ефективності різних МОР за величиною досягнутої шорсткості оброблюваної поверхні зразків. Майже при всіх подачах максимальний наклеп поверхневого шару відмічений у випадку використання закордонної МОР № 7 ($K_n = 1,04 - 1,12$). Закордонний аналог МОР № 7 при шліфуванні зразків з досліджуваних матеріалів поступається за ефективністю новим вітчизняним рідинам.

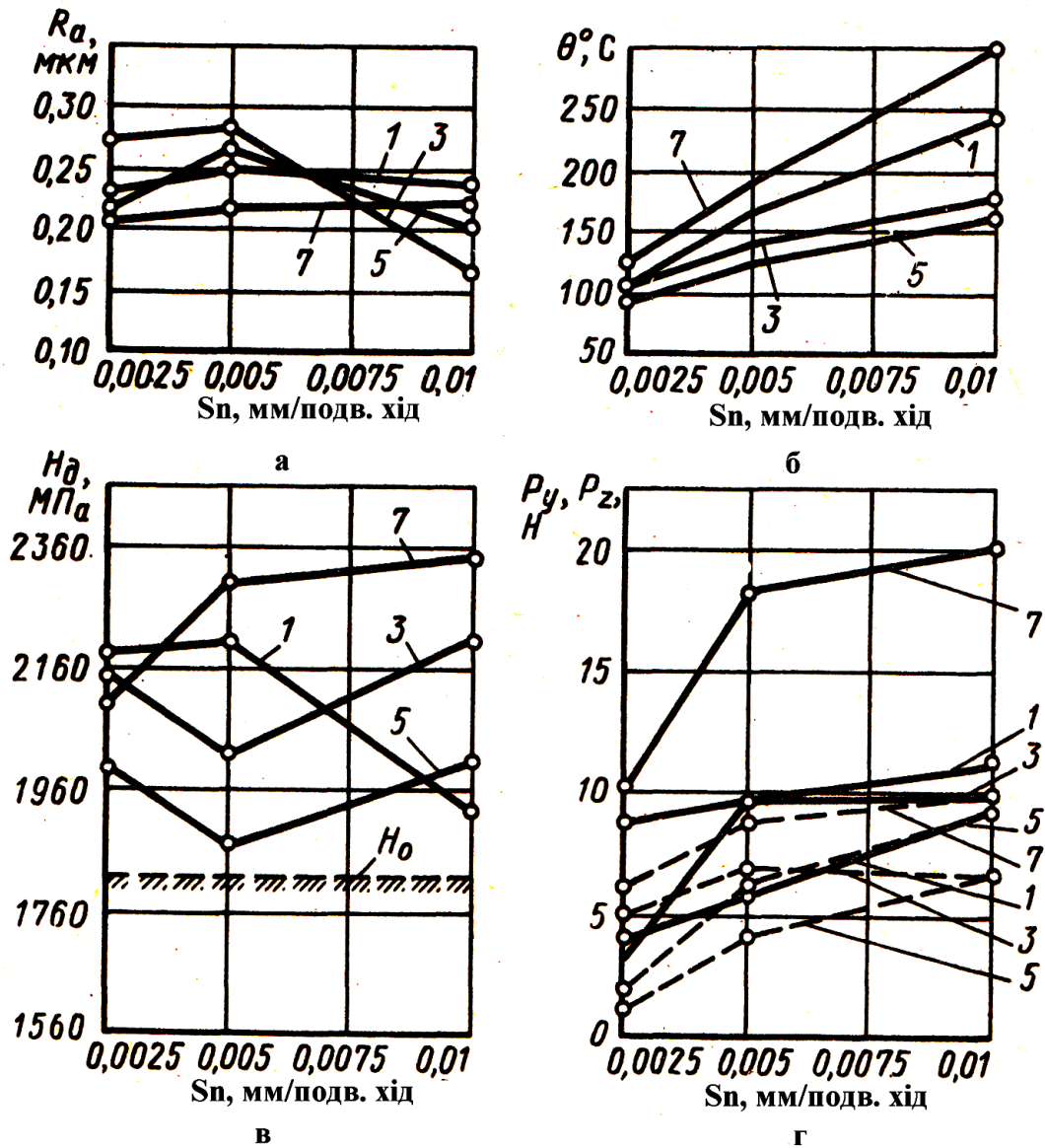


Рисунок 1.4 – Вплив поперечної подачі $S_{\text{поп}}$ круга 63СМ14СМ2Гл на показники шліфування зразків з матеріалу 86Х6НФТ+5%CaF₂ з використанням різних МОР: а – на шорсткість поверхні; б – на контактну температуру; в – на мікротвердість поверхневого шару; г – на сили різання (P_y ; P_z). 1, 3, 5, 7 – номер МОР по табл. 1.9; $n_0 = 60$ кач/хв.; $S_{\text{позд}} = 2$ м/хв.

Порівняння ефективності роботи кругів (рис. 1.5) при шліфуванні зразків з досліджуваних матеріалів із застосуванням МОР № 1 (рис. 1.3, а), а МОР №5 (рис. 1.4, б), та закордонної МОР №7 (рис. 1.5, в), показує, що кращі результати за величиною одержаної шорсткості поверхні, ступенем наклепу забезпечує застосування круга 63СМ14СМ2Гл з використанням МОР №5. Ступінь наклепу при роботі кругом на гліфталевій зв'язці (рис. 1.5, б) дорівнює 3 – 7%, а при шліфуванні високопористими кругом в тих самих умовах вона досягає 4 – 12%, причому в обох випадках зі збільшенням подачі до 0,01

мм/подв.хід ступінь наклепу дещо знижується, оскільки при досить малих глибинах різання $t=0,005 - 0,010$ мм превалюють процеси пластичного деформування та полірування, що протікають без суттєвого нагрівання поверхневого шару. Зі збільшенням подачі круга зростає глибина мікрорізання та частка корисної роботи на видалення металу (коефіцієнт K зростає), а витрати на тертя та руйнування знижуються, що і веде до деякого зниження наклепу поверхневого шару.

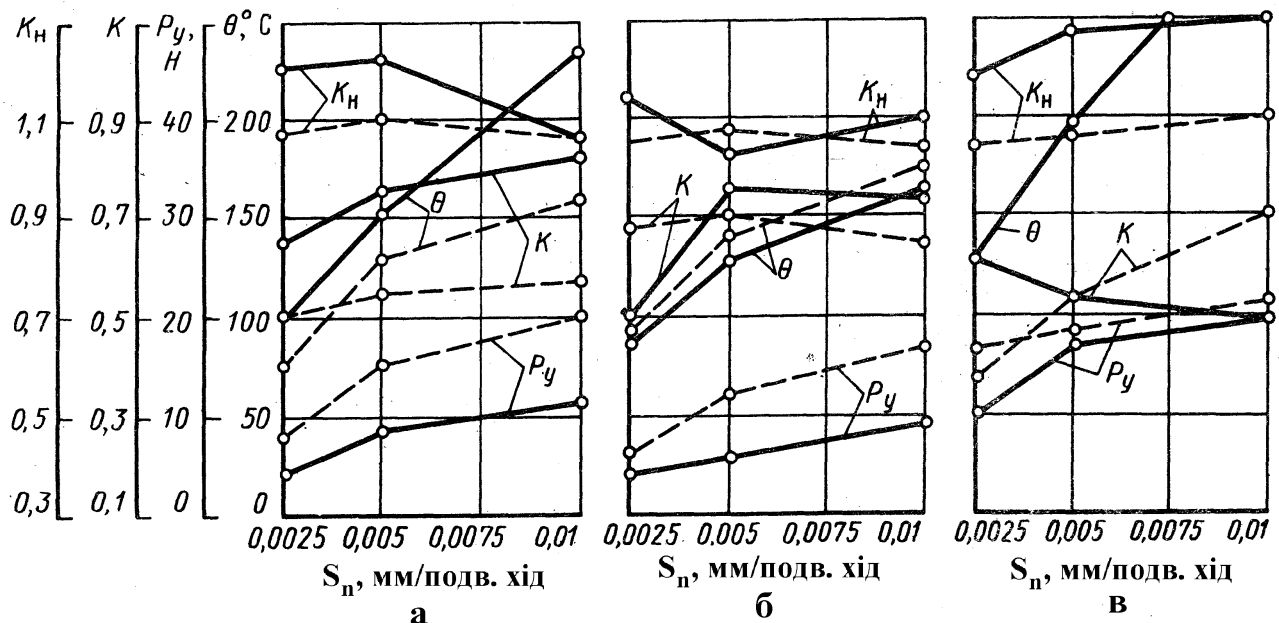


Рисунок 1.5. Порівняльна ефективність складів МОР та абразивних кругів при шліфуванні зразків з матеріалу $4XMHFC+5\%CaF_2$: а - МОР №1; б - МОР №5; в - МОР №7; високопористий круг 63CM40CM220K; круг 63CM14CM2Гл; $V_{кр} = 30-35$ м/с; $n_0 = 60$ кол./хв.; $S_{позд} = 2$ м/хв.

За температурно-силовим критерієм у аналогічних умовах суттєву перевагу має високопористий круг 63CM40CM220K. Необхідно відмітити, що при застосуванні МОР № 1 (рис. 1.5, а) та № 5 (рис. 1.5, б) високопористий круг має більш високу різальну здатність у порівнянні з кругом 63CM14CM2Гл (коефіцієнт K для високопористого круга більший). Зворотна картина (рис. 1.5, в) відмічена при використанні закордонної МОР №7, а саме, круг 63CM14CM2Гл працює в режимі самозаточування (коефіцієнт K зі збільшенням подачі зростає), а при застосуванні високопористого круга – в режимі затуплення (коефіцієнт K зі збільшенням подачі круга зменшується).

Відмічені закономірності та висновки про ефективність МОР і кругів підтверджені при шліфуванні всіх зразків з нових антифрикційних композиційних матеріалів. Кращі результати за температурно-силовим критерієм та різальною властивістю абразивів отримані при застосуванні МОР №5.

Виробничі випробування МОР №5 на ЗАТ «Завод експериментальних промислових технологій» (м. Київ) при плоскому і зовнішньому круглому тонкому абразивному шліфуванні підшипників ковзання, виготовлених з досліджуваних композитних матеріалів, підтвердили отримані експериментальні результати. Застосування МОР №5 не суттєво впливає на зміни параметрів якості оброблених поверхонь.

На основі викладених результатів можна рекомендувати для виробництва синтетичні МОР типу 5%-го водного розчину вітчизняного продукту «Аквол-10».

1.3 Спосіб тонкого шліфування високолегованих композитних матеріалів з ефективним використанням мастильно-охолоджуючої рідини

Як вже зазначалось вище, забезпечити найліпші параметри якості поверхонь оброблення високолегованих, антифрикційних, важкооброблюваних композитів та їх тонке абразивне шліфування доцільно здійснювати лише з використанням мастильно-охолоджуючих рідин (МОР) [23, 24].

Саме це послугувало базою для створення нового способу надтонкої абразивної обробки прецизійних отворів деталей тертя поліграфічних машин [25].

1.3.1 Мастильно-охолоджуюча рідина для абразивної обробки підшипників ковзання з високолегованих композитів

Безпосередньо новий спосіб оброблення відноситься до галузі технології машинобудування, зокрема, до високоточних оздоблювальних методів обробки поверхонь отворів деталей тертя з високолегованих композиційних матеріалів на основі сплавів заліза, що належать до класу важкооброблюваних сплавів зі спеціальними властивостями, наприклад, деталей аерокосмічної техніки,

газотурбінних систем, компресорних магістральних газогонів та деталей тертя (підшипники ковзання, вкладні сегменти) високошвидкісних поліграфічних машин офсетного друку, що працюють в умовах тертя при жорстких режимах експлуатації (температура до 700 °С, тиск 5,0 – 8,0 МПа або швидкості обертання до 500 об./хв. при тиску 2,0 – 4,0 МПа).

Високоточне фінішно-оздоблювальне оброблення вказаних композиційних сплавів із застосуванням відомих мастильно-охолоджуючих рідин не забезпечує виконання необхідних технічних вимог до якості поверхонь таких деталей, які піддаються при роботі інтенсивним експлуатаційним навантаженням, що впливає на техніко-економічні показники спеціальної техніки, зокрема, на параметри надійності (зносостійкість, довговічність, ремонтоздатність). Ці показники залежать від параметрів якості поверхонь оброблення деталей вказаної техніки (шорсткість, величина та глибина наклепу, величина та знак залишкових напружень поверхневої зони).

Для забезпечення високих параметрів якості поверхонь під час тонкої абразивної обробки важкооброблюваних високолегованих сплавів застосовують різні мастильно-охолоджуючі рідини.

Найбільш близьким до нового способу по технічній суті та ефекту, що досягається, є надтонка абразивна обробка отворів підшипників ковзання на прецизійних верстатах із застосуванням у якості мастильно-охолоджуючих речовин 3% водного розчину емульсії, індустріальних мастил та газу [26, 27].

Недоліками цих рідин є технічна неможливість впливу на мінімізацію параметрів наклепу та шорсткості поверхні в оброблюваній зоні та відсутність засобів керування процесом надтонкої абразивної обробки для підвищення параметрів якості поверхонь тертя.

В основу корисної моделі поставлено задачу підвищення якості поверхонь обробки отворів деталей тертя з високолегованих важкооброблюваних композиційних матеріалів шляхом застосування нової мастильно-охолоджуючої рідини, яка суттєво зменшує сили тертя абразивного зерна у складі круга з поверхнею оброблення при зрізанні стружки, знижує

складові сил різання та сприяє перерозподілу теплових потоків на ріжучому лезі абразиву. Усе це дозволяє суттєво покращити показники шорсткості оброблених поверхонь.

Реалізація задачі покращення параметрів якості поверхонь підшипників ковзання з композиційних матеріалів на основі заліза відбувається за рахунок застосування запропонованої мастильно-охолоджуючої рідини, що містить дистильовану воду, згідно корисної моделі новим є те, що вона додатково містить олеїнову кислоту, мурашкову кислоту, гліцерин, дисульфід молібдену, 10% розчин аміаку, індустріальне мастило “И-20” при наступному співвідношенні компонентів об. %: олеїнова кислота - $5 \div 10$; мурашкова кислота - $3 \div 5$; гліцерин - $10 \div 15$; дисульфід молібдену - $3 \div 5$; 10% водний розчин аміаку - $2 \div 3$; індустріальне мастило “И-20” - $10 \div 15$; дистильована вода – решта, при цьому компоненти рідини безпосередньо перед застосуванням протягом 40 -50 хв. змішують в ультразвукових ваннах під тиском 3 – 5 атм. і частотою коливань ультразвуку в межах 25 – 50 кГц.

Покращення якості поверхонь тертя підшипників ковзання може бути пояснено тим, що усі складові мастильно-охолоджуючої рідини, діючи одночасно і у сукупності, виконують, при зрізанні стружки окремим абразивним зерном свої, притаманні тільки їм, функціональні задачі, впливаючи на складні фізичні процеси, які відбуваються у тонкому шарі при зрізанні стружки, а саме, суттєво впливають на формування силового і теплового полів.

Зокрема, індустріальне мастило “И-20” та гліцерин зменшують тертя ріжучої кромки абразивного інструменту зерна по металу при переміщенні інструменту вздовж поверхні оброблення, а відповідно, сприяють утворенню мінімальних сил різання і зменшують спотворення поверхневого шару деталі. Цьому також сприяє дія олеїнової та мурашкової кислот. Крім того, ці складові всотуються у поверхню композиційного пористого матеріалу, адсорбуючись нею, завдяки чому відбувається легке зрізання стружки, а це, відповідно, також

зменшує складові сил різання i , як наслідок, у свою чергу, спрощує процес зрізання стружки та зменшує залишкові напруження поверхневого шару.

Наявність домішки дисульфиду молібдену підвищує ріжучу здатність абразивного інструменту i , у свою чергу, мінімізує дефекти поверхні оброблення, одночасно дозволяючи покращити оброблюваність матеріалу та забезпечити отримання найкращої шорсткості поверхні, перш за все, досягти мінімальних значень параметру якості поверхні R_a .

В цілому склад запропонованого розчину знижує температури у зоні абразивної обробки, що може бути пояснено більшою здатністю рідини до тепловідведення. Це також покращує співвідношення взаємодії силового та температурного полів на вістрі ріжучого абразивного зерна i , як наслідок, покращує параметри шорсткості та фізичні властивості поверхневого шару – ступеню наклепу, спотворення II-го роду, глибини розповсюдження наклепу, знаку та величини залишкових напружень (табл. 1.10, 1.11).

Ефективність застосування запропонованої мастильно-охолоджуючої рідини досягається за умови попереднього (безпосередньо перед обробкою композитів) активного змішування компонентів протягом 40 – 50 хв. в ультразвукових ваннах під тиском 3 – 5 атм. і частотою коливань ультразвуку 25 – 50 кГц (табл. 1.12).

При використанні відомих мастильно-охолоджуючих рідин при абразивній обробці поверхонь підшипників ковзання з високолегованих композиційних сплавів на основі заліза параметри якості поверхонь знижуються.

Таблиця 1.10 Вплив складу мастильно-охолоджуючої рідини на параметри якості поверхонь при обробці зразків з композиційного матеріалу 86X6НФТ + 5% CaF₂

Обробка згідно найближчого аналогу [28]		Обробка із запропонованою рідиною	
Параметри якості поверхні			
Параметр шорсткості R_a , мкм	Глибина наклепу h , мкм	Параметр шорсткості R_a , мкм	Глибина наклепу h , мкм
0,787	3 - 5	0,620	2 - 3

Примітки: 1. Шліфування однопрохідне з виходжуванням; 2. Верстат FF – 250 «Abawerk» (ФРН); 3. Режими різання: швидкість круга – 22 м/с, поздовжня подача (швидкість виробу) – 2 м/хв, глибина різання – 0,002 мм; 4. Абразивний круг з карбіду кремнію зеленого (63С) зернистістю 28 мкм на гліфталевій зв'язці (Гл).

Таблиця 1.11 Вплив складу мастильно-охолоджуючої рідини на параметри якості поверхонь при обробці зразків з композиційного матеріалу 4ХМНФС + 5% CaF₂

Обробка згідно найближчого аналогу [28]		Обробка із запропонованою рідиною	
Параметри якості поверхні			
Параметр шорсткості R _a , мкм	Глибина наклепу h, мкм	Параметр шорсткості R _a , мкм	Глибина наклепу h, мкм
0,795	5 - 7	0,635	3 - 4

Примітки: 1. Шліфування однопрохідне з виходжуванням; 2. Верстат FF – 250 «Abawerk» (ФРН); 3. Режими різання: швидкість круга – 22 м/с, поздовжня подача (швидкість виробу) – 2 м/хв, глибина різання – 0,002 мм; 4. Абразивний круг з карбіду кремнію зеленого (63С) зернистістю 28 мкм на гліфталевій зв'язці (Гл).

Таблиця 1.12 Вплив часу ультразвукового змішування запропонованої мастильно-охолоджуючої рідини на параметри якості поверхонь зразків з композиційного матеріалу 86Х6НФТ+5% CaF₂

Час змішування, хв.	Параметри якості поверхні		
	Параметр шорсткості R _a , мкм	Глибина наклепу h, мкм	Спотворення II –го роду $\Delta a/a \cdot 10^{-4}$
15	1,210	8 – 10	21,01
30	0,975	6 – 7	19,47
40	0,787	3 – 5	18,31
50	0,775	3 - 5	16,90

Примітки: 1. Шліфування однопрохідне з виходжуванням; 2. Верстат FF – 250 «Abawerk» (ФРН); 3. Режими різання: швидкість круга – 22 м/с, поздовжня подача (швидкість виробу) – 2 м/хв, глибина різання – 0,002 мм; 4. Абразивний круг з карбіду кремнію зеленого (63С) зернистістю 28 мкм на гліфталевій зв'язці (Гл).

Нова мастильно-охолоджуюча рідина для абразивної обробки поверхонь підшипників ковзання з високолегованих композиційних сплавів може використовуватись як при обробці отворів деталей, так і для абразивного шліфування плоских та зовнішніх круглих поверхонь деталей.

Нова рідина може бути використана для надтонкої абразивної обробки спеціальних деталей аерокосмічних систем, деталей тертя газотурбінних і компресорних станцій магістральних газогонів та високошвидкісних підшипників ковзання поліграфічних машин офсетного друку.

1.3.2 Спосіб підготовки мастильно-охолоджуючої рідини для абразивної обробки підшипників ковзання з високолегованих композитів

Як неодноразово підкреслювалось при дослідженнях технологічних процесів тонкого абразивного шліфування нових важкооброблюваних високолегованих

композитів широко застосовувались різні склади емульсій з вмістом вихідних продуктів таких, як ЕТ – 2, НГЛ – 205, «Укринол - 1», синтетичних МОР на базі синтетичних продуктів «Аквол - 10» з концентрацією 2,5 та 7%, а також синтетичних мастильно-охолоджуючих рідин з включенням у їх склад вихідних продуктів «Cindolibe 173 Ер (концентрація ~ 1,7%) та «Укринол - 12» (концентрація ~ 5%).

Крім того, в деяких випадках використовувались вуглеводні МОР (масло) на основі продукту «Укринол - 14» (концентрація ~ 100%) [29 - 31].

Проте, у випадках обробки деталей тертя з прецизійною точністю та необхідністю забезпечення мінімальних показників параметрів шорсткості R_a , мінімізації глибини та ступеню наклепу i , особливо, при надтонкій обробці шліфуванням композиційних сплавів, що леговані нікелем, вольфрамом, ванадієм, ніобієм та молібденом [27, 28] і відносяться до класу важкооброблюваних композитів наведені МОР не завжди забезпечували вимоги виробництва [31, 32].

Це обумовило необхідність створення спеціальних мастильно-охолоджуючих рідин та особливих методик їх підготовки до застосування [33].

Спеціальна мастильно-охолоджуюча рідина, що створюється з метою підвищення якості оброблення відноситься до галузі технології машинобудування, зокрема, до способів високоточних оздоблювальних методів обробки поверхонь отворів деталей тертя з високолегованих композитних матеріалів на основі відходів інструментальних сталей, що належать до класу важкооброблюваних сплавів зі спеціальними властивостями, наприклад, деталей аерокосмічної техніки, газотурбінних систем, компресорних станцій магістральних трансєвропейських газогонів та деталей тертя (підшипники ковзання, вкладні, сегменти) високошвидкісних поліграфічних машин офсетного друку, що працюють в умовах тертя при жорстких режимах експлуатації (температура до 700 °С, тиск 5,0 – 8,0 МПа або швидкості обертання до 500 об/хв., тиск 2,0-4,0 МПа).

Високоточне фінішно-оздоблювальне оброблення вказаних важкооброблюваних композитних сплавів відомими технологічними методами не забезпечує виконання необхідних технічних вимог до якості поверхонь таких деталей, які піддаються при роботі інтенсивним експлуатаційним навантаженням, що впливає на техніко – економічні показники спеціальної техніки, зокрема, на параметри надійності (зносостійкість, довговічність, ремонтоздатність).

Ці показники залежать від параметрів якості поверхонь оброблення деталей вказаної техніки (шорсткість, величина та глибина наклепу, величина та знак залишкових напружень поверхневої зони).

Найбільш близьким до корисної моделі по технічній суті та ефекту, що досягається, є надтонке внутрішнє шліфування отворів деталей на верстатах прецизійної точності за допомогою спеціальних абразивних інструментів із застосуванням у якості мастильно-охолоджуючих засобів 3% водного розчину емульсії, індустриальних мастил, гасу та охолоджуючих рідин «Укрнітол» та «Волжаночка» [33].

Недоліками цих рідин є технічна неможливість забезпечення мінімізації параметрів наклепу та шорсткості поверхні в оброблюваній зоні та відсутність засобів керування процесом надтонкої абразивної обробки для підвищення параметрів якості поверхонь тертя.

В основу розробки нової рідини поставлено задачу підвищення якості поверхонь обробки отворів деталей тертя з високолегованих важкооброблюваних композитних матеріалів шляхом зрізання тонких стружок абразивними зернами інструменту за рахунок суттєвого зниження складових сил різання у зоні обробки завдяки зменшенню тертя зерен інструменту по поверхні оброблення. При цьому застосовується спеціальний склад мастильно-охолоджуючої рідини (МОР).

Поставлена задача досягається тим, що у запропонованому способі надтонкої абразивної обробки отворів деталей тертя з високолегованих композитних матеріалів на основі відходів інструментальних сталей

абразивними інструментами з карбіду кремнію зеленого на гліфталевій зв'язці, в якому оброблювана деталь обертається навколо своєї осі з одночасним зрізанням стружки з поверхні отвору абразивним інструментом при його обертанні навколо осі, паралельної осі отвору деталі і застосуванням мастильно-охолоджуючої рідини зі складом, об. %: олеїнова кислота - $5 \div 10$; мурашкова кислота - $3 \div 5$; гліцерин - $10 \div 15$; дисульфід молібдену - $3 \div 5$; 10% водний розчин аміаку - $2 \div 3$; індустріальне мастило "И-20" - $10 \div 15$; дистильована вода – решта, який відрізняється тим, що вказана рідина змішується протягом 40-50 хв. у герметичних ультразвукових ваннах за тиску 3 – 5 атм. і частоти коливань ультразвуку в межах 25 – 50 кГц, та безперервно протягом технологічного процесу оброблення поверхонь у стані постійного перемішування подається у зону обробки зі швидкістю 2 – 5 л/хв.

Спосіб здійснюється наступним чином.

Деталь циліндричної форми з оброблюваним отвором затискається у пристрої верстату. Абразивний інструмент у вигляді абразивного круга з карбіду кремнію зеленого на гліфталевій зв'язці розміщується у отворі деталі так, щоб вісь обертання круга була паралельна осі обертання деталі. Одночасно абразивні зерна входять у робочий контакт з поверхнею оброблення і інструменту надається переміщення вздовж осі деталі, при цьому в зону зрізання стружки подається мастильно-охолоджуюча рідина наступного складу, об. %: олеїнова кислота - $5-10$; мурашкова кислота - $3 \div 5$; гліцерин - $10 \div 15$; дисульфід молібдену - $3 \div 5$; 10% водний розчин аміаку - $2 \div 3$; індустріальне мастило "И-20" - $10 \div 15$; дистильована вода – решта. Компоненти рідини безпосередньо перед застосуванням протягом 40-50 хв. змішують в ультразвукових ваннах за тиску 3 – 5 атм. і частоти коливань ультразвуку в межах 25 – 50 кГц, а після цього у стані постійного перемішування рідина подається у зону обробки зі швидкістю 2 – 5 л/хв. протягом всього технологічного процесу оброблення поверхонь отворів деталей тертя.

Спосіб реалізується за схемою, наведеною на рис. 1.6.

Деталь 1 з отвором затискається у пристрої 3 верстата прецизійної точності і обертається зі швидкістю V_d .

Абразивний круг 2 з відповідною оправкою розташовується в отворі деталі і обертається зі швидкістю V_i .

Абразивний круг 2 за розрахунок відповідної кінематики верстату здійснює переміщення вздовж осі оброблення зі швидкістю V_n . Круг 2 має жорсткий контакт з деталлю 1, внаслідок чого зрізується припуск на обробку t .

В процесі зрізання стружок з поверхні оброблення у ріжучу зону за допомогою трубопроводу 4 подається мастильно-охолоджуюча рідина 5 наступного складу, об. %: олеїнова кислота - 5-10; індустріальне мастило «И-20» - 12-15; гас - 65-70.

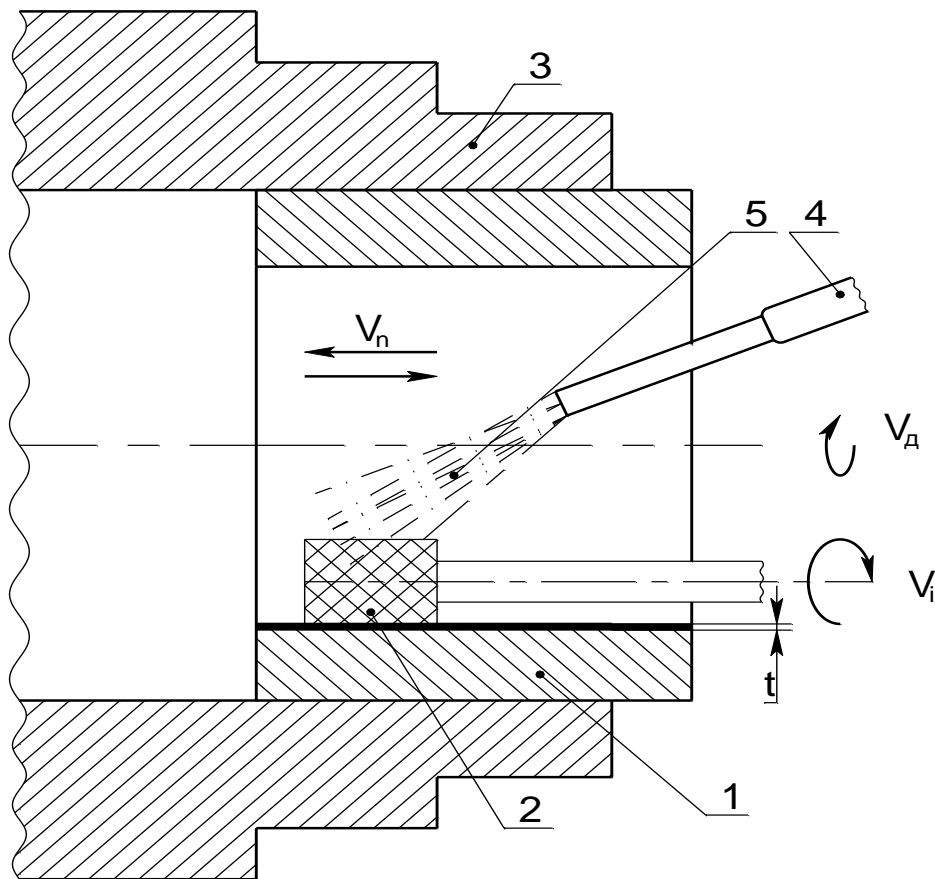


Рисунок 1.6 Спосіб надтонкої абразивної обробки отворів деталей тертя з високолегованих композитних матеріалів

Особливостями даного способу обробки деталей є не тільки попереднє ретельне змішування мастильно-охолоджуючої рідини протягом 40-50 хв. в ультразвукових ваннах за тиску 3 – 5 атм. і частоти коливань ультразвуку в межах 25 – 50 кГц, але й інтенсивна подача рідини у стані постійного

перемішування у зону обробки зі швидкістю 2 – 5 л/хв. протягом всього технологічного процесу оброблення поверхонь отворів деталей тертя.

Завдяки цьому досягається ефект зменшення тертя абразивних зерен з оброблюваною поверхнею, що обумовлює суттєве зниження складових сил різання, які виникають при стружкоутворенні. Ці фактори, у свою чергу, впливають на фактичну глибину різання та переріз стружки, що призводить до покращення якості поверхні оброблення, зокрема, суттєво (на 20-30 %) зменшуються параметри шорсткості, спотворення поверхневих шарів (напруження II –го роду, $\frac{\Delta a}{a}$) як основної характеристики наклепу, при цьому одночасно відбувається зменшення (на 30-35%) глибини проникнення наклепу у поверхневий шар деталі. Це безпосередньо впливає на параметри довговічності та зносостійкості готових виробів.

При використанні традиційних технологій оброблення отворів деталей параметри якості поверхонь оброблення знижуються (табл. 1.13, 1.14).

Таблиця 1.13 Вплив складу мастильно-охолоджуючої рідини на параметри якості поверхні при обробці отворів деталей з композитного матеріалу на основі відходів інструментальної сталі 86Х6НФТ + 5% CaF₂ при застосуванні абразивного круга з карбіду кремнію зеленого зернистістю 28 мкм на гліфталевій зв'язці

Обробка згідно найближчого аналогу [35]			Обробка згідно запропонованого способу		
Параметр шорсткості Ra, мкм	Глибина наклепу h, мкм	Спотворення II –го роду $\frac{\Delta a}{a} \cdot 10^{-4}$	Параметр шорсткості Ra, мкм	Глибина наклепу h, мкм	Спотворення II –го роду $\frac{\Delta a}{a} \cdot 10^{-4}$
0,700	8-10	17-20	0,570	6-7	15-16

Таблиця 1.14 Вплив швидкості подачі мастильно-охолоджуючої рідини у зону різання на якість поверхні при абразивній обробці отворів деталей з композитного матеріалу на основі відходів інструментальної сталі 86Х6НФТ + 5% CaF₂

Швидкість подачі МОР у зону оброблення л/хв.	Параметри якості поверхні		
	Параметр шорсткості Ra, мкм	Глибина наклепу h, мкм	Спотворення II –го роду $\frac{\Delta a}{a} \cdot 10^{-4}$
0,5-1	0,570	6-7	14-15
2-5	0,570	6-7	15-16
5-8	0,600	8-9	16-17
9-12	0,650	10-11	17-18

Спосіб надтонкої абразивної обробки отворів деталей тертя з високолегованих композитних матеріалів на основі відходів інструментальних сталей може використовуватись при обробці спеціальних деталей для аерокосмічних систем, деталей тертя газотурбінних і компресорних станцій магістральних газогонів, ракетних двигунів та швидкісних підшипників ковзання поліграфічних машин офсетного друку.

1.4 Спосіб тонкої абразивної обробки циліндричних отворів деталей обертання з високолегованих композитів

З урахуванням наведених вище методологічних напрацювань були виконані численні та різнопланові дослідження особливостей технологічних процесів фінішного абразивного оброблення деталей тертя для поліграфічних машин різного призначення, які виготовлені з нових високо зносостійких матеріалів, синтезованих зі шламових відходів інструментальних сталей, а також кольорових металів – нікелю, міді та алюмінію.

Головною метою досліджень у цьому напрямку було вивчення основних закономірностей забезпечення вимог досягнення найвищих параметрів якості поверхонь деталей тертя з нових марок високо зносостійких композитів різними технологічними методами, які забезпечують отримання нормованих рівнів зносостійкості, довговічності, ремонтоздатності та одного з найголовніших параметрів надійності – отримання максимально можливого коефіцієнта готовності.

Виконання цих вимог досягається через забезпечення технологічними методами мінімального рівня параметру шорсткості R_a , мінімальних структурно-фазових перетворень поверхневого шару деталі, що обробляється, зокрема, мінімальних спотворень II – го роду $\Delta a/a \cdot 10^{-4}$, ступеню наклепу K , мінімізації глибини h проникнення наклепу у тіло деталі, а також отримання необхідних значень рівня злишкових напружень поверхневого шару оброблення та їх знаку (розтяг чи стиск).

У зв'язку з цим, ретельно та всебічно досліджені процеси тонкого плоского, круглого зовнішнього, круглого внутрішнього абразивного

шліфування, шліфування інструментами з природних алмазів, а також шліфувальними кругами з надтвердих синтетичних матеріалів (алмази, синтетичні, кубоніти, ельбори, боразони). Також було вивчено особливості технологічних процесів надтонкого викінчувально-оздоблювального фінішного оброблення поверхонь деталей тертя суперфінішуванням, хонінгуванням, прецизійною плоскою машинною доводкою та поліруванням феромагнітно-абразивними мікропорошками у магнітному полі (магнітно-абразивна обробка - МАО).

Всебічно досліджувався вплив на параметри якості поверхонь оброблення деталей (шорсткість, точність, наклеп, залишкові напруження) режимних факторів різних технологічних методів формування форми та розмірів деталей і, перш за все, таких найвпливовіших як режими різання при шліфуванні, прецизійній машинній доводці, суперфінішуванні, хонінгуванні, МАО, а також таких важливих факторів як тип алмазно-абразивного інструменту (природні алмази, алмази синтетичні, кубоніти, ельбори, боразони, найсучасніші абразиви – карбід кремнію зелений, карбід кремнію чорний, електрокорунд білий, електрокорунд хром частий, електрокорунд титановий, монокорунд та ін.), їх зернистість, тип зв'язки, процентний склад основної зернової фракції, пористість, склад і метод подачі у зону різання мастильно – охолоджуючої рідини (МОР). На базі виконаних досліджень створені технологічні регламенти для виробництва. Після їх апробації, випробувань та аналізу промислового досвіду окремі технічні рішення проблеми тонкої абразивної обробки нових високолегованих, зносостійких та важкооброблюваних композиційних матеріалів були захищені відповідними патентами України.

Основні з них представлені у подальших розділах третьої частини монографії.

Сутність нового способу прецизійного абразивного оброблення плоских поверхонь деталей тертя з композиційних сплавів на основі штампових та інструментальних сталей 86Х6НФТ, 4ХМНФС, 5Х3В3МФС, 7Х2ВМФ, 11Р3АМ3Ф2 та ін. базується на комплексі технологічних досліджень обробки

нових композитів, які були виконані авторами у попередні роки і результати яких викладені у ряді науково-технічних публікацій [33 - 35].

Безпосередньо спосіб тонкої абразивної обробки циліндричних отворів деталей обертання з високолегованих композитів.

Новий спосіб відноситься до галузі технології машинобудування, зокрема, до способів прецизійних фінішних методів обробки поверхонь отворів деталей з високолегованих композитних матеріалів на основі нікелю, вольфраму, ванадію, титану, кобальту, заліза, що належить до групи важкооброблюваних сплавів зі спеціальними властивостями, наприклад, деталей аерокосмічної техніки, компресорних станцій магістральних газогонів та високошвидкісних поліграфічних машин, а також деталей, що працюють в умовах тертя при жорстких режимах експлуатації (температура середовища до 800 °C та тиск до 8,0 МПа або швидкості обертання до 400 об/хв. та тиску 2,5-5,0 МПа).

Прецизійна обробка таких матеріалів відомими технологічними методами не забезпечує необхідних технічних параметрів якості, обумовлених вимогами специфічних умов експлуатації відповідної техніки.

Найбільш близьким до нового способу по технічній суті та ефекту, що досягається, є тонке внутрішнє шліфування отворів деталей на верстатах прецизійної точності за допомогою спеціальних абразивних інструментів.

Недоліками відомого способу є незадовільні параметри наклепу в робочій зоні оброблювання та неможливість суттєвого зменшення шорсткості поверхонь.

В основу створення нового способу поставлено задачу підвищення якості поверхонь оброблення отворів деталей обертання з високолегованих композитів забезпеченням утворення складної траєкторії руху ріжучого зерна абразивного інструменту у вигляді кола на еластичній зв'язці, здатної пружно демпфувати сили різання, які виникають при зніманні надтонких стружок з поверхні оброблення і формують параметри наклепу, зокрема, глибини наклепу та показники характеристик шорсткості, шляхом застосування абразивів з

карбіду кремнію зеленого зернистістю 10-30 мкм на еластичній гліфталевій зв'язці з інтенсивним використанням мастильно – охолоджуючої рідини.

Поставлена задача досягається тим, що у запропонованому способі тонкої абразивної обробки циліндричних отворів деталей обертання з високолегованих композитів оброблювана деталь обертається навколо своєї осі з одночасним зніманням стружки з поверхні отвору абразивним інструментом при обертанні навколо осі, розташованій паралельно осі отвору деталі, з жорстким контактуванням інструменту з поверхнею оброблення і переміщенням вздовж осі деталі із застосуванням для обробки абразивних інструментів з карбіду кремнію зеленого зернистістю 10-30 мкм, на еластичній гліфталевій зв'язці з інтенсивною подачею мастильно – охолоджуючої рідини.

Спосіб здійснюється наступним чином.

Деталь циліндричної форми з внутрішнім отвором, що обробляється, затискається у пристрої верстату. Абразивний інструмент у вигляді круга, що складається з абразивних зерен, які утримуються разом за допомогою гліфталевої зв'язки, розміщується у отворі деталі так, щоб вісь обертання круга була паралельна осі обертання деталі. Одночасно абразивні зерна входять у контакт з поверхнею оброблення, а інструменту надаються переміщення вздовж осі деталі, при цьому у зону знімання стружки подається мастильно – охолоджуюча рідина.

Спосіб реалізації нового способу обробки здійснюється за схемою, наведено на рис. 1.7.

Деталь 1 з отвором затискається у пристрої 3 верстата прецизійної точності і обертається зі швидкістю V_d . Абразивний круг 2 з відповідною оправкою розташовується в отворі деталі і обертається зі швидкістю V_i .

Абразивний круг 2 за розрахунок відповідної кінематики верстату здійснює переміщення вздовж осі оброблення зі швидкістю V_n . Круг 2 має жорсткий контакт з деталлю 1, внаслідок чого знімається припуск на обробку t .

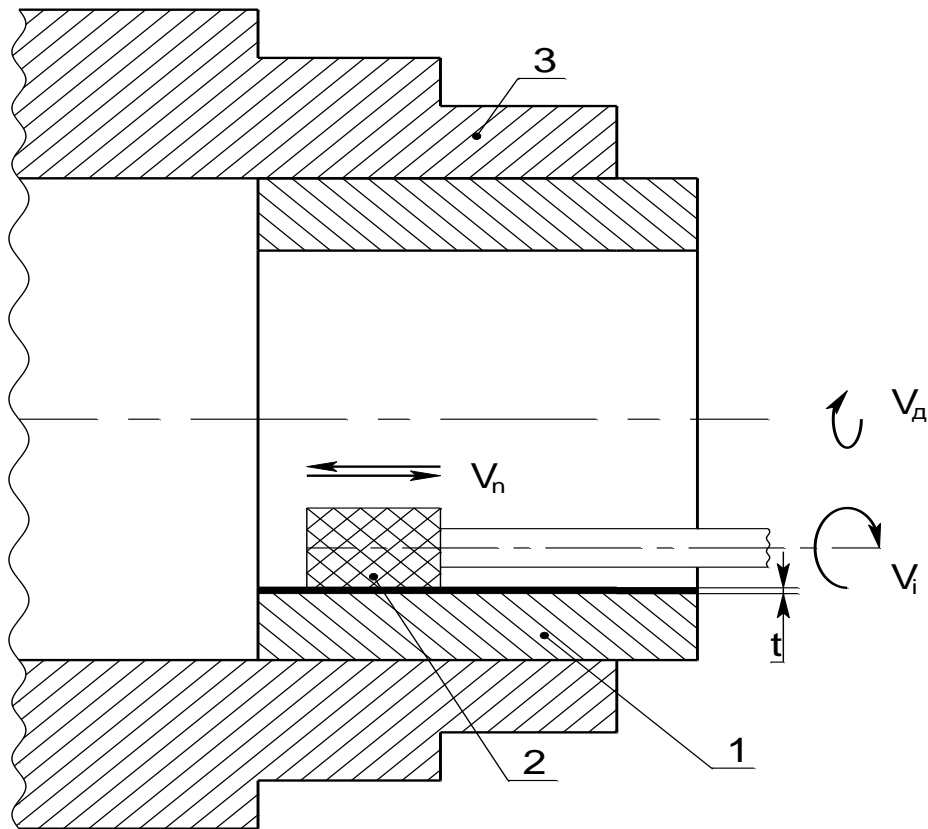


Рисунок 1.7 Спосіб тонкої абразивної обробки циліндричних отворів деталей обертання з високолегованих композитів

Завдяки застосуванню еластичної гліфталевої зв'язки кругу ріжучі абразивні зерна під дією сил різання пружно демфують, зменшуючи таким чином фактичну глибину різання t . Це позитивно впливає на всі параметри різання, обумовлюючи підвищення якості поверхні оброблення. Одночасно в зону обробки інтенсивно подається мастильно – охолоджуюча рідина. Застосування в якості ріжучих зерен карбіду кремнію з зернистістю в межах 10-30 мкм у поєднанні з гліфталевою зв'язкою забезпечує підвищення якості поверхонь на 20-30 % у порівнянні зі способом, здійсненим за найближчим аналогом. При використанні традиційних технологічних схем оброблення, що відрізняються від запропонованої, параметри якості поверхні знижуються (табл. 1.15, 1.16).

Таблиця 1.15 Вплив зв'язки та матеріалу зерна абразивного інструменту зернистістю 28 мкм на параметри якості поверхні при обробці отворів з важкооброблюваних композиційних матеріалів на основі нікелевого сплаву ЭИ929

№ п/п	Матеріал абразиву	Обробка згідно найближчого аналогу, інструментом на керамічній зв'язці		Обробка згідно запропонованого способу, з інструментом на гліфталевій зв'язці	
		Параметр шорсткості Ra, мкм	Глибина наклепу h, мкм	Параметр шорсткості Ra, мкм	Глибина наклепу h, мкм
1	Карбід кремнію зелений	0,657	8-10	0,570	6-7
2	Електрокорунд білий	0,710	11-13	0,690	10-11
3	Монокорунд	0,800	13-15	0,715	12-13

Таблиця 1.16 Вплив зернистості інструменту на гліфталевій зв'язці з карбиду кремнію зеленого на параметри якості поверхні при обробці отворів деталей з важкооброблюваних композиційних матеріалів на основі нікелевого сплаву ЭИ929

№ п/п	Зернистість, мкм	Параметр шорсткості Ra, мкм	Глибина наклепу h, мкм	Спотворення II –го роду $\frac{\Delta a}{a} \cdot 10^{-4}$
1	50	1,18	15-20	17,94
2	28	0,570	6-7	15,63
3	7	0,256	3-5	11,40

Спосіб тонкої абразивної обробки циліндричних отворів деталей обертання з високолегованих композитних може використовуватись при виготовленні деталей апаратурних комплексів аерокосмічних систем, деталей тертя газотурбінних і компресорних станцій магістральних газогонів та високошвидкісних підшипників ковзання поліграфічних машин.

1.5 Спосіб фінішної прецизійної оздоблювальної обробки отворів деталей обертання з високолегованих композитів

Даний спосіб абразивної обробки високолегованих композиційних сплавів, синтезованих зі шламових відходів штампових та швидкорізальних інструментальних сталей, базується на отриманих наукових висновках з досліджень технологічних процесів їх тонкого абразивного шліфування, які

протягом останніх років були виконані авторами цієї монографії, опубліковані в роботах [36 - 38], пройшли експертну перевірку на патентну чистоту щодо аналогічних розробок у провідних державах світу глибиною 40 – 50 років та захищені патентом України № 77356 [39].

Новий спосіб обробки відноситься до галузі технології машинобудування, зокрема, до способів фінішної прецизійної оздоблювальної алмазно-абразивної обробки деталей з високолегованих композитів на основі заліза і нікелю, призначених для вузлів машин і приладів, що експлуатуються у жорстких умовах (температура в діапазоні 500 - 800 °С, тиск у межах 5,0 – 8,0 МПа на повітрі).

Найбільш близьким до нового способу по технічній суті та ефекту, що досягається, є прецизійне абразивне шліфування внутрішніх циліндричних поверхонь деталей обертання на верстатах підвищеної точності за допомогою спеціальних дрібнозернистих абразивних інструментів та застосуванням мастильно-охолоджуючих рідин [40].

Недоліками відомого способу [40] є технічна неможливість забезпечення високих параметрів якості поверхонь оброблення внаслідок застосування режимів різання, які по своїй суті непридатні для оброблення спеціальних композитних сплавів.

В основу створення нового способу обробки поставлено задачу підвищення якості поверхонь обробки отворів деталей тертя з високолегованих важкооброблюваних композитних сплавів завдяки суттєвому зменшенню складових сил різання безпосередньо у зоні оброблення та зменшенню навантажень на мікрооб'єми зрізаного абразивними зернами металу при одночасному зменшенні мікрODEФОРМАЦІЙ при зрізанні стружки і, внаслідок цього, суттєвого покращення якості поверхні (зменшення шорсткості, спотворень II роду, як основного параметру наклепу, та глибини наклепу у приповерхневому шарі), шляхом використання надтонких режимів різання для абразивних інструментів, що мінімізують сили різання.

Поставлена задача досягається тим, що у запропонованому способі фінішної прецизійної оздоблювальної обробки отворів деталей обертання з високолегованих композитів дрібнозернистими абразивними інструментами з карбіду кремнію зеленого на гліфталевій зв'язці при інтенсивній подачі у зону обробки мастильно-охолоджуючих речовин (МОР) оброблювана деталь обертається навколо своєї осі з одночасним зрізанням стружки з поверхні отвору абразивним кругом при його обертанні навколо осі, паралельної осі отвору деталі, з жорстким контактуванням інструменту з поверхнею оброблення і переміщенням його вздовж осі деталі, який відрізняється тим, що обробка поверхні відбувається за такими технологічними режимами: швидкість обертання деталі 2-10 м/хв., швидкість обертання абразивного круга 20-25 м/с, швидкість повздовжнього переміщення абразивного круга вздовж осі отвору поверхні оброблення 0,1-0,3 м/хв., глибина різання 2-10 мкм.

Спосіб здійснюється наступним чином.

Деталь циліндричної форми з отвором закріплюють у технологічному пристрої верстату. Абразивний інструмент круглої форми типу ПП (плоский, прямий) з карбіду кремнію зеленого на еластичній гліфталевій зв'язці розташовується у отворі деталі так, щоб його вісь обертання була паралельною осі отвору оброблюваної деталі. Абразивний круг входить у жорсткий контакт з поверхнею оброблення, а інструмент отримує переміщення вздовж осі деталі, з одночасною подачею в зону зрізання стружки мастильно-охолоджуючої рідини зі складом, об. %: олеїнова кислота - (5-10%) індустріальне мастило «И-20» - (12-15%), гас - (65-70%) зі швидкістю подачі цієї суміші 2-5 л/хв., при цьому обробка поверхні отвору деталі відбувається за такими технологічними режимами – швидкість обертання деталі $V_d = 2-10$ м/хв., швидкість обертання абразивного круга $V_i = 20-25$ м/с, швидкість повздовжнього переміщення абразивного круга V_n вздовж своєї осі 0,1-0,3 м/хв., глибина різання 2-10 мкм. Спосіб ілюструється схемою, наведеною на рис. 1.8.

Деталь 1 з отвором затискається у пристрої 3 верстату прецизійної точності і обертається зі швидкістю V_d .

Абразивний круг 2 за допомогою оправки розташовується в отворі деталі і обертається зі швидкістю V_i .

За рахунок кінематики верстату круг 2 переміщується вздовж осі оброблення зі швидкістю V_n . Абразивний круг 2 має жорсткий контакт з деталлю 1, внаслідок чого зрізається припуск на обробку t .

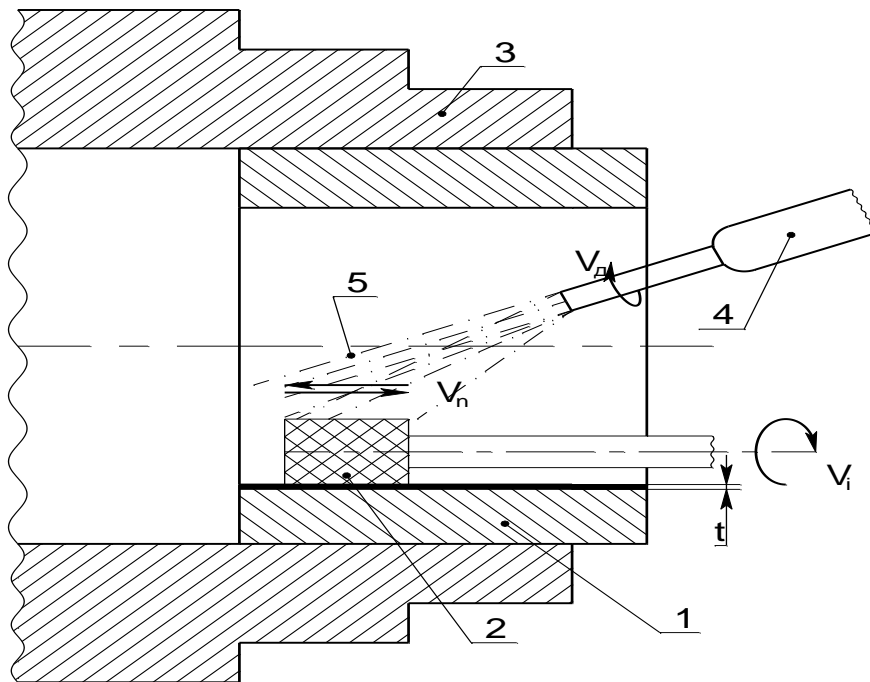


Рисунок 1.8 Спосіб фінішної прецизійної оздоблювальної обробки отворів деталей обертання з високолегованих композитів

В процесі зрізання стружки у зону оброблення за допомогою трубопроводу 4 інтенсивно подається мастильно-охолоджуюча рідина 5. Запропонований спосіб обробки здійснюється за такими режимами: $V_d = 2-10$ м/хв., $V_i = 20-25$ м/с, $V_n = 0,1-0,3$ м/хв., $t = 2-10$ мкм.

Завдяки наведеним режимам різання забезпечується суттєве зменшення складових сил різання у зоні оброблення. У поєднанні з еластичною зв'язкою інструменту, яка має можливість виконувати роль пружного демпфера (при умові застосування абразивних кругів з карбіду кремнію зеленого з зернами найгострішої форми у порівнянні з електрокорундом білим чи монокорундом), досягається зменшення глибини врізання зерен у об'єм оброблюваної деталі, зменшується переріз стружки, яка зрізається з поверхні оброблення, а також

знижуються пластичні деформації у зоні різання. Це обумовлює підвищення параметрів якості поверхонь, зокрема, суттєво покращується параметр шорсткості R_a , зменшуються спотворення II –го роду $\frac{\Delta a}{a} \cdot 10^{-4}$, що характеризують значення наклепу, та глибини залягання наклепу у при поверхневій зоні оброблення деталі.

Використання технологічних режимів, які виходять за межі рекомендованих діапазонів, параметри якості поверхонь знижуються (табл. 1.17, 1.18).

Таблиця 1.17 Складові сили різання та глибина різання при обробці отворів деталей з високолегованих композитів на основі сплаву ЭИ929 згідно запропонованого способу та найближчого аналогу

Глибина різання t , мкм	Складові питомих сил різання					
	P_z , Н/см		P_y , Н/см		P_x , Н/см	
	Згідно найближчого аналогу [1]	Згідно створеного способу	Згідно найближчого аналогу [1]	Згідно створеного способу	Згідно найближчого аналогу [1]	Згідно створеного способу
0,002	15	8	20	12	2,1	1,3
0,005	35	10	45	15	2,8	1,5
0,01	50	20	65	30	3,5	1,5
0,02	70	30	79	50	3,9	1,7
0,05	110	70	170	100	4,8	1,78

Окрім підвищення параметрів якості оброблюваної поверхні деталі одночасно оброблення стає більш технологічним – спрощується процес фінішної прецизійної обробки.

Таблиця 1.18 Параметри якості поверхні при абразивній обробці отворів деталей з високолегованих композитів на основі сплаву ЭИ929 згідно запропонованого способу та найближчого аналогу

Обробка згідно найближчого аналогу			Обробка згідно нового способу		
Параметр шорсткості R_a , мкм	Глибина наклепу h , мкм	Спотворення II –го роду $\frac{\Delta a}{a} \cdot 10^{-4}$	Параметр шорсткості R_a , мкм	Глибина наклепу h , мкм	Спотворення II –го роду $\frac{\Delta a}{a} \cdot 10^{-4}$
0,570	8-10	17-20	0,250	2-3	8-9

Спосіб фінішної прецизійної оздоблювальної обробки отворів деталей обертання з високолегованих композитів може застосовуватись при обробці

деталей спеціальної техніки, зокрема, в аерокосмічних системах, газотурбінних двигунах, компресорних станціях газогонів та високошвидкісних поліграфічних машинах, що працюють у жорстких умовах експлуатації [39].

1.6 Спосіб абразивного оброблення плоских поверхонь зносостійких деталей тертя друкарської техніки з легованих композитів на основі алюмінію

Фінішне надтонке оброблення зносостійких композиційних сплавів на основі алюмінію має ряд специфічних особливостей. Це детально вивчалось авторами монографії у попередні роки і опубліковано у численних наукових виданнях [40 - 45]. Науково обґрунтовані висновки та рекомендації для промислового виробництва стали базою для створення нового способу абразивного оброблення плоских поверхонь зносостійких деталей тертя друкарської техніки з легованих композитів на основі алюмінію. Безпосередньо новий спосіб відноситься до галузі технології машинобудування, зокрема, до способів абразивного оброблення плоских поверхонь зносостійких деталей тертя друкарської техніки з легованих композитів на базі алюмінію, які виготовлені з шламових відходів обробки деталей з алюмінію у крупносерійному виробництві автотракторної та авіаційної галузей промисловості і які працюють в умовах тертя при жорстких роботах експлуатації (температура до 120 – 170 °С, питомі тиски 5 – 7 МПа, агресивне оточуюче середовище – кисень, повітря, виробничий пил з абразивними властивостями при роботі друкарської техніки з паперовою сировиною та інше).

Абразивне оброблення зазначених композитних сплавів на основі алюмінію відомими технологічними способами не забезпечує виконання технічних вимог до якості поверхонь таких деталей тертя, які піддаються при роботі інтенсивним експлуатаційним навантаженням, що впливає на параметри надійності (зносостійкість довговічність, ремонтоздатність), які залежать від параметрів якості поверхонь оброблення деталей поліграфічної техніки

(шорсткість, ступінь наклепу, величина та знак залишкових напружень поверхневої зони).

Відомий спосіб тонкого абразивного шліфування важкооброблюваних високолегованих матеріалів алфенолового класу типу Ю16, 16 ЮИХ, “Alfo” системи «алюміній-іридій-залізо-хром» при застосуванні якого використовують дрібнозернисті інструменти з карбіду кремнію зеленого (63С), зернистістю 10 – 14 мкм на еластичній гліфталевій зв’язці (Гл), а оброблення поверхонь здійснюють, призначаючи надтонкі оздоблювальні режими різання [41, 42].

Недоліком цього способу є те, що при шліфуванні сплавів з підвищеним складом у матеріалі алюмінію під час різання тонких стружок з невеликим їх перерізом (а саме такими є композитні сплави на основі алюмінію АК12М2МгН, АК12ММгН, АК8МЗч, АК12ММгН + (9 – 12) % MoS_2), відбувається миттєве окиснення субмікронних часток елементів стружки, налипання їх до ріжучої кромки абразивного зерна карбіду кремнію зеленого, що змінює умови різання у зоні оброблення, зокрема, веде до збільшення радіусу заокруглення та кута різання при вершині ріжучого поодинокого зерна. Це обумовлює передчасну втрату ріжучої здатності абразивного круга і стає причиною зниження параметрів якості поверхні оброблення деталі.

Найбільш близьким до розробленого є спосіб оброблення поверхонь композитних деталей абразивними інструментами з карбіду кремнію зеленого 63СМ14СМ2Гл з інтенсивним застосуванням тонких режимів різання та мастильно-охолоджуючої рідини (МОР) [42].

Недоліком такого способу є те, що в результаті його застосування на практиці не вдається отримати параметри шорсткості поверхні оброблення R_a менші позначень 0,600 – 0,650 мкм та глибини наклепу (дефектного шару деталі) меншого 8 – 10 мкм, що не дає змогу підвищити зносостійкість та довговічність деталей тертя поліграфічних машин.

В основу нового способу оброблення деталей поставлено задачу підвищення якості поверхонь обробки зносостійких деталей тертя з площинними поверхнями контурів деталей, виготовлених з легованих

композитних матеріалів на основі алюмінію, шляхом зрізання тонких стружок абразивними зернами інструменту за рахунок зниження складових сил різання у зоні обробки завдяки зменшенню тертя зерен інструменту по поверхні оброблення. Крім цього застосовують мастильно-охолоджуючу рідину (МОР) певного складу та консистенції.

Поставлена задача досягається тим, що у новому способі абразивного оброблення плоских поверхонь зносостійких деталей тертя друкарської техніки з легованих композитів на базі алюмінію оброблення виконують дрібнозернистими шліфувальними інструментами при інтенсивній подачі у зону оброблення мастильно-охолоджуючої рідини (МОР), оброблювану деталь фіксують на столі шліфувального верстату з наданням деталі поздовжньо-зворотнього переміщення та одночасним горизонтальним рухом. Для оброблення деталі у якості шліфувального інструменту використовують дрібнозернисті круги з карбіду кремнію чорного (53С) зернистістю 14 – 28 мкм на еластичній гліфталевій зв'язці (Гл), а оброблення плоскої поверхні деталі з легованого композиту на базі алюмінію виконують за такими технологічними режимами: швидкість обертання шліфувального круга – 22 – 25 м/с, швидкість горизонтального поздовжньо-зворотнього руху деталі оброблення (поздовжня подача) – 2– 5 м/хв., швидкість поперечного горизонтального переміщення деталі (поперечна подача) – 0,1 – 0,3 мм/подв.хід., глибина шару зрізання металу (глибина різання) – 2 – 5 мкм.

Деталь з плоскою поверхнею, яку необхідно обробити з прецизійною точністю, закріплюють на столі високоточного плоскошліфувального верстату. Інструмент у вигляді абразивного круга з карбіду кремнію чорного (53С) зернистістю 14 – 28 мкм на еластичній гліфталевій зв'язці (Гл) закріплюють у шпинделі верстату так, щоб вісь обертання круга була паралельна базовій площі поверхні стола плоскошліфувального верстату. Одночасно абразивні зерна вступають в контакт з поверхнею оброблення, а деталі (разом із столом шліфувального верстату) надають поздовжньо-зворотні переміщення з нормованою швидкістю (поздовжня подача) з одночасним рухом у

перпендикулярному напрямку у площині оброблення на кожне поздовжньо-зворотне переміщення деталі (поперечна подача) з наданою швидкістю, при цьому абразивні зерна шліфувального круга зануряються у поверхню оброблення поверхневого шару деталі (глибина різання) з одночасною подачею у зону різання мастильно-охолоджуючої рідини (МОР) певного складу і консистенції (табл. 1.19, 1.20).

Спосіб реалізується за схемою, наведеною на рис. 1.9.

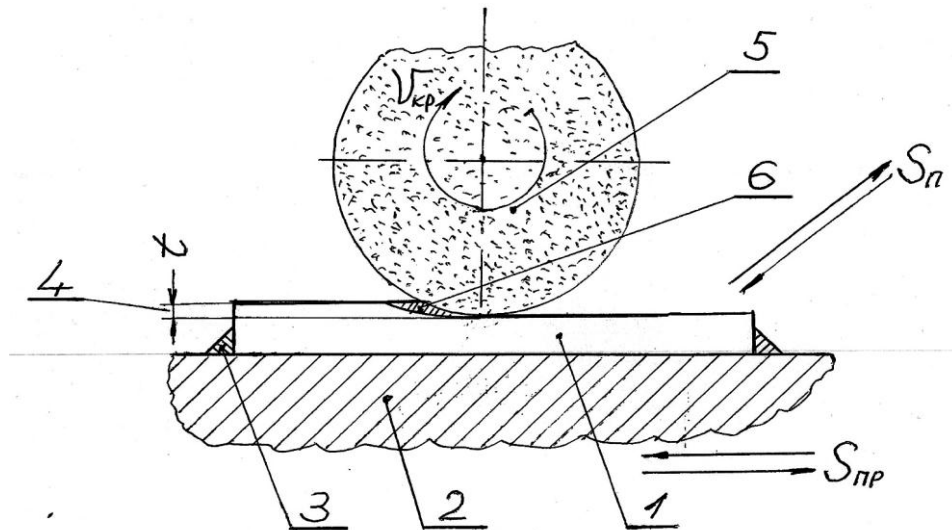


Рисунок 1.9 Спосіб абразивного оброблення плоских поверхонь зносостійких деталей тертя друкарської техніки з легованих композитів на основі алюмінію

Деталь 1 (з плоскою поверхнею оброблення) за допомогою технологічних пристроїв 3 міцно фіксують на столі 2 високоточного плоскошліфувального верстату. Абразивний круг 5 обертається зі швидкістю $V_{кр}$, врізаючись своїми зернами у тіло деталі на глибину різання (t) – 4, при цьому зрізуються тонкі стружки 6. Деталь 1 зі столом 2 плоскошліфувального верстату з нормованою швидкістю переміщується у горизонтальній площині, яка паралельна вісі обертання абразивного круга 5 (поздовжня подача $S_{пр}$), використовуючи плавні поздовжньо-зворотні рухи. Одночасно у перпендикулярному напрямку на кожен поздовжньо-зворотній хід деталі 1 здійснюється її переміщення з заданою швидкістю (поперечна подача S_n). Шліфування здійснюється з активною подачею у зону різання мастильно-охолоджуючої рідини (МОР) певного складу і консистенції (схему подачі МОР на рис. 1.9 не показано).

Завдяки тому, що абразивні зерна карбіду кремнію чорного (53С) у складі шліфувального круга мають досить гостру форму (мінімальний радіус заокруглення та мінімальний кут при вершині ріжучого зерна) серед інших абразивних матеріалів, завдяки мінімальній здатності карбіду кремнію чорного (53С) до схоплювання металу обробки, до ріжучої поверхні зерна та завдяки застосуванню еластичної гліфталевої зв'язки (Гл), коли (при навантаженні зерен під дією сил різання) абразивні зерна карбіду кремнію чорного (53С) демпфують у тіло зв'язки, зменшуючи фактичну глибину різання, чим досягається суттєве зниження складових сил різання, які виникають при стружкоутворенні. Ці фактори впливають на фактичну глибину різання та переріз стружки, що призводить до покращення якості поверхні оброблення (~ 15-20 %) зменшуються параметри шорсткості, ступінь наклепу (~ 10 –15%) та глибина його проникнення у поверхневий шар деталі. Це безпосередньо впливає на параметри довговічності та зносостійкості готових виробів. Крім того, досягненню найвищих параметрів якості поверхонь оброблення сприяє призначення таких режимів тонкого абразивного шліфування, які були дослідженні (з метою досягнення найвищих параметрів якості обробки) і стали нормованими для розробників технологій [43 - 45].

При використанні традиційних технологій оброблення деталей параметри якості обробки їх плоских поверхонь знижуються (табл. 1.21, 1.22).

Таблиця 1.21 Вплив шліфувального інструменту на параметри якості поверхні при обробленні плоских поверхонь деталей зі зносостійкого композитного матеріалу на основі алюмінію АК12М2МгН

Обробка згідно найближчого аналогу кругом з карбіду кремнію зеленого 63СМ28Гл на гліфталевій зв'язці [45]			Обробка згідно запропонованого способу - кругом з карбіду кремнію чорного (53СМ28Гл) на гліфталевій зв'язці		
Параметр шорсткості Ra, мкм	Глибина наклепу h, мкм	Ступінь наклепу К	Параметр шорсткості Ra, мкм	Глибина наклепу h, мкм	Ступінь наклепу К
0,700	8 -10	1,45	0,630	7 - 8	1,39

Таблиця 1.22 Вплив поздовжньої подачі на якість поверхні при абразивній обробці плоских поверхонь деталей тертя з композитного матеріалу на основі алюмінію АК12М2МгН кругами 53СМ28Гл

Поздовжня подача $S_{пр}$, мм/об.	Параметри якості поверхні		
	Параметр шорсткості R_a , мкм	Ступінь наклепу K	Глибина наклепу h , мкм
2	0,630	1,39	7 – 8
3	0,670	1,42	8 – 9
5	0,700	1,49	9 – 10

Спосіб абразивного оброблення плоских поверхонь зносостійких деталей тертя друкарської техніки з легованих композитів на базі алюмінію може використовуватись при обробці деталей тертя поліграфічної техніки та спеціальних деталей машин текстильної та харчової галузей виробництва.

1.7 Спосіб прецизійного оброблення поверхонь отворів підшипників ковзання з композитних сплавів на основі алюмінію

Загальні положення щодо особливостей технологічних процесів тонкого абразивного шліфування деталей зі зносостійких композиційних сплавів на основі алюмінію в цілому співпадають з підходами, наведеними у підрозділі 1.2. Це, в першу чергу, стосується характерних властивостей безпосередньо усього класу алюмінієвих матеріалів, а саме, їх схильністю до миттєвого окиснення на повітрі при отриманні стружок у процесі їх зрізання з оброблюваної поверхні деталі та утворенні на лезі ріжучого інструменту значних джерел тепловиділення (тертя поверхонь різання, суттєві пластичні деформації), які у своїй загальній сукупності, безумовно, впливають на хід та характер процесів окиснення поверхонь оброблення та налипанню субмікроскопічних часток на гостру ріжучу кромку абразивного зерна. Вони погіршують геометрію ріжучого леза інструмента (кут при вершині, радіус заокруглення абразивного зерна), а це обумовлює деяке зниження параметрів якості поверхонь деталей, що обробляються методами тонкого абразивного шліфування. Отже, для тонкого фінішного оброблення деталей зі зносостійких алюмінієвих композитів слід здійснити ряд технологічних заходів, які дозволяють уникнути дії зазначених

негативних факторів або суттєво зменшити їх вплив на параметри якості поверхонь деталей тертя.

З цією метою були виконані відповідні науково-технічні дослідження, які дозволили всебічно проаналізувати складні процеси, що відбуваються на вершині ріжучого леза абразивного зерна. Після їх успішного завершення стало можливим прослідкувати за тим, як саме на параметри шорсткості R_a , ступінь наклепу K , спотворення Π – го роду $\Delta a/a$, глибину h проникнення наклепу у поверхневий шар, величину і знак залишкових напружень впливають основні технологічні фактори тонкого абразивного шліфування (режими різання, склад і зернистість абразивного круга, застосування МОР).

Закономірності, висновки і практичні рекомендації для виробництва, що отримані за результатами виконаних науково-дослідних робіт, опубліковані у фахових науково-технічних виданнях [158, 205, 207] і на сьогодні набули рис технічних нормативів для машинобудівних галузей промисловості, зокрема, для підприємств – виробників поліграфічної техніки.

Саме це стало підставою для створення принципово нового способу оброблення поверхонь отворів деталей тертя з алюмінієвих композитів.

Новий спосіб відноситься до галузі технології машинобудування, зокрема, до способів високоточних оздоблювальних методів обробки поверхонь отворів деталей тертя з високолегованих композитних матеріалів на основі алюмінію, що належать до класу сплавів зі спеціальними властивостями, наприклад, деталей авіаційної техніки, машин легкої та харчової промисловості та деталей тертя (направляючі, скоби, сегменти) різальних поліграфічних машин, що працюють в умовах тертя при режимах експлуатації (температура розігріву до 150 °С, тиск 2,0 – 5,0 МПа або швидкості ковзання до 1 м/с).

Високоточне фінішне оброблення вказаних важкооброблюваних композитних сплавів відомими технологічними методами не забезпечує виконання необхідних технічних вимог до якості поверхонь таких деталей, які піддаються при роботі інтенсивним експлуатаційним навантаженням, що

впливає на техніко-економічні показники спеціальної техніки, зокрема, на параметри надійності (зносостійкість, довговічність, ремонтоздатність).

Ці показники залежать від параметрів якості поверхонь оброблення деталей вказаної техніки (шорсткість, величина та глибина наклепу, величина та знак залишкових напружень поверхневої зони).

Відомий спосіб тонкого абразивного шліфування важкооброблюваних високолегованих матеріалів класу типу Ю16, 16 ЮИХ, “Alfo” системи «алюміній-іридій-залізо-хром» при застосуванні якого використовують дрібнозернисті інструменти з карбіду кремнію зеленого (63С), зернистістю 10 – 14 мкм на еластичній гліфталевій зв’язці (Гл), а оброблення поверхонь здійснюють, призначаючи надтонкі оздоблювальні режими різання [46].

Недоліком цього способу є те, що при шліфуванні сплавів на основі алюмінію під час різання тонких стружок з невеликим їх перерізом (а саме такими є композитні сплави на основі алюмінію АК12М2МгН, АК12ММгН, АК8МЗч, АК12ММгН + (9 – 12) % MoS_2), відбувається миттєве окиснення субмікронних часток елементів стружки, налипання їх до ріжучої кромки абразивного зерна карбіду кремнію зеленого, що змінює умови різання та кути різання у зоні оброблення, зокрема, веде до збільшення радіусу заокруглення та кута різання при вершині ріжучого поодинокого зерна. Це обумовлює передчасну втрату ріжучої здатності абразивного круга і стає причиною суттєвого зниження параметрів якості поверхні оброблення деталі.

Також відомий спосіб оброблення поверхонь композитних деталей абразивними інструментами з карбіду кремнію зеленого 63СМ14СМ2Гл з застосуванням тонких режимів різання та інтенсивним застосуванням для обробки мастильно-охолоджуючих рідин (МОР).

Даний спосіб по технічній суті та ефекту, що має бути досягненим, є найбільш близьким до способу, що заявляється, і тому прийнятим як прототип.

Недоліком такого способу є те, що в результаті його застосування на практиці не вдається отримати параметри шорсткості поверхні оброблення R_a менші позначень 0,600 – 0,650 мкм та глибини наклепу (дефектного шару

деталі) меншого 8 – 10 мкм. Це стримує підвищення зносостійкості та довговічності деталі тертя поліграфічних машин.

В основу нового способу обробки прецизійних отворів поставлено задачу підвищення якості поверхонь обробки отворів деталей тертя з високолегованих композитних матеріалів на основі алюмінію шляхом зрізання тонких стружок ріжучими зернами інструменту за рахунок суттєвого зниження складових сил різання у зоні обробки завдяки зменшенню тертя зерен інструменту по поверхні оброблення. При цьому застосовується мастильно-охолоджуюча рідина (МОР).

Поставлена задача досягається тим, що у новому способі прецизійного оброблення поверхонь отворів деталей тертя з композитних сплавів на основі алюмінію оброблювана деталь обертається навколо своєї осі з одночасним зрізанням стружок з поверхні отвору інструментом при його обертанні навколо осі, паралельної осі отвору деталі, з жорстким контактуванням інструменту з поверхнею обертання, переміщенням його вздовж осі деталі та застосуванням мастильно-охолоджуючої рідини, для оброблення у якості шліфувального інструменту використовують круги з карбіду кремнію чорного (53 С) зернистістю 14 – 28 мкм на еластичній гліфталевій зв'язці (Гл), а обробку поверхні виконують за такими технологічними режимами: швидкість обертання деталі – 15 - 35 м/хв., швидкість обертання абразивного круга – 25-30 м/с, швидкість поздовжнього переміщення інструменту вздовж осі циліндричного отвору поверхні оброблення – 0,5 – 2,5 м/хв., глибина різання – 2 -5 мкм.

Деталь циліндричної форми з циліндричним оброблюваним отвором затискається у пристрої верстату. Інструмент у вигляді абразивного круга з карбіду кремнію чорного (53 С) зернистістю 14-50 мкм на еластичній гліфталевій (Гл) зв'язці розміщується у отворі деталі так, щоб вісь обертання круга була паралельна осі обертання деталі. Одночасно абразивні зерна входять у робочий контакт з поверхнею оброблення і інструменту надається переміщення вздовж осі деталі, при цьому в зону зняття стружки подається мастильно-охолоджуюча рідина (МОР). Спосіб реалізується за схемою, наведеною на рис. 1.10.

Деталь 1 з отвором затискається у пристрої 3 верстата прецизійної точності і обертається зі швидкістю V_d . Шліфувальний круг 2 з відповідною оправкою розташовується в отворі деталі і обертається зі швидкістю V_i .

Шліфувальний круг 2 за рахунок відповідної кінематики верстату здійснює переміщення вздовж осі оброблення зі швидкістю V_n . Круг 2 має жорсткий контакт з деталлю 1, внаслідок чого знімається припуск на обробку t .

В процесі знімання стружок з поверхні оброблення у ріжучу зону за допомогою трубопроводу 4 подається мастильно-охолоджуюча рідина 5.

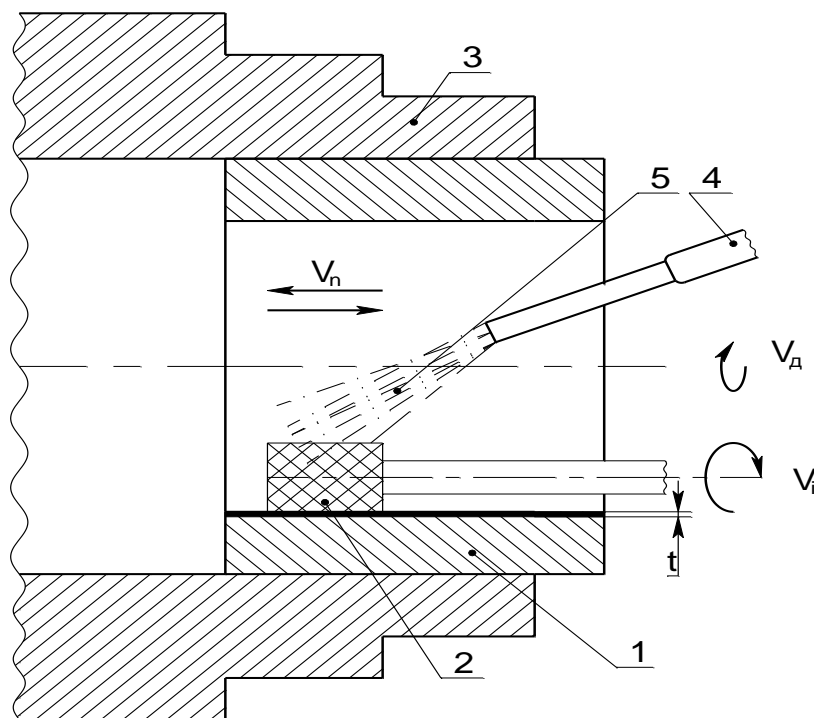


Рисунок 1.10 Спосіб прецизійного оброблення поверхонь отворів деталей тертя з композитних сплавів на основі алюмінію

Завдяки тому, що абразивні зерна у складі шліфувального круга мають найгострішу форму (мінімальний радіус заокруглення та мінімальний кут при вершині ріжучого зерна) серед інших абразивних матеріалів та завдяки застосуванню еластичної гліфталевої зв'язки, коли (при навантаженні зерен під дією сил різання) абразивні зерна немов би демфують у матеріал зв'язки, зменшуючи фактичну глибину різання, досягається суттєве зниження складових сил різання, які виникають при стружкоутворенні. Ці фактори, в свою чергу, впливають на фактичну глибину різання та переріз стружки, що

призводить до покращення якості поверхні оброблення, зокрема, суттєво (на 20-30 %) зменшуються параметри шорсткості, спотворення поверхневих шарів (ступінь наклепу К) як основної характеристики наклепу. При цьому одночасно відбувається зменшення (на 30-35%) глибини проникнення наклепу у поверхневий шар деталі. Це безпосередньо впливає на параметри довговічності та зносостійкості готових виробів. Крім того, досягненню найвищих параметрів якості поверхонь оброблення сприяє призначення таких режимів тонкого абразивного шліфування, які були всебічно дослідженні (з метою забезпечення найвищих параметрів якості обробки) і стали нормованими для розробників технологій.

При використанні традиційних технологій оброблення отворів деталей параметри якості поверхонь оброблення знижуються (табл. 1.23, 1.24).

Таблиця 1.23 Вплив шліфувального інструменту на параметри якості поверхні при обробці отворів деталей з композитного матеріалу на основі відходів сплаву АК12М2МгН

Обробка згідно найближчого аналогу [47] кругом з карбіду кремнію зеленого 63СМ28СМ21Гл на гліфталевій зв'язці			Обробка згідно запропонованого способу - кругом з карбіду кремнію чорного (53 С) на гліфталевій зв'язці.		
Параметр шорсткості Ra, мкм	Глибина наклепу h, мкм	Ступінь наклепу К	Параметр шорсткості Ra, мкм	Глибина наклепу h, мкм	Ступінь наклепу К
0,650	10 -15	1,17	0,271	6,5 -7,5	1,05

Таблиця 1.24 Вплив швидкості обертання деталі оброблення на якість поверхні при абразивній обробці отворів деталей з композитного матеріалу на основі відходів сплаву АК12М2МгН абразивним кругом з карбіду кремнію чорного (53 С) зернистістю 28 мкм на гліфталевій зв'язці

Швидкість обертання деталі оброблення м/хв.	Параметри якості поверхні		
	Параметр шорсткості Ra, мкм	Глибина наклепу h, мкм	Ступінь наклепу К
15	0,269	6,5 – 7,5	1,05
20	0,310	7,5 – 8,0	1,03
30	0,325	8,0 – 9,5	1,03
35	0,337	10 - 15	1,01

Спосіб прецизійного оброблення поверхонь отворів деталей тертя з композитних сплавів на основі алюмінію може використовуватись при обробці спеціальних деталей для аерокосмічних систем, деталей тертя машин легкої та харчової промисловості та зносостійких деталей різальних поліграфічних машин та фальцапаратів.

1.8 Спосіб тонкого кубонітового оброблення циліндричних поверхонь зносостійких деталей обертання з композиційних сплавів на основі нікелю для друкарських машин

Корисна модель відноситься до галузі технології машинобудування, зокрема, до способів тонкого фінішного оброблення зовнішніх циліндричних поверхонь зносостійких деталей з композиційних сплавів на основі нікелю, які виготовлені з відходів обробки деталей з нікелевих матеріалів у крупносерійному виробництві електротехнічної, радіоелектронної та авіаційної галузей промисловості і які працюють в умовах тертя при жорстких режимах експлуатації (температура до 850–900 °С, питомі тиски 5 – 7 МПа, агресивне оточуюче середовище — кисень повітря, виробничий пил з абразивною властивістю при роботі поліграфічних машин з паперовою сировиною та інше).

Абразивне оброблення зазначених композитних сплавів на основі нікелю відомими технологічними методами не забезпечує виконання технічних вимог до якості поверхонь таких деталей тертя, які піддаються при роботі інтенсивним експлуатаційним навантаженням, що впливає на параметри надійності вузлів і механізмів машин (зносостійкість довговічність, ремонтоздатність коефіцієнт готовності).

Ці параметри залежать від параметрів якості поверхонь оброблення деталей друкарської техніки (шорсткість, ступінь наклепу, величина та знак залишкових напружень поверхневої зони).

Відомий спосіб тонкого абразивного шліфування важкооброблюваних високолегованих матеріалів пермалоевого класу типу 79НМ, 80НХС, 81НМТ, Mu-metal, Supermalloy, Sinko та інші системи «нікель–залізо–титан–молібден–хром», при застосуванні якого використовують дрібнозернисті інструменти з карбіду кремнію зеленого (63С), зернистістю 10–14 мкм на еластичній

гліфталевій зв'язці (Гл), а оброблення поверхонь здійснюють, призначаючи надтонкі оздоблювальні режими різання [47, 48].

Недоліком цього способу є те, що при шліфуванні сплавів з підвищеним складом нікелю у матеріалі під час зрізання з нього тонких стружок з невеликим їх перерізом (а саме такими є композитні сплави на основі нікелю ХН55ВТКЮ, ХН50ВТФКЮ та інші), відбувається миттєве окиснення субмікронних часток елементів стружки, активне налипання їх до ріжучої кромки абразивного зерна карбіду кремнію зеленого, що, врешті-решт, змінює умови різання у зоні оброблення, зокрема, веде до збільшення радіусу заокруглення та кута різання при вершині ріжучого поодинокого зерна, що обумовлює передчасну втрату ріжучої здатності абразивного круга та суттєво змінює формування силового та температурного полів у зоні тонкого фінішного шліфування, що приводить до суттєвого зниження параметрів якості поверхні оброблення деталі.

Найбільш близьким аналогом до корисної моделі за технічною суттю і досягнутому ефекту є відомий спосіб оброблення поверхонь композитних деталей абразивними інструментами з кубічного нітриду бора КНБ, створеного в Україні, а саме КНБМ14–М28Бр1 100% з застосуванням тонких режимів різання та інтенсивним застосуванням для обробки мастильно-охолоджуючої рідини [48].

Недоліком вказаного способу є те, що з результаті його застосування не вдається отримати параметри шорсткості поверхні оброблення R_a менші значень 0,275–0,315 мкм та глибини наклепу (дефектного шару деталі) меншого 7–8 мкм, що не дає змоги у перспективі підвищити зносостійкість та довговічність деталей тертя поліграфічних машин.

В першу чергу, це пояснюється принципово різною фізико-технічною сутністю та структурною побудовою композитів на основі алюмінію, методи обробки отворів деталей яких з них захищені патентними рішеннями [50], та важкооброблювальними виокозносостійкими композитами на основі нікелю.

Надтонке оброблення нікелевих композитів абразивними інструментами та режимами різання, які забезпечують отримання сучасного рівня параметрів якості при тонкому шліфуванні прецизійних отворів деталей поліграфічних машин з композитів на основі в'язкості та поганої механічної оброблюваності нікелевих композитів, веде до утворення наростів на ріжучих кромках абразивного зерна інструменту, що безпосередньо змінює геометрію вершини зерна, в першу чергу, радіуса заокруглення і кута різання при вершині ріжучої кромки зерна і обумовлює перерозподіл складових сил різання та миттєвих контактних температур. Саме це погіршує умови різання стружки в зоні оброблення (навіть при мінімальних значеннях їх перерізів a_z) і суттєво погіршує параметри шорсткості R_a , наклепу K , глибини його проникнення h у тіло деталі, рівня і знаку залишкових напружень, що, врешті-решт, не створює умов для забезпечення експлуатаційних характеристик машин, а саме, зносостійкості, довговічності і ремонтоздатності.

В основу корисної моделі поставлено задачу підвищення якості оброблюваних поверхонь зносостійких деталей тертя циліндричної форми, що виготовлені з композиційних сплавів на основі нікелю, шляхом зрізання тонких стружок абразивними зернами інструменту за рахунок зниження складових сил різання у зоні оброблення завдяки зменшенню тертя зерен інструменту по поверхні оброблення. При цьому застосовується мастильно-охолоджуюча рідина (МОР) певного складу та консистенції.

Поставлена задача досягається тим, що у запропонованому способі у якості шліфувального інструменту застосовують дрібнозернисті круги з кубічного нітриду бору – кубоніту КНБ зернистістю 14–28 мкм на еластичній бакелітно-гумовій зв'язці (Бр1), а оброблення зовнішньої циліндричної поверхні деталі з композитного сплаву на основі нікелю виконують за такими технологічними режимами: швидкість обертання шліфувального круга — 35–40 м/с, швидкість обертання деталі — 45–65 м/хв, швидкість поздовжньо-зворотніх переміщень деталі (поздовжня подача) — 40–50 мм/об, а глибина

шару зрізання металу (глибина різання) — 2–7 мкм, з активним застосуванням мастильно-охолоджуючої рідини (МОР).

Спосіб реалізують за схемою, наведеною на рис. 1.11.

Деталь 1 циліндричної форми, зовнішню поверхню якої обробляють, фіксують на круглошліфувальному верстаті прецизійної точності за допомогою технологічних пристроїв 2. Кубонітовий круг 3 закріплюють у верстаті так, щоб його вісь обертання була паралельна вісі обертання оброблюваної деталі, а периферія круга при цьому входить в жорсткий контакт з циліндричною зовнішньою поверхнею оброблюваної деталі.

Спосіб здійснюють наступним чином.

Деталь циліндричної форми, зовнішню поверхню якої оброблюють з прецизійною точністю, технологічними пристроями фіксують у робочих органах високоточного круглошліфувального верстату.

Інструмент у вигляді дрібнозернистого кубонітового круга КНБ зернистістю 14–28 мкм на еластичній бакелітно-гумовій (Бр1) зв'язці закріплюють у верстаті так, щоб вісь обертання круга була паралельна вісі обертання деталі оброблення, а периферія абразивного круга жорстко контактує з циліндричною поверхнею обробки деталі.

Кубонітові зерна інструменту контактують з поверхнею оброблення, а деталі надають кругового обертання навколо своєї вісі з нормованою швидкістю. Одночасно здійснюють поздовжньо-зворотні рухи з наданою швидкістю (поздовжня подача) з врізанням ріжучих абразивних зерен шліфувального круга у поверхню оброблення деталі (глибина різання). При цьому у зону різання інтенсивно подають мастильно-охолоджуючу рідину (МОР) певного складу і консистенції.

Оброблення зовнішньої циліндричної поверхні деталі відбувається таким чином (рис. 1.11).

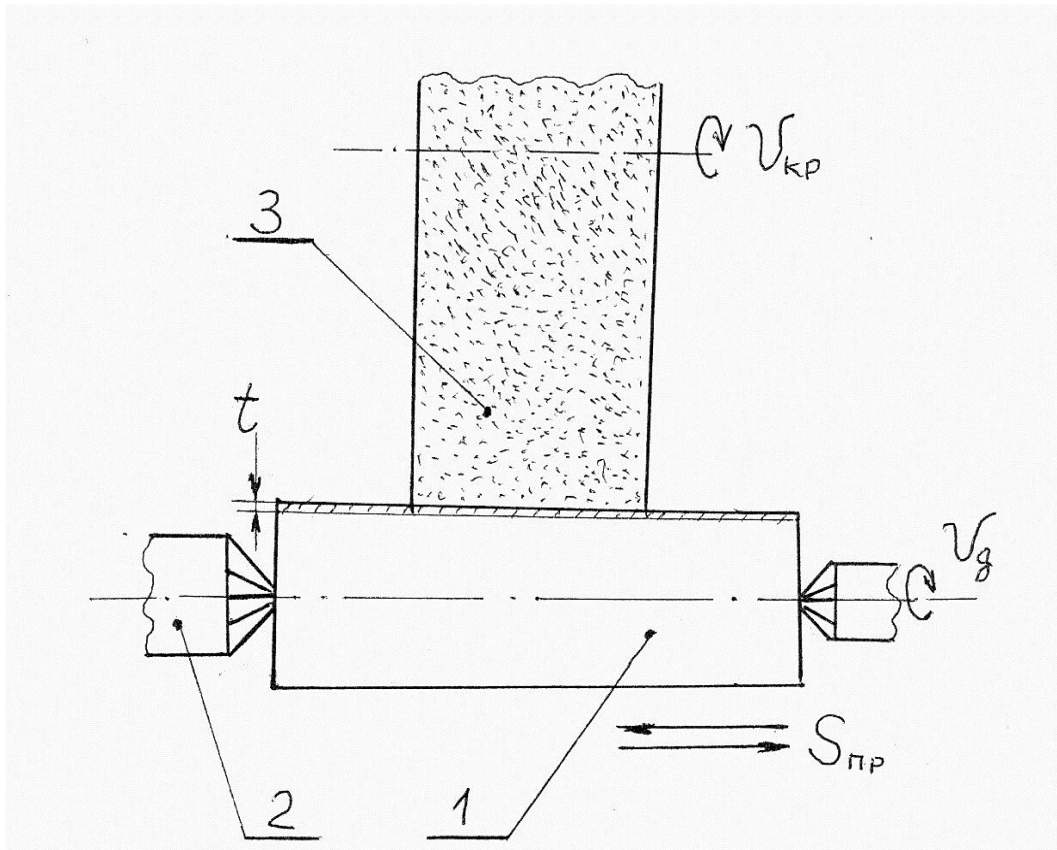


Рисунок 1.11 - Спосіб тонкого кубонітового оброблення циліндричних поверхонь зносостійких деталей обертання з композиційних сплавів на основі нікелю для друкарських машин

Деталь 1 циліндричної форми закріплюють та надають нормоване обертання зі швидкістю V_d . Шліфувальному абразивному кругу 3 надають відповідну швидкість обертання $V_{кр}$ навколо своєї вісі. Одночасно відбувається плинні поздовжньо-зворотні переміщення деталі 1 вздовж вісі її обертання зі швидкістю $S_{пр}$ (поздовжня подача). Одночасно в зону різання подають мастильно-охолоджуючу рідину (МОР) певного складу і консистенції (схему подачі МОР на фіг. не показано).

Завдяки тому, що кубонітові зерна кубоніту КНБ у складі шліфувального кругу мають найгострішу форму (мінімальний радіус заокруглення та мінімальний кут при вершині ріжучого зерна) серед інших ріжучих абразивних матеріалів, завдяки мінімальній здатності зерен кубоніту до захоплення з металом деталі до ріжучої поверхні зерна у порівнянні з зернами карбіду кремнію зеленого (63 С), електрокорунду білого (23 А), чи монокорунду (43А) та завдяки застосуванню еластичної бакелітно-гумової (Бр1) зв'язки, коли (при

навантаженні зерен під дією сил різання) кубонітові зерна з кубічного нітриду бора кубоніту КНБ демпфують у тіло цієї зв'язки, зменшуючи фактичну глибину різання, чим досягається зниження складових сил різання, які виникають при стружкоутворенні. В свою чергу, це впливає на фактичну глибину різання та переріз стружки, що призводить до покращення якості поверхні оброблення, зокрема, зменшуються параметри шорсткості, ступінь наклепу на 10–20 %) та глибина його проникнення у поверхневий шар деталі. Це безпосередньо впливає на параметри довговічності та зносостійкості готових виробів.

При використанні традиційних технологій оброблення деталей параметри якості обробки їх зовнішніх циліндричних поверхонь знижуються (табл.1, 2).

Таблиця 1.25 Вплив шліфувального інструменту на параметри якості поверхні при обробленні зовнішніх циліндричних поверхонь деталей поліграфічних машин зі зносостійкого композитного матеріалу на основі нікелю ХН55ВТКЮ

Обробка згідно найближчого аналогу кругом з карбоніду кремнію чорного 53СМ28Гл на гліфталевій зв'язці [50]			Обробка згідно запропонованого способу — кубонітовим кругом КНБМ28Бр1 на бакелітно-гумовій зв'язці		
Параметр шорсткості Ra, мкм	Глибина наклепу h, мкм	Ступінь наклепу К	Параметр шорсткості Ra, мкм	Глибина наклепу h, мкм	Ступінь наклепу К
0,65	8–10	1,27	0,265	5,0–6,0	1,19

Таблиця 1.26 Вплив повздовжньої подачі на якість поверхні при кубонітовій обробці зовнішніх циліндричних поверхонь деталей поліграфічних машин зі зносостійкого композитного на основі нікелю ХН55ВТКЮ кубонітовими кругами КНБМ14Бр1

Повздовжня подача S _{пр} , мм/об	Параметри якості поверхні		
	Параметр шорсткості Ra, мкм	Ступінь наклепу К	Глибина наклепу h, мкм
40	0,255	1,15	4,9–5,2
45	0,285	1,17	5,5–5,9
50	0,350	1,20	6,1–6,8

Спосіб тонкого кубонітового оброблення циліндричних поверхонь зносостійких деталей обертання з композиційних сплавів на основі нікелю для поліграфічних машин може використовуватись при обробці деталей тертя поліграфічної техніки та спеціальних деталей машин текстильної та харчової галузей виробництва.

1.9 Спосіб надтонкої абразивної обробки суперфінішуванням зовнішніх циліндричних поверхонь деталей обертання поліграфічної техніки з високолегованих композитних сплавів на основі заліза

Спосіб обробки відноситься до галузі технології машинобудування, зокрема, до способів надтонкої абразивної обробки суперфінішуванням зовнішніх циліндричних поверхонь деталей обертання поліграфічної техніки з високолегованих композитних сплавів на основі заліза, що належать до класу важкооброблюваних сплавів зі спеціальними властивостями, наприклад, високоточних зносостійких валів машин офсетного друку, що працюють в умовах тертя при жорстких режимах експлуатації (високі температури до 400 °C та тиски до 2,0 – 5 МПа або швидкості обертання до 800 об./хв. з тисками 1,5 – 4 МПа).

Високоточне фінішно-оздоблювальне оброблення вказаних важкооброблюваних високолегованих сплавів відомими технологічними методами не забезпечує виконання необхідних технічних вимог до якості поверхонь таких деталей, які піддаються при роботі інтенсивним експлуатаційним навантаженням, що впливає на техніко - економічні показники спеціальної техніки, зокрема, на параметри надійності (зносостійкість, довговічність, ремонтоздатність) [52, 53].

Ці показники залежать від параметрів якості поверхонь оброблення деталей вказаної техніки (шорсткість, величина та глибина наклепу, величина та знак залишкових напружень поверхневої" зони).

Найбільш близьким до корисної моделі по технічній суті та ефекту, що досягається, є остаточне оброблення дрібнозернистими абразивними брусками

суперфінішуванням прецизійних зовнішніх циліндричних поверхонь деталей [54].

Недоліками відомого способу [54] є технічна неможливість забезпечення мінімізації параметрів наклепу та шорсткості поверхні в оброблюваній зоні та відсутність засобів керування процесом надтонкої абразивної обробки для підвищення параметрів якості поверхонь тертя.

В основу корисної моделі поставлено задачу підвищення якості поверхонь обробки отворів деталей тертя з високолегованих важкооброблюваних композитних матеріалів шляхом зрізання тонких стружок абразивними зернами інструменту за рахунок суттєвого зниження складових сил різання у зоні обробки та завдяки ускладненню траєкторії переміщення ріжучого абразивного зерна відносно оброблюваної поверхні деталі. Це створює необхідні можливості для суттєвого зменшення перерізу стружки a_z , що зрізається з зовнішньої поверхні оброблення деталі обертання з композитного сплаву і, відповідно, зменшуючи складові сил різання, сприяє формуванню більш якісної поверхні (параметр шорсткості R_a , глибина та ступінь наклепу, знак, величина залишкових напружень та спотворення II-го роду $\Delta a/a \cdot 10^{-4}$).

Поставлена задача досягається тим, що у запропонованому способі надтонкої абразивної обробки суперфінішуванням зовнішніх циліндричних поверхонь деталей обертання поліграфічної техніки з високолегованих композитних сплавів на основі заліза, в якому оброблювана деталь фіксується у оброблюючому верстаті з горизонтальним розташуванням її вісі, а пазі суперфінішної головки так, що вона своєю віссю перпендикулярно пересікається з віссю поверхні деталі і з заданою силою притискується до поверхні оброблення, яка обертається навколо своєї вісі з нормованою швидкістю, виконуючи одночасно плавні позовжні переміщення з розрахованою швидкістю вздовж вісі деталі обертання та разом з позовжніми переміщеннями суперфінішної головки з абразивними брусками додатково отримує позовжньо-зворотні коливання з амплітудою 2 – 5 кол./с., який

відрізняється тим, що у якості ріжучого інструменту використовують абразивні бруски з карбіду кремнію зеленого зернистістю 3 – 10 мкм на гліфталевій зв'язці, а для оброблення поверхонь з високолегованих композитних сплавів застосовують наступні режими суперфінішування: швидкість обертання деталі оброблення - $50 \div 120$ м/хв., швидкість поздовжніх переміщень суперфінішної головки – $0,3 \div 2,0$ м/хв., питомий тиск брусків на поверхню оброблення – $0,5 \div 1,1$ МПа.

Спосіб здійснюється наступним чином.

Оброблювана деталь фіксується у оброблюючому верстаті з горизонтальним розташуванням вісі, а інструмент у вигляді прямокутного абразивного бруску розміщується у прецизійному пазі суперфінішної головки так, що вона своєю віссю поверхні деталі і міцно притискується з заданою силою до поверхні оброблення, яка обертається навколо своєї вісі з нормованою швидкістю. Одночасно суперфінішна головка з абразивними брусками виконує плавні поздовжні переміщення вздовж вісі обертання з розрахованою швидкістю та разом з поздовжніми переміщеннями суперфінішної головки з абразивними брусками додатково отримує поздовжньо-зворотні коливання з амплітудою 2 – 5 мм і частотою коливань у межах 2 – 5 кол./с.

Спосіб реалізується за схемою на рис. 1.12.

Деталь 1, з діаметром D , поверхня якої оброблюється за допомогою пристроїв 2, фіксується у оброблюючому верстаті. Суперфінішна головка 4 розміщується таким чином, що її вісь орієнтована вертикально та перпендикулярно вісі обертання деталі. Для цього використовують спеціальні пристрої 5 (на схемі наведено найпростіший варіант - планка). У прецизійному пазі інструментальної головки 4 розміщують і закріплюють абразивний брусок 3. Механізмами верстату деталі 1 надають обертання з нормованою швидкістю V_d . Суперфінішна головка з абразивним бруском (завдяки кінематичним властивостям верстату) виконує плавні переміщення вздовж вісі деталі 1 з розрахованою сталою швидкістю $V_{п.з.}$, а абразивний брусок 3 внаслідок

навантаження інструментальної головки силою P міцно притискується до поверхні оброблення деталі 1. Ця сила P (в залежності від умов зони контакту абразивного бруска з поверхнею деталі) забезпечує утворення питомого тиску q_0 . Одночасно з плавними поздовжніми переміщеннями вздовж осі деталі 1 суперфінішної головки 4 з абразивним бруском 3, головці додатково надаються поздовжньо-зворотні коливання $n_{z.k.}$ з амплітудою 2 – 5 мм і частотою коливань у межах 2 – 5 кол./с.

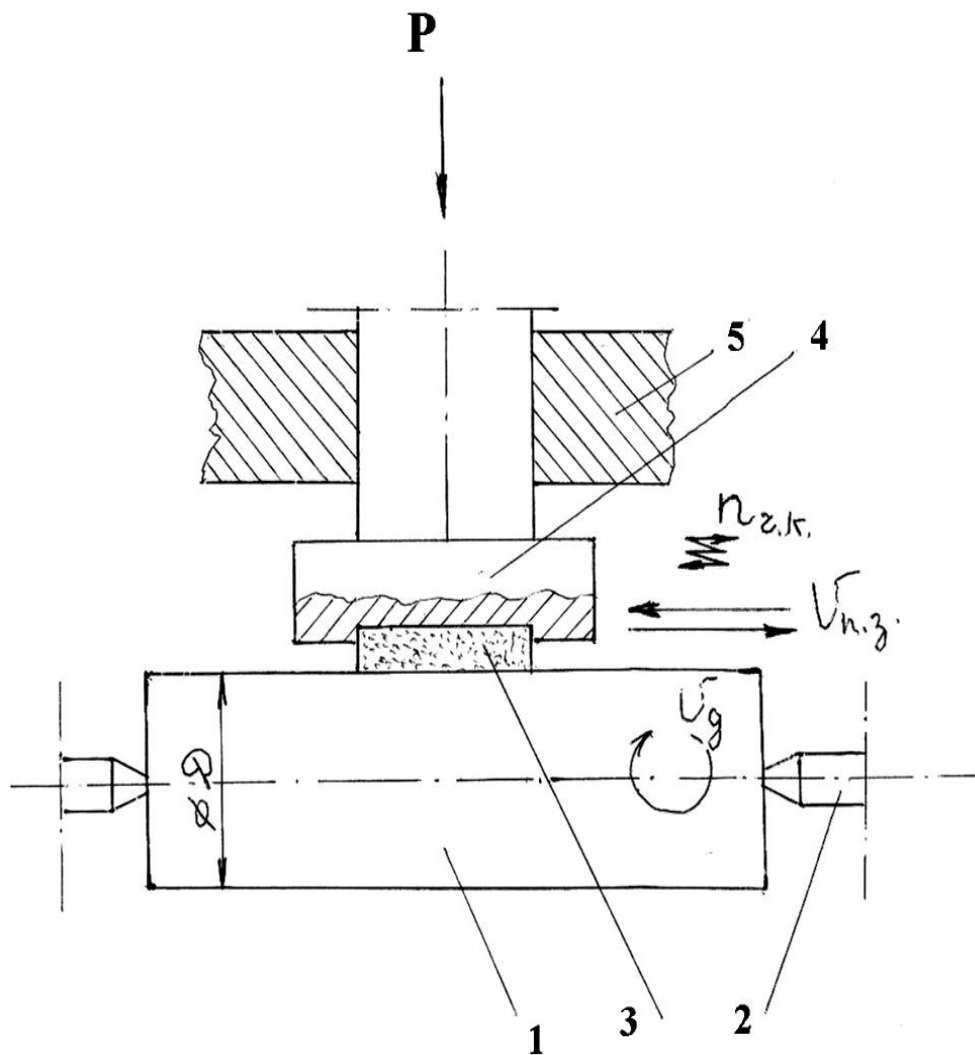


Рисунок 1.12 - Спосіб надтонкої абразивної обробки суперфінішуванням зовнішніх циліндричних поверхонь деталей обертання поліграфічної техніки з високолегованих композитних сплавів на основі заліза

При цьому в ході технологічного процесу надтонкої абразивної обробки поверхонь деталей поліграфічної техніки у якості ріжучого інструменту використовують абразивні бруски з карбіду кремнію зеленого зернистістю 3 –

10 мкм на гліфталевій зв'язці, а для оброблення поверхонь з високолегованих композитних сплавів застосовують наступні режими суперфінішування і швидкість обертання деталі оброблення - $50 \div 120$ м/хв., швидкість поздовжніх переміщень суперфінішної головки – $0,3 \div 20$ м/хв., питомий тиск брусків на поверхню оброблення – $0,5 \div 1,1$ МПа.

Особливою рисою даного способу оброблення зовнішніх поверхонь обертання поліграфічних машин зі зносостійких композитних матеріалів є додаткове застосування частотних коливань $n_{ч.к.}$ абразивного інструменту. Це обумовлює суттєве ускладнення траєкторії переміщення ріжучого абразивного зерна по поверхні оброблення і, як наслідок, значне зменшення перерізу a_z стружки, яка зрізається з робочої поверхні деталі. Як наслідок, створюються позитивні умови для покращення якості поверхні оброблення, в першу чергу, параметра шорсткості поверхні R_a , а також фізичних властивостей поверхневого шару, що обробляється абразивними брусками.

Це безпосередньо впливає на параметри довговічності та зносостійкості готових виробів.

При використанні традиційних технологій оброблення деталей обертання циліндричної форми поліграфічних машин параметри якості поверхонь знижуються (табл. 1.27, 1.28).

Таблиця 1.27 Вплив матеріалу зерна абразивних брусків на параметри якості поверхні при надтонкій обробці циліндричних поверхонь деталей з композитного сплаву на основі відходів інструментальної сталі 86Х6НФТ+5СаF₂

Обробка згідно запропонованого способу				Обробка згідно найближчого аналогу [55]		
Абразивний брусок	Парметр шорсткості R_a , мкм	Глибина наклепу h , мкм	Спотворення II-го роду $\Delta a/a \cdot 10^{-4}$	Парметр шорсткості R_a , мкм	Глибина наклепу h , мкм	Спотворення II-го роду $\Delta a/a \cdot 10^{-4}$
ММ10ГЛ	0,025	5 - 6	8,1	0,060	7 – 8	9,9
23АМ10ГЛ	0,015	3 - 4	7,3	0,050	6 – 7	9,2
63СМ10ГЛ	0,010	2 - 3	6,5	0,040	5 - 6	8,3

Примітки: 1 – швидкість обертання деталі $V_{оп} = 80$ м/хв.; 2 – швидкість поздовжнього переміщення $V_{п.з.} = 0,5$ м/хв.; 3 – частота коливань абразивних брусків $n_{ч.к.} = 5$ м/с.

Таблиця 1.28 Вплив частоти поздовжньо-зворотніх коливань абразивного бруска на параметри якості при надтонкій обробці деталей з зовнішньо-

циліндричною формою з композитного сплаву на основі відходів інструментальної сталі 4ХМНФС+5%CaF₂

Обробка згідно запропонованого способу				Обробка згідно найближчого аналогу		
Частота коливань брусків, кол./с.	Параметр шорсткості R_a , мкм	Глибина наклепу h , мкм	Спотворення II-го роду $\Delta a / a \cdot 10^{-4}$	Параметр шорсткості R_a , мкм	Глибина наклепу h , мкм	Спотворення II-го роду $\Delta a / a \cdot 10^{-4}$
2	0,022	4 - 5	7,9	0,055	6 - 7	9,5
3	0,013	2 - 3	7,1	0,045	5 - 6	9,0
5	0,010	1,5 - 2	6,3	0,035	4 - 5	8,1

Примітки: 1 – швидкість обертання оправки $V_{оп} = 80$ м/хв.; 2 – швидкість поздовжнього переміщення $V_{пв} = 5$ м/хв.; 3 – амплітуда коливань абразивних брусків 5 мм; 4 – матеріал абразивного бруска карбід кремнію зелений 63СМ10Гл.

Спосіб надтонкого абразивного оброблення суперфінішуванням зовнішніх циліндричних поверхонь деталей обертання поліграфічної техніки з високолегованих сплавів на основі заліза може використовуватись у вузлах швидкісних поліграфічних офсетних друкарських машин, а також при обробці спеціальних деталей тертя газотурбінних і компресорних станцій магістральних газогонів та важливих деталей військової техніки.

Висновки до розділу 1

1. Вперше в науковій практиці виконано дослідження комплексу питань щодо вивчення закономірностей технологічних процесів тонкого абразивного шліфування нових високолегованих, зносостійких та важкооброблюваних композитних сплавів для деталей тертя поліграфічної техніки.

2. Проведені теоретичні та всебічні експериментальні дослідження впливу основних технологічних факторів процесу тонкого абразивного шліфування широкої гами композиційних матеріалів (режимів різання, типу та зернистості абразивного інструменту, матеріалу зв'язки, складу і методів подачі у робочу зону різання мастильно-охолоджуючих рідин) на параметри якості поверхонь оброблення – шорсткості R_a , глибини та ступеню наклепу, знаку і рівня залишкових напружень поверхневого шару деталі, що обробляється методами абразивного шліфування.

3. Створені теоретичні моделі утворення залишкових напружень у тонких поверхневих шарах оброблення з врахуванням динамічного удару абразивних зерен на мікрооб'єм металу, що зрізається у вигляді мікростружки,

та динаміки виникнення теплових джерел у зоні різання композитів, які дозволяють прогнозувати параметри якості поверхонь обробки деталі та оптимізувати об'єм складних експериментальних досліджень.

4. Розроблені рекомендації для промислових виробництв, що мають вигляд типових технологічних процесів, технологічних регламентів та стандартів підприємств, які забезпечують необхідний рівень параметрів якості при тонкому абразивному шліфуванні нових марок високолегованих та зносостійких композитів, синтезованих на основі використання сировини зі шламових відходів штампових, швидкорізальних та інструментальних сталей, а також цінних відходів кольорових металів – міді, нікелю та алюмінію.

5. Отримані наукові напрацювання пройшли всебічну промислову перевірку, широку впроваджені у реальне виробництво машинобудівних галузей промисловості та захищені патентами України на винаходи і промислові зразки, що свідчить про оригінальність виконаних робіт і пріоритети України у даному напрямку наукових розробок.

РОЗДІЛ 2 ТОНКЕ АЛМАЗНЕ ШЛІФУВАННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ КОМПОЗИТНИХ ДЕТАЛЕЙ ТЕРТЯ ПОЛІГРАФІЧНОЇ ТЕХНІКИ

Як відзначалось вище вимоги до якості поверхонь деталей тертя, які працюють в умовах інтенсивного зношування, постійно зростають, що обумовлюється безперервним підвищенням важливих експлуатаційних параметрів поліграфічної техніки і, в першу чергу, зростанням термінів служби деталей, механізмів і у цілому машин.

Останнім часом для суттєвого збільшення термінів експлуатації підшипників ковзання поліграфічних машин були синтезовані та впроваджені у виробництво нові самозмащувальні підшипники ковзання з композиційних матеріалів, створених на основі регенованих шліфувальних відходів інструментальних легованих сталей 86Х6НФТ, 4ХМНФС та 5Х3В3МФС з домішками твердого мастила CaF_2 , і які здатні успішно функціонувати при швидкостях обертання 600–800 об./хв. і питомих тисках 2,0–4,0 МПа багатьох друкарських машин [56].

При виготовленні деталей вузлів тертя друкарських машин КВА «Rapida–105», «STAR BINDER 1509» та ін., технологія механічної обробки побудована таким чином, що на фінішних операціях технологічного процесу використовують абразивне шліфування та надтонке магніто-абразивне (МАО) оброблення [57].

З точки зору оптимізації параметрів шорсткості поверхонь оброблення достатньо детально було досліджено процеси тонкого абразивного шліфування та МАО [56] та створені відповідні технологічні рекомендації.

На жаль, процеси тонкого алмазного шліфування нових високолегованих композиційних деталей тертя, виготовлених на основі вторинної сировини, зокрема, на основі шліфувальних відходів сталей 86Х6НФТ, 4ХМНФС та 5Х3В3МФС, залишились взагалі не дослідженими, хоча вони, внаслідок дії відомого [58] принципу технологічної спадкоємності, на 80–90% формують умови отримання найякісніших поверхонь тертя композитних підшипників друкарських машин. В науково-технічній літературі є багато публікацій із

застосування алмазно-абразивної обробки деталей для різних галузей виробництва [59]. Науковцями та практикою провідних машинобудівних підприємств доведено, що застосування алмазного шліфування (перш за все, завдяки особливостям інструменту) дозволяє отримати найкращі показники якості оброблюваних поверхонь.

Втім відсутність технологічних рекомендацій з алмазного шліфування високолегованих та важкооброблюваних композитних сплавів призводить до застосування на практиці різних технологічних схем шліфування, далеко не завжди оптимальних. Вказане викликає поширення різних технологій, часто суттєво різних, і які здебільшого створені відповідно до можливостей того чи іншого підприємства.

Усе це вимагає від науковців і практиків всебічно дослідити процеси тонкого алмазного шліфування підшипників ковзання з нових композиційних матеріалів на основі шліфувальних відходів інструментальних сталей та на цій основі створити типові технологічні процеси для галузі поліграфічного машинобудування.

2.1 Вплив параметрів тонкого алмазного шліфування на якість поверхонь деталей тертя поліграфічних машин

2.1.1 Вплив складу алмазних інструментів та режимів різання на шорсткість поверхонь композитних підшипників ковзання

У даному розділі монографії наведені результати дослідження параметрів шорсткості поверхонь при тонкому алмазному шліфуванні нових композитних підшипників на основі шліфувальних відходів сталей 86Х6НФТ, 4ХМНФС та 5Х3В3МФС з домішками твердого мастила CaF_2 та встановлення впливу зернистості шліфувального круга, матеріалу зерна абразиву, типу зв'язки інструменту і основних режимів різання на якісні показники поверхонь оброблення досліджуваних деталей тертя друкарських машин.

Експериментальні дослідження з означеної науково-технічної задачі виконувались згідно з методикою, наведеною у роботах [57 - 59]. Їх результати наведені у табл. 2.1.

Аналіз даних табл. 2.1 показує, що параметр шорсткості R_a змінюється зі зміною режимних факторів оброблення – глибини шліфування, поперечної та поздовжньої подач.

Обробка експериментів за допомогою статистичних методів, зокрема, із застосуванням методу Ст'юдента для випадку залежних змінних оброблених зразків при фіксованих значеннях двох варіюючих величин (наприклад, V_v , t) та при змінній третій величині (наприклад, $S_{\text{поп.}}$), показала, що досліджені сукупності суттєво різні.

Таблиця 2.1 Параметр шорсткості R_a при тонкому плоскому шліфуванні підшипникового композитного сплаву

Поперечна подача $S_{\text{поп.}}$, мм/подв. хід	Швидкість виробу (поздовжня подача) V_v , м/хв.	Глибина шліфування t , мм		
		0,002	0,01	0,05
		R_a , мкм		
0,1	2	0,201	0,273	0,310
	5	0,253	0,285	0,331
	10	0,270	0,317	0,387
0,2	2	0,300	0,341	0,401
	5	0,330	0,370	0,482
	10	0,341	0,395	0,511
0,5	2	0,375	0,421	0,574
	5	0,400	0,477	0,623
	10	0,410	0,495	0,647
1,0	2	0,433	0,523	0,715
	5	0,471	0,541	0,766
	10	0,520	0,601	0,830

Примітки: Верстат – FF-350 «Abawerk» (ФРН), абразив – АСМ14Бр1100% на бакелітно-гумовій зв'язці, швидкість кругу – 22 м/с, обробка – без охолодження.

Аналогічні результати отримані при порівнянні будь-яких вибірок для подач 0,1–1,0 мм/подв. хід та швидкостей 2–10 м/хв. Слід зауважити, що зі збільшенням різниці між подачами порівнюваних вибірок і різниці між швидкостями відмінності між табличним та розрахунковим розподілом

Ст'юдента зростають. Це дозволяє зробити висновок, що існує зв'язок між параметром шорсткості поверхні R_a та глибиною різання t : $R_a = f(t)$, $S_{\text{поп.}} = \text{const}$, $V_B = \text{const}$.

Використовуючи методи математичної статистики, неважко показати, що існує зв'язок між параметром R_a та поперечною подачею $S_{\text{поп.}}$:

$$R_a = f(S_{\text{поп.}}), V_B = \text{const}, t = \text{const}.$$

Аналогічний статистичний зв'язок існує між параметром шорсткості R_a та швидкістю V_B : $R_a = f(V_B)$, $S_{\text{поп.}} = \text{const}$, $t = \text{const}$.

Дослідження фактичного зв'язку між шорсткістю поверхні та режимними факторами шліфування методами кореляційного аналізу дозволило встановити кількісні співвідношення між досліджуваними факторами.

Для отримання рівняння множинної кореляції на основі наведених експериментальних даних були знайдені коефіцієнти кореляції парних залежностей $R_a - t$; $R_a - S_{\text{п.}}$; $R_a - V_B$; $S_{\text{поп.}} - V_B$; $S_{\text{поп.}} - t$; $t - V_B$.

Проведені розрахунки показують, що між факторами R_a , $S_{\text{поп.}}$, V_B , t існує щільний лінійний зв'язок. Формальний математичний аналіз показує, що між факторами $S_{\text{поп.}} - t$; $t - V_B$ та $S_{\text{поп.}} - V_B$ зв'язок відсутній, хоча це видно із загальних технічних міркувань. Отримані коефіцієнти кореляції r_k далекі від 1. Це свідчить про те, що крім даного фактору (для якого визначено r_k), на параметр шорсткості R_a впливають й інші фактори. Значення коефіцієнтів кореляції вказує на ступінь впливу на шорсткість поверхні досліджуваних факторів.

Найбільший вплив на параметр шорсткості R_a чинять глибина різання t та поперечна подача $S_{\text{поп.}}$, найменше – швидкість випробу V_B .

Рівняння множинної кореляції для досліджуваних факторів має вигляд:

$$R_a = 0,252S_{\text{п.}} + 5,2t + 0,0049 V_B - 0,0430 \quad (2.1)$$

Аналіз формули (2.1) показує, що на параметр шорсткості R_a чинять найбільший вплив глибина шліфування t та поперечна подача $S_{\text{п.}}$, а найменший – швидкість виробу V_B .

Точність цієї моделі можна підвищити, якщо розділити весь діапазон режимів плоского шліфування на дві групи:

I-а група:

- Поперечна подача $S_{\pi} = 0,01-0,02$ мм/подв.хід;
- Глибина шліфування $t = 0,002-0,100$ мм;
- Швидкість виробу $V_{\text{в}} = 2,0-4,0$ м/хв.

II-а група:

- Поперечна подача $S_{\pi} = 0,5-1,0$ мм/подв.хід;
- Глибина шліфування $t = 0,02-0,05$ мм;
- Швидкість виробу $V_{\text{в}} = 5,0-15,0$ м/хв.

Після деяких перетворень рівняння (6.1) може бути трансформоване і набуде вигляду:

I-а група:

$$R_a = 0,2523S_{\pi} + 5,2t + 0,0049 V_{\text{в}} - 0,0031 \quad (2.2)$$

II-а група:

$$R_a = 0,2523S_{\pi} + 5,2t + 0,0049 V_{\text{в}} - 0,0530 \quad (2.3)$$

Розраховані за формулами (6.2) та (6.3) значення R_a відрізняються від експериментальних на 12 – 15%, що дозволяє використовувати дані формули для практичних розрахунків. Наприклад, знаючи конкретні значення $S_{\text{поп.}}$, t , $V_{\text{в}}$ для даного алмазного інструменту, можна орієнтовно визначити яким буде параметр R_a та оцінити (з точки зору вимог, що висуваються до підшипників) прийнятність вибраних режимів шліфування.

Слід зазначити, що отримані висновки підтверджуються при тонкому алмазному шліфуванні кругами різної зернистості – М50, М28, М14 та М7. Відповідні експериментальні дані наведені у табл. 2.1

Аналіз даних табл. 2.1 дозволяє зробити суттєві практичні висновки: найменшу шорсткість поверхні у досліджуваному діапазоні зернистості інструменту (7 – 100 мкм) забезпечують алмазні круги з зернистістю 7 мкм. Ці результати можуть бути пояснені загальними положеннями теорії шліфування.

Таблиця 2.2 Вплив зернистості інструменту на параметр шорсткості поверхні R_a при тонкому плоскому алмазному шліфуванні заготовок композитних підшипників на основі відходів інструментальних сталей

Характеристика абразивного інструменту	Матеріал зразків		
	86Х6НФТ+5%CaF ₂	4ХМНФС+5%CaF ₂	5Х3В3МФС+5%CaF ₂
	R_a , мкм		
АС10Бр1 100%	0,914	0,927	0,943
АС5Бр1 100%	0,875	0,895	0,900
АСМ28Бр1 100%	0,263	0,267	0,279
АСМ20Бр1 100%	0,220	0,224	0,287
АСМ14Бр1 100%	0,201	0,210	0,216
АСМ10Бр1 100%	0,183	0,200	0,207
АСМ7Бр1 100%	0,162	0,175	0,182
63СМ14ГЛ	0,621	0,673	0,681
63СМ7ГЛ	0,358	0,367	0,384

Примітки: Верстат – FF-350 «Abawerk» (ФРН); режими шліфування: швидкість круга – 22 м/с; поздовжня подача (швидкість виробу) – 2 м/хв; поперечна подача – 0,1 мм/подв.хід; глибина різання – 0,002 мм; обробка – без охолодження.

Дійсно, збільшення шорсткості поверхонь зі зростанням зернистості обумовлюється збільшенням перерізу a_z зрізу шару металу. Покращення шорсткості також пояснюється і тим, що зерна синтетичного алмазу мають найгострішу форму (мінімальний кут загострення при вершині зерна) та найменший (у порівнянні з електрокорундовими та монокорундовими зернами) радіус округлення одиночного зерна (табл. 2.3).

Таблиця 2.3 Середні значення геометрії кута ріжучих зерен у різних абразивних матеріалів

Абразивний матеріал	Зернистість	Геометрія вершини зерна	
		Радіус заокруглення ρ , мкм	Кут при вершині, град.
Алмази природні	A10/8	2,8	78,1
	A6/5	2,3	73,3
	AM14/10	1,6	70,2
Алмази синтетичні	АС10/8	2,2	57,4
	АС6/5	1,1	52,2
	АСМ14/10	0,7–0,8	49,5
Карбід кремнію зелений	63С10	7,5	95,1
	63СМ28	2,3	92,1
	63СМ14	2,0	90,6
Електрокорунд білий	23А10	9,5	98,3
	23АМ28	2,7	94,7
	23АМ14	2,4	92,5

В результаті математичної обробки експериментальних даних було отримано кореляційне рівняння зв'язку параметру шорсткості R_a з зернистістю А алмазного інструменту з синтетичних алмазів (АС), що має вигляд:

$$R_a = 0,0051A - 0,0068 \quad (2.4)$$

Таким чином, знаючи зернистість алмазного шліфувального круга А можна розрахувати параметр шорсткості R_a і впевнитись у тому, що вибраний інструмент забезпечить вимоги до якості робочих поверхонь підшипників ковзання. Це значно спрощує зусилля технологів – практиків при раціональному виборі шліфувального інструменту під час проектування технологічних процесів.

Суттєвим питанням є і те, як впливає склад зв'язки алмазного круга на параметр шорсткості поверхні R_a , результати дослідження якого наведені у табл. 2.4.

Таблиця 2.4 Вплив матеріалу зв'язки алмазного круга на параметр шорсткості обробленої поверхні R_a зразків з композитів на основі відходів сталі 86Х6НФТ при плоскому шліфуванні

Характеристика абразивного інструменту	Матеріал зв'язки круга	Параметр шорсткості R_a , мкм
АС5Б1 100%	Бакелітна Б1	0,931
АС5Бр1 100%	Бакелітно-гумова Бр1	0,875
АС5К1 100%	Керамічна К1	1,215
АС5М1 100%	Металева М1	1,195
АСМ28Б1 100%	Бакелітна Б1	0,315
АСМ28Бр1 100%	Бакелітно-гумова Бр1	0,263
АСМ28К1 100%	Керамічна К1	0,511
АСМ14Б1 100%	Бакелітна Б1	0,253
АСМ14Бр1 100%	Бакелітно-гумова Бр1	0,201
АСМ14К1 100%	Керамічна К1	0,395
АСМ10Бр1 100%	Бакелітно-гумова Бр1	0,183
АСМ7Бр1 100%	Бакелітно-гумова Бр1	0,162

Примітки: Верстат – FF-350 «Abawerk» (ФРН); режими різання: швидкість круга – 22 м/с; поздовжня подача (швидкість виробу) – 2 м/хв; поперечна подача – 0,1 мм/подв.хід; глибина різання – 0,002 мм; шліфування – без охолодження.

Аналізуючи дані табл. 2.4, необхідно зазначити, що найкращі значення параметрів шорсткості R_a поверхонь оброблення деталей з нових композитних сплавів на основі інструментальних сталей забезпечують алмазні круги на бакелітно-гумовій зв'язці Бр1. Це може бути пояснено її більш еластичною

здатністю і, таким чином, при шліфуванні (під час врізання абразивного зерна у метал) під дією складових сил різання кожне зерно начебто демпфується в напрямку пружно-еластичного середовища зв'язки. Це обумовлює фактичне зменшення глибини різання. Отже, змінюються умови формування шорсткості поверхні оброблення і, як наслідок, зменшується параметр шорсткості R_a , який є одним із найголовніших факторів, що характеризує якість поверхні після тонкого абразивного шліфування.

Слід зауважити, що ці висновки зроблені на підставі аналізу фактичних даних, отриманих під час експериментального дослідження із застосуванням широкої гами зв'язок (бакелітна, керамічна, металева, бакелітно-гумова) та зернистостей алмазного круга (100, 28, 14, 10 та 7 мкм).

Приймаючи до уваги те, що фізичні явища у процесі різання металів принципово подібні для плоского, зовнішнього круглого та внутрішнього шліфування, експериментальне дослідження процесів тонкого зовнішнього круглого і внутрішнього алмазного шліфування композитних підшипникових сплавів на основі відходів інструментальних сталей виконувалось з урахуванням вищенаведених результатів. Зокрема, для дослідів використовувались алмазні інструменти з синтетичного алмазу (АС) зернистістю 14–28 мкм, які сформовані у шліфувальні круги бакелітно-гумовою зв'язкою (Бр1).

Зазначимо, що зовнішнє тонке алмазне кругле шліфування виконувалось на прецизійному верстаті AS–250 «Werkzajt» (ФРН), а для внутрішнього шліфування застосовувався прецизійний внутрішньошліфувальний верстат надвисокої точності SS – 125 «Studder» (Швейцарія).

Аналіз експериментів показує, що на шорсткість поверхонь деталей з нових композитних матеріалів при тонкому зовнішньому круглому алмазному шліфуванні (як і при плоскому алмазному шліфуванні) суттєво впливають режими різання: швидкість виробу V_b , поздовжня подача S_p та глибина різання t , а також розмір зерна абразиву та склад зв'язки алмазного інструменту.

Аналогічно з плоским алмазним шліфуванням найкращу якість оброблених зовнішніх поверхонь композитних циліндричних деталей (за параметром шорсткості R_a) тонким алмазним круглим зовнішнім шліфуванням забезпечує застосування інструментів на основі алмазу синтетичного (АС) на бакелітно-гумовій зв'язці (Бр1), зернистістю 14–28 мкм (М14–М28) та застосування тонких режимів шліфування ($V_b \rightarrow \min$; $S_{\pi} \rightarrow \min$; $t \rightarrow \min$).

Основні результати досліджень наведені на рис. 2.1, 2.2.

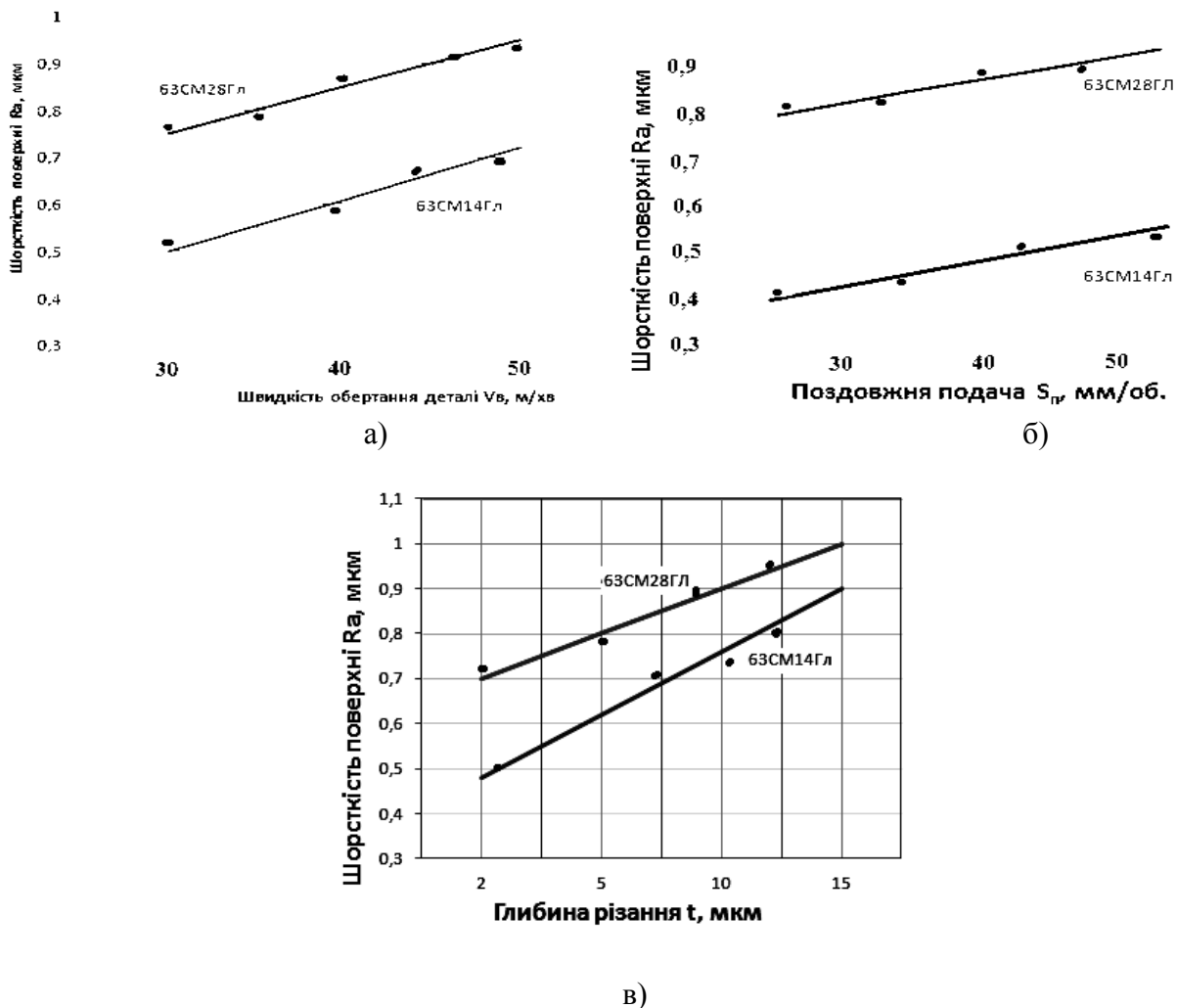


Рисунок 2.1 Залежність параметрів шорсткості поверхні R_a від режимів тонкого алмазного шліфування V_b , S_{π} , t при зовнішньому круглому шліфуванні (швидкість алмазного круга – $V_{кр} = 30$ м/с): а) $S = 5$ мм/об.; $t = 2$ мкм; б) $V_b = 30$ м/хв.; $t = 2$ мкм; в) $V_b = 30$ м/хв.; $S_{\pi} = 5$ м/об.

Схожі результати отримані при тонкому круглому внутрішньому алмазному шліфуванні робочих поверхонь тертя підшипників ковзання з нових композитних сплавів на основі відходів інструментальних сталей.

Результати експериментів наведені на графіках (рис. 2.2).

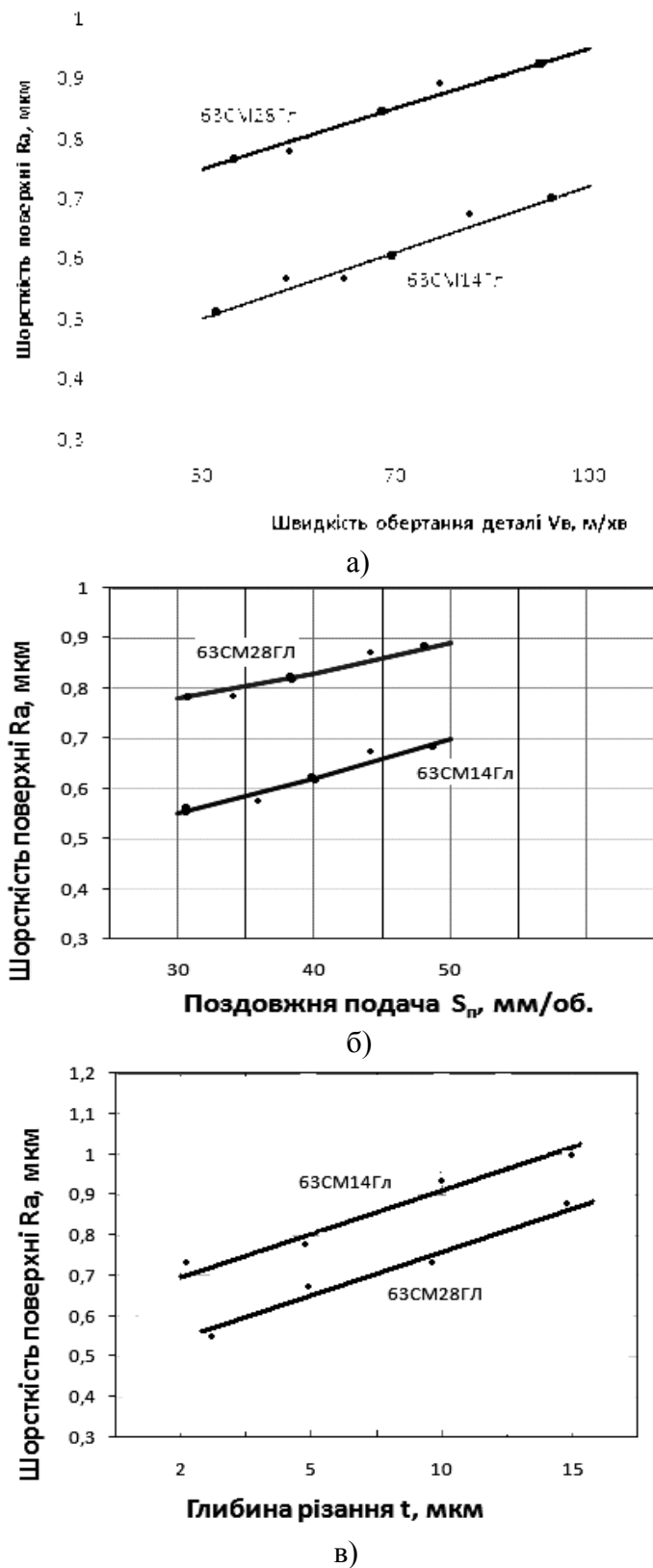


Рисунок 2.2 Залежність параметрів шорсткості поверхні R_a від режимів тонкого алмазного шліфування V_b , S_p , t при тонкому круглому внутрішньому шліфуванні (швидкість алмазного круга – $V_{кр.} = 40$ м/с): а) $S_p = 30$ мм/об.; $t = 2$ мкм; б) $V_b = 50$ м/хв.; $t = 2$ мкм; в) $V_b = 50$ м/хв.; $S_p = 30$ мм/об.

Аналіз рис. 2.2 показує, що при застосуванні для прецизійного внутрішнього алмазного шліфування деталей з нових композиційних сплавів на основі відходів інструментальних сталей з використанням для оброблення алмазних кругів на основі алмазу синтетичного зернистістю 14–28 мкм на бакелітно-гумовій зв'язці, на параметр шорсткості поверхні оброблення R_a найбільше впливають глибина різання t , поздовжня подача S_n та швидкість обертання деталі V_v . Найкращі результати за параметром якості R_a (тобто отримання мінімальної шорсткості поверхні) забезпечують тонкі режими алмазного шліфування, а саме, мінімальні можливі (з точки зору технічних можливостей верстата) режими різання – глибина шліфування, поздовжня подача та швидкість обертання деталі.

Узагальнюючи комплекс експериментальних досліджень, необхідно зробити важливі як наукові, так і практичні висновки.

1. Тонке алмазне оброблення композиційних сплавів, синтезованих на основі утилізованих та регенованих шліфувальних відходів інструментальних сталей, відкриває можливості одержання високоякісних поверхонь деталей тертя з нових композитів для поліграфічних машин.
2. Основні закономірності тонкого прецизійного алмазного шліфування нових композиційних сплавів співпадають при плоскому, круглomu зовнішньому та внутрішньому шліфуванні.
3. На параметр шорсткості поверхні оброблення R_a суттєво впливають зернистість, матеріал зв'язки алмазного круга та режими тонкого алмазного шліфування.
4. Найкращі показники параметру R_a , які задовольняють високі вимоги до поверхонь тертя деталей поліграфічних машин, забезпечують шліфувальні круги з синтетичного алмазу (АС) зернистістю 14–28 мкм на бакелітно-гумовій зв'язці та тонкі режими різання, а саме [60, 61]:

- для **плоского алмазного шліфування**: швидкість круга – 22 м/с, поздовжня подача – 2 м/хв., поперечна подача – 0,1 мм/подв.хід; глибина різання – 2 мкм;

- для зовнішнього круглого алмазного шліфування: швидкість абразивного круга – 30 м/с, швидкість виробу (деталі) – 30 м/хв., поздовжня подача – 30 мм/об., глибина різання – 2 мкм;
- для круглого внутрішнього алмазного шліфування: швидкість круга – 40 м/с, швидкість виробу – 50 м/хв., поздовжня подача – 30 мм/об., глибина різання – 2 мкм.

2.1.2 Силове поле при тонкому алмазному шліфуванні поверхонь тертя композитних підшипників ковзання поліграфічної техніки

Вимоги до деталей тертя, які працюють в умовах інтенсивного зношування, постійно зростають. Це обумовлює необхідність створення та удосконалення існуючих технологій виготовлення деталей такого типу, включаючи синтез нових видів матеріалів та розробку фінішних операцій технологічного процесу надтонкої обробки робочих поверхонь тертя з забезпеченням відповідних високих вимог до якості оброблення (мінімальних значень параметрів шорсткості поверхонь R_a , мінімальних спотворень, знаку та значень залишкових напружень, дефектів тонкого поверхневого шару, глибини залягання наклепу, ступеню деформації металу у зоні зрізання стружки поодиноким абразивним зерном). Ці якості формують умови придатності поверхні оброблення для задоволення високих функціональних вимог експлуатації, зокрема, суттєвого підвищення строків служби машин та механізмів друкарської техніки.

На жаль, усі ці важливі питання недостатньо досліджені, оскільки нові композиційні матеріали (на основі цінних шліфувальних відходів інструментальних сталей) для деталей, які працюють у жорстких умовах експлуатації, лише нещодавно були створені і почали застосовуватись у промисловості [63].

Відомо, що на зносостійкість поверхонь тертя суттєво впливає не тільки параметр шорсткості R_a , а і, що не менш важливо, фізичні властивості тонкого шару поверхонь оброблення. Ці властивості (з точки зору загальної теорії шліфування) забезпечуються при обробці взаємодією силового та

температурного полів на ріжучому лезі алмазного зерна шліфувального інструменту.

Таким чином, дослідження параметрів силового поля (складових сил різання) при тонкому алмазному шліфуванні нових композиційних матеріалів на основі цінної вторинної сировини – шліфувальних відходів сталей 86Х6НФТ, 4ХМНФС та 5Х3В3МФС є актуальним питанням, що має як наукове, так і практичне значення.

Було проведено дослідження складових сил різання P_x , P_y , P_z при алмазній обробці деталей з нових композиційних сплавів на основі відходів інструментальних сталей 86Х6НФТ, 4ХМНФС та 5Х3В3МФС з домішками твердого мастила CaF_2 , та встановлено вплив зернистості шліфувального круга, типу зв'язки круга і режимів різання на параметри силового поля [64].

Експериментальне вивчення силового поля, зокрема, складових сил різання P_x , P_y , P_z при тонкому алмазному шліфуванні деталей тертя з нових композиційних сплавів, виконувалось згідно з методикою, наведеною у роботах [64].

Як вже відзначалось вище, сили різання при шліфуванні металів є джерелом виникнення у зоні різання високих температур та залишкових пластичних деформацій у поверхневих шарах виробу. Сили різання при шліфуванні залежать від міцностних характеристик оброблювального матеріалу, складу алмазного круга та режимів шліфування [51 - 65].

Для утворення стружки різальні кромки алмазних зерен вдавлюються у матеріал деталі і на оброблювальній поверхні утворюються канавки у напрямку руху круга.

Згідно з різними дослідженнями процесів мікрорізання та шліфування, встановлено, що при малих глибинах вдавлювання алмазного зерна відбувається пластичне деформування без зрізання стружки – видавлювання матеріалу з боків риски від проходження зерна; лише при глибині вдавлювання 0,06 – 0,1 мкм починається процес утворення стружки перед різальними зернами [65].

У зв'язку з тим, що алмазні зерна шліфувального круга знаходяться на значній відстані одне від одного і для металевих матеріалів діаграми розтягу при однакових повторних навантаженнях співпадають з діаграмою розвантаження, то пружний стан металу можна розглядати як результат силової дії одиничного зерна.

Зміцнення поверхневого шару є результатом нормальної складової сили різання. Тому ступінь наклепу приблизно може характеризуватись величиною нормальної складової сили різання, що припадає на одиничне зерно.

Враховуючи, що різальні зерна алмазного круга знаходяться на однаковій відстані L_ϕ одне від одного, можна вважати, що кожному зерну відповідає площа L_ϕ^2 .

Кількість різальних зерен m на площі контакту круга з виробом $F=L_k \cdot B$ може бути розрахована за формулою 6.5:

$$m = F'_m = L_K \cdot B / L_\phi^2 \quad (2.5)$$

де B – ширина шліфування, мм; L_k – довжина дуги контакту, мм (для плоского шліфування $L_k = D \cdot t$);

l_ϕ – фактична відстань між зернами, мм;

m' – кількість різальних зерен, що припадає на одиницю площі круга;

D – діаметр шліфування, мм;

t – глибина шліфування, мм.

Відстань між зернами l_ϕ може бути визначена експериментально. Для деяких алмазних зерен, зокрема, для алмазу синтетичного (АС), l_ϕ розрахована, експериментально уточнена і використовується при дослідженнях силового поля [64, 65].

З урахуванням цього були виконані всебічні дослідження. Значення питомих (віднесених до 10 мм ширини круга) тангенціальної та нормальної складових зусиль різання наведені у табл. 2.5 – 2.7.

Аналіз результатів для обох видів матеріалів показує, що зі збільшенням глибини шліфування нормальна та тангенціальна складові зусилля різання закономірно зростають. Це пояснюється як збільшенням навантаження, що

припадає на одиничне різальне зерно, так і збільшенням кількості зерен у зоні контакту шліфувального круга з виробом.

Також необхідно звернути увагу на такий важливий результат, отриманий при дослідженні тонкого алмазного шліфування широкої гами високолегованих композиційних сплавів, а саме: при досить значній зміні режимів різання (наприклад, глибина шліфування t_d у 10 разів – (для всього кола тестування) співвідношення складових сил різання P_y/P_z залишається стабільним і незалежно від марки композиту лежить у межах 1,4-1,8 (для матеріалу на основі 86ХЗВЗНФТ) та 1,13-1,33 (для сплаву 5ХЗВЗМФС), тобто зміни цього показника не перевищують розбіжностей у 12-25%. Це свідчить про стабільність безпосередньо процесів різання при застосуванні алмазних інструментів і, саме в цьому, виявляються переваги тонкого алмазного шліфування у порівнянні з абразивною обробкою.

Крім того, зі збільшенням у складі композитів таких легуючих елементів як вольфрам, молібден та ванадій, відповідно, суттєво змінюються механічні характеристики оброблюваних матеріалів з одночасним погіршенням оброблюємості їх різанням. Зазначимо, що це не викликає значних змін у співвідношенні складових сил шліфування P_y/P_z .

Швидше за все, це явище, найвірогідніше, також може бути пояснено більш високою здатністю до різання алмазних зерен шліфувального круга і відповідними перевагами алмазного шліфування високолегованих важкооброблюваних композитів на основі відходів інструментальних сталей у порівнянні з тонким абразивним шліфуванням кругами з найгостріших абразивних зерен кремнія зеленого.

Зазначені закономірності зберігаються для алмазних кругів на різних зв'язках (еластична бакелітно-гумова Бр1 чи жорстка металева М1). До речі, це свідчить про об'єктивну єдність отриманих залежностей і, більше того, повністю співпадає з загальними положеннями теорії шліфування [65].

Таблиця 2.5 Питомі сили різання при плоскому алмазному шліфуванні сплаву 86Х6НФТ+ 5%CaF₂

Глибина шліфування по лімбу верстату $t_{л}$, мм	Характеристика круга					
	200×32×16 мм					
	АСМ14Бр1 100%			АСМ14М1 100%		
	P_z , Н/см	P_y , Н/см	P_y/P_z	P_z , Н/см	P_y , Н/см	P_y/P_z
0,005	18	22	1,47	20	30	1,50
0,01	22	35	1,59	25	39	1,56
0,02	45	75	1,66	53	75	1,41
0,05	135	245	1,81	145	180	1,24

Примітка: Верстат – FF – 350 “Abawerk” (ФРН); режими шліфування: швидкість круга – 25 м/с; поздовжня подача – 0,1 мм/подв. хід; обробка – без охолодження.

Таблиця 2.6 Питомі сили різання при плоскому алмазному шліфуванні сплаву 4ХНМФС+ 5%CaF₂

Глибина шліфування по лімбу верстату $t_{л}$, мм	Характеристика круга					
	200×32×16 мм					
	АСМ14Бр1 100%			АСМ14М1 100%		
	P_z , Н/см	P_y , Н/см	P_y/P_z	P_z , Н/см	P_y , Н/см	P_y/P_z
0,005	14	19	1,35	19	19	1,00
0,01	23	33	1,43	34	39	1,15
0,02	38	58	1,52	58	58	0,87
0,05	112	127	1,14	118	129	1,09

Примітка: Верстат – FF – 350 “Abawerk” (ФРН); режими шліфування: швидкість круга – 25 м/с; поздовжня подача – 0,1 мм/подв. хід; обробка – без охолодження.

Таблиця 2.7 Питомі сили різання при плоскому алмазному шліфуванні сплаву 5ХЗВЗМФС+ 5%CaF₂

Глибина шліфування по лімбу верстату $t_{л}$, мм	Характеристика круга					
	200×32×16 мм					
	АСМ14Бр1 100%			АСМ14М1 100%		
	P_z , Н/см	P_y , Н/см	P_y/P_z	P_z , Н/см	P_y , Н/см	P_y/P_z
0,005	15	20	1,33	20	20	1,00
0,01	25	35	1,40	35	40	1,14
0,02	40	60	1,50	70	60	0,86
0,05	115	130	1,13	120	130	1,08

Примітка: Верстат – FF – 350 “Abawerk” (ФРН); режими шліфування: швидкість круга – 25 м/с; поздовжня подача – 0,1 мм/подв. хід; обробка – без охолодження

При алмазному шліфуванні використання дрібнозернистих кругів на гліфталевій зв'язці також знижує величини тангенціальної та нормальної складових сили різання (табл. 2.5 – 2.8). Це пояснюється більшою пружністю гліфталевої зв'язки у порівнянні з керамічною.

Для розрахунку навантаження на окреме зерно було прийнято, що у процесі стружкоутворення приймає участь у середньому 0,1 всіх зерен, які

знаходяться на периферії круга, тобто кількість робочих зерен слід розраховувати відповідно формулі (2.5).

З урахуванням цього з експериментальних даних (табл. 2.8, 2.9) видно, що при тонкому алмазному шліфуванні навантаження, що припадає на одне абразивне зерно зростає дуже інтенсивно до глибини 0,012 мм. При подальшому збільшенні глибини шліфування величина розрахункового навантаження незначна. Тому подальше збільшення сил різання пов'язане, в основному, тільки зі збільшенням кількості різальних алмазних зерен у зоні контакту шліфувального круга з виробом.

Таблиця 2.8 - Розрахункове навантаження на окреме різальне зерно круга при алмазному шліфуванні зразків з композиційного сплаву 86Х6НФТ+ $\%CaF_2$

Глибина шліфування по лімбу верстату $t_{л}$, мм	Довжина дуги контакту L_k , мм	Характеристика круга					
		АСМ14Бр1 100%			АСМ14М1 100%		
		m	P_{z3} , Н	P_{y3} , Н	M	P_{z3} , Н	P_{y3} , Н
0,005	0,80	465	0,020	0,041	237	0,074	0,081
0,01	1,1	675	0,026	0,050	348	0,117	0,090
0,02	1,6	910	0,042	0,066	426	0,176	0,198
0,05	2,7	1550	0,070	0,093	780	0,240	0,310

Примітка: Верстат – FF – 350 “Abawerk” (ФРН); режими шліфування: швидкість круга – 22 м/с; позовжня подача – 0,1 мм/подв. хід; В – 10 мм; охолодження – 3% розчин содової емульсії.

Таблиця 2.9 - Розрахункове навантаження на окреме різальне зерно круга при алмазному шліфуванні зразків з композиційного сплаву 4ХНМФС + $\%CaF_2$

Глибина шліфування по лімбу верстату $t_{л}$, мм	Довжина дуги контакту L_k , мм	Характеристика круга					
		400×32×16 мм			200×32×16 мм		
		АС25Бр1 100%			АСМ14Бр1 100%		
		m	P_{z3} , Н	P_{y3} , Н	m	P_{z3} , Н	P_{y3} , Н
0,005	0,80	10	2,3	4,1	465	0,015	0,027
0,01	1,1	14	2,6	4,7	675	0,021	0,032
0,02	1,6	22	2,9	5,5	910	0,029	0,041
0,05	2,7	38	3,5	7,1	1550	0,036	0,058

Примітка: Верстат – FF – 350 “Abawerk” (ФРН); режими шліфування: швидкість круга – 25 м/с; позовжня подача – 0,1 мм/подв. хід; В – 10 мм; охолодження – 3% розчин содової емульсії.

При використанні еластичних зв'язок, наприклад, бакелітно-гумових, навантаження на одне зерно менше залежить від глибини різання.

При шліфуванні дрібнозернистими кругами значення P_{z3} та P_{y3} приблизно у 100-150 разів менші, ніж при шліфуванні крупнозернистими кругами (табл. 2.9). Таким значним зменшенням нормальної складової зусилля різання одиничним зерном і пояснюється, в основному, зниження ступеню зміцнення поверхневого шару і умов покращення формування мінімальної шорсткості поверхонь оброблення деталей тертя з нових композитних матеріалів [41, 79, 158, 297] при використанні дрібнозернистих абразивних інструментів.

Узагальнюючи отримані дослідниками дані, необхідно стверджувати, що для забезпечення високих вимог до якості виробів з нових композитних матеріалів слід враховувати, що найкращі показники (з точки зору дії силових факторів процесу тонкої обробки, зокрема, складових сил різання P_z , P_y , P_x) гарантує застосування інструментів на основі синтетичних алмазів (АС) на бакелітно-гумовій зв'язці (Бр1), які мають зернистість – 14 – 20 мкм.

Суттєво впливають на параметри якості поверхонь алмазного оброблення режими різання. Для практичних цілей отримання стабільних та високих результатів (щодо параметрів якості поверхонь оброблення) забезпечує використання наступних режимів різання: шліфувальний круг АСМ14Бр1 100%; швидкість круга – 25 м/с; поздовжня подача – 0,1 мм/подв. хід; ширина шліфування (В) – 10 мм; охолодження – 3% розчин содової емульсії.

2.1.3 Миттєві контактні температури при тонкому алмазному шліфуванні деталей з композитних матеріалів на основі відходів інструментальних сталей

Як вже відзначалось у сучасній техніці інтенсифікуються режими роботи обладнання, коли машини, їх вузли та деталі працюють у складних і навіть жорстких умовах експлуатації. Так, вузли компресорних станцій магістральних газогонів, деталі тертя двигунів високошвидкісної друкарської техніки та інше

функціонують при температурах до 800°C, тисках у межах 5–8 МПа, швидкостях обертання до 600 об./хв. в умовах дії агресивного середовища – повітря. Для цих цілей створені спеціальні матеріали, які синтезовані на базі шліфувальних відходів інструментального виробництва.

Для забезпечення параметрів зносостійкості та довговічності деталей з нових композитних сплавів їх робочі поверхні (згідно з технологічними регламентами) формують надтонкими методами абразивного оброблення (тонке шліфування, магнітно-абразивна обробка, суперфініш, доводка, хонінгування).

Науковцями та технологами заводів були виконані всебічні дослідження впливу на параметри шорсткості R_a поверхонь оброблення композитних деталей складу абразивного інструменту та режимів різання при тонкому шліфуванні. Достатньо детально вивчено закономірності утворення високоякісних поверхонь тертя магнітно-абразивним обробленням [60 - 68].

На жаль, досліджень температурних факторів тонкого алмазного шліфування досі не існує. Це є причиною того, що немає реальної можливості оптимізувати технологічні процеси тонкого алмазного шліфування поверхонь тертя деталей з нових композиційних сплавів. Адже відомо, що параметри якості поверхонь при шліфуванні формуються в умовах одночасної дії силового та температурного полів, що виникають при зрізанні стружки загостреною вершиною кожного ріжучого зерна шліфувального інструменту. Складові сил різання (силове поле) утворюють залишкові напруження у поверхневому шарі деталей, що оброблюються. Одночасно, виникають температури внаслідок пластичних деформацій зрізання стружки та тертя абразивного зерна в зоні шліфування. Ці миттєві контактні температури (температурне поле) обумовлюють процеси відпочинку шару металу, що попередньо був зміцненим. Накладання одночасно процесів зміцнення та відпочинку шару металу, що обробляється, обумовлює кінцеві значення параметрів шорсткості поверхні R_a та фізичних властивостей шару (залишкових напружень, глибини та ступеню наклепу, глибини залягання наклепу).

З урахуванням наведеного були виконані серії всебічних досліджень температурного поля у зоні тонкого алмазного шліфування нових композитних матеріалів, а також вивчення впливу складу алмазного інструменту (матеріал зерна, зернистість шліфувального круга, матеріал зв'язки) та режимів різання на рівень миттєвих контактних температур.

Основними напрямками досліджень було:

1. Вивчити закономірності утворення контактних температур при тонкому алмазному шліфуванні нових композиційних сплавів, синтезованих на основі утилізованих та регенованих шліфувальних відходів інструментальних сталей 86Х6НФТ, 5Х3В3МФС та 7ХГ2ВМФ з домішками твердого мастила CaF_2 .
2. Зв'язувати, які параметри структури алмазного шліфувального круга (марка алмазу, зернистість, тип зв'язки інструменту) суттєво впливають на температурне поле при тонкому алмазному шліфуванні нових композитів.
3. Встановити рекомендації (щодо вибору для оброблення поверхонь деталей тертя, виготовлених з нових високолегованих та важкооброблюваних композиційних сплавів) по вибору типу алмазного шліфувального круга та його структури.
4. Створити технологічні регламенти для промисловості по режимам тонкого алмазного шліфування нових композитів з оптимізацією температурних показників, що виникають на вершині алмазного зерна при обробленні.

Експериментальні дослідження температурного поля при алмазній обробці нових композиційних сплавів виконувались згідно з методикою, наведеною у роботах [68].

Особливістю досліджень було те, що вони виконувались при зрізанні надтонких перерізів стружки, коли глибина шліфування перебуває у межах 0,001 – 0,005 мм.

Для досліджень використовувались зразки з нових композиційних сплавів 86Х6НФТ + 5% CaF_2 та 5Х3В3МФС + 5% CaF_2 та 7ХГ2ВМФ+5% CaF_2 [66 - 69].

Для встановлення оптимальних режимів шліфування, що забезпечують отримання максимальної якості поверхні, були досліджені залежності величини миттєвої контактної температури, усередненої за шириною круга, від режимів різання при тонкому плоскому алмазному шліфуванні.

Слід особливо підкреслити, що при проведенні досліджень перед кожним вимірюванням температур круг правився, потім деталь (зразок) шліфувалась начисто і виходжувалась протягом 3 – 5 проходів, тобто всі круги мали приблизно однаковий ступінь загострення.

Враховуючи, що зерна алмазу синтетичного (АС) мають найгострішу ріжучу кромку у порівнянні з зернами карбіду кремнія зеленого (63С), електрокорунду білого (23А) та монокорунду (М) [70], для всіх дослідів використовувались лише шліфувальні круги з синтетичного алмазу (АС).

У табл. 2.10 – 2.12 наведені результати дослідження температурного поля (миттєвих контактних температур) при алмазному шліфуванні різних за властивостями композиційних сплавів.

Таблиця 2.10 - Миттєві контактні температури (T , $^{\circ}\text{C}$) при шліфуванні зразків з 86Х6НФТ + 5% CaF_2

Глибина шліфування по лімбу верстата $t_{\text{л}}$, мм	Характеристика шліфувального круга		
	АСМ14Бр1 100%	АСМ14М1 100%	АС5Бр1 100%
	T , $^{\circ}\text{C}$		
0,005	70	85	110
0,01	110	130	150
0,02	150	180	290
0,03	175	260	370
0,05	220	380	455

Примітка: Шліфувальний верстат FF – 250 «Abawerk» (ФРН); швидкість круга $V_{\text{к}}$ – 25 м/с; швидкість виробу $V_{\text{в}}$ – 2 м/хв.; охолодження – 3% розчин содової емульсії.

Таблиця 2.11 - Миттєві контактні температури (T , $^{\circ}\text{C}$) при шліфуванні зразків з матеріалу 5Х3В3МФС + 5% CaF_2

Глибина шліфування по лімбу верстата $t_{\text{л}}$, мм	Характеристика шліфувального круга		
	АСМ14Бр1 100%	АСМ14М1 100%	АС5Бр1 100%
	T , $^{\circ}\text{C}$		
0,005	85	115	135
0,01	115	170	205
0,02	155	195	310
0,03	175	275	485
0,05	265	400	610

Примітка: Шліфувальний верстат FF – 250 «Abawerk» (ФРН); швидкість круга $V_{\text{к}}$ – 25 м/с; швидкість виробу $V_{\text{в}}$ – 2 м/хв.; охолодження – 3% розчин содової емульсії.

Таблиця 2.12 - Миттєві контактні температури (T , $^{\circ}\text{C}$) при шліфуванні зразків з матеріалу $7\text{XГ2ВМФ} + 5\%\text{CaF}_2$

Глибина шліфування по лімбу верстата $t_{\text{л}}$, мм	Характеристика шліфувального круга		
	АСМ14Бр1 100%	АСМ14М1 100%	АС5Бр1 100%
	T , $^{\circ}\text{C}$		
0,005	105	130	165
0,01	130	170	215
0,02	185	235	340
0,03	230	310	495
0,05	350	395	630

Примітка: Шліфувальний верстат FF – 250 «Abawerk» (ФРН); швидкість круга $V_{\text{к}}$ – 25 м/с; швидкість виробу $V_{\text{в}}$ – 2 м/хв.; охолодження – 3% розчин содової емульсії.

Аналіз табл. 2.10 – 2.12 показує, що тонке шліфування нових композитних матеріалів кругами з синтетичного алмазу (АС) на бакелітно-гумовій зв'язці (Бр1) при швидкості обертання шліфувального круга 25 м/с та глибинах шліфування 0,003 – 0,005 мм обумовлює виникнення в зоні оброблення мінімальних температур (100 – 260 $^{\circ}\text{C}$). Це створює придатні умови для найменших спотворень фізичних властивостей поверхневого шару деталі (залишкових напружень, глибини та ступеню наклепу), з якого відбувається зрізання надтонких стружок.

Слід звернути увагу і на те, що використання алмазних кругів на еластичній зв'язці Бр1 (з точки зору температурного поля) дає кращі результати, ніж кругів на металевій зв'язці М1. Пояснення цьому може бути знайденому саме у характеристиках зв'язки: бакелітно-гумова зв'язка – найбільш еластична. Тому сили різання, які утворюються при зрізанні стружки з поверхні оброблення, зменшують фактичну глибину врізання ріжучого зерна у поверхневий шар деталі. Це, відповідно, змінює умови різання, а саме, суттєво зменшує переріз стружки, що і викликає зниження миттєвих контактних температур та сприяє перерозподілу тисків, одночасно покращуючи умови формування рельєфу поверхні оброблення з забезпеченням необхідних показників шорсткості R_a .

Дуже важливим для технологів – практиків є результати виконаних досліджень з оптимізації вибору зернистості алмазного інструменту. Попередніми експериментами було доведено, що шліфування нових

композитних сплавів (з точки зору формування найкращої шорсткості поверхні) забезпечують дрібнозернисті шліфувальні круги.

Тому логічним і технічно обґрунтованим було вивчення впливу зернистості алмазного круга на миттєві контактні температури у зоні різання. Результати цього дослідження наведені у табл. 2.13.

Таблиця 2.13 - Вплив розміру зерна А при тонкому плоскому шліфуванні зразків з нових композитів на основі відходів інструментальних сталей [69, 70] на миттєві контактні температури (Т, °С)

Розмір зерна А алмазного інструменту, мкм	Матеріал зразків		
	86Х6НФТ + 5% CaF ₂	7ХГ2ВМФ + 5%CaF ₂	5Х3В3МФС + 5%CaF ₂
	Т, °С		
50	110	165	135
28	100	150	120
20	90	135	105
14	70	105	85

Примітка: Шліфувальний верстат FF – 250 «Abawerk» (ФРН); швидкість круга V_k – 25 м/с; швидкість виробу V_b – 2 м/хв.; глибина різання t = 0,005 мкм; охолодження – 3% розчин содової емульсії, матеріал зерна круга – алмаз синтетичний (АС); зв'язка круга – бакелітно-гумова (Бр1).

Аналіз табл. 2.13 показує, що зменшення зернистості шліфувального круга (розміру зерна А) суттєво (майже у 1,5–1,6 рази) знижує значення миттєвих контактних температур Т, °С. Це дозволяє зробити висновок, що з точки зору мінімізації температурного поля у зоні оброблення для тонкого алмазного шліфування нових композитних сплавів на основі шліфувальних відходів інструментального виробництва необхідно застосовувати дрібнозернисті інструменти з зернистістю у межах 14 – 20 мкм.

Узагальнюючи наведене, слід зазначити, що вперше в науковій практиці були досліджені закономірності утворення миттєвих контактних температур при тонкому алмазному обробленні нових композиційних сплавів, синтезованих на основі утилізованих та регенерованих шліфувальних відходів інструментальних сталей 86Х6НФТ, 7ХГ2ВМФ та 5Х3В3МФС з домішками твердого мастила CaF₂.

Показано, що на температурне поле (миттєві контактні температури) при шліфуванні суттєво впливають матеріал алмазного зерна, зернистість інструменту та матеріал зв'язки шліфувального круга.

Доведено, що для формування високих параметрів якості поверхонь оброблення деталей з нових композитів необхідно застосовувати шліфувальні круги на основі синтетичного алмазу (АС) на бакелітно-гумовій зв'язці Бр1 із зернистістю у межах 14 – 20 мкм.

За температурними показниками найкращі результати отримані з використанням таких режимів тонкого алмазного шліфування: швидкість кругу $V_{кр} - 25$ м/с, швидкість виробу $V_v - 2$ м/хв., глибина різання $t - 2 \div 5$ мкм, охолодження – 3 % розчин содової емульсії [71].

2.2 Параметри наклепу поверхневого шару композитних підшипників ковзання при тонкому алмазному шліфуванні

Відомості про технологічні засади виготовлення та прецизійної механічної обробки нових композитних підшипників детально наведені у роботах [71]. Цими дослідженнями було доведено, що на строки служби підшипників ковзання з нових композитів впливають показники якості поверхонь оброблення, а саме, параметри шорсткості поверхонь R_a та властивості поверхневого шару, з якого абразивним інструментом здійснюється зрізання тонких стружок. З цієї точки зору висувались задачі досягнення характеристик мінімальної шорсткості R_a поверхонь оброблення, яка є передумовою високих функціональних властивостей підшипників. З цією метою були створені технологічні процеси, де фінішна абразивна обробка здійснювалась із застосуванням методів тонкого абразивного та алмазного шліфування, а також методів магнітно-абразивного оброблення.

Проте, досліджень одного з найважливіших параметрів якості обробленої поверхні, яким є фізичні властивості тонкого поверхневого шару після тонкого алмазного шліфування, а саме, знак і рівень залишкових напружень у зоні оброблення, глибини та ступеню наклепу, практично немає.

Вказані обставини зумовили необхідність детального вивчення властивостей тонкого поверхневого шару після алмазної обробки робочих поверхонь нових підшипників ковзання для друкарських машин. Виконання

дослідів у цьому напрямку дає можливість науково-обґрунтовано підходити до створення технології тонкого алмазного шліфування, а відтак, призначати (в залежності від складу того чи іншого композитного матеріалу) оптимальні режими різання.

Метою таких досліджень є встановлення науково-обґрунтованих режимів тонкого алмазного шліфування робочих поверхонь підшипників ковзання з нових композиційних сплавів, синтезованих на основі утилізованих та регенованих шліфувальних відходів інструментальних сталей 86ХНФТ, 4ХБРФС та 5ХЗВЗМФС. Ці режими різання повинні забезпечити відповідні параметри якості прошліфованих поверхонь та забезпечити необхідний рівень експлуатаційних властивостей вузлів тертя високообертового друкарського обладнання.

Вивчення фізичних властивостей поверхневого шару відбувалось згідно методик, наведених у роботах [66 - 71].

Слід підкреслити, що у всіх експериментах використовувались зразки з нових композитних матеріалів 86ХНФТ+5%CaF₂, 4ХМНФС+5%CaF₂ та 5ХЗВЗМФС+5%CaF₂.

Зазначимо, що фізичні властивості поверхневого шару деталей з нових композитів, а саме - глибина та ступінь наклепу, спотворення II - го роду, знак та величина залишкових напружень, цілковито залежать від взаємодії силового та температурного полів [60 - 71].

Було враховано результати попередніх досліджень сил та миттєвих контактних температур, що виникають і одночасно діють на вершині абразивного зерна шліфувального круга при зрізанні тонких стружок з поверхні оброблення. При цьому сили різання спричиняють зміцнення тонкого поверхневого шару, у той час як миттєві контактні температури сприяють відпочинку зміцненої від дії сил різання поверхні. Як наслідок, формуються кінцеві значення параметрів якості поверхні оброблення. У роботі [69] було спрогнозовано, що при раціональному підборі режимів шліфування у майбутньому можливо буде виконувати обробку так, що відпочинок

поверхневого шару від дії температур буде здатен повністю усунути зміцнення від сил різання.

Отже, технологічні дослідження впливу режимів різання при тонкому алмазному шліфуванні на фізичні властивості поверхневого шару деталей з нових композитів є актуальними, а отримані результати створять умови, коли призначаючи відповідні режими різання, стане можливим максимально зберегти вихідні властивості матеріалу, з якого виготовлено деталі тертя. Це, в свою чергу, забезпечить відповідне зменшення зносу при терті поверхонь підшипників ковзання та значно підвищить строк служби деталі та' друкарської машини у цілому, зокрема, апарату КВА «Rapida - 105».

Результати експериментальних досліджень параметрів зміцнення поверхневого шару при тонкому алмазному шліфуванні зразків з нових підшипникових матеріалів наведені у табл. 2.14 – 2.18.

Таблиця 2.14 - Залежність наклепу від матеріалу зв'язки круга при алмазному шліфуванні зразків із сплаву 86Х6НФТ+5%СаF₂

Абразивний інструмент	Зернистість, мм	Зв'язка інструменту	Параметри наклепу		
			$\Delta a/a \cdot 10^{-4}$	Нз, МПа	К
АС5К1 100%	50	Керамічна	21-22	4190	1,16
АС5М1 100%	50	Металева	20-22	4290	1,19
АС5Бр1 100%	50	Бакелітно - гумова	19-20	4120	1,14
АС5Бр2 100%	50	Бакелітно - гумова	19-21	4200	1,17
АСМ28К1 100%	28	Керамічна	18-19	3900	1,08
АСМ28Бр1 100%	28	Бакелітно - гумова	16-17	3850	1,07
АСМ14К1 100%	14	Керамічна	13-15	3800	1,05
АСМ14Бр1 100%	14	Бакелітно - гумова	12-14	3710	1,03
АСМ14М1 100%	14	Металева	15-17	3750	1,04
АСМ10К1 100%	10	Керамічна	13-16	3700	1,02
АСМ10Бр1 100%	10	Бакелітно - гумова	10-12	3650	1,01

Примітка: 1. $\Delta a/a$ – спотворення 2-го роду; 2. Нд – мікротвердість деталі за Вікерсом; 3. К – ступінь наклепу (Нд/Нз); 4. Показники наклепу зразків без обробки: $\Delta a/a \cdot 10^{-4}=0$, Нз = 3600 МПа; 5. шліфувальні круги з алмазного (АС) на керамічній (К1), металевий (М1) та бакелійно-гумовий (Бр1, Бр2). Зв'язках зі 100%-ю концентрацією алмазу; 6. Режими шліфування: однопровідне плоске з виходжуванням, верстат FF -250 “Abawerk” (ФРН), швидкість круга $V_{кр} = 22$ м/с, швидкість виробу $V_v = 2$ м/хв., глибина різання $t = 2$ мкм, охолодження - 3% розчин содової емульсії.

Таблиця 2.15 - Залежність наклепу від матеріалу алмазного зерна при шліфуванні зразків зі сплаву 86Х6НФТ+5%СаF₂ крупнозернистими кругами

Абразивний інструмент	Зернистість, мм	Параметри наклепу			Охолодження при обробці
		$\Delta a/a \cdot 10^{-4}$	Нз, МПа	К	
АС10Бр1 100%	100	21,5-22,5	4350	1,20	емульсія
А10Бр1 100%	100	21-22	4300	1,15	емульсія
АС5Бр1 100%	50	19-20	4120	1,14	емульсія
АС5Бр1 100%	50	18-19	4080	1,13	емульсія
А5М1 100%	50	19,5-21	4120	1,14	емульсія
А5К1 100%	50	19-19,5	4100	1,14	емульсія
А5К1 100%	50	20-20,5	4200	1,17	без охолодження
А5М1 100%	50	20,5-21	4270	1,18	без охолодження
63С10Гл	100	23,7-24	5400	1,50	емульсія

Примітка: 1. $\Delta a/a$ – спотворення 2-го роду; 2. Нд – мікротвердість деталі за Вікерсом; 3. К – ступінь наклепу (Нд/Нз); 4. Показники наклепу зразків без обробки: $\Delta a/a \cdot 10^{-4}=0$, Нз = 3600 МПа; 5. Шліфувальні круги з алмазу синтетичного (АС) та алмазу природного (А) на керамічній (К1), металевий (М1) та бак елітно-гумовий (Бр1) зв'язках зі 100%-ю концентрацією алмазу. Для порівняння – круг 63С10Гл з карбіду кремнію зеленого (63С) на гліфталевий зв'язці (Гл); 6. Режими шліфування: однопрохідне плоске з виходжуванням, верстат FF -250 “Abawerk” (ФРН), швидкість круга $V_{кр} = 22$ м/с, швидкість виробу $V_v = 2$ м/хв., глибина різання $t = 2$ мкм, охолодження - 3% розчин содової емульсії.

Таблиця 2.16 - Залежність наклепу від матеріалу зерен при алмазному шліфуванні зразків зі сплаву 86Х6НФТ+5%СаF₂ дрібнозернистими кругами

Абразивний інструмент	Параметри наклепу			Охолодження при обробці
	$\Delta a/a \cdot 10^{-4}$	Нз, МПа	К	
АСМ28БР1 100%	16,5-17,5	3870	1,07	емульсія
АСМ28БР1 100%	17-18	3910	1,08	без охолодження
АМ28БР1 100%	16-17	3850	1,06	емульсія
АМ28БР1 100%	17-17,8	3900	1,08	без охолодження
АСМ20БР1 100%	15-16,5	3810	1,05	емульсія
АСМ14БР1 100%	12-14	3710	1,03	емульсія
АМ14БР1 100%	12-12,5	3695	1,02	емульсія
АСМ10БР1 100%	10-12	3650	1,01	емульсія
АСМ10БР1 100%	11-11,5	3720	1,03	без охолодження
АМ10БР1 100%	10,5-11	3680	1,02	емульсія
АМ10БР1 100%	11,5-12,5	3700	1,03	без охолодження
63СМ14Гл	23-23,5	4140	1,15	емульсія

Примітка: 1. $\Delta a/a$ – спотворення 2-го роду; 2. Нд – мікротвердість деталі за Вікерсом; 3. К – ступінь наклепу (Нд/Нз); 4. Показники наклепу зразків без обробки: $\Delta a/a \cdot 10^{-4}=0$, Нз = 3600 МПа; 5. Шліфувальні круги з алмазу синтетичного (АС) та алмазу природного (А) на бекалітно-гумовий (Бр1) зв'язках зі 100%-ю концентрацією алмазу. Для порівняння – круг 63С10Гл з карбіду кремнію зеленого (63С) на гліфталевий зв'язці (Гл); 6. Режими шліфування: однопрохідне плоске з виходжуванням, верстат FF -250 “Abawerk” (ФРН), швидкість круга $V_{кр} = 22$ м/с, швидкість виробу $V_v = 2$ м/хв., глибина різання $t = 2$ мкм, охолодження - 3% розчин содової емульсії.

Таблиця 2.17 - Залежність ступеню наклепу К від зернистості при алмазному шліфуванні зразків з досліджуваних сплавів з синтетичних алмазів (АС) на еластичній бакелітно-гумовій зв'язці (Бр1)

Абразивний інструмент	Зернистість, мм	Матеріал композитних зв'язків		
		86ХНФТ+5%CaF ₂	4ХБРФС+5%CaF ₂	5ХЗВЗМФС+5%CaF ₂
		Параметри наклепу К		
АС10БР1 100%	100	1,20	1,23	1,22
АС5БР1 100%	50	1,14	1,17	1,16
АСМ28БР1 100%	28	1,07	1,12	1,11
АСМ20БР1 100%	20	1,05	1,08	1,07
АСМ14БР1 100%	14	1,03	1,5	1,04
АСМ7БР1 100%	7	1,02	1,03	1,03

Примітки: 1. К - ступінь наклепу (H_d/H_3); 2. Показник наклепу зразка $H_3 = 3600$ МПа; 3. Режим шліфування: однопрохідне плоске з виходжуванням, верстат FF-250 "Abawerk" (ФРН), швидкість круга $V_{кр} = 22$ м/с, швидкість виробу $V_v = 2$ м/хв., глибина різання $t = 2$ мкм, охолодження - 3% розчин содової емульсії.

Таблиця 2.18 - Параметри наклепу на різних рівнях наклепаної зони при алмазному шліфуванні зразків з композитного сплаву 86ХНФТ+5%CaF₂

Вид обробки тип круга	Глибина шару вимірювання , мкм							
	1		3		5		10	
	Параметри наклепу							
	$\Delta a/a \cdot 10^{-4}$	К	$\Delta a/a \cdot 10^{-4}$	К	$\Delta a/a \cdot 10^{-4}$	К	$\Delta a/a \cdot 10^{-4}$	К
Без охолодження АС10БР1 100%	21,5- 22,5	1,21	21-22	1,20	20,5- 21,5	1,19	19,5- 20,5	1,15
З охолодження А10БР1 100%	21-22	1,19	20,5- 21,5	1,18	20-21	1,17	19-20	1,13
З охолодження АС10БР1 100%	21,5- 22,5	1,20	21-22	1,19	20,5- 21,5	1,18	19,4- 20,1	1,14
З охолодження АСМ28БР1 100%	16,5- 17,5	1,07	16-17	1,06	15,5- 16,5	1,05	14-15,55	1,01
Без охолодження АСМ28БР1 100%	17-18	1,08	16,5- 17,5	1,07	16-17	1,06	13-15	1,02
З охолодження АМ28Р1 100%	16-17	1,06	15,5- 16,5	1,05	15-16	1,04	12-14	1,01
З охолодження АСМ20БР1 100%	15-16,5	1,05	14,5- 15,5	1,04	14-16	1,03	13-13,5	1,01
З охолодження АСМ14БР1 100%	12-14	1,03	11,5- 13,5	1,02	11-13	1,01	10,-12,5	1,01
Без охолодження АСМ14БР1 100%	12,5-13	1,02	12-12,5	1,01	11,5-12	1,01	10-12	1,01
З охолодження АМ14БР1 100%	12-12,5	1,02	11,5-12	1,01	11-11,5	1,01	10,5-11	1,01
З охолодження АСМ10БР1 100%	10-12	1,01	9,5-11,5	1,01	9-11	1,01	8,5-10	1,01
Без охолодження АСМ10БР1 100%	11-11,5	1,03	10,5-11	1,02	10-10,5	1,01	8-9,5	1,01
З охолодження АМ10БР1 100%	10,5-11	1,02	10-10,5	1,01	9-10	1,01	7-9	1,01
З охолодження АСМ7БР1 100%	9,5-10,5	1,01	9-10	1,01	8,5-9,5	1,01	6,5-8	1,01

Примітки: 1. $\Delta a/a$ - спотворення II-го роду; 2. K - ступінь наклепу (H_d/H_z); H_d - мікротвердість деталі за Вікерсом; H_z - мікротвердість зразка за Вікерсом 3. Показники наклепу зразка: $\Delta a/a \cdot 10^{-4} = 0$, $H_z = 3600$ МПа; 4. Шліфувальні круги: алмазний (АС) та алмаз природний (А) на бакелітно-гумовій (Бр1) зв'язці зі 100%-юконцентрацією алмазу; 5. Режим шліфування: однопрохідне плоске з виходжуванням, верстат FF-250 "Abawer" (ФРН), швидкість круга $V_{кр} = 22$ м/с, швидкість виробу $V_v = 2$ м/хв., глибина різання $t = 2$ мкм, охолодження - 3% розчин содової емульсії.

З табл. 2.14 – 2.18 видно, що при визначенні залежностей утворення наклепу при тонкому алмазному шліфуванні деталей з нових композитних матеріалів виявлено наступні закономірності: обробка круглими на еластичних зв'язках забезпечує менший наклеп, ніж обробка на жорсткій керамічній ($K1$) та металевій ($M1$) зв'язках: спотворення II роду $\Delta a/a$, мікротвердість H_d та ступінь наклепу K більші при застосуванні шліфувальних інструментів на жорстких зв'язках. Це є характерним для всіх досліджуваних складів композиційних сплавів, синтезованих з відходів інструментальних сталей. Також слід відзначити схожість цієї залежності як при застосуванні крупнозернистих, так і дрібнозернистих шліфувальних інструментів.

Пояснення цьому може бути надано з урахуванням властивостей бакелітно-гумової зв'язки, а саме, її меншою жорсткістю, більшою еластичністю у порівнянні, наприклад, з керамічною. Внаслідок цього під час зрізання стружки з поверхні зразка, що досліджується, на ріжучому лезі абразивного зерна утворюється відповідна сила різання, яка залежить від технологічних режимів різання. Ця сила деформує шар матеріалу і обумовлює утворення у ньому різних дефектів (наклеп, спотворення II роду, залишкові напруження). При цьому, саме завдяки еластичності бекалітно-гумової зв'язки, сили різання перерозподіляються і демпфують ріжуче зерно у тіло шліфувального круга. Це зменшує фактичну глибину шліфування і відповідно, зменшує складові сили шліфування, які у свою чергу обумовлюють зменшення параметрів наклепу [71, 73].

При тонкому алмазному шліфуванні деталей тертя з нових композиційних сплавів виявлено залежність параметрів наклепу від материну зерна алмазу, на основі якого формується шліфувальний інструмент.

Експериментально доведено, що мінімальні спотворення II роду, мікротвердість, ступінь наклепу та глибина залягання дефектів за товщиною поверхневого шару забезпечують застосування шліфувальних кругів на основі природного алмазу (А).

Найбільш чітко це проявляється при тонкому алмазному шліфуванні крупнозернистими інструментами (табл. 2.15), хоча така ж залежність існує і для випадку шліфування дрібнозернистими кругами (табл. 2.16).

Узагальнюючи всю сукупність експериментальних даних як для крупнозернистих, так і дрібнозернистих інструментів, необхідно зробити загальний висновок про зменшення наклепу при тонкому шліфуванні алмазними кругами для всієї гами досліджених нових композитних матеріалів. Зменшення наклепу можна пояснити більш гострою формою ріжучого леза кожного окремого зерна алмазу та більшою міцністю їх, здатних при шліфуванні сприймати та передавати деформованим мікро об'ємам металу (в процесі зрізання стружки) менші навантаження, ніж зерна електрокорунду білого (23А) і карбиду кремнію зеленого (63С). Ці висновки повністю співпадають з висновками, що отримані при дослідженні силового поля при тонкому абразивному шліфуванні нових композитних сплавів, зокрема, зі значеннями питомих складових сил шліфування (P_x , P_y , P_z), які припадають на кожне поодиноке ріжуче зерно, що знаходиться у шарі оброблення і зрізає тонку стружку з перерізом a_z [74].

Аналіз даних табл. 2.17 – 2.18 показує, що існує фактичний зв'язок між параметрами наклепу та зернистістю інструменту. Незалежно від виду алмазного інструменту зі зменшенням його зернистості (у діапазоні 100-7 мкм) параметри наклепу зменшуються. Мінімальний наклеп забезпечує шліфування кругами зернистістю 14 мкм на основі алмазу синтетичного (АС) на бакелітно-гумовій зв'язці (Бр1) зі 100%-ю концентрацією алмазу (АСМ14 100%). Підвищення ступеню наклепу зі збільшенням розміру зерна пояснюється суттєвим збільшенням силової дії на мікро об'єм металу, у зв'язку з чим зростає ступінь пластичної деформації.

Необхідно зазначити, що отримані висновки про закономірності утворення наклепу підтверджуються різними фізичними методами вимірювання (рентгеноструктурний аналіз, металографія, індукційне зондування поверхні оброблення) [72 - 74]. Це свідчить про наявність внутрішнього зв'язку між різними параметрами наклепу та підтверджує достовірність результатів досліджень.

Задача отримання кореляційних моделей зв'язку між різними досліджуваними параметрами не ставилась. Проте, слід звернути увагу на те, що у більшості випадків параметри наклепу менші при шліфуванні з охолодженням змазувально-охолоджуючою рідиною, ніж при різанні без охолодження. Це пояснюється більшим впливом миттєвих контактних температур при зрізанні стружки. Але питання застосування охолоджуючої рідини при тонкому шліфуванні нових композиційних сплавів повинно вирішуватись у комплексному поєднанні з призначенням режимів різання, які також повинні забезпечити мінімальну шорсткість поверхні оброблення нових високошвидкісних підшипників, що є важливим показником якості і суттєво впливає на параметри зношування при їх роботі і довговічності відповідних вузлів, зокрема, ротаційних поліграфічних машин типу КВА «Rapida - 105».

Аналіз табл. 2.18 показує, що глибина наклепаної зони залежність від зернистості інструменту, зменшуючись від 20 мкм (при розмірі зерна 50 – 100 мкм) та до 1 мкм (при розмірі зерна 7-14 мкм).

Таким чином, можна дійти висновку, що при тонкому алмазному шліфуванні нових композитних сплавів відбуваються складні процеси зміцнення та відпочинку тонкого шару поверхонь тертя нових підшипників ковзання, які впливають на показники стійкості та довговічності. Знання закономірностей утворення наклепу дозволяє технологам промислових підприємств створювати технологічні процеси, які враховують вплив складу алмазного інструменту на параметри якості деталей підшипників ковзання та інших деталей тертя друкарських машин і механізмів. Це дозволяє

оптимізувати режими різання, створювати реальні технологічні процеси для виробництва.

Таким чином, узагальнюючи комплекс наведених даних, отримані такі важливі для інженерної практики висновки:

Показано, що на параметри наклепу поверхневого шару суттєво впливають матеріал зерна алмазу (природній чи синтетичний), зернистість шліфувального круга та тип зв'язки алмазного інструменту, а також такий технологічний фактор, як застосування для оброблення змазувально-охолоджуючої рідини.

Найкращі показники параметрів наклепу, а саме мінімальні спотворення II-го роду, мінімальна мікротвердість та ступінь наклепу, а також мінімальна глибина утворення наклепу у шарі поверхні оброблення деталі забезпечують інструменти з природного (А) та синтетичного (АС) алмазу зернистістю 14-20 мкм на бакелітно-гумовій зв'язці (Бр1) при 100%-ій концентрації алмазу.

Для забезпечення необхідних умов якості поверхневого шару (параметри наклепу, шорсткість поверхні оброблення) тонке алмазне шліфування підшипників з нових композиційних матеріалів необхідно виконувати із застосуванням тонких режимів різання, а саме: швидкість круга 22 м/с, швидкість виробу (поздовжня подача) - 2 м/хв., глибина різання - 2 мкм, охолодження - 3 % розчин содової емульсії.

2.3 Специфіка тонкого алмазного шліфування композитних деталей тертя з алюмінію для друкарських машин

У конструкціях новітнього обладнання поліграфічної галузі набули широкого розповсюдження зносостійкі композиційні матеріали, які одержані з цінної та дешевої сировини – промислових шліфувальних відходів кольорових металів, насамперед, алюмінієвих сплавів та які, на жаль, навіть на сьогодні, здебільше вивозяться у відвали і не використовуються у повторному циклі виробництва.

На основі розгалужених науково-дослідних робіт з регенерації та повторного використання у виробничому циклі цих сировинних ресурсів [60 -

70] в останні роки були створені оригінальні високозносостійкі композиційні сплави на основі алюмінію АК12М2МгН, АМ4,5Кд, АК8М3ч та АК12ММгН + (9 – 12 %) MoS_2 [69 - 72]. Вони пройшли всебічну перевірку в умовах дії агресивного оточуючого середовища (кисень, повітря, виробничий пил з абразивною властивістю, температурні навантаження при експлуатації у межах 100 – 170 °С, питомі навантаження до 7 МПа) і широко застосовуються для виготовлення деталей тертя (скоби, направляючі, затли та інші) у ножових різальних машинах поліграфії типу WOHLBERG Trim-tec 560, у висікальному обладнанні паперу та картону типів DROSSERTST-6, BOBSTMISTRAL 110 A2, машин легкої промисловості (автооператорів панчохов'язальних машин типу PALERMO – 105SR, укладачів швидкісних ткацьких верстатів SPRINT – 1205PI) та машин харчової промисловості (лоткові системи, маніпулятори і затискувачів).

Зносостійкий матеріал на основі алюмінієвого сплаву АК12ММгН з домішками твердого мастила (дисульфід молібдену MoS_2) набув визнання у конструкторів і наразі широко використовується у вузлах тертя машин і механізмів, що працюють при підвищених навантаженнях і температурах без змащування рідким мастилом.

Відомо [72 - 74], що зносостійкість деталей, як один із головних параметрів надійності обладнання, суттєво залежить від параметрів якості поверхонь тертя і, в першу чергу, від шорсткості та фізичних властивостей поверхневого шару. Ці параметри формуються на фінішних операціях тонкого абразивного оброблення.

Деякі основні властивості нових зносостійких композиційних матеріалів на основі алюмінію наведені у табл. 2.19.

У зв'язку з тим, що нові композиційні сплави на основі алюмінію знайшли своє використання у машинобудуванні та приладобудуванні відносно нещодавно, розгалужених та всебічних досліджень процесів їх тонкого абразивного оброблення до цього часу практично немає. Зроблено лише перші кроки у цьому напрямку, зокрема, є поодинокі публікації, присвячені

дослідженню впливу складу інструменту та режимів різання на параметри шорсткості поверхонь при тонкому абразивному шліфуванні [74, 75].

Таблиця 2.19 Фізико-механічні та антифрикційні властивості композитів на основі алюмінію

Властивості композитів	Марка композиційного сплаву			
	AK12M2MgH [175]	AM4,5Kд [174]	AK8M3ч [173]	AK12MMgH + (9-12)% MoS ₂ [177]
Межа міцності на розтяг, МПа	180 - 185	187-190	187-195	190-197
Твердість НВ, МПа	550 -570	580-600	590-610	595-615
Ударна в'язкість, кДж/м ²	0,18 - 0,30	0,22- 0,34	0,25 - 0,35	0,27-0,37
Коеф. тертя при 5 МПа	0,0075 - 0,0080*	0,0077 - 0,0082**	0,0045 - 0,0048**	0,0038-0,0050**
Інтенсивність зношування при 5 МПа	3,9*	5,3*	2,66- 2,69**	2,61-2,65
Інтенсивність зношування контртіла при 5 МПа	Сліди	0,005*	0,002**	сліди
Гранична температура, °С	120	170	150	155
Граничне навантаження, МПа	7	7	6**	6,5**

Примітка: * - випробування при 100 °С; ** - випробування при 150 °С; змащування індустріальним мастилом «І – 20» в парі з контртілом зі сталі 45 (45 - 48 HRC).

Виходячи із загальних положень теорії абразивного оброблення матеріалів [74, 75] та враховуючи специфічні властивості композиційних сплавів на основі алюмінію, було б вельми корисним для формування необхідних параметрів шорсткості поверхонь тертя при їх обробленні застосовувати шліфувальні круги з надтвердих синтетичних матеріалів, зокрема, з синтетичного алмазу АС. На жаль, досліджень у цьому напрямку до сьогодні не велось. Це, безумовно, є перешкодою до повного використання усіх резервів підвищення зносостійкості за рахунок використання, притаманних лише їм, властивостей найновітніх марок композитів на основі алюмінію і, у тому числі, зростання параметрів зносостійкості, надійності та довговічності шляхом формування найкращих параметрів шорсткості методами тонкого алмазного шліфування.

В науково-технічній літературі є багато публікацій по застосуванню інструментів з надтвердих синтетичних алмазів для обробки деталей різних галузей виробництва [75]. Науковцями та практикою провідних машинобудівних підприємств доведено, що застосування алмазного

шліфування (перш за все, завдяки особливостям інструменту) дозволяє отримати найкращі показники якості оброблюваних поверхонь.

Втім відсутність технологічних рекомендацій з алмазного шліфування високолегованих та важкооброблюваних композитних сплавів призводить до застосування на практиці різних технологічних схем шліфування, далеко не завжди оптимальних. Вказане викликає поширення різних технологій, часто суттєво протирічних, і які здебільшого створені відповідно до можливостей того чи іншого підприємства.

Тому дослідження технологічних процесів тонкого алмазного шліфування композиційних матеріалів на основі алюмінію є актуальним питанням, що має безсумнівне як наукове, так і, що не менш важливо, практичне значення для технологів-виробників.

Метою даного розділу монографії було дослідження параметрів шорсткості поверхонь при тонкому алмазному шліфуванні деталей тертя з нових композиційних матеріалів на основі алюмінію АК12М2МгН, АМ4,5Кд, АМ8МЗч та АК12ММгН + (9–12 %) MoS₂ та встановлення впливу зернистості шліфувального круга, типу зв'язки інструменту і основних режимів різання на якісні показники поверхонь оброблення досліджуваних деталей тертя.

Експериментальні дослідження з означеної науково-технічної задачі виконувались згідно з методикою наведеною у роботах [76]. Їх результати наведені у табл. 2.20.

Аналіз даних табл. 2.20 показує, що параметр шорсткості R_a змінюється зі зміною режимних факторів оброблення—глибини шліфування, поперечної та поздовжньої подач.

Обробка експериментів за допомогою статистичних методів, зокрема, із застосуванням методу Ст'юдента для випадку залежних змінних оброблених зразків при фіксованих значеннях двох варіюючих величин (наприклад, V_v , t) та при змінній третій величині (наприклад, $S_{\text{поп.}}$), показала, що досліджені сукупності суттєво різні.

Аналогічні результати отримані при порівнянні вибірок для подач 0,1 – 1,0 мм/подв. хід та швидкостей 2 – 10 м/хв. Слід зауважити, що зі збільшенням різниці між подачами порівнюваних вибірок і різниці між швидкостями відмінності між табличним та розрахунковим розподілом Ст'юдента зростають. Це дозволяє зробити висновок, що існує зв'язок між параметром шорсткості поверхні R_a та глибиною різання t : $R_a = f(t)$, $S_{\text{поп}} = \text{const}$, $V_B = \text{const}$.

Використовуючи методи математичної статистики, неважко показати, що існує зв'язок між параметром R_a та поперечною подачею $S_{\text{поп}}$: $R_a = f(S_{\text{поп}})$, $V_B = \text{const}$, $t = \text{const}$.

Аналогічний статистичний зв'язок існує між параметром шорсткості R_a та швидкістю V_B : $R_a = f(V_B)$, $S_{\text{поп}} = \text{const}$, $t = \text{const}$.

Дослідження фактичного зв'язку між шорсткістю поверхні та режимними факторами шліфування методами кореляційного аналізу дозволило встановити кількісні співвідношення між досліджуваними факторами.

Таблиця 2.20 Параметр шорсткості R_a при тонкому плоскому шліфуванні композитного сплаву АК12М2МГН [75 - 77]

Поперечна подача $S_{\text{поп}}$, мм/подв. хід	Швидкість виробу (поздовжня подача) V_B м/хв.	Глибина шліфування t , мм		
		0,002	0,01	0,05
		R_a , мкм		
0,1	2	0,212	0,340	0,380
	5	0,315	0,350	0,400
	10	0,330	0,395	0,440
0,2	2	0,370	0,410	0,455
	5	0,395	0,435	0,445
	10	0,410	0,465	0,580
0,5	2	0,490	0,500	0,600
	5	0,545	0,565	0,670
	10	0,610	0,620	0,700
1,0	2	0,680	0,705	0,770
	5	0,740	0,775	0,820
	10	0,800	0,840	0,890

Примітки: Верстат – FF-350 “Abawerk” (ФРН), абразив – алмаз синтетичний АСМ14Бр1 100% на бакелітно-гумовій зв'язці БР1, швидкість круга – 25 м/с, обробка без охолодження.

Для отримання рівняння множинної кореляції на основі наведених експериментальних даних були знайдені коефіцієнти кореляції парних залежностей $R_a - t$; $R_a - S_{\text{п}}$; $R_a - V_B$; $S_{\text{поп}} - V_B$; $S_{\text{поп}} - t$; $t - V_B$.

Проведені розрахунки показують, що між факторами R_a , $S_{\text{поп.}}$, V_v , t існує щільний лінійний зв'язок. Формальний математичний аналіз показує, що між факторами $S_{\text{поп.}} - t$, $t - V_v$, $S_{\text{поп.}} - V_v$ зв'язок відсутній, хоча це видно із загальних технічних міркувань. Отримані коефіцієнти кореляції r_k далекі від 1. Це свідчить про те, що крім даного фактору (для якого визначено r_k), на R_a впливають й інші фактори. Значення коефіцієнтів кореляції вказує на ступінь впливу на шорсткість поверхні досліджуваних факторів.

Найбільший вплив на параметр шорсткості R_a чинять глибина різання t та поперечна подача $S_{\text{поп.}}$, найменше – швидкість випробу V_v .

Рівняння множинної кореляції для досліджуваних факторів має вигляд:

$$R_a = 0,265S_{\text{п}} + 5,1t + 0,0053V_v - 0,0441 \quad (2.6)$$

Аналіз формули (2.6) показує, що на параметр шорсткості R_a чинять найбільший вплив глибина шліфування t та поперечна подача $S_{\text{п}}$, а найменший – швидкість виробу V_v .

Точність цієї моделі можна підвищити, якщо розділити весь діапазон режимів плоского шліфування на дві групи:

I – а група:

- поперечна подача $S_{\text{п}} = 0,01 - 0,02$ мм/подв.хід;
- глибина шліфування $t = 0,002 - 0,100$ мм;
- швидкість виробу $V_v = 2,0 - 4,0$ м/хв.

II – а група:

- поперечна подача $S_{\text{п}} = 0,5 - 1,0$ мм/подв.хід;
- глибина шліфування $t = 0,02 - 0,05$ мм;
- швидкість виробу $V_v = 5,0 - 15,0$ м/хв.

Після деяких перетворень рівняння (2.1) може бути трансформоване і набуде вигляду:

I – а група:

$$R_a = 0,2655S_{\text{п}} + 5,12t + 0,0053V_v - 0,0065 \quad (2.7)$$

II – а група:

$$R_a = 0,2547S_{\text{п}} + 5,31t + 0,0055V_v - 0,0546 \quad (2.8)$$

Розраховані за формулами (2.7) і (2.8) значення R_a відрізняються від експериментальних на 12 – 15%, що дозволяє використовувати дані формули для практичних розрахунків. Наприклад, знаючи конкретні значення $S_{\text{поп.}}$, t , V_v для даного ельборового інструменту, можна орієнтовно визначити яким буде параметр R_a та оцінити (з точки зору вимог, що висуваються до підшипників) прийнятність вибраних режимів шліфування.

Слід зазначити, що отримані висновки підтверджуються також при тонкому алмазному шліфуванні кругами різної зернистості M50, M28, M14, M7. Відповідні експериментальні дані наведені у табл. 2.21.

Аналіз даних табл. 2.21 дозволяє зробити суттєві практичні висновки: найменшу шорсткість поверхні у досліджуваному діапазоні зернистості інструменту (7 – 100 мкм) забезпечують алмазні круги з зернистістю 7 мкм. Ці результати можуть бути пояснені загальними положеннями теорії шліфування.

Таблиця 2.21 Вплив зернистості інструменту на параметр шорсткості поверхні R_a при тонкому плоскому алмазному шліфуванні деталей з композитних сплавів на основі алюмінію [73 – 75, 77]

Характеристика ельборового (ЛО) інструменту	Матеріал зразків		
	AK12M2MгH	AM4,5Kд	AK8M3ч
	R_a , мкм		
AC10Br1 100%	0,890	0,871	0,855
AC 5Br1 100%	0,850	0,835	0,815
AC M28Br1 100%	0,261	0,240	0,260
AC M20 Br1 100%	0,225	0,207	0,210
AC M14 Br1 100%	0,212	0,203	0,195
AC M10 Br1 100%	0,201	0,190	0,186
AC M7 Br1 100%	0,181	0,174	0,163
63CM14Гл	0,673	0,621	0,615
63CM7Гл	0,367	0,358	0,345

Примітки: Верстат – FF-350 «Abawerk» (ФРН); режими шліфування: швидкість круга – 25 м/с; поздовжня подача (швидкість виробу) – 2 м/хв; поперечна подача – 0,1 мм/подв.хід; глибина різання – 0,002 мм; обробка – без охолодження.

Дійсно, збільшення шорсткості поверхонь зі зростанням зернистості обумовлюється збільшенням перерізу a_z зрізу шару металу. Покращення шорсткості також пояснюється і тим, що зерна алмазу мають достатньо гостру форму (мінімальний кут загострення при вершині зерна) та найменший (у порівнянні з зернами карбіду кремнію зеленого та електрокорунду) радіус округлення одиничного зерна (табл. 2.22.) [78, 79].

В результаті математичної обробки експериментальних даних було отримано кореляційне рівняння зв'язку параметру шорсткості R_a з зернистістю А алмазного інструменту, що має вигляд:

$$R_a = 0,0051S_n - 0,0069 \quad (2.9)$$

Таким чином, знаючи зернистість алмазного шліфувального круга А можна розрахувати параметр шорсткості R_a і впевнитись у тому, що вибраний інструмент забезпечить вимоги до якості робочих поверхонь деталей тертя. Це значно спрощує зусилля технологів-практиків при виборі шліфувального інструменту під час проектування технологічних процесів.

Суттєвим питанням є і те, як впливає склад зв'язки алмазного круга на параметр шорсткості поверхні R_a , результати дослідження якого наведені у табл. 2.22.

Таблиця 2.22 Середні значення геометрії кута ріжучих зерен у різних абразивних матеріалів

Абразивний матеріал	Зернистість	Геометрія вершини зерна	
		Радіус заокруглення ρ , мкм	Кут при вершині, град.
Алмази природні	A10/8	2,8	78,1
	A6/5	2,3	73,3
	AM14/10	1,6	70,2
Алмази синтетичні	AC10/8	2,2	57,4
	AC6/5	1,1	52,2
	ACM14/10	0,7-0,8	49,5
Ельбор	63C10	7,5	95,1
	63CM28	2,3	92,1
	63CM14	2,0	90,6
Карбід кремнію зелений	ЛО10/8	2,25	58
	ЛО6/5	1,15	53
	ЛОМ14/10	0,8-0,85	50,1
Електрокорунд білий	23A10	9,5	98,3
	23AM28	2,7	94,7
	23AM14	2,4	92,5

Зазначимо, що основні експерименти проводились на зразках композитів на типу АК12М2МгН і дещо обмежена кількість дослідів виконувалась на зразках композитів інших марок, для встановлення загальних закономірностей.

Аналізуючи дані табл. 2.23, необхідно зазначити, що найкращі значення параметрів шорсткості R_a поверхонь оброблення деталей з нових композитних сплавів на основі алюмінію забезпечують алмазні круги на бакелітно-гумовій зв'язці Бр1. Це може бути пояснено її більш еластичною здатністю і, таким чином, при шліфуванні (під час врізання абразивного зерна у метал) під дією складових сил різання кожне зерно начебто демфується в напрямку пружно-еластичного середовища зв'язки. Це обумовлює фактичне зменшення глибини різання. Отже, змінюються умови формування шорсткості поверхні оброблення і, як наслідок, зменшується параметр шорсткості R_a , який є одним із найголовніших факторів, що характеризує якість поверхні після тонкого ельборового шліфування.

Таблиця 2.23 Вплив матеріалу зв'язки алмазного круга на параметр шорсткості обробленої поверхні R_a зразків з композитів на основі алюмінію АК12М2МгН при плоскому шліфуванні

Характеристика абразивного інструменту	Матеріал зв'язки круга	Параметр шорсткості R_a , мкм
АС5Б1 100 %	Бакелітна Б1	0,920
АС5Бр 100 %	Бакелітно-гумова Б1	0,850
АС5К1 100 %	Керамічна К1	1,210
АС5М1 100 %	Металева М1	1,105
АСМ28Б1 100 %	Бакелітна Б1	0,300
АСМ28Бр1 100 %	Бакелітно-гумова Бр1	0,261
АСМ28К1 100 %	Керамічна К1	0,490
АСМ14Б1 100 %	Бакелітна	0,225
АСМ14Бр1 100 %	Бакелітно-гумова Бр1	0,212
АСМ14К1 100 %	Керамічна	0,300
АСМ10Бр1 100 %	Бакелітно-гумова Бр1	0,201
АСМ7Бр1 100 %	Бакелітно-гумова Бр1	0,181

Примітки: Верстат – FF-350 «Abawerk» (ФРН); режими різання: швидкість круга – 25 м/с; поздовжня подача (швидкість виробу) – 2 м/хв; поперечна подача – 0,1 мм/подв.хід; глибина різання – 0,002 мм; шліфування – без охолодження

Слід зауважити, що ці висновки зроблені на підставі аналізу фактичних даних, отриманих під час експериментального дослідження із застосуванням

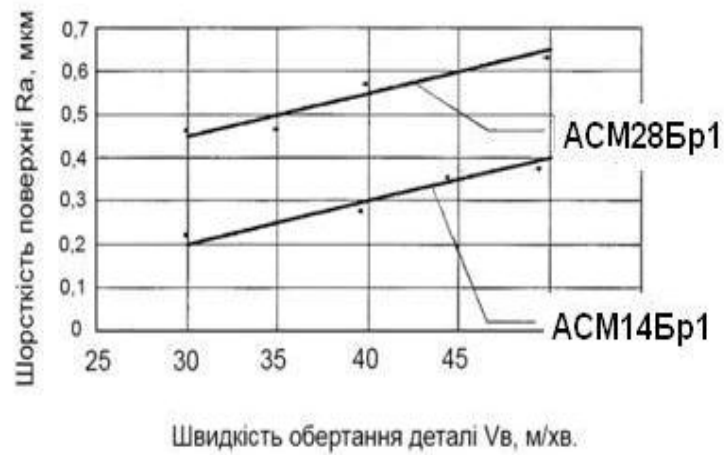
широкої гами зв'язок (бакелітна, керамічна, металева, бакелітно-гумова) та зернистостей алмазного круга (100, 28, 14, 10 та 7 мкм).

Приймаючи до уваги те, що фізичні явища у процесі різання металів принципово подібні для плоского, зовнішнього круглого та внутрішнього шліфування, експериментальне дослідження процесів зовнішнього круглого і внутрішнього алмазного шліфування деталей тертя з композитних матеріалів на основі алюмінію виконувалось з урахуванням вищенаведених результатів. Зокрема, для дослідів використовувались алмазні інструменти з синтетичного алмазу АС зернистістю 14 – 28 мкм, які сформовані у шліфувальні круги бакелітно-гумовою зв'язкою (Бр1).

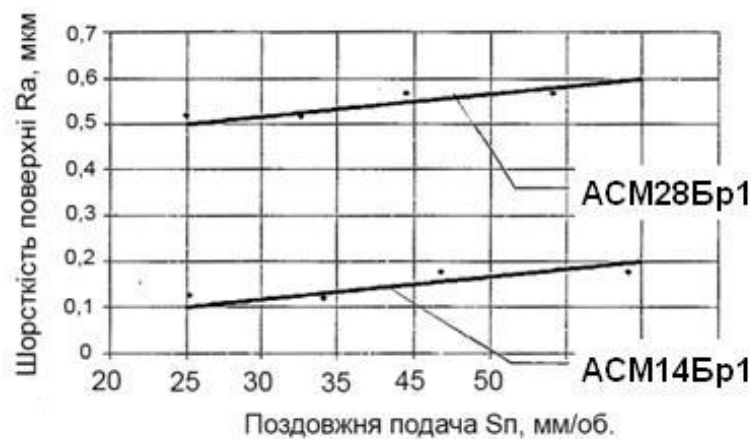
Зазначимо, що зовнішнє тонке алмазне кругле шліфування здійснювалось на прецизійному верстаті AS-250 «Werkzajt» (ФРН), а для внутрішнього шліфування застосовувався прецизійний внутрішньошліфувальний верстат надвисокої точності SS – 125 «Studder» (Швейцарія). Основні результати досліджень наведені на рис. 2.3, 2.4.

Аналіз експериментів (рис.2.3) показує, що на шорсткість поверхонь деталей з нових композитних матеріалів на основі алюмінію при тонкому зовнішньому круглому алмазному шліфуванні (як і при плоскому алмазному шліфуванні) суттєво впливають режими різання: швидкість виробу V_b , поздовжня подача S_n та глибина різання t , а також розмір зерна абразиву, та склад зв'язки алмазному інструменту [78].

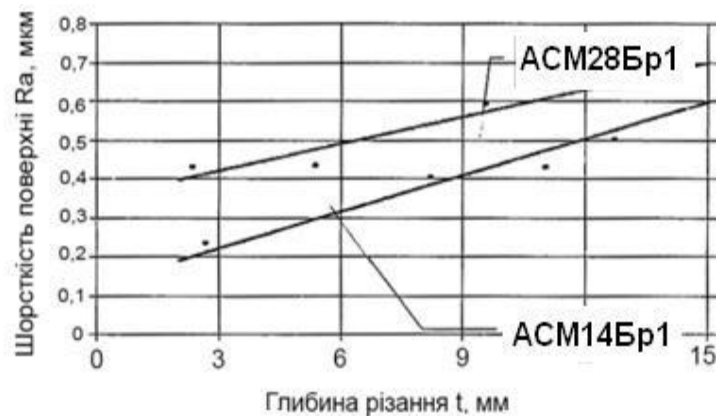
Аналогічно з плоским алмазним шліфуванням найкращу якість оброблених зовнішніх поверхонь композитних циліндричних деталей (за параметром шорсткості R_a) тонким алмазним круглим зовнішнім шліфуванням забезпечує застосування інструментів з синтетичних алмазів (АС) на бакелітно-гумовій зв'язці (Бр1), зернистістю 14–28 мкм (M14 – M28) та застосування тонких режимів шліфування ($V_b \rightarrow \min; S_n \rightarrow \min; t \rightarrow \min$).



а)



б)



в)

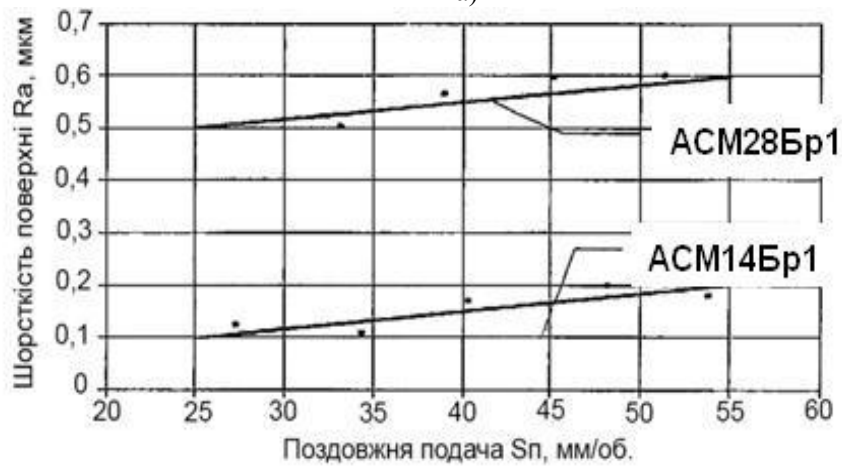
Рисунок 2.3. Залежність параметрів шорсткості поверхні R_a деталей з композиційного сплаву АК12М2МгН на основі алюмінію від режимів тонкого алмазного шліфування V_b , S_{π} , t при зовнішньому круглому шліфуванні (швидкість кола – $V_{кр} = 35$ м/с): а) $S = 5$ мм/об.; $t = 2$ мкм; б) $V_b = 30$ м/хв.; $t = 2$ мкм; в) $V_b = 30$ м/хв.; $S_{\pi} = 5$ мм/об.

Схожі результати отримані при тонкому круглому внутрішньому ельборовому шліфуванні робочих поверхонь деталей тертя з нових композитних сплавів на основі алюмінію АК12ММгН + (9 – 12) % MoS.

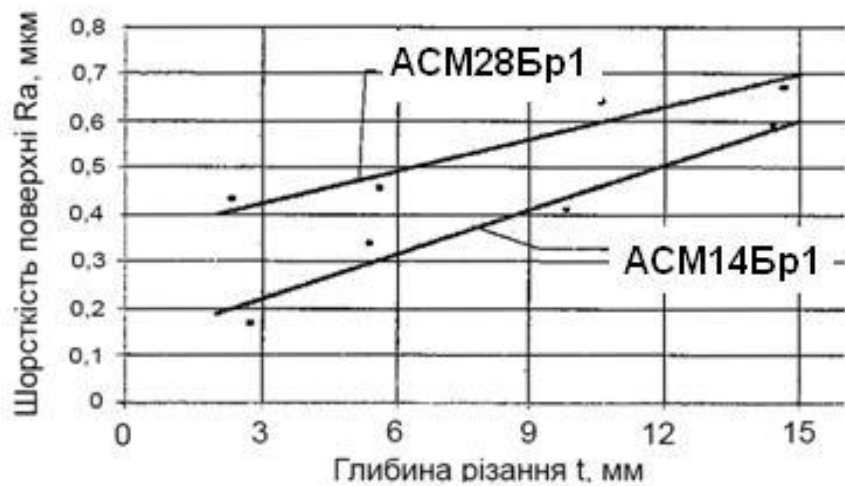
Результати експериментів наведені на графіках (рис. 2.4).



а)



б)



в)

Рисунок 2.4. Залежність параметрів шорсткості поверхні R_a деталей з композиційного сплаву АК12ММГН + (9 – 12) % MoS_2 від режимів тонкого алмазного шліфування V_b , S_p , t при тонкому круглому внутрішньому шліфуванні (швидкість ельборового круга – $V_{кр.} = 45$ м/с): а) $S_p = 30$ мм/об.; $t = 2$ мкм; б) $V_b = 50$ м/хв.; $t = 2$ мкм; в) $V_b = 50$ м/хв.; $S_p = 30$ мм/об.

Аналіз рис. 2.4 показує, що при застосуванні для прецизійного внутрішнього алмазного шліфування деталей з нових композиційних сплавів на основі алюмінію з використанням для оброблення алмазних кругів з синтетичного алмазу АС зернистістю 14-28 мкм на бакелітно-гумовій зв'язці, на параметр шорсткості поверхні оброблення R_a найбільше впливають глибина різання t , поздовжня подача S_n та швидкість обертання деталі V_v . Найкращі результати за параметром якості R_a (тобто отримання мінімальної шорсткості поверхні) забезпечують тонкі режими алмазного шліфування, а саме, мінімальні можливі (з точки зору технічних можливостей верстата) режими різання – глибина шліфування, поздовжня подача та швидкість обертання деталі [80].

Узагальнюючи комплекс виконаних досліджень, необхідно зробити важливі як наукові, так і практичні висновки [80].

1. Вперше досліджено процеси тонкого алмазного шліфування нових композиційних сплавів, синтезованих на основі утилізованих та регенованих шліфувальних відходів виробництва деталей з алюмінію, що відкриває можливості одержання високоякісних деталей тертя з нових композитів для поліграфічних машин.

2. Показано, що основні закономірності тонкого прецизійного алмазного шліфування нових композиційних сплавів співпадають при плоскому, круглому зовнішньому та внутрішньому шліфуванні.

3. Доведено, що на параметр якості поверхні оброблення R_a суттєво впливають зернистість, матеріал зв'язки алмазного круга та режими тонкого алмазного шліфування.

4. Найкращі показники параметру R_a , які задовольняють високі вимоги до поверхонь деталей тертя технологічних комплексів і машинних систем, забезпечують шліфувальні круги з синтетичних алмазів АС зернистістю 14 – 28 мкм на бакелітно-гумовій зв'язці та тонкі режими різання, а саме:

- для плоского алмазного шліфування: швидкість круга – 25 м/с, поздовжня подача – 2 м/хв., поперечна подача – 0,1 мм/подв.хід; глибина різання – 2 мкм;
- для зовнішнього круглого алмазного шліфування: швидкість абразивного круга – 35 м/с, швидкість виробу (деталі) – 30 м/хв., поздовжня подача – 30 мм/об., глибина різання – 2 мкм;
- для круглого внутрішнього алмазного шліфування: швидкість круга – 45 м/с, швидкість виробу – 50 м/хв., поздовжня подача – 30 мм/об., глибина різання – 2 мкм.

Подальші дослідження будуть спрямовані на виконання експериментів та встановлення закономірностей формування параметрів якості поверхонь оброблення нових композитних деталей тертя машин, зокрема параметрів шорсткості та фізичних властивостей поверхневого шару оброблення при тонкому шліфуванні із застосуванням найновітніх шліфувальних інструментів-кругів на основі кубоніту та борозону, що обумовить реалізацію подальших кроків для підвищення зносостійкості деталей такого типу.

2.4 Способи прецизійного оброблення зносостійких поверхонь деталей тертя з високолегованих композитів тонким алмазним шліфуванням

У попередніх розділах монографії детально викладені результати всебічного вивчення особливостей технологічних процесів надтонкого фінішного оброблення поверхонь деталей тертя методами тонкого викінчувального алмазного шліфування.

Детально досліджувався вплив на параметри якості поверхонь оброблення деталей (шорсткість, точність, наклеп, залишкові напруження) режимних факторів шліфування і, перш за все, таких найвпливовіших як режими різання, тип алмазно-абразивного інструменту (природні алмази, алмази синтетичні), його зернистість, тип зв'язки (керамічна, металева, еластично-органічна), відсотковий вміст загальної зернової фракції,

шпаринність, склад і метод подачі у зону різання мастильно-охолоджуючих речовин (МОР).

На основі виконаних досліджень створені технологічні регламенти для виробництва у вигляді типових технологічних процесів, а, у більшості випадків, стандартів підприємств. Після їх апробації, випробувань та аналізу накопиченого промислового досвіду, окремі технічні рішення проблеми тонкої алмазної обробки нових високолегованих композитних матеріалів пройшли патентний пошук ретроспективою 40 років за 30 розвинутими індустріальними країнами світу і були захищені відповідними патентами України.

Одночасно автори надали порівняльні дані випробувань нових способів оброблення та їх технічні переваги у порівнянні з існуючими методами оброблення.

2.5 Спосіб оздоблювально-викінчувального оброблення отворів підшипників ковзання з високолегованих композитних сплавів для друкарських машин

Сутність даного способу оздоблювально-викінчувального оброблення отворів підшипників ковзання з високолегованих композитних сплавів для друкарських машин обґрунтована виконанням розгалужених технологічних досліджень щодо вивчення впливу режимів різання, складу і зернистості шліфувального інструменту, типу зв'язки, концентрації основної зернової фракції у складі шліфувального круга та особливостей використання мастильно – охолоджуючої рідини, її складу та способу подачі у зону різання деталі з композитного сплаву на параметри якості поверхонь оброблення (шорсткість R_a , ступінь наклепу K , спотворення II – го роду $\Delta a/a \cdot 10^{-4}$, глибина h наклепу, рівень та знак залишкових напружень). Результати вказаних досліджень були попередні роки виконані авторами цієї роботи, всебічно перевірені, впроваджені у промислове виробництво та опубліковані у численних технічних виданнях для користування широким науково-інженерним загалом [70 - 82]. Усе це у сукупності стало підставою для отримання відповідного патенту

України [80], що попередньо пройшов експертний пошук у 30 розвинутих країнах світу глибиною 40 – 50 років, тим самим підтверджуючи свою оригінальність та патенту чистоту.

Основною перевагою розробленого способу є наукова оптимізація режимів різання при тонкому шліфуванні деталей тертя з нових марок зносостійких композитів та застосування для фінішного оброблення дрібнозернистих інструментів з алмазів синтетичних (АС).

Слід зауважити, що даний спосіб відноситься до галузі технології машинобудування, зокрема, до способів високоточних оздоблювальних методів обробки поверхонь отворів деталей тертя з високолегованих композитних матеріалів на основі відходів швидкорізальних інструментальних сталей, що належать до класу важкооброблюваних сплавів зі спеціальними властивостями, наприклад, деталей аерокосмічної техніки, газотурбінних систем, компресорних станцій магістральних трансєвропейських газогонів та деталей тертя (підшипники ковзання, вкладні, сегменти) високошвидкісних поліграфічних машин офсетного друку, що працюють в умовах тертя при жорстких режимах експлуатації (температура до 700 °С, тиск 5,0 – 8,0 МПа або швидкості обертання до 500 об/хв., тиск 2,0-4,0 МПа).

Високоточне оздоблювально-викінчувальне оброблення вказаних важкооброблюваних композитних сплавів відомими технологічними методами не забезпечує виконання необхідних технічних вимог до якості поверхонь таких деталей, які піддаються при роботі інтенсивним експлуатаційним навантаженням, що впливає на техніко – економічні показники спеціальної техніки, зокрема, на параметри надійності (зносостійкість, довговічність, ремонтоздатність).

Ці показники залежать від параметрів якості поверхонь оброблення деталей вказаної техніки (шорсткість, величина та глибина наклепу, величина та знак залишкових напружень поверхневої зони).

Найбільш близьким до нового способу по технічній суті та ефекту, що досягається, є надтонке внутрішнє шліфування отворів деталей на верстатах

прецизійної точності за допомогою абразивних інструментів з карбіду кремнію зеленого зернистістю 10-14 мкм на гліфталевій зв'язці і застосуванням мастильно-охолоджуючих рідин [75].

Недоліками відомого способу [79] є технічна неможливість забезпечення мінімізації параметрів наклепу та шорсткості поверхні в оброблюваній зоні та відсутність засобів керування процесом надтонкої абразивної обробки для підвищення параметрів якості поверхонь тертя.

В основу створення нового способу поставлено задачу підвищення якості поверхонь обробки отворів деталей тертя з високолегованих важкооброблюваних композитних матеріалів шляхом зрізання тонких стружок абразивними зернами інструменту за рахунок суттєвого зниження складових сил різання у зоні обробки завдяки зменшенню тертя зерен інструменту по поверхні оброблення. При цьому застосовується мастильно-охолоджуюча рідина (МОР).

Поставлена задача досягається тим, що у розробленому способі обробки отворів деталей тертя з високолегованих композитних матеріалів оброблювана деталь обертається навколо своєї осі з одночасним зніманням стружок з поверхні отвору інструментом при його обертанні навколо осі, паралельної осі отвору деталі, з жорстким контактуванням інструменту з поверхнею обертання, переміщенням його вздовж осі деталі та застосуванням мастильно-охолоджуючої рідини, для оброблення у якості шліфувального інструменту використовують круги з синтетичних алмазів АС зернистістю 14-50 мкм на бакелітно-гумовій зв'язці та 100 % -ою концентрацією алмазу, а обробку поверхні виконують за такими технологічними режимами: швидкість обертання деталі – 10-20 м/хв., швидкість обертання алмазного круга – 25-35 м/с, швидкість поздовжнього переміщення інструменту вздовж осі отвору поверхні оброблення – 0,5 – 1,0 м/хв., глибина різання – 10 - 15 мкм.

Спосіб здійснюється наступним чином, а саме деталь циліндричної форми з оброблюваним отвором затискається у пристрої верстату. Інструмент у вигляді алмазного круга з синтетичного алмазу АС зернистістю 14-50 мкм на

бакелітно-гумовій зв'язці розміщується у отворі деталі так, щоб вісь обертання круга була паралельна осі обертання деталі. Одночасно алмазні зерна входять у робочий контакт з поверхнею оброблення і інструменту надається переміщення вздовж осі деталі, при цьому в зону зняття стружки подається мастильно-охолоджуюча рідина (МОР) (рис. 2.5).

Деталь 1 з отвором затискається у пристрої 3 верстата прецизійної точності і обертається зі швидкістю V_d .

Абразивний круг 2 з відповідною оправкою розташовується в отворі деталі і обертається зі швидкістю V_i .

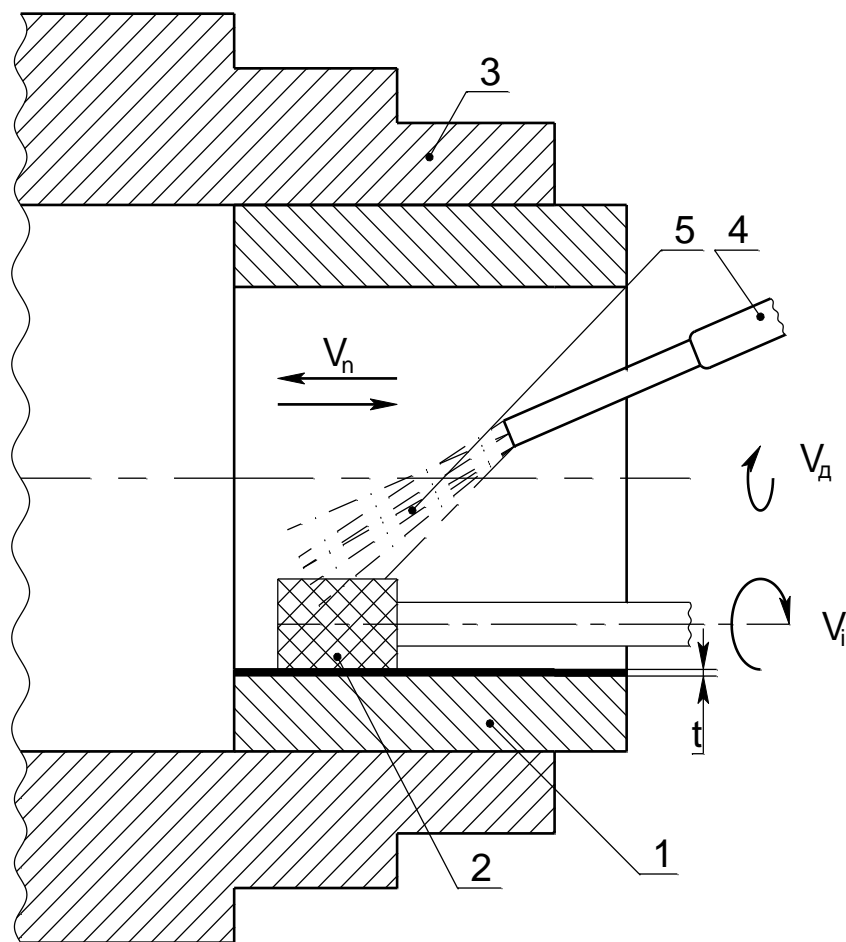


Рисунок 2.5 Спосіб оздоблювально-викінчувального оброблення отворів підшипників ковзання з високолегованих композитних сплавів для друкарських машин

Абразивний круг 2 за розрахунок відповідної кінематики верстату здійснює переміщення вздовж осі оброблення зі швидкістю V_n . Круг 2 має жорсткий контакт з деталлю 1, внаслідок чого знімається припуск на обробку t .

В процесі знімання стружок з поверхні оброблення у ріжучу зону за допомогою трубопроводу 4 подається мастильно-охолоджуюча рідина 5.

Завдяки тому, що алмазні зерна у складі шліфувального круга мають найгострішу форму (мінімальний радіус заокруглення та мінімальний кут при вершині ріжучого зерна) серед інших абразивних матеріалів та завдяки застосуванню еластичної бакелітно-гумової зв'язки, коли (при навантаженні зерен під дією сил різання) алмазні зерна немов би демфують у тіло зв'язки, зменшуючи фактичну глибину різання, досягається суттєве зниження складових сил різання, які виникають при стружкоутворенні. Ці фактори, в свою чергу, впливають на фактичну глибину різання та переріз стружки, що призводить до покращення якості поверхні оброблення, зокрема, суттєво (на 20-30 %) зменшуються параметри шорсткості, спотворення поверхневих шарів (напруження II –го роду, $\frac{\Delta\sigma}{\sigma}$) як основної характеристики наклепу, при цьому одночасно відбувається зменшення (на 30-35%) глибини проникнення наклепу у поверхневий шар деталі. Це безпосередньо впливає на параметри довговічності та зносостійкості готових виробів. Крім того, досягнення найвищих параметрів якості поверхонь оброблення сприяє призначення таких режимів алмазного шліфування, які були всебічно дослідженні (з метою забезпечення найвищих параметрів якості обробки) і стали нормованими для розробників технологій.

При використанні традиційних технологій оброблення отворів деталей параметри якості поверхонь оброблення знижуються (табл. 2.24, 2.25).

Таблиця 2.24 Вплив шліфувального інструменту на параметри якості поверхні при обробці отворів деталей з композитного матеріалу на основі відходів інструментальної сталі 86Х6НФТ + 5% CaF₂

Обробка згідно найближчого аналогу [80] кругом з карбіду кремнію зеленого 63СМ28СМ21Гл на гліфталевій зв'язці			Обробка згідно нового способу - алмазним кругом АСМ28Бр1 100 % на бакелітно-гумовій зв'язці.		
Параметр шорсткості Ra, мкм	Глибина наклепу h, мкм	Спотворення II –го роду $\frac{\Delta a}{a} \cdot 10^{-4}$	Параметр шорсткості Ra, мкм	Глибина наклепу h, мкм	Спотворення II –го роду $\frac{\Delta a}{a} \cdot 10^{-4}$
0,650	8-10	17-20	0,265	6-7	12-14

Таблиця 2.25 плив швидкості обертання деталі оброблення на якість поверхні при алмазній обробці отворів деталей з композитного матеріалу з відходів інструментальної сталі 86Х6НФТ + 5% CaF₂ кругом АСМ14Бр1 100 % на бакелітно-гумовій зв'язці

Швидкість обертання деталі оброблення м/хв.	Параметри якості поверхні		
	Параметр шорсткості Ra, мкм	Глибина наклепу h, мкм	Спотворення II –го роду $\frac{\Delta a}{a} \cdot 10^{-4}$
10	0,265	5-6	11-13
12	0,300	5-6	12-14
15	0,310	7-8	12-14
20	0,320	9-10	14-15

Спосіб надтонкої абразивної обробки отворів деталей тертя з високолегованих композитних матеріалів може використовуватись при обробці спеціальних деталей для аерокосмічних систем, деталей тертя газотурбінних і компресорних станцій магістральних газогонів, ракетних двигунів та швидкісних підшипників ковзання поліграфічних машин офсетного друку.

2.6 Спосіб алмазного хонінгування отворів деталей тертя з високолегованих композитних матеріалів на основі алюмінію з використанням ультразвуку

Корисна модель відноситься до галузі технології машинобудування, зокрема, до способів високоточних оздоблювальних методів обробки поверхонь отворів деталей тертя з високолегованих композитних матеріалів на основі

сплавів заліза, нікелю, алюмінію, відходів інструментальних сталей, що належать до класу важкооброблюваних сплавів зі спеціальними властивостями, наприклад, деталей тертя (підшипники ковзання, вкладки, сегменти) високошвидкісних поліграфічних машин офсетного друку, що працюють в умовах тертя при жорстких режимах експлуатації (температура до 200 °С, тиск 5,0 – 7,0 МПа або швидкості обертання до 500 об./хв., тиск 2,0 – 4,0 МПа), а також деталей аерокосмічної техніки, компресорних станцій, магістральних газогонів та спеціальних деталей військової техніки.

Відомий спосіб тонкого абразивного оброблення високолегованих зносостійких матеріалів алфенолового класу типу Ю16, «Алфо», 16ЮИХ системи «алюміній – іридій – залізо – хром», при застосуванні якого використовують дрібнозернисті інструменти з карбіду кремнію зеленого (63С), зернистістю 10 – 14 мкм на еластичній гліфталевій зв'язці (Гл), а оброблення поверхонь здійснюють, призначаючи оздоблювальні режими різання [81].

Недоліком цього способу є те, що при обробленні поверхонь деталей з підвищеним вмістом алюмінію у матеріалі під час зрізання тонких стружок з невеликим їх перерізом (а саме такими є композитні сплави на основі алюмінію АК12М2МгН, АК12ММгН, АК8МЗч, АК12ММгН+(9 – 12)% MoS₂, відбувається миттєве окиснення субмікронних часток елементів стружки, активне налипання їх до ріжучої кромки абразивного зерна карбіду кремнію зеленого, що зрештою, змінює умови різання у зоні оброблення, зокрема, веде до збільшення радіусу заокруглення та кута різання при вершині ріжучого поодинокого зерна, що обумовлює передчасну втрату ріжучої здатності абразивного інструменту, суттєво змінює формування силового та температурного полів у зоні тонкого фінішного абразивного оброблення і, врешті-решт, стає причиною суттєвого зниження параметрів якості поверхні деталі, що підлягає обробці.

Також відомий спосіб оброблення поверхонь композитних деталей абразивними інструментами з карбіду кремнію зеленого 63СМ14СМ2Гл з

інтенсивним застосуванням для обробки мастильно-охолоджуючої рідини (МОР) та використанням тонких режимів різання [82].

Даний спосіб по суті та ефекту, що має бути досягненим, є найбільш близьким до об'єкта, що заявляється, і тому був прийнятий як прототип.

Недоліком відомого способу є те, що в результаті його застосування на практиці не вдається отримати параметри шорсткості поверхні оброблення R_a менші позначень 0,600 – 0,650 мкм та глибини наклепу (дефектного шару деталі) меншого 8 – 10 мкм, що не дає змоги у перспективі підвищити зносостійкість та довговічність деталей тертя поліграфічних машин.

В основу нового способу обробки поставлено задачу підвищення якості поверхонь обробки отворів деталей тертя з високолегованих важкооброблюваних композитних матеріалів на основі алюмінію шляхом застосування алмазного хонінгування зі зрізанням тонких стружок алмазними зернами інструменту за рахунок суттєвого зниження складових сил різання у зоні обробки та завдяки ускладненню траєкторії переміщення ріжучого абразивного зерна відносно оброблюваної поверхні отвору деталі. Це створює необхідні можливості для суттєвого зменшення перерізу стружки a_z , що зрізається з поверхні деталі оброблення і, відповідно, зменшуючи складові сил різання сприяє формуванню більш якісної поверхні (параметр шорсткості R_a , глибина та ступінь наклепу, знак та величина залишкових напружень).

Поставлена задача досягається тим, що у запропонованому способі алмазного хонінгування отворів деталей тертя з високолегованих композитних матеріалів на основі алюмінію оброблювана деталь фіксується на столі хонінгувального верстату з вертикальним розташуванням вісі отвору деталі оброблення, а робочий інструмент у вигляді хона – оправки з закріпленими у ньому дрібнозернистими алмазними брусками розташовують співвісно з оброблюваним отвором так, що алмазні бруски з заданою силою притискаються до поверхні оброблення, а хону – оправці надають обертальні рухи з нормованою швидкістю навколо своєї вісі та плавні переміщення з заданою швидкістю вздовж осі поверхні оброблення і одночасно з цим надають

ультразвукові коливання з частотою $n_{ч.к}$ у межах 40 – 50 кГц, а для робочого процесу викінчувально-оздоблювального оброблення застосовують алмазні бруски зернистістю 3,0 – 10,0 мкм з синтетичного алмазу АС на органічній зв'язці В1 – 02 (АСМ3/10В1 – 02 150%) та концентрацією алмазу 150%, при цьому хон – оправку переміщують в отворі деталі оброблення (в залежності від складу легуючих елементів у композитному сплаві) зі швидкістю обертання 500 – 120,0 м/хв., одночасно надаючи плавні поздовжні переміщення вздовж осі оброблення хона зі швидкістю 10 – 15 м/хв. та поздовжньо-зворотні ультразвукові коливання з частотою 40 – 50 кГц, створюючи питомий тиск абразивних брусків на поверхню обробки в діапазоні 0,2 – 1,5 МПа.

Спосіб здійснюється наступним чином (рис. 2.6). Деталь з композитного матеріалу на основі алюмінію з оброблюваним отвором циліндричної форми затискається у пристрої хонінгувального верстату для обробки з вертикальним розташуванням осі отвору, що обробляється.

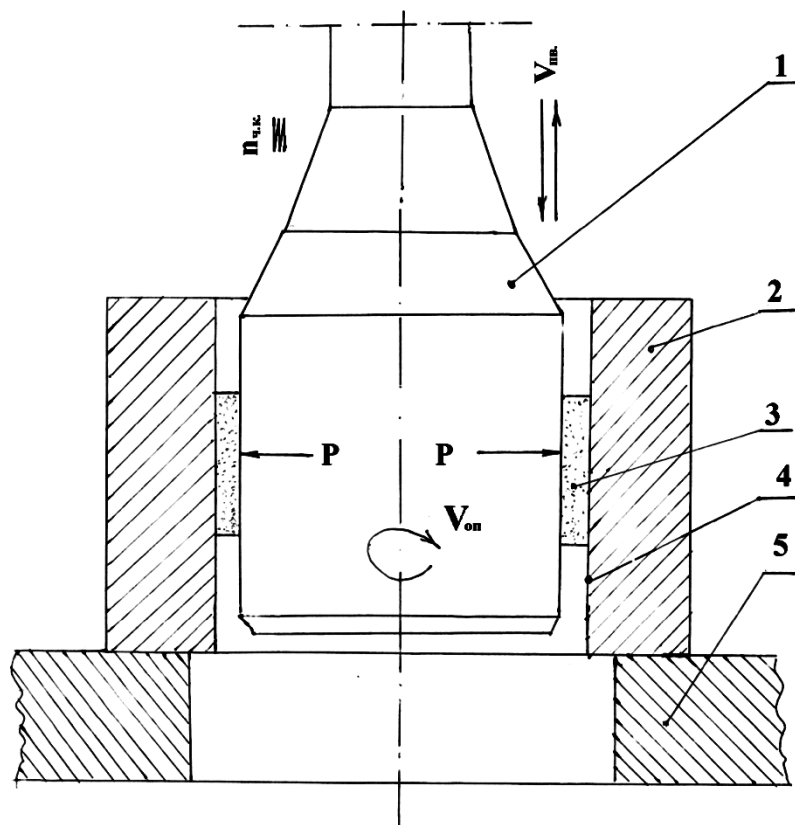


Рисунок 2.6 - Спосіб алмазного хонінгування отворів деталей тертя з високолегованих композитних матеріалів на основі алюмінію з використанням ультразвуку

Алмазні інструменти для обробки отворів деталі у вигляді дрібнозернистих брусків з синтетичного алмазу АСМ3/10В1 – 02 150% розміщуються у хоні – оправці для оброблення так, що вісь оправки точно співпадає з розташуванням вісі отвору обробки, а бруски міцно притискуються з заданою силою до поверхні оброблення. Одночасно обробляюча хон – оправка з алмазними брусками обертається з нормованою швидкістю навколо своєї вісі, виконує плавні переміщення зі сталою швидкістю вздовж вісі деталі оброблення та разом з цим отримує поздовжньо-зворотні ультразвукові коливання з частотою 40 – 50 кГц, а абразивні інструменти створюють тиск на поверхню оброблення в діапазоні 0,2 – 1,5 МПа.

Спосіб реалізується за схемою, наведеною нарис.2.6.

Деталь 2 за допомогою технологічних пристроїв 5 закріплюють для оброблення на столі хонінгувального верстату.

В отвір деталі для прецизійної фінішної обробки робочої поверхні тертя підшипника 4 заводять хон-оправку 1, якій за допомогою кінематичних механізмів верстату надається обертальний рух зі швидкістю V_{on} навколо своєї осі, яка співпадає з вертикальною віссю деталі. Одночасно алмазні бруски 3, розташовані на периферії хону-оправки 1, завдяки його конструктивним особливостям силою P міцно притискуються до поверхні оброблення 4, створюючи відповідний тиск. Разом з обертанням хон-оправка 1 плавно поздовжньо-зворотньо переміщується вздовж вертикальної вісі деталі зі швидкістю $V_{пв}$, здійснюючи ультразвукові коливання з частотою коливань $n_{ч.к.}$, а для робочого процесу викінчувально-оздоблювального оброблення застосовують алмазні бруски зернистістю 3,0 – 10,0 мкм з синтетичного алмазу АС на органічній зв'язці В1 – 02 (АСМ3/10В1 – 02 150%) та концентрацією алмазу 150%, при цьому хон-оправку переміщують в отворі підшипнику (в залежності від складу легуючих елементів у композитному сплаві) зі швидкістю обертання 50,0 – 120,0 м/хв., одночасно надаючи плавні поздовжні переміщення вздовж осі оброблення хона зі швидкістю 10,0 – 15,0 м/хв. та здійснюючи ультразвукові коливання з частотою 40 - 50 кГц, створюючи

питомий тиск абразивних брусків на поверхню оброблення в діапазоні 0,2 – 1,5 МПа.

Особливою рисою даного способу хонінгування прецизійних отворів деталей з високолегованих композитних матеріалів є застосування у якості інструменту брусків з синтетичного алмазу АС на органічній зв'язці В1 – 02 (АСМ3/10В1 – 02 150%) та концентрацією алмазу 150% та складної траєкторії переміщення ріжучого зерна абразиву на поверхні оброблення, яка утворюється за рахунок обертання хона-оправки з брусками навколо своєї вісі з нормованою швидкістю, його плавного поздовжньо-зворотного переміщення вздовж вертикальної вісі деталі та одночасної дії ультразвукових коливань з частотою 40 – 50 кГц, створюючи при цьому необхідний питомий тиск абразивних брусків на поверхню оброблення.

Це обумовлює значне зменшення перерізу a_z стружки, яка знімається з робочої поверхні отвору композитного підшипнику ковзання. Як наслідок, знижуються складові сил різання окремим зерном, створюються позитивні умови для покращення якості поверхні оброблення, в першу чергу, параметра шорсткості поверхні R_a , а також фізичних властивостей поверхневого шару, що оброблюється абразивними брусками.

При використанні традиційних технологій оброблення отворів підшипників ковзання поліграфічних машин параметри якості поверхонь знижуються (табл. 2.26, 2.27).

Таблиця 2.26 Вплив ультразвукових $n_{ч.к.}$ коливань алмазних брусків з синтетичного алмазу (АС) зернистістю 3 – 10 мкм (М3, М10) на органічній зв'язці В1 – 02 при 150% - й концентрації алмазу (АСМ3/10В1 – 02 150%) при надтонкій обробці отворів деталей композитних матеріалів на основі алюмінію АК12ММгН

Обробка згідно запропонованого способу				Обробка згідно найближчого аналогу [82 - 84]		
Частота ультразвукових коливань $n_{ч.к.}$, кГц	Параметр шорсткості R_a , мкм	Глибина наклепу h , мкм	Ступінь наклепу K	Параметр шорсткості R_a , мкм	Глибина наклепу h , мкм	Ступінь наклепу K
40	0,013	2 – 2,5	1,19	0,060	7 – 8	4,3
45	0,010	1,5 – 2	1,20	0,050	6 – 7	4,5
50	0,015	3 - 4	1,25	0,040	5 - 6	5,2

Примітки: 1 – швидкість обертання оправки $V_{оп} = 80$ м/хв.; 2 – швидкість поздовжнього переміщення $V_{п.в.} = 5$ м/хв.; 3 – питомий тиск брусків $q_a = 1$ МПа.

Таблиця 2.27 Вплив поздовжньої швидкості хону $V_{п.в.}$ з алмазними брусками з синтетичних алмазів (АС) зернистістю 10 мкм (М10) на органічній зв'язці В1 – 02 при 150% - й концентрації алмазу (АСМ10В1 – 02 155%) при надтонкій обробці отворів деталей з композитів на основі алюмінію АК8МЗч

Обробка згідно запропонованого способу				Обробка згідно найближчого аналогу[82 - 84]		
Поздовжня швидкість $V_{п.в., м/хв}$	Параметр шорсткості $R_a, мкм$	Глибина наклепу $h, мкм$	Ступінь наклепу K	Параметр шорсткості $R_a, мкм$	Глибина наклепу $h, мкм$	Ступінь наклепу K
10	0,010	1,19	1,18	0,055	6 - 7	1,4
12	0,06	1,30	1,20	0,045	5 - 6	1,5
15	0,05	1,32	1,24	0,035	4 - 5	1,7

Примітки: 1 – швидкість обертання оправки $V_{оп} = 100$ м/хв.; 2 – швидкість поздовжнього переміщення $V_{п.в.} = 12$ м/хв.; 3 – частота ультразвукових коливань $n_{ч.к.} = 45$ кГц; 4 – питомий тиск брусків $q_a = 1$ МПа.

Спосіб хонінгування отворів деталей з високолегованих композитних матеріалів на основі алюмінію може використовуватись у вузлах швидкісних підшипників ковзання поліграфічних офсетних друкарських машин, а також при обробці спеціальних деталей для аерокосмічних систем деталей тертя газотурбінних і компресорних станцій, магістральних газогонів та деталей військової техніки.

Висновки до розділу 2

1. Виконано теоретико-експериментальне дослідження технологічного процесу тонкого алмазного шліфування високолегованих і важкооброблюваних композиційних сплавів з застосуванням найновіших шліфувальних інструментів з синтетичних алмазів, створених Інститутом надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля Національної академії наук України.
2. Сформульовані вимоги до якості поверхонь деталей тертя вузлів, механізмів і в цілому машин друкарської техніки, які гарантують отримання сучасних параметрів надійності, зносостійкості, довговічності та ремонтоздатності. З цієї точки зору розглянуто питання раціонального вибору типу алмазного інструменту, його зернистості, зв'язки (металева, керамічна, бакелітна або еластична бакелітно-гумова), відсоткового співвідношення

зернового складу синтетичного алмазу у шліфувальному крузі (50 %, 75% чи 100 % основної зернової фракції) для тонкого шліфування різних композитних матеріалів, синтезованих на основі штампових чи інструментальних сталей, міді, нікелю та алюмінію.

3. Встановлені основні закономірності впливу технологічних факторів тонкого алмазного шліфування (режими різання, тип алмазного зерна, його зернистість, характеристика зв'язки інструменту, концентрація алмазу у шліфувальному крузі, склад та спосіб подачі мастильно-охолоджуючої рідини, точність технологічних пристроїв та верстатного обладнання) на параметри якості оброблюваних поверхонь деталей з нових композитів – шорсткості, глибини та ступеню наклепу, величини і знаку залишкових напружень поверхневого шару.

4. Отримані наукові висновки дослідження процесів тонкого алмазного шліфування нових типів зносостійких композитів впроваджені у виробництво як у вигляді уніфікованих (типових, групових) технологічних процесів, так і як нормативи, зокрема, стандарти підприємств. Вони пройшли всебічну неодноразову перевірку, експертний пошук на патентну чистоту ретроспективою 40 років за 30 індустріально розвинутими державами світу і захищені патентами України.

РОЗДІЛ 3 ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ ТЕРТЯ, ОБРОБЛЕНИХ НОВИМИ МЕТОДАМИ ФІНІШНОЇ ОБРОБКИ

Однією з найголовніших проблем проектування та виготовлення сучасних технологічних комплексів народного господарства України є забезпечення високих показників їх надійності, довговічності, працездатності та ремонтоздатності.

З цієї точки зору вченими-матеріалознавцями були створені, пройшли всебічну перевірку та впроваджені у виробництво нові високозносоустійкі композиційні сплави для деталей тертя, які спроможні суттєво знизити інтенсивність зношування та підвищити термін служби машин і механізмів. Особливо важливим це є при роботі техніки у жорстких умовах експлуатації (температури контактних поверхонь деталей пар тертя у межах 750 – 800 °С і питомих тисках 5 – 8 МПа, агресивне оточуюче середовище – кисень повітря, виробничий пил з елементами абразивної здатності тощо). Особливістю створених в останні роки новітніх зносоустійких композиційних матеріалів було те, що всі вони були отримані шляхом синтезу зі шламових шліфувальних відходів високолегованих штампових і швидкорізальних інструментальних сталей, у складі яких присутні цінні легуючі елементи (титан, вольфрам, ванадій, молібден, ніобій, нікель, марганець тощо) і які є дешевою та вельми корисною та дефіцитною сировиною для виготовлення різних конструкційних деталей [80–85]. При цьому легуючі елементи нових зносоустійких сплавів утворюють в їх структурі чималу частку дрібнозернистих фаз – інтерметалідів. Усе це забезпечує отримання високих фізико-механічних та антифрикційних властивостей матеріалів (табл. 3.1).

Як відомо, параметри зносоустійкості деталей тертя у машинах і механізмах технологічних комплексів визначаються не тільки функціональних можливостей матеріалів, з яких ці комплекси виготовляються, але і параметри якості їх поверхонь, що сформовані внаслідок механічного оброблення [81, 86–88].

З цієї точки зору деталі з композитів, що мають у своєму складі у якості легуючих такі елементи як титан, вольфрам, ванадій і молібден належать до класу важкооброблюваних сплавів, вимагають особливого підходу до вибору типу абразивних інструментів і методів оброблення робочих поверхонь тертя.

У зв'язку з тим, що зазначені високозносостійкі композиційні матеріали створені 10 – 15 років (хоча вже і набули достатнього широкого застосування) до сьогодні відсутні хоча б якісь дослідження по надтонким методам абразивного оброблення поверхонь деталей тертя, зокрема, по всебічному вивченню технологічних процесів суперфінішування, коли у поверхнях оброблення формується мікрорельєф рівня $Ra = 0,01 - 0,02$ мкм і створюється фундамент для забезпечення високого рівня параметрів зносостійкості, надійності і довговічності деталей пар тертя.

3.1 Мікрогеометрія поверхні та стан поверхневого шару зносостійких деталей тертя з високолегованих композитів за умови абразивного суперфінішування

Авторами проведено комплекс досліджень по вивченню надтонких оздоблювальних процесів абразивного суперфінішування високолегованих важкооброблюваних композитних сплавів, синтезованих на основі відходів штампових та інструментальних сталей типу 11РЗАМЗФ, 85Х6НФТ, 4ХМФТС, Р6М5ФЗ і 4Х2В5МФ, які містять у своєму складі сполуки титану, вольфраму, ванадію та молібдену, має незаперечне наукове і, що не менш важливо, практичне значення. У загальній сукупності це визначає актуальність обраної теми досліджень і ілюструє науково-технічну важливість поставленої задачі.

Метою роботи є дослідження параметрів якості поверхонь за умови надтонкого оздоблювального суперфінішування деталей тертя машинних комплексів, які виготовлені з нових композиційних сплавів 11РЗАМЗФ, 85Х6НФТ, 4ХМФТС, Р6М5ФЗ і 4Х2В5МФ, які містять у своєму складі титан, вольфрам, молібден і ванадій з домішками CaF_2 та встановлення

закономірностей абразивного суперфінішування на параметри якості й точності поверхонь деталей оброблення.

Таблиця 3.1. Основні фізико-механічні та антифрикційні властивості композиційних сплавів, синтезованих зі шламових відходів інструментальних сталей легованих титаном, вольфрамом, ванадієм і молібденом

Матеріал	Межа міцності при згині, МПа	Твердість, НВ, МПа (20 °С)	Ударна в'язкість, кДж/м ²	Коефіцієнт тертя	Інтенсивність зношування зразка, мкм/км	Інтенсивність зношування контртіла, мкм/км
Композит на основі інструментальної сталі 85Х6НФТ	570 – 600	860 – 920	750 – 760	0,0055 – 0,0085	0,5 – 0,8	Сліди
Композит на основі інструментальної сталі 11Р3АМ3Ф	590 – 620	850 – 910	770 – 790	0,0050 – 0,0080	0,45 – 0,70	Сліди
Композит на основі інструментальної сталі Р6М5К5	530 – 540	760 – 870	710 – 720	0,0014 – 0,0020	0,25 – 0,27	Сліди
Композит на основі інструментальної сталі Р6М5Ф3	520 – 530	770 – 880	670 – 680	0,0016 – 0,0023	0,29 – 0,32	Сліди
Композит на основі інструментальної сталі 4ХМФТС	600 – 630	855 – 915	780 – 790	0,0055 – 0,0082	0,45 – 0,75	Сліди
Композит на основі інструментальної сталі 4Х2В5МФ	570 – 610	770 – 810	750 – 800	0,0015 – 0,0017	0,27 – 0,30	Сліди

Процес суперфінішування до останнього часу розглядався лише як засіб зменшення шорсткості поверхні оброблення деталі та надання їй товарного виду [88, 89].

Така точка зору будувалась на існуючій технології машинобудування, коли шар металу, що зрізався за період оброблення, не перевищував значень у межах 2–3 мкм, а технічною сутністю обробки вважалось прасування нерівностей від попередньої операції, після чого інтенсифікація процесу суперфінішування поступово зменшувалась до його повної зупинки. Відсутність досліджень

механізму процесу і стану поверхневого шару деталей, які оброблялись оздоблювальним суперфінішуванням, сформувало сталий погляд про те, що даний спосіб абразивного оброблення не змінює кристалічну структуру, залишкові напруження, мікротвердість та інші характеристики поверхневого шару.

На сьогоднішній день (в результаті досліджень, виконаних за участю авторів) отримано ряд нових даних, які дозволяють суттєво змінити уявлення про процес суперфінішування [90 - 91].

Сучасна технологія суперфінішування базується на таких принципах: застосування абразивних брусків з підвищеними ріжучими властивостями, кінематичному регулюванню інтенсивності процесу і стану приповерхневого шару матеріалу деталей, які оброблюються цим способом, підвищення частоти коливань абразивного бруска навіть до рівня ультразвукових режимів, збільшення жорсткості системи притискування бруска до поверхні оброблення деталі. Все це у сукупності дозволяє виконувати процес суперфінішування зі зрізанням шару матеріалу з поверхні деталі у межах 10–30 мкм, суттєво виправляючи при цьому похибки геометричної форми деталей.

Встановлено, що при взаємодії бруска з металом поверхні деталі безпосередньо в ході процесу суперфінішування мають місце процеси різання металу абразивними зернами та тертя зерен по поверхні з пластичним і пружним деформуванням нерівностей [90]. Тому, як правило, процес суперфінішування необхідно виконувати у дві послідовні стадії:

- 1) з превалюючим різанням – для видалення слідів попередніх операцій обробки і виправлення геометричної форми деталі;
- 2) з домінуючим тертям – для досягнення мінімальних значень параметри шорсткості поверхні R_a .

Говорячи про особливості мікрорельєфу поверхні, що оброблюється суперфінішуванням, перш за слід відзначити, що внаслідок контакту абразивного бруска з поверхнею деталі по всій поверхні оброблення (а не по

лінії, як при шліфуванні) повністю зрізується хвилястість, що суттєво збільшує фактичну опорну поверхню деталей.

Якщо при шліфуванні на верстатах нормальної точності хвилястість складає в середньому 1–3 мкм, а на верстатах високої точності – 0,3–0,5 мкм, то при суперфінішуванні значення хвилястості, які вимірювались прецизійним приладом «Talerund – 2013» (ФРН), знаходяться у межах розподільної точності приладу – 0,05 мкм (рис. 3.1).

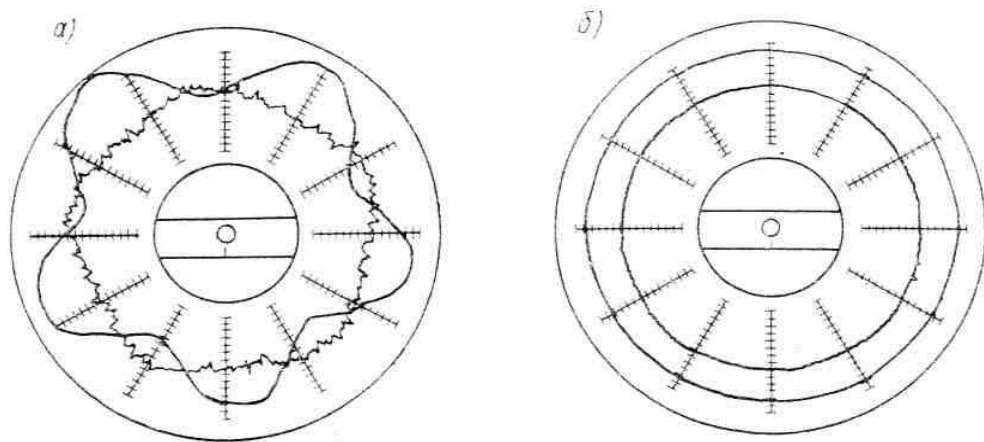


Рисунок 3.1 Круглограми поверхні до (а) і після (б) суперфінішування циліндричних деталей з високолегованого композитного сплаву 11РЗАМЗФЖ; $\times 2000$ і $\times 4000$

Суперфінішування, як один з видів фінішної абразивної оздоблювальної обробки, стабільно забезпечує шорсткість поверхні по параметру R_a у межах 0,01–0,10 мкм. При цьому не тільки висота, але також частота, форма та напрямок мікронерівностей піддаються регулюванню за рахунок змін механізму і кінематики процесу.

На рис. 3.2 наведена залежність шорсткості поверхні від зернистості суперфінішного бруска. Залежність (з достатньою точністю) може бути прийнята, як лінійна.

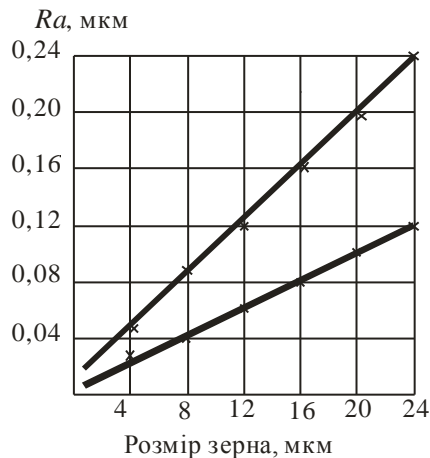


Рисунок 3.2 Залежність шорсткості поверхні після суперфінішування деталей з композиту 4ХМФТС від зернистості абразивного бруска: 1 – режим різання; 2 – режим тертя – полірування

Перехід від режиму переважно чого різання до режиму тертя – полірування дозволяє зменшити висоту нерівностей у середньому на 40% за рахунок їх пластичного деформування.

Високі показники якості поверхонь по параметру їх шорсткості Ra отримані на всіх типах композитних сплавів, легованих титаном, вольфрамом, ванадієм та молібденом, а саме при суперфінішуванні композитів 11РЗАМЗФ, 85Х6НФТ, 4ХМФТС, Р6М5Ф3 і 4Х2В5МФ.

Для досягнення найліпших результатів доцільним є використання брусків на еластичних органічних зв'язках (наприклад, гліфталевих) та застосування під час суперфінішування мастильно-охолоджувальних рідин підвищеної в'язкості та маслянистості [90, 92], що дозволяє вести обробку суперфінішуванням у режимі тертя – полірування.

Суперфінішування утворює на обробленій поверхні щільну сітку нерівностей. Так, при обробці деталей з композиту 85Х6НФТ бруском карбіду кремнію зеленого зернистістю 28 мкм на гліфталевій зв'язці (63СМ28СМ2Гл) з забезпеченням шорсткості поверхні по параметру Ra у межах 0,16–0,24 мкм на 1 мм довжини поверхні утворюється 80–90 нерівностей, при обробці таким же фінішуванням бруском зернистістю 7 мкм (63СМ7СМ2Гл) з забезпеченням параметру Ra у межах 0,04–0,08 мкм утворюється значно більше нерівностей –

140–160 на 1 мм довжини поверхні. В табл. 3.2 наведені дані розподіл нерівностей по висоті на поверхнях, які були прошліфовані та суперфінішовані на зразках з композиту 4Х2В5МФ.

Таблиця 3.2 Розподіл нерівностей поверхонь по їх висоті

Рівень точки мкм	найвищої профілю,	Кількість нерівностей на 1 мм довжини			
		Параметри шорсткості Ra=0,16–0,24 мкм		Параметри шорсткості Ra=0,04–0,08 мкм	
		шліфування	суперфінішування	шліфування	суперфінішування
0,05		1	4	2	10
0,10		2	8	4	35
0,15		3	12	11	88
0,20		5	17	44	110
0,25		8	24	52	160
0,30		12	32	–	–
0,35		18	42	–	–
0,40		25	51	–	–
0,45		43	71	–	–

Примітка: 1. Для шліфування застосовувався круг 63СМ7СМ2Гл. 2. Суперфінішування виконувалось абразивним бруском 63СМ7СМ2Гл. 3. Для суперфінішування використовувалась мастильно-охолоджувальна рідина зі складом: масло И16 (30%), гас (70%).

З табл. 3.2 слідує, що частина нерівностей після суперфінішування значно вища, ніж після шліфування, що пояснюється дією великої кількості найдрібніших абразивних частинок та наявністю високочастотних коливань абразивного бруска.

Форма мікронерівностей також суттєво відрізняються від шліфованої поверхні. Так, якщо після шліфування найбільш ймовірні радіуси заокруглення вершин нерівностей r складають 10–15 мкм, то після суперфінішування розподіл значень r має характер, уявлення про який надає табл. 3.3.

Дані табл. 3.3 дозволяють зробити висновок про те, що зміни характеру взаємодії абразивних зерен з композитом (а саме, перехід від різання до тертя) веде до значного збільшення радіусів заокруглення вершин нерівностей. Ця обставина, до речі, може бути використана, наприклад, для підвищення контактної жорсткості поверхонь.

Таблиця 3.3 Розподіл значень радіусів r заокруглення вершин нерівностей при суперфінішуванні деталей з композиту 85Х6НФТ

Характеристика абразивного бруска	Режим оброблення	Кількість нерівностей в % залежно від r (мкм)				
		10 – 20	20 – 40	40 – 80	80 – 180	180 – 320
63СМ28СМ2Гл	Різання	52	22	13	–	–
63СМ28СМ2Гл	Тертя – полірування	2	13	63	18	4
63СМ14СМ2Гл	Різання	40	35	15	–	–
63СМ14СМ2Гл	Тертя – полірування	26	5	61	26	6

Примітка: 1. Режим суперфінішування – швидкість деталі $v_{\text{дет}} = 100$ м/хв; швидкість поздовжньо-зворотних коливань $v_{\text{п.з.}} = 1,0$ м/хв, питомий тиск брусків $q = 0,8$ МПа. 2. Склад мастильно-охолоджувальної рідини при суперфінішуванні – індустріальне масло И16 (30%), гас (70%).

Змінюючи співвідношення швидкостей робочих рухів при суперфінішуванні, можливо регулювати напрямок орієнтації нерівностей, що дозволяє створити більш сприятливі умови роботи поверхонь тертя при майбутній експлуатації деталей у машинах і механізмах. Така можливість при шліфуванні відсутня, тому що сліди обробки поверхні абразивними зернами мають постійний напрямок, який визначається обертанням шліфувального круга.

Відзначені особливості мікрорельєфу поверхні суттєво впливають на площу фактичного контакту $A_{\text{ф}}$.

На рис. 3.3 наведені криві опорної площі поверхні деталей, які оброблені шліфуванням і наступним суперфінішуванням до значень шорсткості поверхні по параметру R_a на рівні 0,08–0,16 мкм. Вочевидь, обробка суперфінішуванням абразивними брусками збільшує $A_{\text{ф}}$ у 2–3 рази при ідентичних показниках шорсткості.

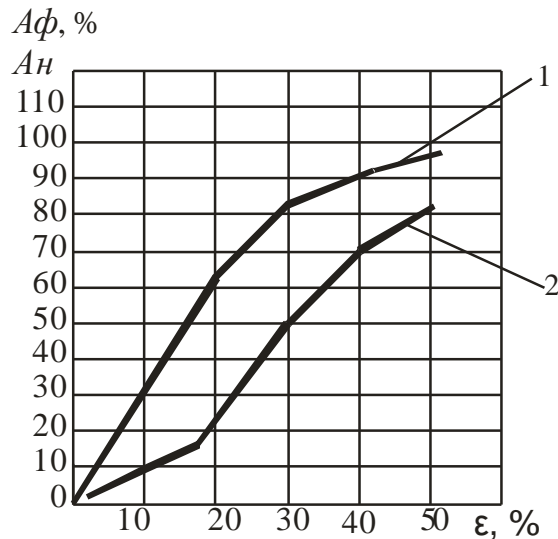


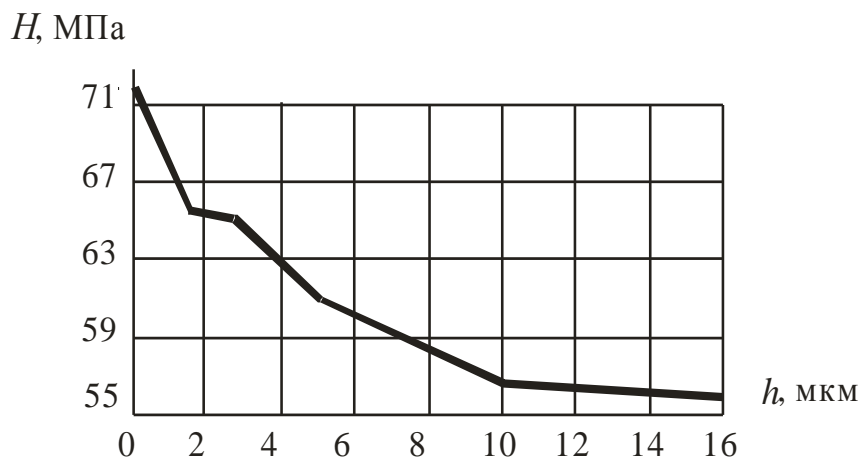
Рис. 3.3 Криві опорної поверхні: 1 – суперфінішування; 2 – шліфування

У зв'язку з тим, що суперфінішування є кінцевою технологічною операцією, яка формує поверхневий шар деталей з високолегованих зносостійких композиційних сплавів, доцільним і, безумовно, виправданим є вивчення його фізико-механічних властивостей.

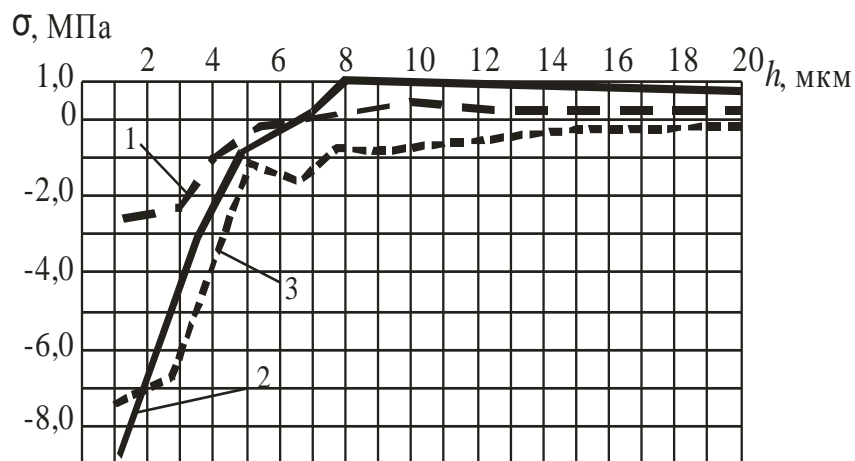
За допомогою рентгеноструктурного аналізу [91–95] встановлено, що якісь фазові зміни у поверхневому шарі – відсутні. Ці дані повністю узгоджуються з результатами вимірювань температур при суперфінішуванні [93, 94], які здебільше, не перевищують значень 60–100%. Проте, інтенсивна пластична деформація мікрооб'ємів композиту абразивними зернами веде до значних змін впорядкованої структури. Так наприклад, при суперфінішуванні (без попереднього шліфування) високолегованого композита 11РЗАМЗФ відзначається подрібнення блоків до величини $D=(0,6\div1,5)10^{-5}$ см (у відпаленої сталі 45 $D=1\cdot10^{-5}$ см). Одночасно виникають залишкові напруження II роду з параметром $\Delta a/a=(0,6\div0,9)10^{-3}$, а щільність дислокацій складає $\rho=(0,5\div3)10^{10}$ см²/см³. Для порівняння зазначимо, що для загартованої сталі 45 значення цих параметрів складають: $D=(0,3\div0,5)10^{-5}$ см; $\Delta a/a=(2,2\div3)10^{-3}$; $\rho=(3,7\div9)10^{10}$ см²/см³. Корисно зазначити, що менші з вказаних вище значень показників D та більші значення $\Delta a/a$ і ρ отримані при роботі в режимі тертя – полірування, коли пластична деформація поверхневого шару є найбільш інтенсивною.

Встановлені ефекти знаходять своє відображення у змінах таких параметрів, як мікротвердість поверхневого шару та залишкові напруження I-го роду. Так наприклад, при обробці композита 4Х2В5МФ мікротвердість збільшилась від 15–16 МПа до значень у межах 21–22 МПа, а при обробці високолегованого композиційного сплаву Р6М5Ф3 – від 57 МПа до 72–73 МПа (рис. 3.4, а).

При дослідженні залишкових напружень I-го роду було встановлено, що суперфінішування утворює у поверхневому шарі стискувальні напруження, значення яких знаходяться у достатньо широких межах від 2,0 МПа до 9,0 МПа (рис. 3.4, б).



а)



б)

Рис. 3.4. Мікротвердість H (а) та залишкові напруження σ (б) поверхневих шарів деталей з високолегованого композиту Р6М5Ф3 після суперфінішування брусками 63СМ14СМ2Гл при: різанні (крива 1), тертя (крива 2) і тертя – полірування (крива 3)

Встановлено, що найбільше впливає на рівень залишкових напружень безпосередньо механізм процесу обробки суперфінішуванням. Дійсно, якщо в результаті різання утворюються залишкові напруження, що дорівнюють значенням 2,0–3,0 МПа, то при терті – поліруванні вони зростають до рівня 7,0–9,0 МПа, тобто є більшими у 3–4 рази.

Всі зазначені вище явища в поверхневому шарі композиційного сплаву фіксуються, як правило, на глибині до 5–10 мкм, при цьому найбільш знакові ефекти відбуваються у надтонкому шарі глибиною близько 1–2 мкм.

Таким чином, технологічний процес суперфінішування високолегованих зносостійких композитів має ряд суттєвих переваг (у порівнянні з іншими методами оздоблювального абразивного оброблення) з точки зору формування мікрогеометрії і якості поверхні деталей. Стабільне забезпечення вимог досягнення мінімальних параметрів шорсткості поверхні R_a , виправлення хвилястості, специфічна форма нерівностей, яка обумовлює значне збільшення фактичної опорної поверхні, зміцнення поверхневого шару композита, утворення залишкових стискувальних напружень і, нарешті, можливість регулювання цими параметрами за рахунок гнучких змін технології оброблення – все це у сукупності дозволяє впевнено зробити висновок про рекомендацію процесу суперфінішування деталей, що виготовленні з новітніх марок високолегованих зносостійких композитів, у якості фінішної операції виготовлення деталей тертя машин і механізмів сучасних технологічних комплексів.

3.2 Прецизійна машинна доводка плоских поверхонь зносостійких деталей тертя з композитів на основі високолегованих сталей для технологічних комплексів

У конструкціях новітнього обладнання поліграфічної галузі, а також у сучасних машинах легкої та харчової промисловості широко застосовують зносостійкі композиційні матеріали, які одержані з цінної та дешевої сировини – промислових шліфувальних відходів високолегованих, зокрема, штампових та швидкорізальних інструментальних сталей. У складі цих відходів міститься

велика кількість елементів, які є гостродефіцитними для народного господарства України, а саме – вольфрам, титан, молібден, ванадій, ніобій, нікель, мідь та інші. На жаль, навіть на сьогодні, ця сировина, у вигляді відходів основного виробництва промислових підприємств вивозиться у відвали і не використовується у повторному циклі виробництва.

На основі розгалужених науково-дослідних робіт з регенерації та повторного використання у виробничому циклі цих сировинних ресурсів [91–96], в останні роки були створені оригінальні зносостійкі композиційні сплави на базі високолегованих інструментальних сталей 85X6HФТ, 11P3AM3Ф, P6M5K5, P6M5Ф3, 4ХМФТС та 4X2B5MФ. Вони пройшли всебічну перевірку в умовах дії агресивного оточуючого середовища (кисень повітря, виробничий пил з абразивною властивістю, температурні навантаження при експлуатації у межах 750 – 800° С, питомі тиски – 5–8 МПа) і широко застосовуються для виготовлення деталей тертя (скоби, направляючі, плоскі вкладні пальців автооператорів, підтримувані конвеєрних систем) у ножових різальних машинах поліграфії типу WOHLBERG Trim-tec 560, у висікальному обладнанні паперу та картону DROSSERT ST-6, BOBMISTRAL 110 A2, машин легкої промисловості (автооператорів панчохов'язальних машин типу PALERMO-105 SR, укладачів швидкісних ткацьких верстатів SPRINT-1205Pi) та машин харчової промисловості (лоткові системи, маніпулятори і затискувачі).

Більшість наведених у таблиці 3.4 матеріалів містить у своєму складі певну кількість (до 10 – 12 %) домішок твердого мастила у вигляді фториду кальцію CaF_2 . Вони позитивно зарекомендували себе при роботі в жорстких умовах експлуатації і наразі широко використовуються у вузлах тертя машин і механізмів, здебільшого працюючи без змащування рідкими мастилами.

Відомо [91–96], що зносостійкість деталей, як один із головних параметрів якості поверхонь тертя і, в першу чергу, від шорсткості та фізичних властивостей поверхневого шару. Ці параметри формуються на фінішних операціях тонкого абразивного оброблення.

Деякі основні властивості нових зносостійких матеріалів на основі сталей наведені у табл. 3.4.

Таблиця 3.4 Основні фізико-механічні та антифрикційні властивості композиційних сплавів, синтезованих зі шламових відходів штампових та інструментальних сталей.

Матеріал	Межа міцності при згині, МПа	Твердість, НВ, МПа (20 °С)	Ударна в'язкість, кДж/м ²	Коефіцієнт тертя	Інтенсивність зношування зразка, мкм/км	Інтенсивність зношування контртіла, мкм/км
Композит на основі інструментальної сталі 85Х6НФТ	570-600	860-920	750-760	0,0055-0,0085	0,5-0,8	Сліди
Композит на основі інструментальної сталі 11РЗАМЗФ	590-620	850-910	770-790	0,0050-0,0080	0,45-0,70	Сліди
Композит на основі інструментальної сталі Р6М5К5	530-540	760-870	710-720	0,0014-0,0020	0,25-0,27	Сліди
Композит на основі інструментальної сталі Р6М5Ф3	520-530	770-880	670-680	0,0016-0,0023	0,29-0,32	Сліди
Композит на основі інструментальної сталі 4ХМФТС	600-630	855-915	780-790	0,0055-0,0082	0,45-0,75	Сліди
Композит на основі інструментальної сталі 4Х2В5МФ	570-610	770-810	750-800	0,0015-0,0017	0,27-0,30	Сліди

У зв'язку з тим, що нові високолеговані композиційні сплави знайшли своє використання у технологічних комплексах відносно нещодавно, розгалужених та всебічних досліджень процесів їх тонкого абразивного оброблення до цього часу практично немає. Зроблено лише перші кроки у цьому напрямку [81, 85].

Виходячи із загальних положень теорії абразивного оброблення матеріалів [92–97] та враховуючи специфічні властивості композиційних сплавів на основі сталей [80 - 93], безумовно доцільним є обробка високоточних плоских поверхонь деталей тертя з новітніх марок високолегованих зносостійких композитів на основі інструментальних сталей за схемою «тонке високоточне шліфування – прецизійна механічна доводка». Така схема оброблення гарантує отримання надвисоких вимог до поверхонь тертя композитних деталей, які є засадничими для забезпечення високих параметрів надійності пар тертя (зносостійкості, довговічності, ремонтоспроможності та коефіцієнта готовності). Наприклад, для прецизійних опор конвеєрних систем поліграфічних комплексів, ці вимоги складають – параметр шорсткості поверхні оброблення R_a повинен знаходитись у межах 0,020 мкм – 0,040 мкм, не площинність на базі 60×60 мм – 0,05 – 0,08 мкм, ступінь наклепу $K = 1,4 - 1,5$, глибина наклепу $h = 2 - 5$ мкм, залишкові напруження у поверхневому шарі – стиску. На жаль, на сьогодні повністю відсутні відомості про дослідження технологічних процесів прецизійної машинної доводки деталей з високолегованих композитів на основі інструментальних сталей. Швидше за все, це пояснюється тим, що ці композитні матеріали лише нещодавно набули поширення у промисловості.

Тому всебічних технологічних досліджень по забезпеченню якості поверхонь деталей та оптимізації режимів оброблення не проводилось. Є лише перші спроби по дослідженню параметрів шорсткості поверхонь наклепу, залишкових напружень поверхневих шарів деталей з нових високолегованих композитів при тонкому шліфуванні (абразивному, алмазному, ельборовому, кубонітовому) плоских поверхонь, поверхонь отворів та зовнішніх циліндричних поверхонь деталей обертання та розробці оптимальних режимів різання, вибору структури і складу шліфувальних інструментів [93, 95].

В науково-технічній літературі є багато публікацій по машинній доводці плоских прецизійних поверхонь деталей з важкооброблюваних матеріалів для систем різного призначення [93].

Науковцями та практикою провідних машинобудівних підприємств доведено, що застосування прецизійної машинної доводки з використанням сучасних абразивних інструментів дозволяє отримати найкращі показники якості оброблюваних поверхонь.

Втім, відсутність науково обґрунтованих рекомендацій з високоточної машинної доводки деталей з композитних сплавів на основі високолегованих сталей призводить до застосування на практиці різних технологічних схем оброблення, далеко не завжди оптимальних.

Вказане викликає поширення різних технологій, часто суттєво протирічних, і які здебільшого створені до можливостей того чи іншого підприємства.

Тому дослідження технологічних процесів прецизійної машинної доводки плоских поверхонь зносостійких деталей тертя з нових композиційних матеріалів на основі інструментальних сталей є актуальним питанням, що має безсумнівне як наукове, так і, що не менш важливо, практичне значення для технологів-виробників.

Метою даного розділу монографії було дослідження параметрів якості поверхонь при прецизійній машинній доводці деталей тертя з нових композиційних матеріалів 85Х6НФТ, 11РЗАМЗФ, Р6М5К5, Р6М5Ф3, 4ХМФТС 4Х2В5МФ та встановлення впливу технологічних параметрів обробки (матеріали зерна абразиву для доводки, його зернистість, режимів різання – питомого тиску, швидкості різання та інше) на показники якості оброблених поверхонь (параметри шорсткості R_a , мікротвердість H , структурні характеристики поверхні – $\Delta a/a$, розмір блоків D).

Як вже відзначалось, доводка є фінішною операцією технологічного процесу механічної обробки і тому стан поверхневого шару композиту після доводки безпосередньо впливає на такі експлуатаційні властивості деталей машин, як їх зносостійкість та довговічність.

Нижче наведені результати дослідження якості поверхні (шорсткість, мікротвердість, залишкові напруження) зразків з високолегованих композитів

11РЗАМЗФ, поверхні тертя яких були оброблені методом прецизійної машинної доводки з застосуванням різних абразивних матеріалів (алмаз синтетичний АС, ельбор звичайної міцності ЛО, карбід кремнію зелений 63С, електрокорунд хромчастий 33А з вмістом у складі абразиву до 2 % оксиду хрому Cr_2O_3 , електрокорунд титанистий 37А з вмістом у складі абразиву до 2 % оксиду титану TiO_2). Для дослідів використовувались мікропорошки зернистістю М14 та М1.

Доводка виконувалась на прецизійному плоско-доводочному верстаті С15 на чавунних притирах з застосуванням наступних режимів різання: швидкість різання – 25 м/хв., питомий тиск 0,5 МПа, мастильно-охолоджуюча рідина – суміш індустріального мастила У-16 (~ 30%) та гасу (~ 70%), час доводки ~3 хв. [20]. Вимірювання параметрів шорсткості R_a , мікротвердості Н, залишкових напружень здійснено згідно методики, що наведена у роботах [93 - 96].

В результаті досліджень встановлено, що за 30 с доводки абразивами зернистості М14 досягається значення параметру шорсткості R_a у межах 0,08 – 0,16 мкм (рис. 3.1). При цьому абразиви, які мають більш гострі зерна (алмаз синтетичний АС та карбід кремнію зелений 63С), забезпечують отримання більш гладкої поверхні, ніж абразиви, що мають дещо більший радіус заокруглення вершини зерна (ельбор звичайної міцності ЛО та електрокорунд титанистий 37А) [97].

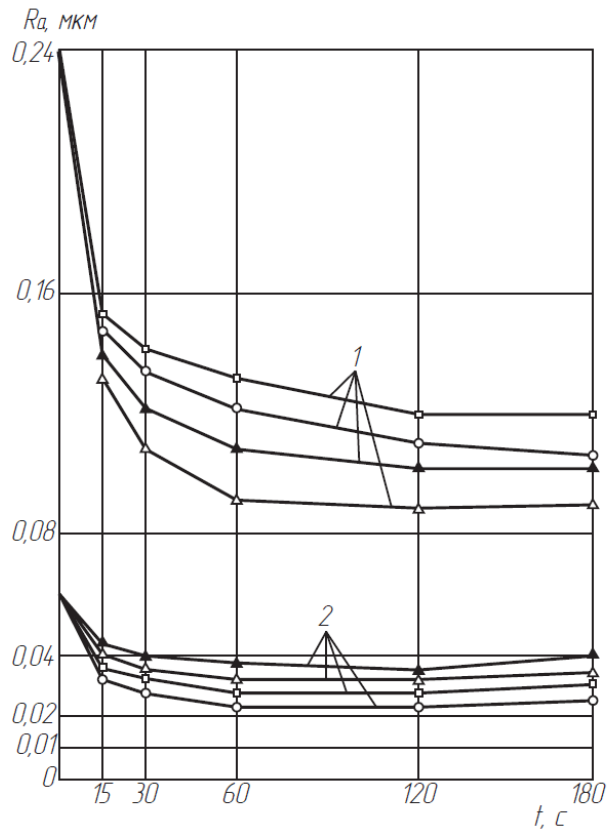


Рисунок 3.5 Вплив часу доводки t композита 11РЗАМЗФ на параметр шорсткості R_a (питомий тиск 0,5 МПа, швидкість різання 25 м/хв.):

1 – зернистість мікропорошків М14;

2 – зернистість мікропорошків М1;

□-□-□ – обробка ельбором звичайної міцності ЛО;

○-○-○ – обробка титанистим електрокорундом 37А;

▲-▲-▲ – обробка алмазом синтетичним АС;

Δ-Δ-Δ – обробка карбідом кремнію зеленим 63С.

Параметр шорсткості R_a поверхні оброблення композиту у межах показників 0,02 – 0,04 мкм можливо отримати в результаті доводки абразивами зернистістю М1 у експериментальних зразків, попередньо доведених абразивами зернистістю М14 і додатково абразивами зернистості М7 (проміжна доводка). Цікаво зазначити, що у даному випадку застосування титанистого електрокорунду та ельбору дають меншу шорсткість, ніж обробка алмазом синтетичним АС та карбідом кремнію зеленим 63С, що пояснюється більшою

поліруючою дією абразивних зерен, які мають більш заокруглені вершини [10–12].

Результати дослідження мікротвердості поверхні, обробленої методом прецизійної машинної доводки, наведені на рис. 3.6.

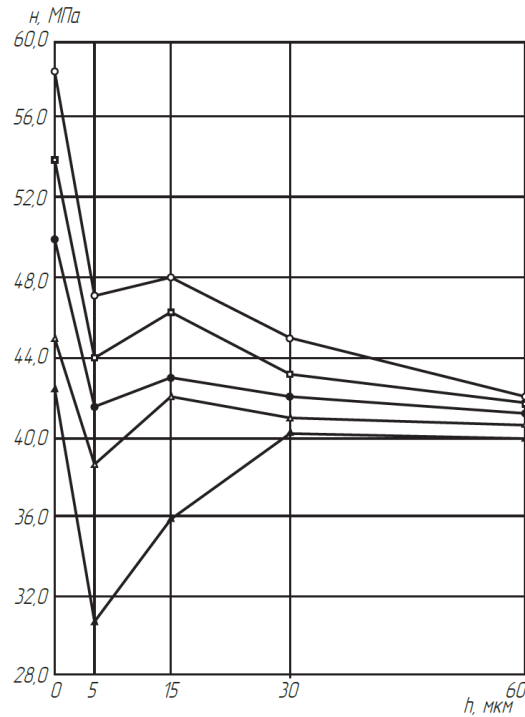


Рисунок 3.6 Розподіл мікротвердості H по глибині поверхневого шару h при машинній доводці деталей з високолегованого зносостійкого композиту 4ХМФТС абразивними мікропорошками зернистістю 14 мкм (питомий тиск – 0,5 Мпа, швидкість різання – 25 м/хв., час обробки – 120 с.):

- – доводка титанистим електрокорундом 37А;
- – доводка ельбором звичайної міцності ЛО;
- – доводка електрокорундом хромчастим 32А;
- Δ-Δ-Δ – доводка мікропорошками карбіду кремнію зеленого 63С;
- ▲-▲-▲ – доводка мікропорошками алмазу синтетичного АС.

Дані, наведені на рис. 3.2, підтверджують припущення про превалюючу роль пластичної деформації при обробці поверхонь мікропорошками титанистого електрокорунду та ельбору зернистістю М14. Зерна алмазу, як найбільш гострі і тверді [98]. При доводці переважно ріжуть поверхню деталі.

Це дає приблизно на 27 % меншу мікротвердість, ніж електрокорунд титанистий.

З рис. 3.2 також слідує, що крива мікротвердості поверхневого шару після доводки круто спадає при віддалені від поверхні і на глибині близько 15 мкм переходить у плавну криву, яка відносно плинно знижується до рівня мікротвердості вихідного матеріалу (значення початкового стану). Також слід звернути увагу на суттєву зміну мікротвердості на глибині 5 мкм від обробленої поверхні.

Виконані рентгенографічні та дифрактометричні дослідження, в свою чергу, підтвердили наявність змін фізичного стану шару на зазначеній глибині. В табл. 2 наведені значення структурних характеристик (D – розмір блоків, $\Delta a/a$ – мікронапруження II-го роду, ρ – щільність дислокацій) експериментальних зразків, поверхні яких були оброблені методом прецизійної машинної доводки з застосуванням ріжучих абразивних мікропорошків з кубічного нітриду бора марки ЛО (ельбор звичайної міцності) зернистістю M14 (14 мкм). Вимірювання фізико-механічних характеристик здійснено на різних відстанях h від поверхні оброблення.

Таблиця 3.7 Фізичний стан поверхні високолегованого композиту 4X2B5МФ, яка була доведена ельбором M14

h , мкм	$D \times 10^5$, см	$\Delta a/a \times 10^3$	$\rho \times 10^{11}$, см ² /см ³
0	0,6	1,7	2,3
1,1	0,9	1,4	1,1
30,	0,7	1,4	1,7
5,2	0,6	1,6	2,3
10,0	0,8	1,9	1,2

Примітки: 1 – доводочний диск – чавун;

2 – режими різання: швидкість різання $V_p = 25$ м/хв., питомий тиск $q = 0,5$ МПа;

3 – час доводки – 180 с;

4 – склад мастильно-охолоджуючої рідини – індустріальне мастило U16 (30 %) + гас (70 %).

Дослідження показали, що доводка мікропорошками зернистістю 1 мкм (M1) забезпечує отримання більш дрібних блоків, більших напружень II-го

роду та більшої щільності дислокацій, ніж при обробці мікропорошками більшої зернистості, а саме М14. При цьому найбільш подрібнюючою дією характерні мікрозерна карбіду кремнію зеленого (63С), меншою – зерна ельбору ЛО і мінімальний вплив здійснюють мікропорошки алмаза синтетичного (АС).

На основі експериментальних досліджень процесу прецизійної машинної доводки високолегованих зносостійких композитів, створених на базі відходів штампованих і швидкорізальних інструментальних сталей, встановлено, що при доводці в поверхневому шарі утворюються залишкові напруження рівня 4,0 – 6,5 МПа.

З досліджених абразивних матеріалів найбільші залишкові напруження утворюють зерна ельбору (ЛО), а мікропорошки синтетичного алмазу (АС). Це може бути пояснено принципово різними механізмами процесу доводки цими матеріалами [99, 100]. Крім того, дослідження також показали, що перехід від зернистості М14 до М1 при машинній доводці обумовлює підвищення рівня залишкових напружень для мікропорошків з синтетичних алмазів (АС) приблизно на 17 %, для всіх інших абразивів – 8 – 10 %.

Серед режимів різання машинної доводки найбільший вплив на рівень та глибину розповсюдження залишкових напружень має питомий тиск. При його збільшенні залишкові напруження зростають. Для мікропорошків зернистості М1 це зростання є більш помітним, ніж для зернистостей абразивів М14.

3.3 Стрічкове алмазно-абразивне полірування деталей обертання зі зносостійких композитів на основі алюмінію для поліграфічних машин

У конструкціях новітнього обладнання поліграфічної техніки широко застосовують зносостійкі композиційні матеріали, які одержані з цінної та дешевої сировини – промислових шліфувальних відходів кольорових металів, насамперед, алюмінієвих сплавів та які, на жаль, навіть на сьогодні, здебільшого вивозяться у відвали і не використовуються у повторному циклі виробництва.

На основі розгалужених науково-дослідних робіт з регенерації та повторного використання у виробничому циклі цих сировинних ресурсів [101, 102] в останні роки були створені оригінальні високозносостійкі сплави на основі алюмінію АК12М2МгН, АМ4,5Кд, АК8МЗч та АК12ММгН + (9 – 12)%MoS₂ [102].

Вони пройшли всебічну перевірку в умовах дії агресивного оточуючого середовища (кисень повітря, виробничий пил з абразивною властивістю, температурні навантаження при експлуатації у межах 100 – 170°C, питомі навантаження до 7 МПа) і широко застосовуються для виготовлення деталей тертя (циліндричні втулки, пальці захоплювачів автооператорів, ролики рольгангів конвейєрних систем, вісі підтримувачів кантувальних пристроїв вузлів переадресації готової продукції) поліграфічних комплексів КВА Rapida-6+L-NN-L (шестикольоровий з двома лакуючими секціями) фірми Koenig+Baner AG (ФРН), КВА Rapida 75–4 (ФРН), п'ятикольорових пристроїв Ose Arizona 6160 XTS та семикольорових Ose Arizona 6170 XTS фірми Canon (США), ножових різальних машин типу WOHLBERG Trim-tec 560 (ФРН), висікального обладнання паперу та картону DROSSERTST-6 BOBMISTRAL (ФРН), автоматичних машин світлодіодної сушки LED-UV офсетних друкарських машин фірми Air Motion System Europe (Швейцарія) та ін.

Зносостійкий матеріал на основі алюмінієвого сплаву АК12ММгН з домішками твердого мастила (дисульфід молібдену MoS₂) набув визнання у конструкторів та наразі широко використовується у вузлах тертя машин і механізмів, що працюють при підвищених навантаженнях і температурах без змащування рідким мастилом. Відомо [102, 103], що зносостійкість деталей, як один із головних параметрів надійності обладнання, суттєво залежить від параметрів якості поверхонь тертя і, в першу чергу, від шорсткості та фізичних властивостей поверхневого шару. Ці параметри формуються на фінішних операціях тонкого абразивного оброблення.

Основні фізико-механічні та антифрикційні властивості нових композитів на основі алюмінію наведені у табл. 3.8

Таблиця 3.8 Фізико-механічні та антифрикційні властивості композитів на основі алюмінію

Властивості композитів	Марка композиційного сплаву			
	AK12M2MгН [3]	AM4,5Кд [4]	AK8M3ч [5]	AK12MMгН + (9 – 12)%MoS ₂ [6]
Межа міцності на розтяг, МПа	180 – 185	187 – 190	187 – 195	190 – 197
Твердість НВ, МПа	550 – 570	580 – 600	590 – 610	595 – 615
Ударна в'язкість, кДж/м ²	0,18 – 0,30	0,22 – 0,34	0,25 – 0,35	0,27 – 0,37
Коеф. тертя при 5 МПа	0,0075 – 0,0080*	0,0077 – 0,0082**	0,0045 – 0,0048**	0,0038 – 0,0050**
Інтенсивність зношування при 5 МПа	3,9*	5,3*	2,66 – 2,69**	2,61 – 2,65
Інтенсивність зношування контртіла при 5 МПа	Сліди	0,005*	0,002**	сліди
Гранична температура, °С	120	170	150	155
Граничне навантаження, МПа	7	7	6**	6,5**

Примітка: * – випробування при 100°C; ** – випробування при 150°C; змащування індустріальним мастилом «І – 20» в парі з контртілом зі сталі 45 (45 – 48 HRC).

У зв'язку з тим, що нові композиційні сплави на основі алюмінію знайшли своє використання у машинобудуванні та приладобудуванні відносно нещодавно, розгалужених та всебічних досліджень процесів їх тонкого абразивного оброблення до цього часу практично немає. Зроблено лише перші кроки у цьому напрямку, зокрема, є поодинокі публікації, присвячені дослідженню впливу складу інструменту та режимів різання на параметри шорсткості поверхонь при тонкому абразивному шліфуванні [103].

Виходячи із загальних положень теорії абразивного оброблення матеріалів [104] та враховуючи специфічні властивості композиційних сплавів на основі алюмінію [105], безумовно, доцільним є обробка викінчувально-оздоблювальним стрічковим алмазно-абразивним поліруванням деталей обертання зі зносостійких композитів на базі відходів алюмінієвої сировини за схемою – «тонке плоске ельборове шліфування – стрічкове алмазно-абразивне полірування». Така схема оброблення гарантує отримання

надвисоких вимог до поверхонь тертя композиційних деталей, які є базовими для забезпечення високих параметрів надійності пар тертя (зносостійкості, довговічності, ремонтоздатності та коефіцієнта готовності). Наприклад, для прецизійних підтримувачів конвеєрних систем поліграфічних комплексів, ці вимоги складають – параметр шорсткості поверхні оброблення R_a повинен знаходитись у межах $0,020 \div 0,040$ мкм, ступінь наклепу $K = 1,4 \div 1,5$, глибина наклепу $h = 2 - 5$ мкм, залишкові напруження у поверхневому шарі – стиску.

На жаль, на сьогодні повністю відсутні хоча б якісь відомості про дослідження технологічних процесів стрічкового алмазно-абразивного полірування деталей з композитів на основі алюмінію.

Швидше за все, це пояснюється тим, що ці композитні матеріали лише нещодавно набули поширення у промисловості [105]. Тому всебічних технологічних досліджень щодо забезпечення якості поверхонь деталей та оптимізації режимів оброблення не проводилось.

Є лише перші спроби з дослідження параметрів шорсткості поверхонь деталей з алюмінієвих сплавів при тонкому абразивному та ельборовому шліфуванні циліндричних поверхонь обертання та розробці оптимальних режимів різання, вибору структури і складу шліфувальних інструментів [105, 106].

В науково-технічній літературі є багато публікацій стосовно стрічкового алмазно-абразивного полірування поверхонь деталей з важкооброблювальних матеріалів для систем різного призначення [107]. Науковцями та практикою провідних машинобудівних підприємств доведено, що застосування викінчувально-оздоблювального стрічкового алмазно-абразивного полірування з використанням сучасних абразивних інструментів (незалежно від матеріалу основи стрічок – шифон, нейлон, лавсан, капрон чи типу абразиву, складу лаків і смол для закріплення абразивних зерен у ріжучому робочому шарі полірувальної стрічки) дозволяє отримати найкращі показники якості оброблювальних поверхонь (шорсткість за параметром R_a у межах $0,03 - 0,05$ мкм, ступінь наклепу $K = 1,25 \div 1,30$, глибина h до $1,5 - 2$ мкм).

Втім, відсутність науково - обґрунтованих рекомендацій з алмазно-абразивного полірування стрічкою для оброблення поверхонь деталей обертання з композитних сплавів на основі алюмінію призводить до застосування на практиці різних технологічних схем оброблення, далеко не завжди оптимальних. На жаль, навіть на сьогодні немає сталого уявлення стосовно процесу обробки: деякі автори вважають, що це – тонке стрічкове шліфування [107, 108], інші – оздоблювально-викінчувальна технологічна операція є процесом надтонкого полірування алмазно-абразивними стрічками на гнучкій еластичній основі [108]. Вказане викликає поширення різних технологій (від стрічкового полірування до тонкого шліфування пелюстковими шліфувальними кругами), часто суттєво протирічних, і які здебільшого створені відповідно до можливостей того чи іншого підприємства.

Тому дослідження технологічних процесів полірування поверхонь зносостійких деталей з високолегованих антифрикційних композитів на основі алюмінію гнучкими алмазно-абразивними стрічками є актуальним питанням, що має безсумнівне як наукове, так і, що не менш важливо, практичне значення для технологів-виробників.

Метою даної роботи було дослідження параметрів якості поверхонь обертання при стрічковому поліруванні деталей тертя з нових композиційних матеріалів на основі алюмінію АМ4,5Кд, АК12М2МгН, АК8М3ч та АК12ММгН + (9 – 12%) MoS₂ та встановлення впливу зернистості гнучкої еластичної стрічки і основних режимів різання на якісні показники поверхонь оброблення досліджуваних деталей тертя (параметр шорсткості R_a, ступінь наклепу К, глибина його проникнення h у тіло деталі).

Задачами дослідження були такі:

1. Дослідити закономірності утворення параметрів якості при оздоблювально-викінчувальному поліруванні алмазно-абразивними стрічками нових композиційних сплавів, синтезованих на основі утилізованих і регенерованих шліфувальних відходів алюмінію при виробництві силу мінових деталей автотранспортних та авіаційної галузей промисловості;

2. З'ясувати, які параметри полірувальних стрічок (тип абразиву, його зернистість, вид основи стрічки) істотно впливають на процес формування шорсткості і фізико-механічних властивостей поверхневого шару оброблення;

3. Встановити основні закономірності впливу режимів різання на параметри якості поверхонь оброблення при стрічковому алмазно-абразивному поліруванні;

4. Дати рекомендації для промисловості щодо забезпечення технічних вимог до якості поверхонь при обробці нових зносостійких сплавів на основі алюмінію за умови застосування для їх фінішного оздоблювально-викінчувального оброблення гнучких алмазно-абразивних стрічок.

Експериментальні дослідження технологічних процесів стрічкового алмазно-абразивного полірування поверхонь обертання деталей з нових композиційних сплавів виконувались згідно методики, що детально викладена у працях [108].

Особливістю досліджень було те, що вони виконувались при зрізанні надтонких перерізів стружки a_z , коли глибина шару зрізання металу з поверхні деталі перебуває в межах 0,001 – 0,005 мм.

Для досліджень використовувались технологічні зразки з нових композиційних сплавів АК12М2МгН, АК12ММгН + (9–12%)MoS₂, АМ4,5Кд, та АК8МЗч [108, 109].

Слід зазначити, що для отримання необхідних технічних умов щодо забезпечення високих параметрів якості поверхонь оброблення деталей з композитів на основі алюмінію при їх стрічковому алмазно-абразивному поліруванні найголовнішою умовою є питання вибору параметрів ріжучих абразивних зерен [109]. З урахуванням цього для розгалужених досліджень шорсткості та фізичних властивостей тонкого поверхневого шару (наклепу) деталей при їх фінішній оздоблювально-викінчувальному поліруванні використовувались у якості ріжучих абразивних мікропорошків зерна електрокорунду хромчастого з вмістом у складі абразиву оксиду хрому CrO₂ до 1,2 – 1,5% (33А), електрокорунду титанового з вмістом у складі зерен оксиду

титану TiO_2 до 2% (37А), карбиду кремнію зеленого (63С) та алмазів синтетичних (АС). Зернистість алмазно-абразивних мікропорошків у всіх випадках коливалась у межах 0,5 – 3 мкм [110, 111].

Полірувальні стрічки для експериментів були виготовлені двох типів – на тканинній основі з нейлону та шифону [111, 112] і з поліетилентерефталату товщиною 10 – 20 мкм.

Авторами статті була створена нова полірувальна стрічка (рис. 3.7). Вона має поліетилентерефталатну основу та ріжучий алмазно-абразивний шар з дрібнозернистих мікропорошків, розподілених у поверхневому шарі, стрічка у поєднуючій речовині суттєво відрізняється від існуючих на сьогоднішній стрічок тим, що з метою покращення якості обробки, речовина робочого шару стрічки складається з суміші полівінілбутиралу та резольної фенолоформальдегідної смоли у співвідношенні 1:1 за вагою, а у якості наповнювача застосовують дрібнозернисті алмазно-абразивні мікропорошки зернистістю 0,5 – 3 мкм (при 100%-й концентрації алмазів АС у випадку їх застосування). При цьому товщина поліетилентерефталатової основи знаходиться у межах 10 – 20 мкм, а товщина алмазно-абразивного шару – 1 – 5 мкм.

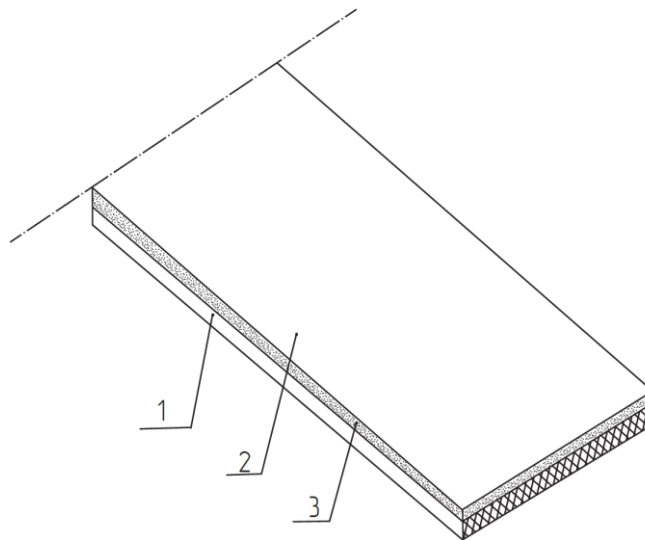


Рисунок 3.7 Алмазна стрічка для полірування поверхонь деталей тертя

Зображений на рис. 1 варіант нової гнучкої стрічки має еластичну основу 1 з поліетилентерефталату. На основі 1 міцно закріплено (завдяки адгезійним

властивостям) алмазно-абразивний робочий шар, що складається з поєднуючої речовини 2, в якій рівномірно розподілені дрібнозернисті (0,3 – 3 мкм) мікропорошки 3 абразивів (чи синтетичних алмазів АС при 100%-й їх концентрації у ріжучому шарі полірувальної стрічки). Поєднуюча речовина 2 ріжучого шару складається з суміші полівінілбутиралу та резольної фенолоформальдегідної смоли у співвідношенні 1:1 за вагою.

Виготовлення експериментальних зразків полірувальної стрічки для дослідів здійснювалось у багатоцільових машинах «GEVERT 15–0.1A» (Бельгія) фільтрального штабу для нанесення на поверхню гнучкої еластичної основи з поліетилентерефталату рідинної поєднуючої суміші з полівінілбутиралу, резольної фенолформальдегідної смоли у співвідношенні 1:1 за вагою та наповнювача з дрібнозернистих (0,3 – 3 мкм) абразивно-алмазних мікропорошків. У робочих органах машини на котушках ємкістю 100 – 200 м встановлювали основу стрічки. Конструкція машини «GEVERT 15–0.1A» для поливу суміші та специфічні особливості фільт'єр дозволяють виконувати нанесення ріжучого дрібнозернистого шару на один бік плоскої поверхні основи стрічки при її безперервному транспортуванні з нормованою швидкістю (залежить від товщини основи та алмазно-абразивного шару, зернистості мікропорошків, їх концентрації та ін.), забезпечуючи точність нанесення ріжучого шару на основу стрічки у межах 0,01 – 0,015 мкм та рівномірність товщини шару за довжиною стрічки 1,5 – 2,0 м не менше 0,05 – 0,07 мкм. Технологічним процесом передбачено програмне забезпечення полімеризації суміші, відповідні температурні регламенти, автоматичний контроль отриманих лінійних та геометричних параметрів стрічки та автоматичне пакування готової продукції на котушки з наступним завантаженням її автооператорами у тару для подальшого транспортування за призначенням.

Створення нового типу полірувальних алмазно-абразивних стрічок дозволило реалізувати принципово новий спосіб полірування деталей зі зносостійких високолегованих композитів на основі алюмінію, який (поряд з

іншими) був всебічно досліджений авторами статті. В основу запропонованого авторами способу полірування була поставлена задача підвищення якості оброблення деталей тертя з композитних матеріалів на основі алюмінію шляхом зрізання надтонких стружок дрібнозернистими алмазно-абразивними стрічками за рахунок зрізання мікростружок найгострішими (серед інших відомих абразивних матеріалів алмазними зернами з синтетичних алмазів (АС), які закріплені на ріжучій робочій поверхні полірувальної стрічки та застосуванням відповідної кінематики переміщення її алмазно-абразивного шару за поверхнею оброблення. Це створює необхідні можливості для суттєвого зменшення перерізу стружки a_z , що зрізується з зовнішньої поверхні обертання деталі з композитного сплаву і, відповідно, зменшуючи складові сил різання, сприяє збереженню початкової гостроти ріжучих алмазних зерен та покращенню умов формування більш якісної поверхні (параметр шорсткості R_a , ступінь наклепу K та глибина h його проникнення у тіло деталі).

Сутність способу полірування гнучкими алмазно-абразивними стрічками та його реалізація полягає у наступному (рис. 3.8).

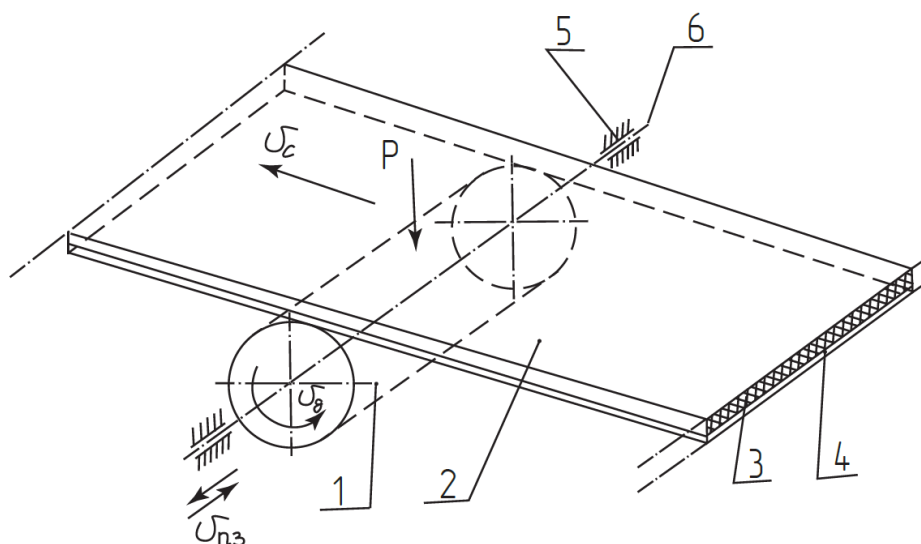


Рисунок 3.8. Схема полірування циліндричних поверхонь деталей алмазними стрічками

Деталь 1, зовнішня циліндрична поверхня якої повинні бути оброблена оздоблювальним поліруванням, закріплюють у технологічному пристрої (на рис. 2 конструкція його не наведена) таким чином, що в опорах ковзання 5

деталь 1 має можливість обертатись навколо своєї осі зі швидкістю V_{∂} . Дотичну до поверхні оброблення деталі 1 у перпендикулярному до її осі напрямку плинно з нормованою швидкістю V_c переміщують гнучку еластичну стрічку 2, яка має поліетилентерефталатну основу 3. На її робочу (ріжучу) поверхню поєднуючою речовиною з полівінілбутиралю та ре зольної формальдегідної смоли у співвідношенні 1:1 за вагою наносять шар 4 дрібнозернистих мікропорошків з сучасних абразивів чи синтетичного алмазу (АС) зернистістю 0,5 – 3 мкм (для алмазів АС – при їх 100-й концентрації алмазів).

Після полімеризації смоли алмазно-абразивні зерна міцно утримуються у ріжучому шарі 4 стрічки, при цьому товщина гнучкої еластичної основи 3 полірувальної стрічки становить 10 – 20 мкм, а товщина ріжучого шару з дрібнозернистих алмазно-абразивних мікропорошків знаходиться у межах 1,5 – 5 мкм, що досягається на етапах виготовлення полірувальних стрічок за допомогою прецизійних машин фільтрального типу «GEVERT 15–0.1A» (Бельгія).

Конструкція технологічного пристрою виконана таким чином, що вісь 6, на якій закріплено деталь 1, має можливість у опорах ковзання 5 здійснювати поздовжньо-зворотні коливання зі швидкістю $V_{n.з.}$ та амплітудою коливань A . Полірувальна стрічка 2 притискувачем (на рис. 2 не показано) пружинного, гідравлічного чи пневматичного типу з зусиллям P утворює надійний контакт алмазно-абразивного шару 4 з поверхнею оброблення деталі 1, забезпечуючи попередньо розраховану (в залежності від фізико-механічних властивостей матеріалу композитного сплаву, з якого виготовлено деталь 1) величину питомого тиску q .

Завдяки наведеній на рис. 3.8 схемі відносних переміщень абразивних зерен полірувальної стрічки 2 по поверхні деталі 1 та внаслідок поєднання робочих рухів стрічки зі швидкістю V_{∂} , плинних поздовжньо-зворотніх $V_{n.з.}$ коливань з амплітудою A та розрахованого питомого тиску q досягається якісне полірування поверхні деталі. Особливою рисою даного способу полірування алмазно-абразивною стрічкою циліндричних деталей з високолегованих композитів на основі алюмінію для друкарської техніки є застосування

безпосередньо для зрізання з поверхні деталей мікростружок таких режимів різання: швидкість деталі $V_d = 0,5 - 10$ м/хв., швидкість переміщення алмазно-абразивної стрічки $V_c = 0,05 - 0,25$ м/хв., швидкість поздовжньо-зворотніх коливань $V_{н.з.} = 0,01 - 0,05$ м/хв., амплітуда коливань $A = 0,5 - 1,5$ мм, питомий тиск стрічки на поверхню оброблення $q = 0,05 - 0,15$ МПа.

У сукупності усі наведені обставини створюють умови для одержання мінімальних значень параметру шорсткості поверхні R_a , а також фізичних властивостей поверхневого шару (ступеню наклепу K та глибини h його проникнення у тіло деталі), що забезпечує виконання технічних вимог до поверхонь обертання деталей друкарської техніки і у подальшому веде до зростання довговічності та зносостійкості готових виробів.

Порівняльні експериментальні дослідження, результати яких наведені у табл. 3.9, цього методу оброблення з відомими іншими були виконані до початку багатопланових наукових експериментів.

Таблиця 3.9 Параметри якості поверхонь полірування деталей зі зносостійкого композиту АК12М2МгН при застосуванні різних алмазно-абразивних стрічок

№ п/п	Характеристика полірувальної стрічки	Параметри якості		
		Шорсткість R_a , мкм	Ступінь наклепу K	Глибина наклепу h
1.	Основа – поліетилентерефталат. Зерно-алмаз синтетичний (АС) М 0,5	0,03 – 0,05	1,20 – 1,22	1,20 – 1,30
2.	Основа – поліетилентерефталат. Зерно-алмаз синтетичний (АС) М 1	0,06 – 0,07	1,22 – 1,24	1,25 – 1,35
3.	Основа – поліетилентерефталат. Зерно-алмаз синтетичний (АС) М 3	0,08 – 0,10	1,24 – 1,26	1,4 – 1,8
4.	Основа – нейлон. Зерно-карбід кремнію зелений (63С) М1	0,10 – 0,12	1,26 – 1,28	1,5 – 1,7
5.	Основа – нейлон. Зерно-електрокорунд хромчастий (33А) М1	0,09 – 0,11	1,25 – 1,27	1,6 – 1,7
6.	Основа – нейлон. Зерно-електрокорунд титановий (37А) М1	0,12 – 0,14	1,27 – 1,29	1,7 – 1,9
7.	Основа – шифон. Зерно-електрокорунд білий (23А) М1	0,15 – 0,17	1,29 – 1,31	1,8 – 2,0

Примітки: 1. Режими різання при обробці деталей: $V_d = 5$ м/хв., швидкість полірувальної стрічки $V_c = 0,15$ м/хв., швидкість поздовжньо-зворотніх коливань $V_{н.з.} = 0,03$ м/хв., амплітуда коливань $A = 1,0$ мм, питомий тиск $q = 0,10$ МПа.

2. Час оброблення – 1 хв.

Уважно проаналізувавши отримані результати, необхідно зробити деякі важливі для подальших досліджень висновки.

По-перше, в усьому достатньо широкому діапазоні експериментів отримано чіткі дані щодо незаперечних переваг ріжучих алмазних зерен (АС) в алмазозносному шарі полірувальної стрічки, що має у якості основи гнучкий еластичний матеріал – поліетилентерефталат. Параметри шорсткості поверхні R_a у 3 – 5 рази менші, ніж при використанні зерен електрокорунду білого (23А), електрокорунду хромчастого (33А), електрокорунду титанового (37А) чи карбиду кремнію зеленого (63С). Також значно менші ступінь наклепу K (\sim у 1,0 – 1,2 рази) та глибина h його проникнення у поверхневий шар деталі оброблення (\sim у 1,5 – 1,6 рази). Пояснення цьому явищу може бути надано на базі засадничих положень теорії різання матеріалів [10–13, 78, 19, 22, 23]: зерна алмазів мають найгострішу форму ріжучого леза – радіус заокруглення ρ , кут при вершині γ (табл. 3.10). Це покращує умови оброблення (змінюються параметри перерізу стружки a_z , теплові і силові характеристики поля на вершині ріжучої кромки абразивного зерна) і, відповідно, відбувається зменшення шорсткості поверхні оброблення (за параметром R_a), а також ступеню наклепу K та його глибини h .

По-друге, явно відслідковується тенденція покращення усіх параметрів якості поверхні оброблення деталі оздоблювально-викінчувальним поліруванням алмазними стрічками, які мають основу стрічки з поліетилентерефталату, у порівнянні з основами стрічки з нейлону та шифону. Ця залежність притаманна різним стрічкам, ріжучий шар яких виготовлено з використанням широкої гами абразивних мікропорошків (карбід кремнію зелений 63С, електрокорунд білий 23А, електрокорунд хромчастий 33Ф, електрокорунд титановий 37А). Покращення параметрів якості може бути пояснене найбільшою еластичністю поліетилентерефталатної основи. Це обумовлює (внаслідок її пружних властивостей) певне зменшення фактичної глибини різання при зрізанні стружок, як результат деякого занурення ріжучих алмазних зерен в основу під дією складових сил різання (ефект демпфування).

У сукупності з найгострішими зернами алмазу відбувається покращення умов різання матеріалу і, відповідно, параметрів шорсткості та фізико-механічних властивостей поверхні оброблення деталі.

Таблиця 3.10 Середні значення радіусів заокруглення та кутів при вершині зерен різних абразивних матеріалів [111, 112]

Абразивний матеріал	Зернистість, мкм	Радіус заокруглення ρ , мкм	Кут при вершині γ , град.	Межі коливань	
				ρ , мкм	γ , град.
Алмаз природний (А)	1,0	0,15	70,5	0,08–0,10	10–15
Алмаз синтетичний(АС)	0,5	0,20	72,4	0,10–0,12	12–60
Алмаз синтетичний(АС)	1,0	0,6	76,2	0,12–0,15	13–67
Алмаз синтетичний(АС)	3,0	0,9	80,1	0,15–0,17	15–70
Карбід кремнію зелений (63С)	1,0	1,1	84,1	0,2–0,3	20–75
Карбід кремнію зелений (63С)	3,0	1,2	84,5	0,2–0,3	20–75
Електрокорунд білий (23А)	1,0	1,5	87,3	0,5–0,6	25–100
Електрокорунд білий (23А)	3,0	1,7	88,1	0,6–1,5	30–105
Електрокорунд хром-частий (33А)	1,0	1,7	90,2	0,6–1,1	31–112
Електрокорунд хром-частий (33А)	3,0	1,6	91,5	1,1–1,5	35–115
Електрокорунд титановий (37А)	1,0	1,6	92,7	1,2–1,6	37–117
Електрокорунд титановий (37А)	30,	1,8	93,1	1,3–1,7	40–120

Враховуючи отримані дані для подальших експериментальних досліджень використовувались лише алмазні полірувальні стрічки на еластичній поліетилентерефталатній основі.

Важливе значення (для отримання високих параметрів якості при оздоблювально-викінчувальному поліруванні циліндричних поверхонь деталей зі зносостійких композиційних сплавів на основі алюмінію) має застосування для оброблення раціональних режимів різання.

За попередніми дослідями були отримані результати (з використанням теорії ймовірності), що при стрічковому поліруванні найбільше впливають на

шорсткість поверхні та параметри наклепу такі режими різання – швидкість стрічки V_c , швидкість поздовжньо-зворотніх коливань $V_{н.з.}$ та питомого тиску q .

У табл.3.11–3.13 наведені результати досліджень впливу на параметри якості поверхні основних режимів різання при поліруванні новітніх марок зносостійких композитів на основі алюмінію.

Таблиця 3.11 Вплив швидкості алмазної стрічки на параметр шорсткості R_a при обробленні алюмінієвих композитів

Швидкість стрічки V_c , м/хв	Параметр шорсткості R_a , мкм		
	Композит АК12М2МгН	Композит АМ4,5Кд	Композит АК8М3ч
0,05	0,03 – 0,05	0,04 – 0,06	0,05 – 0,06
0,15	0,05 – 0,07	0,05 – 0,06	0,06 – 0,07
0,25	0,07 – 0,08	0,06 – 0,07	0,07 – 0,08

Примітки: 1. Стрічка на поліетилентерефталатній основі з ріжучим зерном синтетичного алмазу (АС) зернистістю 0,5 мкм (М0,5).

2. Режими різання: швидкість деталі $V_d = 0,5$ м/хв., швидкість поздовжньо-зворотніх коливань $V_{н.з.} = 0,01$ м/хв., питомий тиск $P = 0,05$ МПа.

3. Час оброблення – 120 с.

Дані табл. 3.11 дозволяють зробити декілька важливих висновків щодо тенденції до певного оброблення при використанні для виготовлення деталей композиту АК12М2МгН (параметр R_a у порівнянні, наприклад, зі сплавом АМ4,5Кд менший приблизно на 20 – 30% у всьому діапазоні режимів різання). Суттєво впливає на параметр шорсткості R_a швидкість руху алмазної стрічки V_c (шорсткість у всьому діапазоні швидкостей покращується при застосуванні мінімальних швидкостей стрічки V_c у межах 0,25 – 0,30 м/хв.).

Враховуючи ці результати експериментів, подальші дослідження впливу режимних факторів полірування на якість поверхні виконувались на технологічних зразках з найбільш важкооброблюваного композиційного сплаву АК12М2МгН.

Таблиця 3.12 Вплив швидкості поздовжньо-зворотніх коливань $V_{н.з.}$ при поліруванні композитних сплавів на основі алюмінію АК12М2МгН гнучкими алмазними стрічками

Швидкість поздовжньо-зворотніх коливань $V_{н.з.}$, м/хв.	Параметр якості поверхні		
	Шорсткість R_a , мкм	Ступінь наклепу K	Глибина наклепу h , мкм
0,01	0,03 – 0,05	1,22 – 1,24	1,25 – 1,35
0,03	0,04 – 0,06	1,23 – 1,25	1,27 – 1,37
0,05	0,05 – 0,07	1,24 – 1,27	1,30 – 1,38
0,07	0,07 – 0,09	1,25 – 1,29	1,35 – 1,39

Примітки: 1. Стрічка на поліетилентерефталатній основі з ріжучим зерном синтетичного алмазу (АС) зернистістю 1 мкм (М1).

2. Режими різання: швидкість деталі $V_d = 0,5$ м/хв., швидкість стрічки $V_c = 0,25$ м/хв., питомий тиск $P = 0,05$ МПа.

3. Час оброблення – 120 с.

Таблиця 3.13 Вплив питомого тиску q при поліруванні зразків з композитних сплавів на основі алюмінію АК12М2МгН гнучкими алмазними стрічками

Питомий тиск q , МПа	Параметр якості поверхні		
	Шорсткість R_a , мкм	Ступінь наклепу K	Глибина наклепу h , мкм
0,05	0,03 – 0,05	1,22 – 1,24	1,25 – 1,35
0,08	0,05 – 0,07	1,23 – 1,25	1,27 – 1,37
0,10	0,07 – 0,09	1,24 – 1,27	1,30 – 1,38
0,12	0,10 – 0,12	1,30 – 1,35	1,40 – 1,45
0,15	0,12 – 0,15	1,35 – 1,37	1,45 – 1,50

Примітки: 1. Стрічка на поліетилентерефталатній основі з ріжучим зерном синтетичного алмазу (АС) зернистістю 1 мкм (М1).

2. Режими різання: швидкість деталі $V_d = 0,5$ м/хв., швидкість стрічки $V_c = 0,25$ м/хв., швидкість поздовжньо-зворотніх коливань $V_{н.з.} = 0,01$ м/хв.

3. Час оброблення – 120 с.

Аналіз даних табл. 3.11 – 3.13 показує, що режими оздоблювально-викінчувального полірування алмазними стрічками суттєво впливають на всі параметри якості поверхні (R_a , K , h). Найбільший вплив (за ранжируванням) спричиняє питомий тиск q алмазної стрічки на поверхню деталі оброблення, потім – швидкість поздовжньо-зворотніх коливань $V_{н.з.}$ деталі оброблення і швидкість руху V_c полірувальної стрічки з дрібнозернистим алмазним ріжучим шаром. Ця закономірність відслідковується у достатньо широкому діапазоні режимів різання (наприклад, діапазон питомих тисків q змінюється у 3 рази, а швидкість поздовжньо-зворотніх коливань – у 7 разів). Пояснення отриманим даним може бути надано згідно засадничих основ теорії абразивного оброблення матеріалів. Зі зменшенням режимів різання відзначається зміна величини перерізу стружки a_z , що зрізується з поверхні матеріалу, а це, в свою чергу, обумовлює суттєвий перерозподіл складових сил різання і миттєвих контактних температур безпосередньо у зоні зрізання мікростружки алмазним зерном, створюючи відповідне покращення параметрів якості поверхні оброблення (параметру шорсткості R_a , ступеню наклепу K та глибини його проникнення у тіло деталі).

3.4 Поверхні зносостійких композитних деталей тертя поліграфічних машин при прецизійній доводці

У сучасних поліграфічних машинах для забезпечення безперервно зростаючих вимог до підвищення їх споживчих характеристик (якості, надійності, довговічності, зносостійкості) при виготовленні пар тертя вузлів та механізмів широкого розповсюдження набули новітні висок леговані композиційні матеріали. Здебільше, вони застосовуються для деталей, які працюють в умовах жорстких умов експлуатації (контактні температури – $170\div 900^{\circ}\text{C}$, питомі тиски – $2\div 5$ МПа) [121 - 125].

Особливістю усіх цих композитів (незалежно від того, на якій базі вони синтезовані – з інструментальних штампованих, швидкорізальних сталей чи з алюмінію) є те, що для їх виготовлення були використані цінні шліфувальні шламіві відходи основного виробництва, які містять у своєму складі високо дефіцитні матеріали (вольфрам, ванадій, молібден, іридій, титан, нікель, марганець, мідь, алюміній та ін.) і які, на жаль, до сьогодні викидались у відвали. Використання названих сировинних ресурсів дозволило створити гаму нових композитних сплавів, виконати їх всебічне дослідження і домогтись впровадження у промислове виробництво [125 - 127].

Відомо [123], що показники довговічності та зносостійкості деталей з композитних матеріалів суттєво залежать від параметрів якості оброблених поверхонь деталей тертя і, і першу чергу, від параметрів шорсткості R_a , ступеню наклепу K та глибини h його проникнення у тіло деталі.

Вимоги до параметрів якості поверхонь оброблення невпинно зростають. Вже на сучасному етапі створення поліграфічних машин необхідно виконувати такі умови: забезпечити шорсткість плоских поверхонь деталей у межах $R_a = 0,050 - 0,070$ мкм, відхилення від площинності $\sim 0,5-1$ мкм на довжині 35–50 мм, ступінь наклепу K не більше 1,5–2,0, глибину наклепу h до 1,0–1,2 мкм.

Ці високі вимоги виконати методами тонкого алмазно-абразивного шліфування неможливо.

До останнього часу доводки плоских поверхонь композитних деталей виконувались вручну висококваліфікованими робітниками. Це не завжди забезпечувало високу якість виконаних робіт, результати яких у значному ступені залежали від суб'єктивних характеристик (уміння і кваліфікації робітника, його фізичний стан та інше).

Комплексні обґрунтовані рекомендації по машинній доводці високолегованих, важкооброблюваних та високо зносостійких композитних деталей тертя до сьогодні практично відсутні. Є лише перші спроби у напрямку вирішення цієї технологічної задачі [123, 124]. Тому у виробництві набрали поширення різні технології, які здебільше забезпечують виконання задач лише даного виробництва і нерідко були непридатні для застосування на інших підприємствах навіть однієї галузі промисловості.

Вказані обставини зумовили необхідність детального вивчення технологічних процесів прецизійної машинної доводки деталей з новітніх марок композиційних сплавів для поліграфічної техніки.

Виконання дослідів у цьому напрямку є актуальною задачею, позитивне вирішення якої має як наукове, так і незаперечне практичне значення.

Метою даної монографії є всебічне дослідження параметрів якості поверхонь та встановлення науково-обґрунтованих режимів прецизійної машинної доводки плоских поверхонь деталей тертя машинних комплексів, що виготовлені з нових композиційних сплавів, синтезованих на основі утилізованих та регенерованих шліфувальних відходів інструментальних сталей 11РЗАМЗФ, 4ХМНФС, 7ХГ2ВМФ та силумінів АМ4,5Кд, АК12М2МгН та АК8МЗг [114]. Ці режими різання повинні забезпечити відповідні параметри якості доведених поверхонь та створити умови для зростання та досягнення необхідного рівня експлуатаційних властивостей вузлів тертя машинних комплексів, зокрема, високо обертового друкарського обладнання.

Матеріали та результати досліджень. Методику вивчення фізичних властивостей поверхневого шару зразків наведено у роботах [125, 127].

Для технологічних досліджень використовувались зразки з нових марок композитів двох типів: на основі високолегованих штампованих та інструментальних сталей 11РЗАМЗФ, 4ХМНФС, 7ХГ2ВМФ і на основі алюмінію АК12М2МгН, АК8МЗГ, АМ4,5Кд.

Результати досліджень процесів тонкої прецизійної доводки плоских поверхонь деталей пар тертя, виготовлених з новітніх композиційних сплавів, наведені нижче.

У таблиці 3.14 надані деякі основні дані по експериментальному дослідженню ручної доводки дрібнозернистими брусками карбіду кремнію зеленого на керамічній зв'язці 63СМ14Т1К та природними брусками, що найчастіше застосовуються при ручній прецизійній доводці на вітчизняних заводах і на відомих підприємствах закордонних фірм, а саме брусками «Індій» (США, родовище у штаті Індіана), «Арканзас» (США, родовище мікролітів у штаті Арканзас), мікрокварцитами Білорецького родовища (Росія, с.м.т. Коливань, Алтайський край), Чугунашського родовища (Росія, с.м.т. Ліствянка, Байкал), Едіганського родовища (Казахстан, с.м.т. Урумча, Тянь-Шань) та Атасу (Україна, с.м.т. Дюрош, Карпати).

Таблиця 3.14 Параметри шорсткості поверхні R_a та ступеня наклепу K при прецизійній ручній доводці деталей тертя з композитів на основі інструментальних сталей та алюмінію

Абразивний інструмент	Тип композиту							
	11РЗАМЗФ		4ХМНФС		7ХГ2ВМФ		АК8МЗГ	
	R_a , мкм	K	R_a , мкм	K	R_a , мкм	K	R_a , мкм	K
63СМ14Т1К	0,04	1,99	0,04	1,92	0,05	1,90	0,07	1,95
Брусок «Індій»	0,03	1,85	0,03	1,83	0,04	1,80	0,06	1,82
Брусок «Арканзас»	0,03	1,80	0,03	1,77	0,04	1,75	0,06	1,76
Брусок «Білорецький»	0,025	1,70	0,025	1,69	0,035	1,65	0,05	1,68
Брусок «Чугунаш»	0,025	1,65	0,025	1,63	0,035	1,60	0,045	1,65
Брусок «Едіган»	0,02	1,60	0,02	1,55	0,025	1,50	0,03	1,53
Брусок «Атасу»	0,02	1,58	0,02	1,50	0,025	1,48	0,03	1,51

Аналіз табл. 3.14 показує, що в усіх випадках якості поверхні деталей оброблення вища при ручній доводці на природних брусках, ніж на штучно створених інструментах з карбіду кремнію зеленого (63СМ14Т1К). Це стосується як показників шорсткості R_a , так, і ступеню наклепу K . Пояснення

цьому полягає у більшій однорідності структури природних абразивних брусків.

Доцільно зазначити, що всі природні абразивні бруски мають високу зернову однорідність (у межах 5–10 мкм), а спектральний та петрографічний аналізи, виконані авторами статті, свідчать про 100%-ву відсутність у їх складі вкраплень сторонніх кристалічних речовин, тобто про загальну однорідність і унікальність природних абразивних інструментів. Детальні характеристики їх та потенціальні можливості детально висвітлені у робота [127 - 130].

Для прецизійної машинної доводки використовувався верстат С–15, у якому шпиндель розташовано ексцентрично осі обертання доводочного диску. На коромислі-водителі шпинделя у його двох центрах встановлювались пристрої типу центрових накладок, у гніздах котрих встановлювались композитні деталі оброблення так, щоб площинна обробка торкалась плоскої поверхні доводочного диску [131]. При обертанні шпинделя з водилом-коромислом (завдяки ексцентриситету) деталі оброблення набувають додаткового обертання відносно своїх центрів, а з урахуванням обертання доводочного диску траєкторія доводки нагадує регулярну архімедову спіраль.

Шпиндель верстату С–15 має плинно рухатись у вертикальному напрямку.

Експерименти (з урахуванням рекомендацій роботи [116]) виконувались зі швидкістю різання $V_p = 7 - 10$ м/хв. При питомому тиску $p = 0,05 - 0,07$ МПа. Матеріалом спеціально підготовленого для доводки диску були: глобулярний чавун, мідь, олово, скло марки «Пірекс».

Абразивна суспензія готувалась з мікропорошків карбіду кремнію зеленого (63С), електрокорунду білого (23А), електрокорунду білого хром частого зі вмістом у складі абразиву оксиду хрому CrO до 2% (33А) та субмікронної пасти «діамантін» [116].

Зернистість мікропорошків складала 1; 3; 5; 10 мкм. Мікропорошки щільно змішувались у мастильно-охолоджуючій рідині зі складом: гас (65%), олеїнова кислота (35%). Утворена суміш подавалась у робочу зону доводки.

Параметри шорсткості поверхні оброблення R_a , неплоскостності H , ступеню наклепу K та глибини h його проникнення у тіло деталі для різних за своїм складом композитів наведені у таблиці 3.15.

Таблиця 3.15 Параметр шорсткості R_a , неплоскостність H , ступень наклепу K та його глибина h при машинній доводці високолегованих композитних сплавів на основі штампованих та інструментальних сталей

Метод машинної доводки	Композити на основі сталей							
	11P3AM3Ф				7ХГ2ВМФ			
	R_a , мкм	H , мкм	K	H , мкм	R_a , мкм	H , мкм	K	H , мкм
Чавунний диск Мікропорошок 63СМ10	0,12	1,9–2,0	2,1–2,5	2,5	0,13	2,1–2,3	2,0–2,2	2,3
Мідний диск Мікропорошок 63СМ14	0,13	2,0–2,5	2,2–2,6	2,3	0,14	2,5–2,6	2,1–2,2	2,3
Чавунний диск Мікропорошок 23АМ7	0,085	1,7–1,8	1,45	2,1	0,09	1,8–1,9	1,43	2,2
Мідний диск Мікропорошок 23АМ7	0,080	1,6–1,7	1,35	2,0	0,085	1,7–1,8	1,40	2,1
Чавунний диск Мікропорошок 23АМ3	0,075	1,5–1,6	1,40	1,9	0,080	1,6–1,7	1,45	2,0
Мідний диск Мікропорошок 23АМ3	0,065	1,4–1,5	1,30	1,8	0,070	1,3–1,4	1,65	1,9
Чавунний диск Мікропорошок 33АМ7	0,045	1,3–1,4	1,30	1,6	0,050	1,2–1,3	1,65	1,5
Мідний диск Мікропорошок 33АМ3	0,040	1,2–1,3	1,25	1,5	0,040	1,15–1,2	1,40	1,3
Олов'яний диск Паста «діамантін» 3мкм	0,035	1,1–1,2	1,22	1,4	0,035	1,1–1,2	1,30	1,2
Комбінована доводка (послідовно): а) чавунний диск мікропорошок 33АМ3 б) олов'яний диск Паста «діамантін»	0,030	0,50	1,1–1,2	1,10	0,037	0,065	1,13	1,25
Комбінована доводка (послідовно): а) чавунний диск мікропорошок 33АМ3 б) Скло «Пірекс» Паста «діамантін»	0,025	0,40	1,05	1,00	0,035	0,060	1,08	1,05

Примітка: 1 – швидкість різання $V_p = 7$ м/хв.; 2 – питомий тиск $p = 0,05$ МПа.

Таблиця 3.16 Параметр шорсткості R_a , неплосчинність H , ступень наклепу K та його глибина h при машинній доводці високозносостійких композитних сплавів на основі алюмінію

Метод машинної доводки	Композити на основі алюмінію							
	AK12M2MgH				AM4,5Kд			
	R_a , мкм	H , мкм	K	h , мкм	R_a , мкм	H , мкм	K	h , мкм
Чавунний диск Мікропорошок 23AM3	0,072	1,4–1,5	1,35	1,8	0,063	1,2–1,3	1,37	1,7
Мідний диск Мікропорошок 23AM3	0,060	0,6–0,7	1,30	1,75	0,055	0,7–0,75	1,35	1,55
Чавунний диск Мікропорошок 33AM3	0,037	1,2–1,3	1,23	1,7	0,033	0,75–0,9	1,21	1,5
Мідний диск Мікропорошок 33AM3	0,033	0,9–1,1	1,17	1,6	0,030	0,75–0,8	1,15	1,4
Олов'яний диск Паста «діамантін» М3	0,030	0,5–0,7	1,15	1,3	0,025	0,65–0,7	1,13	1,3
Комбінована доводка (послідовно): а) чавунний диск мікропорошок 33AM3 б) олов'яний диск мікропорошок 33AM1 в) олов'яний диск Паста «діамантін» М1	0,025	0,4–0,5	1,07	1,2	0,023	0,60	1,12	1,2
Комбінована доводка (послідовно): а) чавунний диск мікропорошок 33AM3 б) Скло «Пірекс» Паста «діамантін» М1	0,020	0,3–0,4	1,05	0,9	0,020	0,55	1,07	1,0

Примітка: 1 – швидкість різання $V_p = 7$ м/хв.; 2 – питомий тиск $p = 0,05$ МПа.

Аналіз даних, наведених у табл. 3.15, 3.16 показує, що найкращі результати (по всім показникам якості поверхонь) отримані при обробці на чавунних дисках і комбінованій машинній доводці з застосуванням послідовно чавунних дисків та дисків зі скла «Пірекс». При цьому машинна прецизійна доводка плоских поверхонь композитних деталей тертя здійснюється з використанням мікропорошків електрокорунду хром частого зернистістю 3 мкм (33AM3) та пасти «діамантін» М1. Це може бути пояснено з допомогою базових положень загальної теорії абразивної обробки матеріалів. Дійсно, доводка на чавунних дисках (завдяки наявності глобулярних вкраплень вуглецю на поверхні доводочного диску) веде до стабілізації перерізу a_z стружки, яка зрізується з поверхні оброблення деталі, а це, в свою чергу,

обумовлює рівномірність процесу, на певному рівні забезпечує стабільність дії складових сил різання і температурного поля безпосередньо на ріжучому лезі абразивного зерна. У сукупності створюються умови для забезпечення вимог якості поверхонь оброблення.

Доцільно звернути увагу на те, що доводка використання мікропорошків з карбіду кремнію зеленого 63С (табл. 3.15) веде до отримання найгірших показників якості. Мабуть, пояснити це можливо, якщо прийняти до уваги ту обставину, що (незважаючи на найгостріші параметри зерен карбіду кремнію зеленого у порівнянні з іншими абразивами – мінімальний радіус заокруглення радіусу при вершині зерна та мінімальний кут загострення) зерна карбіду кремнію зеленого мають пластинчасту форму. Отже, частина абразивних зерен не приймає участі у процесі зрізання стружки, а лише ковзає по плоскій поверхні доводочного диску. Таким чином, для машинної доводки композитних деталей тертя рекомендувати вживання мікропорошків карбіду кремнію зеленого 63С не має технічного сенсу.

Також експериментальні дані табл. 3.15, 3.16 також показують, що зменшення зернистості ріжучих мікропорошків обумовлює покращення всіх показників параметрів якості обробки, що повністю співпадає з засадничими положеннями теорії абразивного оброблення [115, 117–128].

Деякі основні результати досліджень наведені у таблиці 3.17

Таблиця 3.17 Вплив швидкостей різання V_p на параметри шорсткості R_a , ступеню наклепу K та його глибини h при машинній доводці деталей з високозносостійких композитних сплавів

Швидкість різання V_p , м/хв	Тип композиційного сплаву											
	11РЗАМЗФ			7ХГ2ВМФ			АК12ММГН			АМ4,5Кд		
	R_a , мкм	K	h , мкм	R_a , мкм	K	h , мкм	R_a , мкм	K	h , мкм	R_a , мкм	K	h , мкм
2	0,035	1,18	1,22	0,039	1,23	1,30	0,029	1,22	1,20	0,025	1,16	1,3
5	0,040	1,20	1,25	0,041	1,25	1,35	0,032	1,25	1,25	0,030	1,19	1,4
7	0,043	1,26	1,32	0,045	1,28	1,40	0,037	1,28	1,30	0,033	1,21	1,5
10	0,045	1,27	1,35	0,047	1,30	1,45	0,040	1,30	1,35	0,038	1,25	1,7

Примітка: 1 – питомий тиск $p = 0,05$ МПа; 2 – склад мастильно-охолоджуючої рідини – гас (~ 65%), олеїнова кислота (~ 35%); 3 – матеріал доводочного диску – чавун; 4 – абразивний мікропорошок – 33АМЗ.

З практичної точки зору, для проектування технологічних процесів прецизійної машинної доводки суттєве значення має знання закономірностей впливу на параметри якості режимів різання.

Таблиця 3.18 Вплив питомого тиску q на параметри шорсткості R_a , ступеня наклепу K та його глибини h при машинній доводці деталей з високозносостійких композитних сплавів

Питомий тиск q , МПа	Тип композиційного сплаву											
	11РЗАМЗФ			7ХГ2ВМФ			АК12ММГН			АМ4,5Кд		
	R_a , мкм	K	h , мкм	R_a , мкм	K	h , мкм	R_a , мкм	K	h , мкм	R_a , мкм	K	h , мкм
0,05	0,043	1,26	1,32	0,045	1,28	1,40	0,037	1,28	1,30	0,033	1,21	1,5
0,06	0,050	1,30	1,35	0,055	1,35	1,45	0,040	1,30	1,35	0,038	1,25	1,55
0,07	0,055	1,40	1,50	0,060	1,45	1,5	0,045	1,35	1,40	0,040	1,30	1,65

Примітка: 1 – швидкість різання $V_p = 7$ м/хв.; 2 – склад мастильно-охолоджуючої рідини – гас (~ 65%), олеїнова кислота (~ 35%); 3 – матеріал доводочного диску – чавун; 4 – абразивний мікропорошок – 33АМЗ.

Аналіз експериментальних даних табл. 3.17, 3.18 показує, що має місце тенденція до покращення шорсткості поверхні (по параметру R_a), зменшення ступеню наклепу K та глибини його проникнення h у тіло деталі з застосуванням для прецизійної машинної доводки мінімальних значень швидкості різання ($V_p = 5-7$ м/хв.) та питомого тиску $q = 0,05-0,07$ МПа). Ця закономірність прослідковується для всієї гами досліджених композитів і є засадничою, як для сплавів на основі високолегованих штампованих і інструментальних сталей, так і для високозносостійких та важкооброблюваних композитів на основі алюмінію. Таке співпадіння – не випадкове: воно свідчить про єдність закономірностей при здійсненні надтонких операцій зрізання стружки при прецизійній доводці. Пояснення цьому може бути надане, якщо звернутись до основних теорій різання металів при абразивній обробці [128, 130].

Згідно з ними у процесі прецизійної машинної доводки зрізуються надтонкі стружки з мінімально можливим їх перерізом a_z . Зменшення швидкості різання V_p та питомого тиску доводки q веде до мінімізації перерізу a_z , обумовлюючи перерозподіл складових сил різання на лезі абразивного зерна і значень миттєвих контактних температур безпосередньо у зоні оброблення. Це, в свою чергу, змінює умови різання абразивного зерна у процесі машинної

доводки, створюючи найкращі умови для формування необхідних параметрів якості поверхонь оброблення, зокрема веде до покращення параметрів шорсткості R_a , зменшення ступеня наклепу K та глибини h його проникнення у тіло деталі.

Дані табл. 3.17, 3.18 також показують, що параметри якості поверхні, яка обробляється прецизійною машинною доводкою, дещо кращі при обробці композитів на основі алюмінію. Найімовірніше, це пояснюється більш легкою їх оброблюваністю у порівнянні з композитами на основі штампованих та інструментальних сталей, які містять у своєму складі лігатуру з вольфраму, ванадію, молібдену, нікелю, іридію та марганцю, що робить ці матеріали важкооброблюваними [127–129].

Одночасно необхідно зазначити, що дослідженні режими різання при машинній доводці повністю забезпечують виконання надвисоких вимог якості до поверхонь оброблення зносостійких деталей тертя з нових композиційних сплавів для вузлів і механізмів машинних комплексів різного призначення.

Слід також звернути увагу на те, що запропоновані методи доводки змінюють вихідні властивості новітніх марок синтезованих композитів [129–131] лише на незначну величину, що (в залежності від складу композиційного сплаву) лежить у межах 1,20–1,50 мкм. На сьогодні досягти кращих результатів з допомогою інших методів оброблення – неможливо [132 - 135].

Висновки до 3 розділу

Узагальнюючи комплекс виконаних досліджень, представлений у 3 розділі монографії, необхідно зробити важливі як наукові, так і практичні висновки.

1. Доведено, що на параметри якості поверхні оброблення істотно впливають параметри абразивних брусків (зернистість, матеріал зерна, тип зв'язки) та режими суперфінішування.
2. Найкращі показники за показниками мікротвердості поверхні, рівню залишкових напружень та глибини їх проникнення у поверхневий шар деталей з високолегованих композитів, забезпечують абразивні бруски з карбіду

кремнію зеленого зернистістю 7–14 мкм на еластичних гліфталевих зв'язках (63СМ7СМ2Гл, 63СМ14СМ2Гл) та тонкі режими різання.

3. Найкращі показники параметрів шорсткості R_a , мікротвердості H , параметрів спотворень поверхневого шару ($\Delta a/a$, D , ρ) та глибини їх проникнення у тіло деталі оброблення забезпечує прецизійна машинна доводка плоских поверхонь з застосуванням чавунних дисків-притирів, використанням дрібнозернистих (1 – 14 мкм) мікропорошків синтетичного алмазу (АС), ельбору (ЛО) та електрокорунду хромчастого (ЗЗА) з вмістом у його складі до 2 % оксиду хрому CrO_3 та наступними режимами обробки: швидкість різання $V_p = 20 - 25$ м/хв., питомий тиск $q = 0,1 - 0,5$ МПа, мастильно-охолоджуюча рідина – суміш зі складом: гас (70 %) + індустриальне мастило U16.

4. Вперше в науковій практиці виконане багатопланове вивчення технологічного процесу викінчувально-оздоблювального полірування дрібнозернистими алмазними стрічками нових марок високотносостійких композитів на основі алюмінію АК12М2МгН, АМ4,5Кд, АК8М3ч та АК12ММгН + (9 – 12)% MoS_2 для різних машинних комплексів.

5. Доведено, що мінімальні значення параметрів якості поверхонь оброблення забезпечує використання для полірування гнучких еластичних стрічок з поліетилентерефталатною основою та робочим ріжучим шаром з синтетичних алмазів (АС) зернистістю 0,5 – 1 мкм (М0,5 – М1) при 100%-й концентрації алмазів.

6. Показано, що режими різання суттєво впливають на параметри якості поверхонь деталей, які обробляються поліруванням дрібнозернистими алмазними стрічками. Найбільший вплив на параметри шорсткості R_a , ступінь наклепу K та його глибину h здійснює питомий тиск q стрічки, швидкість поздовжньо-зворотніх коливань $V_{н.з.}$ та швидкість руху V_c алмазної стрічки. Отримані результати повністю відповідають основам теорії абразивного оброблення, що підкреслює єдність фізичних законів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Вперше в науковій практиці виконано дослідження комплексу питань щодо вивчення закономірностей технологічних процесів тонкого абразивного шліфування нових високолегованих, зносостійких та важкооброблюваних композитних сплавів для деталей тертя поліграфічної техніки.
2. Проведені теоретичні та всебічні експериментальні дослідження впливу основних технологічних факторів процесу тонкого абразивного шліфування широкої гами композиційних матеріалів (режимів різання, типу та зернистості абразивного інструменту, матеріалу зв'язки, складу і методів подачі у робочу зону різання мастильно-охолоджуючих рідин) на параметри якості поверхонь оброблення – шорсткості R_a , глибини та ступеню наклепу, знаку і рівня залишкових напружень поверхневого шару деталі, що обробляється методами абразивного шліфування.
3. Створені теоретичні моделі утворення залишкових напружень у тонких поверхневих шарах оброблення з врахуванням динамічного удару абразивних зерен на мікрооб'єм металу, що зрізається у вигляді мікростружки, та динаміки виникнення теплових джерел у зоні різання композитів, які дозволяють прогнозувати параметри якості поверхонь обробки деталі та оптимізувати об'єм складних експериментальних досліджень.
4. Виконано теоретико-експериментальне дослідження технологічного процесу тонкого алмазного шліфування високолегованих і важкооброблюваних композиційних сплавів з застосуванням найновіших шліфувальних інструментів з синтетичних алмазів, створених Інститутом надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля Національної академії наук України.
5. Встановлені основні закономірності впливу технологічних факторів тонкого алмазного шліфування (режими різання, тип алмазного зерна, його зернистість, характеристика зв'язки інструменту, концентрація алмазу у шліфувальному крузі, склад та спосіб подачі мастильно-охолоджуючої рідини, точність технологічних пристроїв та верстатного обладнання) на параметри якості оброблюваних поверхонь деталей з нових композитів – шорсткості,

глибини та ступеню наклепу, величини і знаку залишкових напружень поверхневого шару.

6. Вперше в науковій практиці виконане багатопланове вивчення технологічного процесу викінчувально-оздоблювального полірування дрібнозернистими алмазними стрічками нових марок високозносостійких композитів на основі алюмінію АК12М2МгН, АМ4,5Кд, АК8МЗч та АК12ММгН + (9 – 12)%MoS₂ для різних машинних комплексів.

7. Доведено, що мінімальні значення параметрів якості поверхонь оброблення забезпечує використання для полірування гнучких еластичних стрічок з поліетилентерефталатною основою та робочим ріжучим шаром з синтетичних алмазів (АС) зернистістю 0,5 – 1мкм (М0,5 – М1) при 100%-й концентрації алмазів.

8. Показано, що режими різання суттєво впливають на параметри якості поверхонь деталей, які обробляються поліруванням дрібнозернистими алмазними стрічками. Найбільший вплив на параметри шорсткості R_a , ступінь наклепу K та його глибину h здійснює питомий тиск q стрічки, швидкість поздовжньо-зворотніх коливань $V_{н.з.}$ та швидкість руху V_c алмазної стрічки. Отримані результати повністю відповідають основам теорії абразивного оброблення, що підкреслює єдність фізичних законів.

9. Отримані наукові висновки дослідження процесів тонкого алмазного шліфування нових типів зносостійких композитів впроваджені у виробництво як у вигляді уніфікованих (типових, групових) технологічних процесів, так і як нормативи, зокрема, стандарти підприємств. Вони пройшли всебічну неодноразову перевірку, експертний пошук на патентну чистоту ретроспективою 40 років за 30 індустріально розвинутими державами світу і захищені патентами України.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Композиційні підшипникові матеріали для підвищених умов експлуатації [Текст]: Монографія / Т. А. Роїк, П. О. Киричок, А. П. Гавриш.- К.: НТУУ „КПІ”, 2007.- 404 с.
2. Актуальные проблемы порошковой металлургии [Текст] / Под ред. Романа О.В., Аруначалама В.С. - М.: Металлургия, 1990. - 232 с.
3. Прогрессивные технологические процессы штамповки деталей из порошка [Текст] / Г. М. Волкогон, А. М. Дмитриев, Е. П. Добряков [и др.] / Под общ. ред. Дмитриева А.М., Овчинников А.Г. – М.: Машиностроение, 1991. – 320 с.
4. Андриевский Р.А. Порошковое материаловедение [Текст] / Р. А. Андриевский. – М.: Металлургия, 1991. – 205 с.
5. Смитлз К.Дж. Металлы [Текст]: Справочник / К.Дж.Смитлз // Пер. с англ. под. ред. С.Г. Глазунова. - М.: Металлургия, 1980. – 447 с.
6. Роик Т.А. Материалы для высокотемпературных узлов трения [Текст] / Т. А. Роик / Вестник НТУУ “КПИ”. Машиностроение”. – Киев. – 1998. - Вып. 33. - С. 200-208.
7. Роик Т. А. Перспективные материалы для высокотемпературных узлов трения [Текст] / Т. А. Роик // Сб. трудов III Международной конф. “Современные технологии машиностроения, качество, реструктуризация”. - Кишинев. – 1999. – С. 18 - 21.
8. Roik T. A. New powder antifrictional compositions for a work at increased temperatures [Text] / T. A. Roik // Proceedings of IV International Conference “Modern technologies, quantity, reconstruction C.T.K.P.2000”. - Iași (România). - 2000. – P. 49-52.
9. Роїк Т. А. Особливості формування структури і властивостей високотемпературних композиційних матеріалів на основі нікелю // Роїк Т. А., Ю. Ю. Віцюк / Зб. II Міжнарод. Конф. Студентів та аспірантів «До високих технологій на основі новітніх фізико-матеріалознавчих досліджень». – К., 11 – 13 грудня 2007 р. – С. 51 – 53.

10. Гаркунов Д. Н. Триботехника // Д. Н.Гаркунов. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.
11. Аналіз триботехнічних властивостей матеріалів і стан тертьових поверхонь // Роїк Т.А., Гавриш А.П., Віцюк Ю.Ю., Мельник О.О., Холявко В.В. Междунар. сб.науч.трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения». – Донецк: ДонНТУ, 2009. – Вып.37 . – С.199-206.
12. Гавриш О. А. Рентгенографічне дослідження параметрів наклепу при тонкому шліфуванні підшипників ковзання з антифрикційних матеріалів // О. А. Гавриш, Т. А. Роик, А. П. Гавриш. - Вісник двигунобудування. – Запоріжжя, 2004. - № 3. – С. 59 – 63.
13. Гавриш А. П., П. О. Киричок, Роїк Т. А., Віцюк Ю. Ю., Олійник В. Г. Шліфування і доводка зносостійких антифрикційних композитних деталей друкарських машин: Монографія.-ч. 2.- К.: Видавничий дім „АртЕк”, 2019.-132 с., ISBN 978-617-7674-76-3.
14. Гавриш О. А. Образование наклепа при машинной доводке деталей из магнитомягких сплавов / О. А. Гавриш, Т. А. Роик, А. П. Гавриш // Сб. трудов IV промышленной конференции «Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях». – Славское, 2004. – С. 7 – 9.
15. Роїк Т. А. Забезпечення якості поверхонь деталей з композиційних антифрикційних сплавів тонким шліфуванням // Т. А. Роїк, А. П. Гавриш / Матеріали IV Міжнародної наук.-практ. конф. «Качество, стандартизация, контроль: теория и практика», 28 – 30 сент. 2004, Ялта. – К.: АТМ Україна. – С. 149 – 150.
16. Пат. України 47544, МПК C22C9/00, C22C9/06, B22F7/08. Антифрикційний композиційний матеріал та спосіб його одержання / С. Д. Ігнатенко. – Опуб. 15.07.2002, Бюл. № 6.
17. Волкогон Г. М. Прогрессивные технологические процессы штамповки деталей из порошка / Г. М. Волкогон, А. М. Дмитриев, Е. П. Добряков. – М.: Машиностроение, 1991. – 320 с.

18. Гавриш А.П., Роїк Т.А., Віцюк Ю.Ю. Принципи оптимізації складу підшипникових матеріалів на основі нікелю // Матеріали 8-й ежегодн.международ.Промышленной конф. «Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях», февраль 2008 г., п. Славское.- С.115-118.

19. Гавриш А. П. Алмазно-абразивна обробка магнітних матеріалів / А. П. Гавриш, П. П. Мельничук. – Житомир: ЖДТУ, 2003. – 652 с.

20. Roik T. New powder antifrictional compositions for a work at increased temperatures // Proceedings of IV International Conference «Modern technologies, quantity, reconstruction» С. Т. К. Р., 2000. – Iasi (Romania), 2000. – P. 49 – 52.

21. Vitsuk Yu. Composite bearing materials on the basis of nickel for high temperatures operation / Annual students conference «Innovations in Science and Technology». – Kyiv, 25 March, 2008. – P. 22.

22. Гонтарь А. Г. Інструментальний світ // А. Г. Гонтарь, В. Н. Ткач, Е. С. Кузьменко. – 2001. - № 12. – С. 16 – 18.

23. Роїк Т. А. Вплив легуючих елементів на структуроутворення та властивості антифрикційних матеріалів з силумінових відходів // Т. А. Роїк / Международ. Сб. научных трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения». – Донецк: ДонГТУ, 2003. – Вып. 26. – С. 44 – 51.

24. Проволоцкий А. Е. Новые порошковые антифрикционные композиты на основе отходов силумина / А. Е. Проволоцкий, Т. А. Роик / Вісті Акад. Інж. Наук України «Машинобудування». – 2002. - № 4 (47). – С. 13 – 18.

25. ДСТУ 2839 – 94 (ГОСТ 1583-93) Сплави алюмінієві ливарні. Технічні умови. – К.: Держстандарт України, 1995. – 49 с.

26. Роїк Т. А. Підшипникові матеріали для поліграфічної техніки / Т. А. Роїк // Технологія і техніка друкарства: Зб. наук. праць. – К.: НТУУ «КПІ». – 2004. Вип. 4. – С. 123 -128.

27. Полянский Н. Н. Основы полиграфического производства / Н. Н. Полянский. - 2-е изд. – М.: Книга, 1991. – 350 с.

28. Алексюк М. М. Механические испытания материалов при высоких температурах / М. М. Алексюк, В. А. Борисенко, В. П. Кращенко. – К.: Наукова думка, 1980. – 208 с.
29. Клименко С. А. Фактральна параметризація структури матеріалів, їх оброблюваність різанням та зносостійкість різального інструменту / С. А. Клименко. – К.: ІНМ НАНУ, 2009. – 168 с.
30. Колесов И. М. Основы технологии машиностроения: Учебник / И. М. Колесов. – 2 –е изд., испр. – М.: Высшая школа, 1999. – 559 с.
31. Якубов Ф. Я. Структурно-энергетические аспекты упрочнения и повышения стойкости режущего инструмента / Ф. Я Якубов. – Симферополь: Крымиздат, 2005. – 300 с.
32. Схиртладзе А. Г. Технологическое оборудование машиностроительных производств / А. Г. Схиртладзе, В. Ю. Новиков, Ю. И. Тулаев. – М.: МГТУ «Станкин», 1997. – Ч. 1. – 311 с.
33. Схиртладзе А. Г. Станочное оборудование машиностроительного производства / А. Г. Схиртладзе, В. Ю. Новиков, А. И. Тананин. – Ижевск: Изд. УдГТУ, 1994. – 300 с.
34. Струтинський В. Б. Технологія моделювання динамічних процесів та систем / В. Б. Струтинський, Н. Р. Веселовська. – Вінниця: НТУУ «КПІ», 2007. – 466 с.
35. Струтинський В. Б. Математичне моделювання процесів та систем механіки / В. Б. Струтинський. - Житомир: ЖУТІ, 2001. – 616 с.
36. Гавриш А. П. Новітні технології фінішного оброблення композиційних підшипників ковзання для жорстких умов експлуатації : монографія / А. П. Гавриш, О. О. Мельник, Т. А. Роїк, М. Г. Аскеров, О. А. Гавриш. – К. : НТУУ «КПІ», 2012. – 196 с.
37. Мазур М. П. Основы теории резания материалов: Підручник / Під заг.ред. М. П. Мазура. – Львів: Новий світ, 2010. – 423 с.

38. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: Монография в 6 т. / Под общ. ред. Н. В. Новикова. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАНУ, 2007. Т. 6. – Алмазно-абразивный инструмент в технологиях обработки. – 340 с.
39. Лавриненко. Надтверді абразивні матеріали в механообробі: Енциклопедичний довідник / Під заг. ред. ак. НАН України М. В. Новікова. – К.: ІНМ ім. В. М. Бакуля НАН України, 2013. – 456 с.
40. Патент України № 77356, МПК (2013.01) G11B5/127 Спосіб фінішної прецизійної оздоблювальної обробки отворів деталей обертання з високолегованих композитів/ Гавриш А.П., Роїк Т.А., Мельник О.О., Віцюк Ю.Ю., Гавриш О.А.–опубл. 11.02.2013, Бюл. № 3.
41. Якимов А. В. Технология машиностроение : учебник / А. В.Якимов, В. Н. Царюк, А. А, Якимов, Г. А. Оборский, В. Л. Ларшин, А. В. Самойленко. – Одесса : Изд-во Астропринт, 2001. – 602 с.
42. Гавриш А. П. Прецизійна машинна доводка плоских поверхонь деталей терт з композитів на основі алюмінію для технологічних комплексів / А. П. Гавриш, Т. А. Роїк, І. Є. Дорфман // Вісник КНУТД, № 2. – К.: КНУТД, 2014. – 37 – 47 с.
43. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием: справочник / под общ. ред. С. Г. Энгельса, Э. М. Берлинера. – 2-е изд., переработ. и дополн. – М. : Машиностроение, 1995. – 496 с.
44. Майборода В. С. Основи створення і використання порошкового магнітно-абразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь / дис. на здоб. ступеня д.т.н. – К.: НТУУ «КПІ», 2001. – 401 с.
45. Оликер В. Е. Порошки для магнитно-абразивной обработки износостойких покрытий / В. Е. Оликер. – М. : Металлургия, 1990. – 176 с.
46. Гавриш А. П. Вплив мастильно-охолоджуючих рідин на якість поверхонь деталей тертя друкарських машин з композиційних сплавів при тонкому абразивному шліфуванні / А. П. Гавриш, Т. А. Роїк, П. О. Киричок, Ю. Ю. Віцюк // Наукові нотатки ЛНТУ. – Луцьк. – Вип. 42, 2013. – С. 67 – 74.

47. Акунович Л. М. Смазочно-охлаждающие технологические средства на основе оксиэтилированных алкилфенолов для магнитно-абразивной обработки алюминиевых сплавов / Л. М. Акунович. – Беларусь: Серия физика тех. наук, 2010. - № 1. – С. 42 – 45.
48. Лебедев В. Я. Смазочно-охлаждающие технологические средства для магнитно-абразивной обработки на основе поверхностно-активных веществ / В. Я. Лебедев. – Беларусь: Серия физика тех. наук, 2008. - № 2. – С. 41 – 43.
49. Таблицы функции распределения и плотностей распределения Стьюдента / Под ред. Н. В. Смирнова. – М.: Изд. АН СССР, 1990. – 196 с.
50. Конотюк А. Е. Основы научных исследований: Монография / А. Е. Конотюк. – К.: Наукова думка, 2010. – 452 с.
51. Пат. України № 102299 МПК C22C33/02 (2006.01), C22C38/22(2006.01). Антифрикційний композиційний матеріал на основі інструментальної сталі / Т. А. Роїк, А. П. Гавриш, О. А. Гавриш. Опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12.
52. Roik T. A., Gavrish A. P., Kyrychok P. A., Vitsiuk Iu. Iu. Effect of secondary structures on the functional properties of high-speed sintered bearings for printing machines //Powder Metallurgy and Metal Ceramics: Springer, New York: Volume 54, Issue 1 (2015), P. P. 119-127.
53. Roik T., Gavrish A., Vitsiuk Iu., Khlus O. Friction behavior of the new composite bearing materials for printing machines and special use at heavy operating conditions//*Journal of Science of the Gen. Tadeusz Kościuszko Military Academy of Land Forces*, Wroclaw, Poland.-Volume 47 Number 4 (178) 2015.-P.P. 100-108.
54. Roik T., Vitsiuk Iu., Oliynik V. Modern approaches to the Use of Grinding Aluminum Alloy Waste For the Production Of New Antifriction Parts/ European Scientific Approaches And Applied Technologies-Współpraca Europejska, Warsaw, №5 (12), 2016.-P. 62-72.
55. Роїк Т. А., Киричок П. О., Хлус О. С., Гавриш А. П. Температурне поле підшипників ковзання поліграфічних машин з високотносостійких композитів на основі інструментальних сталей і нікелю за умов тонкого

абразивного шліфування поверхонь тертя //Технологія і техніка друкарства.- №2(51).-2016- С. 51-68.

56. Гавриш А.П., Роїк Т.А., Киричок П.О., Хохлова Р.А. Сили різання при тонкому кубонітовому шліфуванні деталей зі зносостійких композиційних матеріалів на основі нікелю для друкарських машин//Наукові Вісті НТУУ «КПІ».-№1.-2016.- С. 77-83.

57. Гавриш А.П., Роїк Т.А., Киричок П.О., Хохлова Р.А. Вплив абразивного інструменту і режимів різання при тонкому шліфуванні зносостійких нікелевих композитів на параметри шорсткості поверхонь тертя поліграфічних машин//Наукові Вісті НТУУ «КПІ».-№2.-2016.- С. 77-87.

58. Гавриш А.П., Роїк Т.А., Киричок П.О., Хмілярчук О. І., Хлус О.С. Параметри наклепу поверхонь деталей тертя поліграфічних машин зі зносостійких композитів на основі нікелю при тонкому кубонітовому шліфуванні// Наукові Вісті НТУУ КПІ», №5(109).- 2016.- С. 54-61.

59. Roik T., Gavrish A., Vitsuk Iu. Effect of the friction films' tribosynthesis mechanism on the antifriction properties of composite materials based on nickel//Selected engineering problems, Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Gliwice, Poland, 2015.- №6.-Р.-81-90.

60. Гавриш А.П., Роїк Т.А., Киричок П.О., Лотоцька О.І. Силове поле при тонкому алмазному шліфуванні деталей тертя з нових композиційних матеріалів на основі нікелю//Технологія і техніка друкарства. – Вип. 3(53), 2016. – 61-72.

61. Киричок П. О. Фінішне оброблення зносостійких деталей друкарських машин: Учебний посібник / П. О. Киричок, Т. А. Роїк, А. В Шевчук. – К.: НТУУ «КПІ», 2014. – 404 с.

62. Киричок П.О., Роїк Т.А., Гавриш А.П., Шевчук А.В., Віщук Ю.Ю. Новітні композиційні матеріали деталей тертя поліграфічних машин: Монографія.- К.: НТУУ КПІ, 2015.- 428 с.

63. Гавриш А. П., Киричок П. О., Роїк Т. А., Зоренко О. В., Олійник В. Г. «Прецизійна доводка та полірування деталей поліграфічних машин з високолегованих композитів»: Монографія.- К.:НТУУ «КПІ», 2016.-498 с.
64. Патент України № 81849, МПК (2013.01) G11B5/127 Спосіб тонкої абразивної обробки циліндричних отворів деталей обертання з високолегованих композитів/ Гавриш А.П., Роїк Т.А., Киричок П.О., Мельник О.О., Віцюк Ю.Ю., Гавриш О.А. –опубл.10.07.2013, Бюл. № 13.
65. Патент України №81816, МПК (2013.01) G11B5/127 Мастильно – охолоджуюча рідина для абразивної обробки підшипників ковзання з високолегованих композиційних сплавів/ Гавриш А.П., Роїк Т.А., Киричок П.О., Віцюк Ю.Ю., Гавриш О.А.- опубл. 10.07.2013, Бюл. № 13.
66. Патент України № 85525, МПК (2013.01) B24B 5/00 - Спосіб фінішного оброблення отворів композитних підшипників ковзання поліграфічних машин абразивними брусками /А.П. Гавриш, Т. А. Роїк, П. О. Киричок, Ю. Ю.Віцюк, О.А. Гавриш. - опубл. 25.11.2013, Бюл. № 22.
67. Патент України № 85553, МПК (2013.01) G11B 5/127 Спосіб надтонкої абразивної обробки отворів деталей тертя з високолегованих композитних матеріалів на основі відходів інструментальних сталей/ А.П.Гавриш, Т. А.Роїк, П. О. Киричок, Ю. Ю.Віцюк, О.А.Гавриш .- опубл. 25.11.2013, Бюл. № 22.
68. Патент України № 85154, МПК (2013.01) G11B 5/127 Спосіб оброблення зовнішніх поверхонь деталей обертання поліграфічних машин зі зносостійких композитів абразивними брусками/ А.П.Гавриш, Т. А.Роїк, П. О.Киричок, Ю. Ю.Віцюк, О.А.Гавриш, І.Є. Дорфман. - опубл. 11.11.2013, Бюл. № 21.
69. Патент України №87131, МПК (2014.01) G11B5/127 Спосіб оздоблювально-викінчувального оброблення отворів підшипників ковзання з високолегованих композитних сплавів для друкарських машин/ А.П. Гавриш, Т.А. Роїк, П.О. Киричок, Ю. Ю. Віцюк, О.А. Гавриш.– опубл. 27.01.2014, Бюл.№2.

70. Roik T. A., Gavrysh O. A., Vitsiuk Yu. Yu. The Functional Properties Acquired by Antifriction Composites Produced from Silumin Grinding Waste// Powder Metallurgy and Metal Ceramics: Springer, New York: pp. 1-7, **DOI** 10.1007/s11106-019-00011-0, First Online: 15 February 2019. <http://link.springer.com/article/10.1007/s11106-019-00011-0>.
71. T. Roik, "System Modern technologies in engineering blanking production", A. Gavrish , Kiev, ECMO , 2010, 212 p.
72. T. Roik, "Newest technology of standardized products", A. Gavrish , O. Gavrish, Kiev, NTU "KPI" , 2012, 204 p.
73. Jamroziak K., Roik T. New Antifriction Composite Materials Based On Tool Steel Grinding Waste//WIT Transaction on Engineering Sciences, Volume 124, 2019: WIT-press, Material and Contact Characterisation IX, WIT Press Ashurst Lodge, Ashurst, Southampton, SO40 7AA, UK, Computational Mechanics International Inc 25 Bridge Street, Billerica, MA 01821, USA, ISBN: 978-1-78466-331-5 eISBN: 978-1-78466-332-2 ISSN: 1746-4471 (print) ISSN: 1743-3533 (online), pp. 151-159.
74. Tribotechnical Properties of Composite Materials Produced from ShKh15SG Steel Grinding Waste//Powder Metallurgy and Metal Ceramics: Springer Science + Business Media, LLC, Springer Nature 2019, New York: Volume 58(7), (2019), pp. 439-445, DOI 10.1007/s11106-019-00093w, First Online: 05 December 2019. <http://link.springer.com/article/10.1007/s11106-019-00093-w>.
75. A. Matalin, "Surface quality and performance of the machines", Mashgiz, 1976, 384 p .
76. Роїк Т. А., Віцюк Ю. Ю. Антифрикційний композиційний матеріал на основі шліфувальних відходів інструментальної сталі для деталей друкарських машин/Міжвузівський збірник «Наукові нотатки».- Луцьк.- Вип. 68, 2019.- С.79-85.
77. B. Kostecki, "Reliability and durability of machines", I. Nosovskii , L. Bershad, Kiev, Tehnika , 1975, 408 p.

78. B. Hevko, I. Hevko, D. Radik “Tech Agricultural Engineering”, Kiev, Condor , 2006, 490 p.
79. A. Dalsky, "Technology to ensure reliability of precision parts”, Moscow, Mechanical Engineering , 1975, 224 p.
80. P. Rudenko, “Design of technological processes in mechanical engineering”, Kiev: High School, 1985, 255 p.
81. A. Sokolovsky, “Scientific bases of technology of mechanical engineering”, Saint Petersburg, Mashgiz, 1955, 515 p.
82. Роїк Т. А., Віцюк Ю. Ю., Хмілярчук О. І. Структура і триботехнічні властивості композиційних антифрикційних матеріалів на основі відходів сталі Р7М2Ф6// Наукові Вісті КПП ім. Ігоря Сікорського.– № 1.- 2020.– С. 54-60.
83. Патент України № 91221, МПК (2014.01) B24B1/00, B24B55/00 Спосіб обробки отворів підшипників ковзання з високолегованих композитів для поліграфічних машин / А.П. Гавриш, Т.А. Роїк, П.О. Киричок, Ю. Ю. Віцюк, О.А. Гавриш.- Заявка u2014 00776. - опубл. 25.06.2014, Бюл.№12.
84. S. Mitrofanov “Group Technology engineering production”, Mechanical Engineering, 1983, 407 p.
85. A. Yakimov, "Technology of mechanical engineering", Tsaryuk et al ., Odessa, Astroprint , 2001, 602 p.
86. P. Yascheritsin, “Cutting theory”, E. Feldstein, M. Kornievich, Minsk, The new edition, 2006, 512 p.
87. Kurzawa Adam, Roik Tetiana, Gavrysh Oleg, Vitsiuk Iulia, Bocian Mirosław, Pyka Dariusz, Zajac Pawel, Jamroziak Krzysztof. Friction mechanism features of the nickel-based composite antifriction materials at high temperatures, Journal “Coatings”, MDPI, Vol. 10(5), No 454, Basel, Switzerland, May, 7, 2020, pp. 1-22. <https://doi.org/10.3390/coatings10050454> , <https://www.mdpi.com/2079-6412/10/5/454>.
88. A. Gavrish, T. Roik, Yu. Vitsyuk, “Effect modes superfinishing grinding surfaces of revolution on quality composite parts rubbing printing machines”, Engineering, 2013, № 7 – 8, pp. 34-39.

89. Yu Vitsyuk, T. Roik, V. Oleinik, A. Gavrish, "Contact interaction abrasive tools and parts processing surfaces presses when superfinishing abrasives bars", *Technology and Printing Technology*, 2013, № 3, pp. 62-85.
90. A. Gavrish, T. Roik, O. Melnik, Yu. Vitsyuk, "The impact on the quality of the diamond superfinishing of surfaces from wear resistant composites based on aluminum", *Scientific news NTU "KPI"*, 2015, № 1, pp. 46-52.
91. T. Roik, A. Gavrish, P. Kyrychok, Yu. Vitsuk, "Effect of manufacture technology on properties of aluminium alloy wastes-based bearing composites for printing machines", *International Journal of innovative and informaties manufacturing technologies*, New-York, 2014, № 1, pp. 35–39.
92. L. Khudobin, *Application technology of cutting tools in metalworking*, E. Berdichev, Moscow, Mechanical Engineering, 1977, 192 p.
93. Jamroziak K., Roik T. (2020) Friction Films and Their Influence on the Antifriction Properties of New High-Temperature Nickel Composites/ In: Abdel Wahab M. (eds) *Proceedings of the 8th International Conference on Fracture Fatigue and Wear FFW-2020: Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer Nature Singapore Pte Ltd., November 2020, DOI 10.1007/978-981-15-9893-7, ISBN 978-981-15-9893-7, Серия ISSN 2195-4356.
94. Ed. Acad. NAS NV Novikova, Dr. tehn. Sciences SA Klimenko, "Tools of superhard materials", Moscow, Mechanical Engineering, 2014, 608 p.
95. V. Lavrinenko, "Superhard abrasives in machining", Kiev, publishing house ISM NAS of Ukraine, 2013, 456 p.
96. Роїк Т. А., Гавриш О. А., Віцюк Ю. Ю. Композиційний антифрикційний матеріал на основі відходів алюмінієвого сплаву для деталей постдрукерського обладнання// Порошкова металургія.-№5/6-2020.-С. 57-67.
97. Патент України № 93250, МПК (2014.01) B24B1/00, B24B55/00 Спосіб абразивного оброблення циліндричних поверхонь зносостійких деталей обертання з композиційних сплавів на основі алюмінію для поліграфічних машин/ А.П. Гавриш, Т.А. Роїк, П.О. Киричок, Ю. Ю. Віцюк, О.А. Гавриш, Дорфман І.Є.-опубл. 25.09.2014, Бюл. №18.

98. Патент України № 93251, МПК (2014.01) B24B1/00, B24B55/00 Спосіб прецизійної обробки отворів підшипників ковзання з важкооброблюваних композитних матеріалів для поліграфічної техніки/ А.П. Гавриш, Т.А. Роїк, П.О. Киричок, Ю. Ю. Віцюк, О.А. Гавриш – опубл. 25.09.2014, Бюл. №18.

99. Патент України №94829, МПК (2014.01) B24B1/00, B24B55/00 Спосіб абразивного оброблення плоских поверхонь зносостійких деталей тертя друкарської техніки з легованих композитів на базі алюмінію/ А.П. Гавриш, Т.А. Роїк, П.О. Киричок, Ю. Ю. Віцюк, О.А. Гавриш, І.Є.Дорфман .– опубл.10.12.2014, Бюл. № 23.

100. Патент України № 90726 , МПК G11B5/127 (2006.01) Спосіб фінішної обробки циліндричних отворів деталей тертя з важкооброблюваних композитів для друкарської техніки/ А.П. Гавриш, Т.А. Роїк, Ю. Ю. Віцюк, П.О. Киричок, О.А. Гавриш. –опубл.10.06.2014, Бюл.№11.

101. Roik, T.A., Gavrysh, O.A. & Vitsiuk, I.I. Composite Antifriction Material Based on Wastes of Aluminum Alloy for Items of Post-Printing Equipment // Powder Metallurgy and Metal Ceramics (2020): Springer Science + Business Media, LLC, Springer Nature 2020, New York: Volume 59, Nos. 5-6, September, (2020), pp. 282-289. Published: 02 November 2020. <https://doi.org/10.1007/s11106-020-00160-7>.

102. Ящерицын П. И. Прогрессивная технология финишной обработки деталей / П. И. Ящерицын. – Минск: Беларусь, 1989. – 312 с.

103. Байкалов А. К. Введение в теорию шлифования / А. К. Байкалов. – К.: Наукова думка, 1978. – 207 с.

104. Основи теорії різання матеріалів: Підручник / М. П. Мазур, Ю. М. Внуков, В. Л. Доброскок та ін. / Під заг. ред. М.П. Мазура. – Львів: Новий світ, 2010. – 423 с.

105. Патент України № 135075 Зносостійкий композиційний матеріал на основі нікелю МПК(2019.01) C22C19/03, C22C32/00/Т. А. Роїк, Ю. Ю. Віцюк, О. А. Гавриш. – Заявка и 2019 00875 від 29.01.2019. - опубл. 10.06.2019, Бюл.№11.

106. Лариненко В. І. Надтверді абразивні матеріали в механообробі: Енциклопедичний довідник / В. І. Лавриненко, М. В. Новіков. – К.: Вид. ІНМ НАН України, 2013. – 456 с.

107. *Инструменты из сверхтвердых материалов* / под ред. акад. НАН Украины Н. В. Новикова, д.т.н. С. А. Клименко. – М. : Машиностроение, 2014. – 607 с.

108. Гавриш А. П. Фінішна алмазно-абразивна обробка магнітних матеріалів: Монографія / А. П. Гавриш, П. П. Мельничук. - Житомир: ЖДТУ, 2004. – 552 с.

109. Обеспечение качества поверхностей деталей из магнитомягких сплавов прецизионной доводкой: Монография / Т. А. Роик, П.А. Киричок, А. П. Гавриш и др. – К.: НТУУ «КПИ», 2013. – 232 с.

110. Патент України № 135076 Антифрикційний композиційний матеріал на основі міді МПК(2019.01) C22C9/02, C22C9/00, C22C1/00, C22C1/04, C22C1/05/Т. А. Роїк, О. А. Гавриш, Ю. Ю. Віцюк. – Заявка u 2019 00876 від 29.01.2019. – опубл. 10.06.2019, Бюл.№11.

111. Кремень З. И. Применение новых видов микропорошков для окончательной доводки плоскопараллельных концевых мер длины [Текст] // З. И. Кремень // Абразивы, № 6, 1981. – С. 45 – 51.

112. Кремень З. И. Методы исследования шаржированной поверхности доводочных притиров [Текст] / З. И. Кремень, Р. Л. Певзнер, Т. Ю. Гавронская // Абразивы, № 6, 1993. – С. 34 – 41.

113. Роїк Т. А., Віцюк Ю. Ю. Аналіз функціональних параметрів матеріалів на основі регенерованих відходів// XII Міжнародна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Перспективні технології на основі новітніх фізико матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного конструювання матеріалів», м. Київ, 18-19 квітня 2019 р. – С. 34.

114. Тигров Т. В. Новые конструкции доводочных станков [Текст] / Т. В. Тигров // Обработка на шлифовальных и доводочных станках. – М.: Машиностроение, 1989. – С. 54 – 60.

115. Филиппкин А. Т. Механизация трудоемких ручных отделочных операций в машиностроении [Текст] / А. Т. Филиппкин, К. В. Пичета. – М.: ВИНТИ, 1979. – 211 с.

116. Roik T., Vitsiuk Iu. Iu. Use of recycled aluminum wastes for new composite antifriction materials manufacture// Abstracts of I International Scientific and Practical Conference «Scientific Achievements of Modern Society», Liverpool, United Kingdom, 11-13 September 2019, «Sci-conf» Cognum Publishing House, 2019, pp. 31-35.

117. Прецизійна машинна доводка плоских поверхонь деталей тертя з композитів на основі алюмінію для технологічних процесів / [А. П. Гавриш, Т. А. Роїк, Дорфман І. Є., Ю. Ю. Віцюк]. // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – К. – 2014. – №4. – С. 81–91.

118. Сверхтвердые материалы. Получение и применение [Текст]: монография в 6 т. // Под общ. ред. акад. НАН Украины Н. В. Новикова. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2007. – Т. 6: Алмазно-абразивный инструмент в технологиях обработки // Под ред. А. А. Шепелева. – 340 с.

119. *Композиційний підшипниковий матеріал на основі алюмінію* : пат. 34407 Україна: МПК С22С21/02 / Роїк Т. А., Гавриш А. П., Холявко В. В., Прохоренко О. М. ; заявник і патентовласник Нац. техн. ун-т України «Київський політехн. ін-т». – № U200803173; заявл. 12.03.2008 ; опублік. 11.08.2008, Бюл. № 15. – С. 3.

120. *Антифрикційний матеріал на основі алюмінію* : пат. 26862 Україна : МПК С22С21/02(2006.01) / Роїк Т. А., Гавриш А. П., Киричок П. О., Гавриш О. А. ; заявник і патентовласник Нац. техн. ун-т України «Київський політехн. ін-т». – № U200705653; заявл. 22.05.2007 ; опублік. 10.10.2007, Бюл. № 16. – С. 2.

121. Роик Т .А., Вицюк Ю. Ю., Олийник В. Г. Технологические аспекты создания новых материалов для узлов трения полиграфического оборудования// Dynamics of the development of world science. Abstracts of the 2nd International scientific and practical conference. Perfect Publishing. Vancouver, Canada.-2019. pp. 213-216.

122. *Зносостійкий* матеріал на основі алюмінієвого сплаву : пат. 75523 Україна МПК С22С21/02(2006.1) / Роїк Т. А., Гавриш А. П., Гавриш О. А., Киричок П. О., Віцюк Ю. Ю., Мельник О. О., Замулко С. О., Дорфман І. Є. заявник і патентовласник Нац. техн. ун-т України «Київський політехн. ін-т». – № U201204119; заявл. 03.04.2012 ; опублік. 10.12.2012, Бюл. № 23. – С. 3.
123. *Оптимізація* технологічних режимів тонкого абразивного шліфування зносостійких деталей з нових композитів на основі алюмінію для поліграфічних комплексів / [А. П. Гавриш, Т. А. Роїк, Ю. Ю. Віцюк та ін.]. // Технологічні комплекси – 2014. – №1(9). – С. 98–108.
124. *Гавриш А. П.* Фінішна алмазно-абразивна обробка магнітних матеріалів : монографія / А. П. Гавриш, П. П. Мельничук. – Житомир : ЖДТУ, 2004. – 551 с.
125. *Байкалов А. К.* Введение в теорию шлифования / А. К. Байкалов. – К. : Наук. думка, 1978. – 207 с.
126. *Маталин А. А.* Технологические методы повышения долговечности деталей машин / А. А. Маталин. – К.: Техника, 1971. – 144 с.
127. *Тонке* ельборове шліфування деталей тертя з композитів на основі алюмінію для машинних комплексів / [А. П. Гавриш, Т. А. Роїк, Дорфман І. Є., Ю. Ю. Віцюк]. // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – К. – 2014. – №2. – С. 37–47.
128. *Инструменты* из сверхтвердых материалов / под ред. акад. НАН Украины Н. В. Новикова, д.т.н. С. А. Клименко. – М. : Машиностроение, 2014. – 607 с.
129. *Исследование* ориентированного механического воздействия абразивом на неметаллические монокристаллы / О.Н. Григорьев, В. И. Карбань и др. //Обработка неметаллических материалов. – К. : ИСМ АН УССР, 1982. С. 62–70.
130. *Лавриненко В. І.* Надтверді абразивні матеріали в механообробі : Енциклопедичний довідник під заг. ред. акад. НАН України М. В. Новікова. – К. : ІНМ НАН України, 2013. – 456 с.

131. *Основи теорії різання матеріалів : підручник* / [Мазур М. П., Внуков Ю. М., Доброскок В. Л. та ін.] ; під заг. ред. М. П. Мазура. – Львів. : Новий світ, 2010. – 423 с.
132. *Обработка полупроводниковых материалов* / [Карбань В. И., Кой П. П., Рогов В. В. и др.] ; под ред. Н. В. Новикова, В. Бертольди. – К. : Наукова думка, 1982. – 256 с.
133. Синтетические сверхтвердые материалы : монография в 3 т. / [под. общ. ред. Новикова Н. В.]. – . – Т. 3: Применение синтетических сверхтвердых материалов. – К. : Наукова думка, 1986. – 280 с.
134. Jamroziak K., Roik T. Jamroziak K., Roik T. Friction Films and Their Influence on the Antifriction Properties of New High-Temperature Nickel Composites/8th International Conference on Fracture Fatigue and Wear FFW 2020, Bruges, Belgium, On-Line, 26–27 August-2020.
135. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: Монография в 6 т./Под. общ. Н. В. Новикова.– К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАНУ, 2007.– Т. 6: Алмазно-абразивный инструмент в технологиях обработки/Под. ред. А. А. Шепелева.– 340 с.