

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

УДК 669.01:621.762:621.89:621.9.048

**ПРОГРЕСИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ СИНТЕЗУ І ТОНКОЇ
ОБРОБКИ НОВИХ АНТИФРИКЦІЙНИХ
КОМПОЗИТНИХ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ ВУЗЛІВ
ДРУКАРСЬКИХ МАШИН,
Частина 2**

КИЇВ - 2025

*Рекомендовано Вченою радою
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
(протокол № 10 від 9 грудня 2024 р.)*

Рецензенти

В. В. Книш, доктор технічних наук, професор,
чл.-кор. НАН України, лауреат державної премії України в галузі науки і
техніки, завідувач відділом Інституту електрозварювання
ім. Є. О. Патона НАН України

О. П. Уманський, доктор технічних наук, професор,
завідувач відділом Інституту проблем матеріалознавства
ім. І. М. Францевича НАН України

Прогресивні технології синтезу і тонкої обробки нових антифрикційних композитних деталей для вузлів друкарських машин. Ч. 2: Монографія/П. О. Киричок, Т. А. Роїк, О. А. Гавриш, Ю. Ю. Майстренко, В. Г. Олійник. – К.: Видавничий дім «АртЕк», 2025.– 281 с.

У частині 2 монографії представлено напрацювання з розробки і застосування нових антифрикційних композитів, одержаних на основі регенованих шліфувальних відходів, де наведено результати досліджень зі створення та прецизійної обробки деталей з нових антифрикційних композитів на основі шліфувальних відходів швидкорізальних сталей Р6М5, 11РЗАМЗФ2 та ін., які призначені для роботи у важконавантажених вузлах тертя високообертового друкарського обладнання, а також на основі шліфувальних відходів низки алюмінієвих сплавів АК12ММгН, АМ4,5Кд та ін., призначених для оснащення помірно навантажених контактних з'єднань постдрукарського устаткування. Наведено нові склади антифрикційних композитів для широкого діапазону умов експлуатації, розроблено технологічні засади регенерації шліфувальних відходів, синтезу матеріалів та технологічні процеси тонкої обробки робочих поверхонь деталей, розгалужено висвітлено методологічні аспекти проведення широкого комплексу теоретико-експериментальних досліджень, та наведено особливості методологічного забезпечення параметрів якості поверхонь тертя деталей з нових антифрикційних композитів на основі цінних шліфувальних відходів чорних і кольорових металів.

Для фахівців машинобудівного та матеріалознавчого профілю, що займаються розробкою та механічною обробкою нових деталей тертя, призначених для експлуатації у контактних з'єднаннях. Може бути корисною для студентів та аспірантів вищих технічних навчальних закладів.

ЗМІСТ

ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ В ОБЛАСТІ ТЕХНОЛОГІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ І ВИКОРИСТАННЯ АНТИФРИКЦІЙНИХ ДЕТАЛЕЙ ДРУКАРСЬКОГО ТА ПОСТДРУКАРСЬКОГО УСТАТКУВАННЯ	7
1.1. Особливості роботи вузлів тертя ротаційних друкарських машин	7
1.2. Сучасні уявлення про механізм тертя і зношування матеріалів в умовах тертя	9
1.3. Литі та композиційні антифрикційні деталі для вузлів друкарських та постдрукарських машин	17
1.3.1. Антифрикційні деталі для важких умов експлуатації	17
1.3.2. Антифрикційні деталі на основі алюмінію для помірних та легких режимів роботи	23
1.4. Фінішне абразивне оброблення антифрикційних деталей друкарського і постдрукарського обладнання	37
1.4.1. Огляд абразивних матеріалів	39
1.4.2. Абразивні інструменти	44
Висновки до розділу 1	48
РОЗДІЛ 2. ПРИНЦИПИ ВИГОТОВЛЕННЯ, ОБРОБКИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ КОМПОЗИТНИХ АНТИФРИКЦІЙНИХ ДЕТАЛЕЙ НА ОСНОВІ ШЛІФУВАЛЬНИХ ВІДХОДІВ СТАЛЕЙ І АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ДЛЯ ПОЛІГРАФІЧНОЇ ТЕХНІКИ	51
2.1. Технологічні основи синтезу антифрикційних композитів на основі відходів легованих інструментальних сталей	51
2.1.1. Вибір вихідних компонентів для виготовлення високошвидкісних антифрикційних композитів на основі відходів сталей	51
2.1.2. Регенерація вихідних порошків шліфувальних відходів сталей	53
2.1.3. Відпрацювання технологічних режимів виготовлення антифрикційних композитів на основі відходів інструментальних сталей	55
2.2. Вибір вихідних компонентів та відпрацювання технологічних режимів виготовлення деталей на основі шліфувальних відходів алюмінієвих сплавів	58
2.2.1. Вихідні компоненти для композитних антифрикційних деталей на основі шліфувальних відходів алюмінієвих сплавів	58

2.2.2. Регенерація вихідних порошків шліфувальних відходів алюмінієвих сплавів	61
2.2.3. Відпрацювання технологічних режимів виготовлення деталей на основі шліфувальних відходів алюмінію	67
2.3. Методи дослідження властивостей нових антифрикційних композитних деталей	71
2.3.1. Методи мікроструктурного та електронно-мікроскопічного аналізів	71
2.3.2. Методи дослідження фізико-механічних властивостей	73
2.3.3. Методика досліджень триботехнічних характеристик	74
2.3.4. Методика дослідження стану поверхонь тертя	76
2.3.5. Профілометричний аналіз	79
2.3.6. Методика вимірювання наклепу	80
2.3.6.1. Метод рентгеноструктурного аналізу	80
2.3.6.2. Метод металографічного аналізу при дослідженні наклепу	83
2.3.7. Вимірювання залишкових напружень у поверхневих шарах	84
2. 4. Загальна методика виконання експериментальних досліджень з фінішного оброблення поверхонь композитів	84
2.4.1. Вибір шліфувальних інструментів, верстатного обладнання і технологічних схем тонкої алмазно-абразивної обробки поверхонь антифрикційних композитів на основі відходів інструментальних сталей	85
2.4.1.1. Верстатне обладнання для фінішної обробки деталей тертя	87
2.4.1.2. Абразивні інструменти для фінішної обробки деталей з антифрикційних композитів на основі шліфувальних відходів сталей	88
2.4.1.3. Мастильно-охолоджуючі середовища для фінішного оброблення деталей зі зносостійких антифрикційних композитів	89
2.4.2. Методика тонкого ельборового шліфування зносостійких деталей з композитів на основі шліфувальних відходів алюмінієвих сплавів	90
2.4.3. Методика прецизійної машинної доводки зносостійких деталей з композитів на основі шліфувальних відходів силуміну АК12ММгН	94
2.5. Математична обробка результатів експериментів	96
2.5.1 Оцінка суттєвих різниць між експериментальними вибірками	96
2.5.2. Методи дослідження статистичного зв'язку	99
2.6. Оцінка ефективності технології виготовлення та тонкої обробки поверхонь антифрикційних композитних деталей на основі шліфувальних відходів алюмінієвих сплавів	104

Висновки до розділу 2	108
РОЗДІЛ 3. БУДОВА І ВЛАСТИВОСТІ АНТИФРИКЦІЙНИХ КОМПОЗИТНИХ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ КОНТАКТНИХ З'ЄДНАНЬ ДРУКАРСЬКИХ І ПОСТДРУКАРСЬКИХ МАШИН	109
3.1. Аналіз структури антифрикційних композитів на основі регенерованих шліфувальних відходів інструментальних сталей	109
3.2. Структура антифрикційних композитів на основі регенерованих шліфувальних відходів алюмінієвих сплавів	117
3.3. Фізико-механічні та триботехнічні властивості антифрикційних композитів на основі шліфувальних відходів інструментальних сталей	127
3.4. Фізико-механічні та триботехнічні властивості антифрикційних композитів на основі шліфувальних відходів алюмінієвих сплавів	136
3.5. Вибір умов роботи нових композиційних деталей зі шліфувальних відходів алюмінієвих сплавів на основі аналізу стану поверхонь тертя	142
3.4 Ефективність технології виготовлення композиційних антифрикційних деталей на основі відходів алюмінієвих сплавів	150
Висновки до розділу 3	157
РОЗДІЛ 4. ТОНКЕ БОРАЗОНОВЕ ШЛІФУВАННЯ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ АНТИФРИКЦІЙНИХ КОМПОЗИТНИХ ДЕТАЛЕЙ ЗІ ШЛІФУВАЛЬНИХ ВІДХОДІВ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ СТАЛЕЙ	159
4.1. Шорсткість поверхонь нових високошвидкісних антифрикційних композитів для друкарських машин при бразононому шліфуванні	159
Висновки до розділу 4	170
РОЗДІЛ 5. ТОНКЕ АЛМАЗНЕ ШЛІФУВАННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ КОМПОЗИТНИХ ДЕТАЛЕЙ ТЕРТЯ ЗІ ШЛІФУВАЛЬНИХ ВІДХОДІВ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ПОЛІГРАФІЧНОЇ ТЕХНІКИ	171
5.1. Вплив параметрів тонкого алмазного шліфування на якість поверхонь композиційних антифрикційних деталей поліграфічних машин	173
5.1.1. Вплив складу алмазного інструменту та режимів різання на шорсткість поверхонь антифрикційних композитних деталей	173
5.1.2. Силове поле при тонкому алмазному шліфуванні поверхонь тертя заготовок композитних підшипників ковзання поліграфічної техніки	183

5.1.3. Миттєві контактні температури при тонкому алмазному шліфуванні заготовок з композитних матеріалів на основі відходів інструментальних сталей	190
5.1.4. Параметри наклепу поверхневого шару втулок композитних підшипників ковзання при тонкому алмазному шліфуванні	196
Висновки до розділу 5	204
РОЗДІЛ 6. ФІНІШНА МЕХАНІЧНА ОБРОБКА ЗНОСОСТІЙКИХ КОМПОЗИТНИХ ДЕТАЛЕЙ НА ОСНОВІ ШЛІФУВАЛЬНИХ ВІДХОДІВ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ДЛЯ ПОСТДРУКАРСЬКОГО ОБЛАДНАННЯ	205
6.1. Тонке ельборове шліфування зносостійких деталей з композитів на основі алюмінію	208
6.2. Прецизійна машинна доводка плоских поверхонь деталей тертя з композитів на основі відходів алюмінію	217
6.3. Залишкові напруження при прецизійній машинній доводці поверхневих шарів деталей зі зносостійких алюмінієвих композитів	230
Висновки до розділу 6	237
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	239
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	244

ВСТУП

В сучасних умовах видавнича і поліграфічна індустрія зазнає корінних технологічних змін і перебуває в стадії бурхливого розвитку. Найпоширеніший попит на різні види друкарської продукції, що відрізняються великим розмаїттям і номенклатурою, високими вимогами до якості продукції сприяє не тільки розвиткові й удосконаленню класичних і давно відомих способів друку, але призводить до того, що велике значення надають надійності, довговічності та продуктивності самого поліграфічного обладнання, від стабільності функціонування якого напрямую залежить якість друкарської продукції.

Одним з головних чинників, що визначають довговічність і продуктивність як поліграфічного обладнання, так і обладнання в цілому, є деталі тертьових сполучень, насамперед, антифрикційні деталі, а саме їх здатність чинити опір різним видам контактної взаємодії.

Розвиток поліграфічного машинобудування, оснащення поліграфічної техніки різного роду складними механізмами і пристроями додає проблемі підвищення зносостійкості деталей у вузлах тертя машин величезне значення.

Інтенсивний знос сполучених деталей у вузлах тертя призводить до втрати кінематичної точності механізмів, порушення герметичності робочого простору машин, порушення нормального режиму змащення і т.д., в результаті чого знижується продуктивність устаткування, що призводить до зниження якості продукції.

Зазначене відноситься до найрізноманітнішого поліграфічного устаткування, умови роботи якого коливаються у широких межах навантажуючих факторів – від легких режимів роботи за невеликих швидкостей і навантажень, зокрема, ножових різальних машин WOHLBERG Trim-tec 560, WOHLBERG Trim-tec 607, фальцапаратів HEIDELBERG IF-50 ST та ін., до важких умов експлуатації, пов'язаних з високими швидкостями обертання і навантаженнями, насамперед, таких машин, як PLAMAG Rondoset RO 170, SITMA C80 750i, STAR BINDER 1509,

WOHLENBERG 1A438, HEIDELBERG Speedmaster SM 102 FP+L, KBA RAPIDA-105 та ряд ін.

У вирішенні задач підвищення надійності і довговічності вузлів друкарського обладнання поряд із вдосконаленням конструкцій машин та механізмів, раціональним вибором матеріалів для їх деталей, вагоме місце відводиться розробці нових технологічних процесів виготовлення деталей, забезпеченню необхідних експлуатаційних властивостей матеріалу, з якого вони виготовляються, та технологічним аспектам підвищення параметрів якості робочих поверхонь деталей, що сприймають основне навантаження у процесі контактної взаємодії і у підсумку визначають термін служби як окремої деталі і вузла, так і машини у цілому [1–4].

Тому при виготовленні антифрикційних деталей вузлів тертя поліграфічного обладнання, що повинні мати високі зносостійкість та опірність, стійкість проти змінних і динамічних навантажень, довговічність в умовах малих та високих швидкостей, особливого значення набуває комплексне вирішення завдання конструкційної будови деталей антифрикційного призначення, коли необхідно приділяти увагу найголовнішому елементу будь-якої конструкції деталі - це матеріалу конструкції, з якого і за якою технологією виготовлена та механічно оброблена деталь.

Як правило, руйнування деталей тертя в умовах експлуатації починається з їх поверхні, особливо при наявності на ній ділянок дії концентраторів напружень. При цьому на ресурс антифрикційних деталей, наприклад, підшипників, впливають вид зовнішнього навантаження, фізико-механічні та антифрикційні властивості їх матеріалу, швидкість та температура експлуатації, навколишнє середовище, геометрія деталі і стан поверхневого її шару, шорсткість робочої поверхні R_a , величина та характер залишкових напружень та інші фактори [1–15].

Критерієм оцінки якості антифрикційних деталей вузлів тертя поліграфічного обладнання є не тільки точність розмірів та шорсткість виконавчих поверхонь, а й фізико-хімічні властивості поверхневого шару

матеріалу деталі: склад і властивості плівок тертя (так званих вторинних структур), рельєф мікрогеометрії, які у переважній більшості мають першочергове значення для забезпечення надійності та довговічності деталі.

В силу цього чи не головними завданнями на сучасному етапі, поряд із безперервним вдосконаленням технологічних процесів, що забезпечують точність розмірів та форми деталей, є створення нових та вдосконалення існуючих технологій синтезу матеріалів з наступною тонкою обробкою деталей з них для надання поверхневому шару необхідних функціональних властивостей.

Правильний вибір матеріалів на стадії конструювання поліграфічного обладнання залежить від багатьох факторів: призначення і конструктивних особливостей вузла тертя, рівня розвитку технології виробництва, умов експлуатації, вимогам до міцності, довговічності та надійності певних деталей.

Вибір матеріалів деталей та методів їх тонкої обробки, що забезпечує працездатність пари тертя, у кожному окремому випадку можна зробити лише на основі ретельного зіставлення умов роботи тертьових деталей, вихідних властивостей матеріалів і тих змін, які вони зазнають, на поверхнях тертя у процесі експлуатації вузла.

Під час тертя на поверхнях деталей відбувається пластична деформація. Поверхневий шар змінює свою структуру і переходить в активований стан. Із такого термодинамічно невірноваженого стану матеріал прагне негайно перейти в пасивний стан через адсорбційну, дифузійну або хімічну взаємодію із зовнішнім середовищем. В результаті цієї взаємодії утворюється нова фаза, що і стає об'єктом поверхневої руйнації. Проте механізм руйнації реалізується не за всіх умов тертя. Якщо не утвориться достатньо міцного і зносостійкого прошарку вторинних структур, що захищає основний матеріал пари тертя від безпосередньої взаємодії, процес тертя перебігатиме в умовах пошкоджуваності, тоді відбувається зчеплення, мікрорізання, проникнення і проорювання, фретинг-процес тощо. Відповідно до сучасних уявлень роль процесу припрацювання поверхонь тертя зводиться до генерації прошарку

вторинних структур в результаті всього комплексу фізичних, фізико-хімічних і механічних процесів, що відбуваються під час тертя [4–10].

Розглянуті результати досліджень механізму тертя [5–10] здебільшого отримано на звичайних литих матеріалах, проте вони цілком застосовані і для тлумачення процесів, що відбуваються під час тертя композиційних спечених матеріалів. Особливості технології виготовлення, складу і структури композиційних спечених матеріалів дозволяють успішно реалізовувати отримані уявлення про механізм тертя для впливу на процес тертя в потрібному напрямі [1–3, 16–30]

Проте на сьогоднішній день залишаються не з'ясованими механізми технологічного впливу на процес тертя за різних експлуатаційних режимів, особливо при відсутності змащування рідкими мастилами, в умовах одночасної дії малих і високих швидкостей, помірних і підвищених навантажень та агресивного середовища (повітря).

Окрім цього, до теперішнього часу відсутні цілеспрямовані технологічні заходи з синтезу і фінішної обробки, які б дозволили одержувати не тільки прогнозовану структуру об'єму антифрикційної деталі, але і наперед задані параметри якості її робочих поверхонь, які би сприяли керованому трибосинтезу антифрикційних захисних плівок, що утворились у процесі роботи тертьової пари за визначених умов експлуатації вузла друкарської машини.

Вище означені аргументи визначили напрямки досліджень авторів монографії ч. 2, яка є продовженням напрацювань, викладених у монографії ч. 1, з узагальнення результатів досліджень щодо особливостей розроблених авторами технологій синтезу і прецизійної обробки робочих поверхонь нових самозмащувальних антифрикційних деталей з композитів на основі відновлених шліфувальних відходів низької швидкорізальних сталей і високолегованих алюмінієвих сплавів, які є ефективною альтернативою нині застосованим литим антифрикційним деталям, що призначені для оснащення контактних пар друкарського і постдрукарського обладнання.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ В ОБЛАСТІ ТЕХНОЛОГІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ І ВИКОРИСТАННЯ АНТИФРИКЦІЙНИХ ДЕТАЛЕЙ ДРУКАРСЬКОГО ТА ПОСТДРУКАРСЬКОГО УСТАТКУВАННЯ

1.1. Особливості роботи вузлів тертя ротаційних друкарських машин

Успішне функціонування підприємства будь-якої галузі промисловості, зокрема, поліграфічної, в умовах сучасної ринкової економіки вимагає виготовлення продукції не тільки високої якості, але і випуск цієї продукції у досить короткі терміни. Тобто перед підприємствами постає завдання виготовлення продукції «сьогодні на завтра».

Досягти таких результатів можна декількома шляхами, наприклад, розширенням кількості обладнання. Даний шлях розв'язання проблеми не завжди виправданий, більш того, придбання обладнання є досить дорогим у реалізації. Іншим шляхом є збільшення потужностей машин, зростання швидкостей руху виконавчих і допоміжних механізмів задля нарощування випуску кількості продукції в одиницю часу. З іншого боку, постійне підвищення вимог до надійності й довговічності роботи обладнання.

Зростання швидкостей руху механізмів ротаційних друкарських машин призводить до підвищення температур в зоні контакту і в сукупності з відсутністю не стабільного змащування контактуючих поверхонь, дії знакозмінних циклічних навантажень, агресивних середовищ (клей, лак, паперовий пил, розчинники, що особливо характерно для поліграфічної промисловості), спричиняє посилений знос поверхонь тертя.

При цьому в процесі експлуатації обладнання змінюються розміри деталей машин, їх геометричні характеристики, структура, властивості й напружений стан поверхневих шарів.

Зношування робочих поверхонь деталей обмежує строк служби обладнання та призводить до погіршення критеріїв працездатності: втраті кінематичної точності механізмів, зниженню міцності деталей, підвищення шуму та вібрацій внаслідок збільшення зазорів у передачах.

Таким чином, виникає потреба у підвищенні якості експлуатаційних властивостей відповідних деталей поліграфічного обладнання, підвищенні ресурсу роботи деталей, зміцнення поверхонь тертя, підвищення їх зносостійкості.

До основних дефектів, які виникають при роботі високообертового поліграфічного обладнання можна віднести [1–3] механічні пошкодження, хіміко-термічні пошкодження, механічне зношування.

З механічних дефектів присутні тріщини, пробоїни, риски та надири, викривчування, поломки та злами, згини і вм'ятини, скручування.

Тріщини виникають в результаті дії значних місцевих навантажень, ударів, перенавантажень. Найбільше поширення мають втомлювальні тріщини, які з'являються у найбільш навантажених місцях деталей вузлів тертя при довгостроковій дії знакозмінних навантажень.

В результаті попадання на поверхні тертя деталей високообертового поліграфічного обладнання пилу та паперу, на них з'являються такі пошкодження як риски та надири.

Під дією динамічних ударних навантажень, а також в результаті втомлювальних напружень виникають викривчування, що є характерними для підшипників (бігові доріжки кілець).

Для деталей вузлів тертя поліграфічного обладнання характерний такий дефект, як скручування. Він виникає під дією крутного моменту за наявності значного опору, потрапляння сторонніх предметів, перенавантаження, відсутність мастила і т. п. Такі дефекти характерні, як правило, для валів.

З видів хіміко-теплого пошкодження деталей присутня корозія поверхні, електроерозійне пошкодження, накип, короблення. Корозії можуть піддаватися незахищені поверхні деталей під дією оточуючого середовища, особливо при зростанні вологості повітря [1–3].

Серед видів механічного зношування у вузлах тертя найчастіше спостерігаються схоплювання та стирання (спрацювання).

Схоплювання – процес відриву або видалення часток металу з поверхні тертя. Викликано наявністю мікронерівностей, що залишаються в процесі обробки деталі. Стирання відбувається найбільш інтенсивно у початковий період роботи нової або відремонтованої машини, так званий період обкатки.

Чим гірше оброблені поверхні деталі, тим інтенсивніше відбувається стирання та тим більший знос виникає у період припрацьовування. Необхідність відновлення деталей під час планових ремонтів, переважно до 80%, обумовлена зносом [1, 3, 7–15].

Такі явища притаманні роботі антифрикційних деталей вузлів тертя таких друкарських машин, як KBA Rapida-105 (Німеччина), Heidelberg Speedmaster SM 102 FPL (Німеччина), STAR BINDER 1509 (Швейцарія), SITMA C80 750i (Італія), Solna D390 та Solna D480 (Швеція) та ін.

1.2. Сучасні уявлення про механізм тертя і зношування матеріалів в умовах тертя

Успіхи в створенні нових антифрикційних матеріалів, ефективних деталей з них і забезпечення оптимальних умов їх експлуатації залежать від глибокого розуміння механізму тертя і зношування, а також від розроблення теоретичних основ процесу тертя.

Тертя і зношування винятково складні процеси, для яких характерні фізичні, хімічні, електрохімічні явища, взаємодія матеріалу тертьових поверхонь і мастил, а також навколишньої атмосфери, деформація поверхневих шарів, перенесення речовини тертьових матеріалів тощо [1–15].

До останнього часу не існує достатньо повної теорії цих процесів, що дозволяла б підходити до створення матеріалів вузлів тертя на підставі чітких теоретичних уявлень про механізм тертя і зношування. Установлені в багатьох працях закономірності процесів тертя мають зазвичай частковий характер і залишаються справедливими тільки у вузьких межах конкретного експерименту.

Вивченню механізму тертя присвячено велику кількість праць [5–11], і їх можна розділити на декілька основних напрямів, що відображають сучасний стан проблеми: вивчення молекулярної і механічної взаємодії тертьових поверхонь, втомного механізму зношування, механізму утворення робочих прошарків і їх складу, деформації і поверхневої міцності матеріалу під час тертя, механізму вибіркового перенесення.

Уявлення про розмаїтість і суперечливість даних про вплив зовнішніх параметрів на одну з характеристик процесу тертя, наприклад, коефіцієнт тертя, дають узагальнені дані І. В. Крагельського, подані за результатами праць [9]. Відповідно до уявлень І. В. Крагельського характерними для коефіцієнта тертя у разі тертя без змащування є зниження його значень із зростанням навантаження, наявність максимального значення зі збільшенням швидкості тертя, зростання його значень зі збільшенням розміру поверхонь, що контактують, і зменшення – зі зменшенням шорсткості поверхні [9].

У разі граничного тертя коефіцієнт тертя має такі особливості: за малих навантажень він знижується в міру збільшення тиску до певного значення, потім стабілізується або зростає в результаті часткового переходу тертя від граничного до тертя без змащування. Залежно від швидкості тертя відбувається підвищення або зниження коефіцієнта тертя з наступною його стабілізацією.

Стан досліджень у галузі тертя та зношування поки не дозволяє проектувати вузли тертя без широкого залучення експериментальних методів.

Пошуки нових матеріалів для цієї мети вкрай утруднені, оскільки немає однозначних уявлень про механізм тертя і зношування, про вплив структури, фізико-механічних та інших властивостей матеріалу, методів тонкої обробки поверхонь деталей з нових матеріалів на його антифрикційні властивості.

Спочатку процес тертя розглядали як результат зачеплення виступів на поверхні тіл, що контактують. Потім було встановлено молекулярну взаємодію [8–11, 15]. Ці дані, так само, як і наступні дослідження, показали вплив на перебіг процесу тертя швидкостей і навантажень, природи матеріалів

пари тертя, навколишнього середовища, механічної обробки робочих поверхонь тощо [1–3, 8–11, 15, 19–37].

Тільки в останні десятиліття лише частково розкрито фізичну і фізико-хімічну природу тертя і зношування. Через складність процесу були розпочаті спроби розчленувати його та аналітично розглянути його модельні складники, зокрема, пружно-пластичну деформацію, мікрорізання, локальне зварювання, відділення (відрив) атомів, пластичний зсув, сили атомної взаємодії та ін. [8–11, 15].

Теоретичні основи процесу тертя і зношування розвиваються нині у декількох напрямках. Широко відомі праці І. В. Крагельського і його школи [9], в основу яких покладено уявлення про молекулярно-механічну природу тертя. Відповідно до цих праць тертя між поверхнями зумовлено насамперед взаємодією (зчепленням) виступів на поверхнях у результаті взаємного проникнення поверхонь, що контактують. Причому на вихідну шорсткість поверхонь накладається додаткова шорсткість, що виникає під тиском стискальних сил і зумовлена неоднорідністю механічних властивостей полікристалічних матеріалів. У місцях реального контакту виникають адгезійні зв'язки (містки зварювання) [9]. Ця взаємодія характеризується двома безрозмірними параметрами: відносним проникненням нерівностей і відносною міцністю адгезійного зв'язку на зсув. Отже, керування процесом тертя зводиться до керування деформаційними й адгезійними складниками сил тертя.

І. В. Крагельський [9] указує, що існують два способи зниження тертя і зношування: зменшення деформаційного складника відносного проникнення і зниження адгезійного складника, тобто відносного зсувного опору. В ідеальному випадку мінімального тертя можна досягнути у випадку граничного твердого тіла, покритого м'якою захисною плівкою або з поверхневим шаром зниженої міцності на зсув.

Отже, відповідно до цих уявлень механізм зовнішнього тертя зводиться до пластичного або пружного відтискування більш м'якого матеріалу

виниклими нерівностями (деформаційні складники сил тертя) і подолання адгезійних зв'язків, що виникають у контактній зоні (адгезійний складник).

Поряд із цим численні спроби знайти кореляцію між тими або іншими фізичними (теплопровідністю, теплоємністю, електронною структурою) і механічними (твердістю, плинністю, модулем пружності, міцністю під час стискання і зсуву) властивостями, а також фазовим складом і структурою (гетерогенністю або гомогенністю, характером кристалічної ґратки, геометрією структурних складників та ін.) задовільних результатів не дали.

Праці [1–3; 5; 7; 8, 10, 11, 14, 16–30] переконливо показують, що характер і властивості вторинних структур, що виникають безпосередньо в процесі роботи, справляють вирішальний вплив на зносостійкість пари тертя. Стан робочого прошарку визначається процесами, що перебігають під час тертя – дифузійними, зумовленими перерозподілом елементів у складі матеріалу, абсорбційними, що супроводжуються взаємодією поверхонь тертя з повітрям, мастильними речовинами й іншими навколишніми середовищами, пов'язаними з хімічними взаємодіями. Відбуваються структурно-фазові перетворення, причому активність їх дуже залежить від пластичної плинності поверхневого шару і температури.

Під час тертя досягається тісний зв'язок між найтоншими компонентами вихідних речовин (механічне легування) й утворюються нові фази – карбіди, нітриди, сульфіді, тверді розчини взаємодіючих елементів під впливом великого енергетичного потенціалу утворювальних частинок, локального підвищення тисків і температур та високого ступеня дефектності структури частинок. У хімічних і фізико-хіміко-механічних процесах активно беруть участь кисень, азот, оксид і двооксид вуглецю, що наявні у повітрі, вуглеводні й інші речовини в мастилі.

Найбільший інтерес становить вивчення зазначених фізико-механічних явищ і структури утворюваного прошарку, які характеризують сталий процес тертя. Тільки в умовах його стабілізації можливе тривале функціонування вузлів тертя. Проте до останнього часу більш вивченими були процеси, які

відбуваються під час переходу в зону катастрофічного зношування, що супроводжується зчепленням і заїданням поверхонь. Тому для створення надійних матеріалів тертя необхідно насамперед вивчити умови виникнення робочих прошарків, які мають тривалу стійкість. Таким вимогам відповідає окислювальний вид зношування.

Дифузійний перерозподіл елементів у поверхневому шарі. На утворення і властивості шару вторинних структур на поверхнях пари тертя великий вплив справляють дифузійні процеси, що відбуваються у найтонших прошарках під впливом локальних високих температур, тисків і деформацій. Ці процеси перебігають з великими швидкостями і можуть призводити до істотних змін хімічного складу поверхневих шарів та перерозподілу елементів у них. Хімічний склад змінюється також в результаті взаємодії матеріалів пар тертя і змащування на повітрі або іншого навколишнього середовища.

Наприклад, у разі тертя матеріалу підшипника зі сталі 10X18H9T у парі з валом з такого самого матеріалу вміст нікелю в поверхневому шарі вала зменшувався очевидно за рахунок переважного окислювання нікелю [2]. У роботах [2, 4] виявлено також перенесення міді з бронзографіту на поверхню вала до 6–9 % і дифузію її на деяку глибину від поверхні вала.

Перерозподіл елементів, що дифундують під час тертя, призводить до появи під поверхневим шаром тонкого (близько 10 мкм) прошарку, збідненого продифундованим елементом.

Автори [4] поділяють досліджувані елементи на дві групи – елементи, що нагромаджуються в поверхневому шарі деформованого металу (вуглець, кремній, ванадій, нікель, мідь), і елементи, концентрація яких зменшується в матриці поверхневого шару деформованого металу (марганець, хром, молібден, вольфрам).

Адсорбційне зниження міцності поверхневого шару. Винятково великий вплив на зносостійкість матеріалу можуть справляти поверхнево-активні речовини (ПАР) внаслідок адсорбційного зниження міцності. Під впливом ПАР, наявних у мастилах, що полегшують вихід дислокацій на

поверхню деформованих тіл, відбувається пластифікація поверхневого шару і полегшення його деформації. Дефекти кристалічної структури полегшують міграцію атомів ПАР у зародкові тріщини, що призводить до окрихчування матеріалу.

Поверхнево-активні речовини впливають на тверді тіла, змінюючи поверхневу енергію, твердість та інші характеристики матеріалу. За цих умов винятково великий вплив на зносостійкість матеріалу справляють процеси пластичної деформації. У зв'язку з цим великого значення набувають дослідження, спрямовані на вивчення хімічних і структурних змін у поверхневих шарах матеріалів під час тертя.

У працях Б. І. Костецького та І. Г. Носовського [7, 8, 10] детально розглянуто процеси, що відбуваються у поверхневих шарах матеріалів під час тертя, і питання поверхневої міцності. Б. І. Костецький запропонував класифікацію видів зношування, в основу якої покладено уявлення про чільну роль у механізмі зношування механіко-хімічного (окиснювального) зношування [7, 8].

У роботах [2, 4–11, 15] сформульовано положення про те, що поверхнева міцність матеріалів зумовлюється універсальним явищем структурної пристосованості матеріалів під час тертя, сутність якого зводиться до такого.

Під час тертя на поверхнях матеріалів відбувається пластична деформація. Поверхневий шар змінює свою структуру і переходить в активований стан. Із такого термодинамічно неврівноваженого стану матеріал прагне негайно перейти в пасивний стан через адсорбційну, дифузійну або хімічну взаємодії із зовнішнім середовищем. В результаті цієї взаємодії утворюється нова фаза, що і стає об'єктом поверхневої руйнації. Проте механізм руйнації реалізується не за всіх умов тертя. Якщо не утвориться достатньо міцного і зносостійкого прошарку вторинних структур, що захищає основний матеріал пари тертя від безпосередньої взаємодії, процес тертя перебігатиме в умовах пошкоджуваності, тоді відбувається зчеплення мікрорізання, проникнення і проорювання, фретинг - процес тощо.

Принцип структурної пристосованості ґрунтується на такому механізмі. Під час тертя в результаті деформації структура найтоншого поверхневого шару перебудовується в нову тонкодисперсну фазу. Відповідно до принципів термодинаміки усі види взаємодії під час тертя відбуваються у мінімальних об'ємах у тонкоплівковому об'єкті, здатному поглинати максимальну енергію до руйнації.

У разі руйнації за принципом структурної пристосованості питома робота руйнації на декілька порядків вища, ніж за інших процесів руйнації під час тертя. Такі тонкі зруйновані прошарки перебувають в надзвичайно хиткому стані, у результаті чого з великою швидкістю мають відбуватися процеси пасивації. Їх перебіг зумовлено взаємодією з активними елементами середовища (киснем, сіркою, фосфором, хлором, азотом та ін.) і матеріалом контртіла, а також внутрішньою перебудовою структури поверхневих шарів. Кожний із цих видів пасивації відбувається паралельно відповідно до термодинамічних умов, що виникають під час тертя.

У результаті пасивації з'являються нові однофазні або гетерофазні тонкоплівкові об'єкти (вторинні структури).

Вторинні структури утворюються у певному діапазоні режимів тертя за наявності динамічної рівноваги процесів активації і пасивації.

Внаслідок зношування поверхневої плівки в умовах тертя активуються нові прошарки основного матеріалу, і завдяки наступним процесам пасивації прошарок вторинної структури відновлюється.

Вторинні структури за нормального тертя металів мають ультрадисперсну орієнтовану будову. Вони метастабільні і являють собою здебільшого тверді розчини й нестехіометричні сполуки металів та активних компонентів середовища.

Відповідно до сучасних уявлень роль процесу припрацювання поверхонь тертя зводиться до генерації прошарку вторинних структур в результаті всього комплексу фізичних, фізико-хімічних і механічних процесів, що відбуваються під час тертя [2, 15].

Розглянуті результати досліджень механізму тертя здебільшого отримано на звичайних литих матеріалах [5, 7, 8, 10, 11, 15], проте вони цілком застосовані і для тлумачення процесів, що відбуваються під час тертя композиційних спечених матеріалів.

Особливості технології виготовлення, складу і структури композиційних спечених матеріалів дозволяють успішно реалізовувати отримані уявлення про механізм тертя для впливу на процес тертя в потрібному напрямі [1–3, 16, 18, 20–30].

Методи порошкової металургії дозволяють виготовляти композиційні антифрикційні матеріали різноманітного складу з наявністю в матеріалі рівномірно розподілених вкраплень речовин, що відіграють роль твердого мастила – графіту, сульфідів, селенідів, фторидів та інших сполук, які активно беруть участь у створенні вторинних структур на поверхнях тертя. Крім того, у структуру матеріалу можна вводити тверді зносостійкі домішки типу карбідів та інших твердих сполук, що мають невисокий коефіцієнт тертя і перебирають на себе навантаження, підвищуючи несучу здатність підшипника. У широких межах можна регулювати дисперсність вкраплень і їх розподіл у матеріалі підшипника [1–4].

У спечених матеріалах можна зробити каркас з міцного матеріалу порожнини в якому заповнені м'яким матеріалом або сплавом, спроможним відігравати роль твердого мастила. І, навпаки, в матриці м'якого матеріалу можуть бути розподілені тверді вкраплення, які підвищують його несучу здатність.

Усі ці особливості відкривають великі перспективи для цілеспрямованого регулювання властивостей антифрикційних матеріалів стосовно до конкретних умов їх експлуатації, забезпечення потрібної поверхневої й об'ємної міцності матеріалу і перебігу процесів, що сприяють утворенню прошарку вторинних структур з оптимальними антифрикційними властивостями.

1.3. Литі та композиційні антифрикційні деталі для вузлів друкарських та постдрукарських машин

1.3.1. Антифрикційні деталі для важких умов експлуатації

Литі матеріали традиційно застосовуються найчастіше для виготовлення антифрикційних деталей для вузлів поліграфічних машин, що працюють за високих швидкостей обертання, підвищених навантажень на пару тертя, у агресивному середовищі - повітрі.

Насамперед, це антифрикційні деталі з бронз та латуней.

Бронза має універсальні антифрикційні властивості, що дозволяє її застосовувати в широкому спектрі вузлів поліграфічного обладнання. Бронзи поділяються [1–4, 15] на олов'яні, олов'яно-цинково-свинцеві, олов'яно-фосфориста (особливо ефективна при високому тиску і середніх швидкостях), свинцеві (володіє підвищеним в порівнянні з високоолов'яним бабітам опором втомі).

До бронзових деталей пред'являються набагато вищі, вимоги до твердості цапф (ніж до бабітів) і до шорсткості поверхонь цапф і вкладишів, а також до змащувальних мастил, оскільки окиснені мастила викликають корозію бронзових деталей.

Латуні мають вищі фізико-механічні властивості [1–4, 15], ніж бронзи, тому вони знайшли своє використання у більш навантажених вузлах тертя друкарської техніки, що піддаються більшим навантаженням на контактну пару, або високим швидкостям.

Так, у вузлах офсетних, друкарських, формних циліндрів друкарської техніки закордонного виробництва для підшипників ковзання зазвичай використовуються литі бронзи типу Cu₈₃Sn₇Zn₃Pb₇ або CuSn₅ZnPb (B505, B584) C93200, C83800 стандарти ASTM, США, що є аналогами вітчизняних бронз типів Бр.ОЦС-6-6-3, Бр.АЖ9-4, або литі латуні типу CuZn₃₇, CuZn₃₇Pb₁, CW508L (EN стандарт), C27200, C33500 (ASTM стандарти США), що є аналогами вітчизняних латуней типів Л63, ЛС59-1, які працюють тільки за наявності рідкого змащення зони контакту [1–3, 16–24].

При значних навантаженнях (4,0–5,0 МПа) і помірних швидкостях обертання (до 700 об./хв.) в умовах роботи із загартованою цапфою валу застосовують втулки підшипників з литої алюмінієво-залізистої бронзи CuAl10Fe, стандарт DIN, або бронзи C95400, стандарт ASTM, США, що є аналогом вітчизняної бронзи Бр.АЖ9-4.

Слід також зазначити, що в умовах високих швидкостей обертання, які характерні для друкарських машин, жодне рідке мастило стає неефективним в наслідок його викидання із зони тертя відцентровими силами, і робота вузла тертя фактично перетворюється в «сухе» тертя. Це, у свою чергу, призводить до швидкого зносу підшипнику. Антифрикційні втулки підшипників ковзання, що виготовлені з литих бронз та латуней закордонних марок, широко застосовуються у вузлах тертя поліграфічного обладнання друкарських та брошурувальних цехів (табл. 1.1).

Таблиця 1.1. Антифрикційні втулки з литих бронз і латуней у друкарському обладнанні ДП «Преса-України»

Марка машини, де використовуються підшипники ковзання	Назва механізмів, де задіяні втулки підшипників ковзання	Матеріал втулки	Термін служби антифрикційної втулки
Heidelberg Speedmaster SM 102 FP+L	Вал з кулачками (обертальний рух)	латуні типу CuZn37, CuZn37Pb1	до 1 року
3-Х ножова різальна машина WOHLBERG 1A438	Головний вал з кулачками (обертальний рух)	бронзи типу Cu83Sn7Zn3Pb7, CuSn5ZnPb	до 0,5 року
Кришкоробний автомат фірми «Колбус» ДА – 36	Клейовий вал (обертальний рух)	бронзи типу Cu83Sn7Zn3Pb7, CuSn5ZnPb	до 0,5 року
3 – Х ножова різальна машина BRT – 300	Головний вал; вал приводу ножів (обертальний рух)	бронзи типу Cu83Sn7Zn3Pb7, CuSn5ZnPb	до 0,5 року
P-46, чотирьох фарбова друкарська аркушева машина	Букси – друкарського, офсетного та формного циліндрів (обертальний рух) Букса – фарбового дукторного валу (комбінований рух)	латуні типу CuZn37, CuZn37Pb1	до 1 року
SITMA C80 750i	Обертальний вал	латуні типу CuZn37, CuZn37Pb1	до 1 року
Каландарна машина «PLAMAG Rondoset RO 170»	Всі вали накатної та розкатної групи (комбінований рух)	латуні типу CuZn37, CuZn37Pb1	до 0,5 року

В умовах роботи при високих швидкостях обертання (>1000 об./хв.) і помірних навантаженнях до 4,0 МПа для вкладишів підшипників найчастіше застосовують литі латуні CuZn37, CuZn37Pb1 (ЕН стандарт), С27200, С33500 (ASTM стандарти США), що є аналогами вітчизняних латуней Л63, ЛС59-1 та ін.

Головне, що об'єднує застосовані нині литі підшипники з бронз типу Cu83Sn7Zn3Pb7, CuSn5ZnPb та латуней типу CuZn37, CuZn37Pb1, це їх високий знос (більше 800–1000 мкм/км) у важких умовах роботи високообертової друкарської техніки та високий коефіцієнт тертя (0,37–0,39), оскільки рідке мастило стає не ефективним, не здатним змащувати контактні поверхні, що скорочує термін корисного використання таких деталей і потребує їх заміни (табл. 1.1).

Як видно з табл. 1.1, термін служби застосовуваних на сьогоднішній день матеріалів для підшипників ковзання з литих бронз або латуней досить низький, що збільшує кількість міжремонтних періодів поліграфічних машин [1, 3].

Композитні матеріали для антифрикційних деталей виготовляються з порошків шляхом пресування і спікання в захисній атмосфері, застосовують їх навіть при мінімальному змазуванні підшипникових вузлів поліграфічних агрегатів. Матеріали мають пористу структуру з об'ємом пор 15–35%, який заповнюється маслом (шляхом спеціального просочення вкладнів гарячим мастилом), або включенням до складу матеріалу елементів, які виконують функцію твердого мастила [1–4].

З неметалевих матеріалів для вкладнів підшипників та вузлів тертя поліграфічного обладнання, що працює у не високих умовах навантаження (деякі листові машини), застосовують пластмаси, фторопласти та іноді графітові матеріали [4].

Істотна особливість більшості неметалевих підшипникових матеріалів у зв'язку з їх низькою теплопровідністю полягає в тому, що для них кращим

змащувальним матеріалом є вода, що забезпечує добре охолодження. Такі деталі здебільшого застосовуються у неважких умовах роботи .

Поліамідні (капронові) вкладні володіють достатньою технологічністю і достатньо високими антифрикційними властивостями капрону. Швидкість зношування капрону в умовах тертя при граничному змащуванні в 3-4 рази нижче за швидкість зношування бронзи, але їх застосування обмежене тихохідними вузлами та механізмами поліграфічних машин [2, 4].

Композитні антифрикційні матеріали широкого спектру хімічного складу застосовуються в основному для роботи без змащувального матеріалу в найрізноманітніших умовах експлуатації. Вони здатні забезпечувати низький коефіцієнт тертя, зберігати антифрикційні властивості в найширшому діапазоні температур (від -200 до +1000 °C), мають високу теплопровідність і корозійну стійкість. Тому їх можна широко застосовувати в важких умовах експлуатації поліграфічного обладнання, при роботі за підвищених і високих швидкостей обертання, підвищених і високих навантажень, в агресивних середовищах тощо [1–4, 36, 38].

Композиційні антифрикційні матеріали мають цінні переваги у порівнянні з литими, а саме: можливість точного регулювання антифрикційних властивостей за рахунок введення різного роду домішок, як взаємодіючих, так і не взаємодіючих з металом основи, великою економією металів внаслідок майже повної відсутності втрат у стружку, економією енерговитрат, що особливо привабливо у зв'язку з нестачею енергетичних ресурсів, і нарешті, зведенням до мінімуму забруднення навколишнього середовища.

Серед великої множинності антифрикційних композиційних спечених матеріалів, що призначені для найрізноманітніших умов роботи, окреме місце займають матеріали, які працюють у важких умовах експлуатації [1–3, 36].

Для використання при підвищених швидкостях (або температурах до 600°C) розроблено і широко застосовується цілий *клас металографітових*

матеріалів на основі Fe, Cu, бронзи або латуні, сплавів Cr-Co, сплавів Ni-Fe і т.п.

Найбільш розповсюджені матеріали даного класу і області використання наведено у табл. 1.2.

Фізико-механічні і антифрикційні властивості металографітових матеріалів у значній мірі визначаються їх складом та щільністю.

Так, матеріал на основі заліза (табл. 1.2, №2) має твердість HB = 18–25 кгс/мм², його коефіцієнт тертя при вказаних умовах дорівнює 0,36–0,38 [2, 4]. Матеріал на основі міді (табл. 1.2, №3) має HB = 28–30 кгс/мм²; $\sigma_{ст.}$ = 11–13 кгс/мм²; a_k = 0,05–0,07 кгс·м/см² та μ = 0,15–0,18 [4]. Матеріал, що працює у діапазоні –200÷+600 °С (табл. 1.2, №1) має властивості: $\sigma_{виг.}$ = 6,3–11,83 кгс/мм²; $\sigma_{в.}$ = 5–12 кгс/мм²; $\sigma_{ст.}$ = 18–21,3 кгс/мм² і μ = 0,05–2,0 [4].

Структура основи матеріалу залежить від його хімічного складу та характеру взаємодії графіту та основи.

Типова структура матеріалів композиції метал-графіт складається з металевої основи, графіту і деякої кількості пор (8–15%).

Величина зносу та коефіцієнт тертя металографітових матеріалів залежать також від складу матеріалів, насамперед, від кількості графіту та умов роботи.

Таблиця 1.2. Склади і області використання деяких металографітових спечених матеріалів [4]

№ з/п	Вміст С, мас. %	Домішки, мас. %	Область використання
На основі заліза			
1.	17-30	-	Для роботи без змащування у важких умовах тертя (t° = -200÷+600 °С, у воді, газах при швидкостях до 45 м/с і $P < 5$ кгс/см ²)
2.	10-15	1,5-3,5 Bi; As, Sb	Для роботи у діапазоні температур 50÷370 °С при $P = 2 \div 10$ кгс/см ² і $V = 4,35 \div 35,8$ м/с
На основі міді			
3.	15-16	10-12 Pb; 9-10 Sn	Для роботи без змащування при температурах до 300 °С
На основі бронзи або латуні			
4.	4-25	-	Підшипники для роботи при $V = 8-10$ м/с або температурах -200÷+350 °С при P до 20 кгс/см ²

За сприятливих умов коефіцієнт тертя металографітових матеріалів знаходиться у межах 0,05, а при несприятливих – наближається до 0,3–0,8. Властивості і режими роботи деяких металографітових композицій наведено у табл. 1.3.

Так, матеріал на основі міді МГр30ЖН1К при навантаженні 10 кгс/см², швидкості ковзання 1 м/с при терті по загартованій сталі у воді має знос І= 3,3 мкм/км, в той час як пластографіт АТМ-1 при тих самих умовах має І=20 мкм/км [2, 4, 36].

Таблиця 1.3. Властивості і режими роботи металографітових матеріалів [2, 4, 38]

Характеристика	Склад, мас. %					
	Бронза + 6С	Бронза + 8С	Бронза + 10С	Бронза + 8С + 10Рб	Залізо + 6С	Залізо + 8С
Межа міцності при 20 °С:						
на розтяг, кгс/мм ²	6,2	4,35	2,64	3,10	11,6	8,05
на стискання, кгс/мм ²	28,8	24,4	22,8	19,5	49,1	26,6
Твердість за Бринелем, кгс/мм ²	46-81	41,7	39-68	39-62	37-65	33-57
Коефіцієнт лінійного розширення, $\times 10^{-6}$, 1/град.	18	17	16	20	13	12
Коефіцієнт тертя при роботі без мастила по загартованій сталі при Р ≤ 5 кгс/см ² та V = 1 м/с	0,2-0,4	0,2-0,4	0,2-0,4	0,2-0,4	0,3-0,6	0,3-0,6
Робоча температура (на повітрі), °С	204	204	204	204	593	593

Це пов'язано з більш високими параметрами несучої спроможності та зносостійкості металографітових матеріалів, що дозволило виготовляти з них та широко застосовувати підшипники, торцеві ущільнення у різних галузях машинобудування, насамперед, де присутній примусовий нагрів або дія підвищених швидкостей обертання (до 700 об./хв.).

При розробленні матеріалів, здатних працювати при підвищених та високих швидкостях або температурах, необхідно вирішувати такі завдання, як забезпечення високої жароміцності, стійкості проти окиснення та доброї антифрикційності.

Для задоволення таких вимог окрім вище згаданих металографітових матеріалів було розроблено велику кількість інших антифрикційних спечених матеріалів на основі заліза, нержавіючих сталей, міді, нікелю, кобальту тощо (табл. 1.4).

Антифрикційні властивості порошкових матеріалів забезпечуються введенням у пори або у вихідну шахту присадок (графіту, сульфідів, селенідів, фторидів та ін.). Підвищення жароміцності і жаростійкості досягається легуванням сплавів на основі заліза хромом, нікелем, молібденом [2, 4].

Таблиця 1.4. Склад та області використання спечених антифрикційних матеріалів на основі заліза та міді [2, 4]

№ з/п	Хімічний склад, мас. %							Антифрикційні домішки, мас. %	Область призначення і умови роботи
	C	Cr	B	Mo	Sn	Ni	Інші елементи		
На основі заліза									
1.	1,5-3,5	-	-	13-20	-	-	-	-	Для роботи при 400°C.
2.	-	-	-	3-20	-	-	-	2-10 CaF ₂	Підшипники для роботи при швидкостях >5 м/с або 400°C, тертя без змащування.
3.	-	-	-	-	1,4	1,8	11,8 Cu	1-30 WS ₂ або CaF ₂	Деталі, що працюють при температурах >200°C або швидкостях 5-7 м/с.
4.	10-15	-	-	-	-	-	1,5-3,5 Bi, As або Sb	-	Для роботи при температурах 50-370°C навантаженнях 2-10 кгс/см ² , швидкостях 4,35-35,8 м/с.
5.	0,6-2,0	-	-	0,5-5	-	-	6-15 Co, 1-5 Cu	-	Для роботи при 100-600°C або швидкостях до 5 м/с.
6.	0,07-0,8	13-32	0,04-10	-	-	0,5-20	-	0,05-7,0 S	Підшипники поворотних пристроїв двигунів, працюючих при 650°C.
На основі міді									
7.	-	-	-	-	10,0	-	-	0-50 WS ₂ або MoS ₂	Для роботи при терті на повітрі, у вакуумі до 600°C або швидкостях до 10 м/с.
8.	-	-	-	-	4-10	2-15	-	25 WS ₂	Робочі температури 400-450°C або швидкості ковзання до 15 м/с.

1.3.2. Антифрикційні деталі на основі алюмінію для помірних та легких режимів роботи

Литі антифрикційні деталі на основі сплавів алюмінію

У номенклатурі постдрукарського обладнання, яке займає одне з провідних місць в поліграфічній промисловості і є невід'ємною ланкою в технологічному процесі виготовлення друкарської продукції, широко застосовується таке устаткування, як брошуровально-палітурне обладнання, фальцапарати, різальні машини, машини для вклеювання окремих елементів в упаковку, автоматичних кашировальних машин та ін. Робота такої техніки

пов'язана з використанням багатьох деталей контактної взаємодії, що виготовлені, насамперед, з антифрикційних алюмінієвих сплавів.

Алюмінієві антифрикційні сплави призначені для виготовлення литих направляючих, скоб, монометалевих і біметалевих підшипників, а також біметалевих стрічок методом прокатування з наступним штампуванням з них вкладишів, які традиційно застосовуються у постдрукарському обладнанні. Марки, склад, деякі властивості та умови роботи наведено в табл. 1.5 [2, 15].

Таблиця 1.5. Алюмінієві антифрикційні сплави. Марки, масова частка хімічних елементів, властивості, умови роботи [2, 15]

Марка *	Sn	Cu	Si	Mn, Ni, Sb	Наван- тажен- ня, МПа	Швид- кість, м/с	Темпе- ратура , °C	Твер- дість вала НВ, МПа	Коефі- цієнт тертя з масти- лом
АО3-7	2,5–3,7	7,0–8,5	0,6– 1,2	Mn 0,5– 0,8	20,0	15	100	320	0,008
АО9-2	8,0–10,0	2,0–2,5	0,3– 0,7	Ni 0,8– 1,2	25,0	15	100	250	0,008
АО6-1	5,0–7,0	0,7–1,3	-	Ni 0,7– 1,3	32,0	20	120	250	0,008
АО9-1	8,0–10,0	0,8–1,2	-	-	30,0	20	120	250	0,009
АО20- 1	17,0–23,0	0,7–1,2	-	-	30,0	20	120	200	0,009
АН2,5	-	-	-	Ni 2,7– 3,3	20,0	15	100	250	0,01
АСМ	-	-	-	Sb 3,5– 6,5	20,0	10	100	250	0,009
АМС Т	-	0,7–1,2	0,03– 0,30	Sb 4,6– 6,5	40,0	15	120	200	0,01

Примітка: *решта Al

Так, сплав АН2,5 застосовується для виливання вкладишів та одержання прокатуванням моно- і біметалевої стрічки з наступним штампуванням вкладишів, товщина антифрикційного шару яких менша за 0,5 мм.

Сплави АСМ, АМСТ використовуються для прокатування біметалевої стрічки з наступним штампуванням вкладишів, товщина антифрикційного шару яких менша за 0,5 мм.

М'яка основа у всіх антифрикційних алюмінієвих сплавах – це тверді розчини алюмінію з елементами, які містять цей сплав, а тверді вкраплення – хімічні сполуки в евтектиці з твердим розчином. Мікроструктура, наприклад,

сплаву АН2,5, складається з $\text{Al}(\text{Ni})$ + евтектика $[\text{Al}(\text{Ni}) + \text{NiAl}_3]$, а сплаву АОЗ-7 – $\text{Al}(\text{Cu}, \text{Si})$ + евтектика $[\text{Al}(\text{Cu}, \text{Si}) + \text{Cu Al}_2]$.

Твердість алюмінієвих тертьових деталей вища за твердість бабітів, тому можна використовувати тільки в парі з твердими валами (азотовані шийки валів, поверхнево загартовані шийки валів тощо), а температурний інтервал використання становить 100–120 °С [2, 15].

Литі антифрикційні деталі на основі сплавів алюмінію є невід’ємною ланкою в технологічному процесі функціонування постдрукарського обладнання, такого, як брошурувально-палітурне обладнання, фальцапарати (рис. 1.1), фальцювально-склеювальні машини, машини для вклеювання віконця в упаковку, автоматичні та напівавтоматичні кашировальні машини (рис. 1.2), паперорізальні апарати (рис 1.3) та ін., які займають одне з провідних місць в поліграфічній промисловості.



Рисунок 1.1. Загальний вигляд фальцювального апарата «Stahl FK-47 А»



Рисунок 1.2. Загальний вигляд напівавтоматичної кашировальної машини NB 1100 B/1300B



Рисунок 1.3. Загальний вигляд паперорізальної машини WOHLENBERG cut-tec 137

Деталі, що працюють у вузлах наведених машин (рис. 1.1 – 1.3.) піддаються дії навантажень 2,0 – 6,0 МПа, при швидкості ковзання 2 – 4 м/с зі змащуванням рідким мастилом та в умовах самозмащування (залежно від виду деталі у вузлі тієї чи іншої постдрукерської машини) [15].

Композиційні антифрикційні тертьові деталі на основі алюмінію

Згідно праць [2, 4] тертьові деталі, розроблені на основі алюмінію, мають високі антифрикційні характеристики, тому їх розглядають як перспективні замітники олов'янистих бронз як для роботи з мастилом, так і в умовах тертя без змащування.

Композиційні алюмінієві деталі мають високий коефіцієнт теплопровідності, завдяки чому робоча температура на поверхні тертя за інших однакових умов може бути нижчою, а довговічність і допустимі значення чинника несучої здатності $P \times V$ (де P – питоме навантаження; V – швидкість ковзання) при цьому вищі [2, 4], що видно з рис. 1.4.

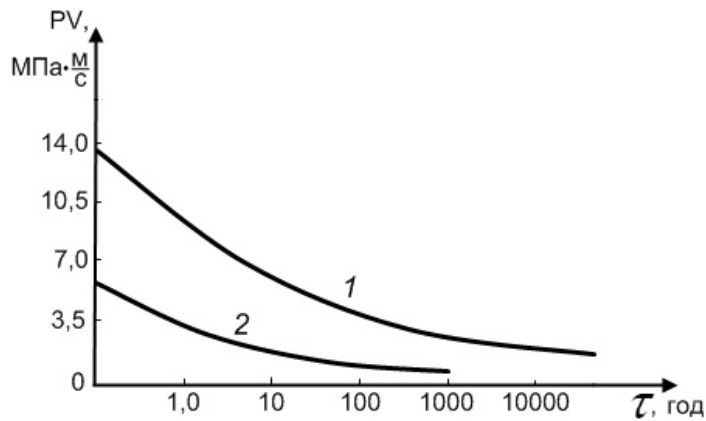


Рисунок 1.4. Залежність довговічності спечених тертьових деталей на основі алюмінію (1) і бронзи (2) від несучої здатності $P \times V$ в умовах роботи без змащування [4]

Тертьові деталі на основі алюмінію здебільшого леговані різними домішками і містять 10–60 % пор. Виготовляють їх із сумішей порошків або порошків лігатур різними методами залежно від складу деталі потрібної кінцевої пористості та призначення.

Для функціонування в умовах змащування алюмінієві пористі тертьові деталі просочують мастилом [2, 4]. Для умов тертя без змащування деталей піддають екструзії, ущільненню калібруванням, електророзрядному спіканню та іншим впливам, які дозволяють досягти щільності 95% і вище [4].

Додавання 5% Cu дозволяє одержати спечені вироби з крупними порами, які заповнюють мастилом. Якщо пористість становить 18–20 %, такі деталі мають $\sigma_b = 140$ МПа; $\sigma_{ст} = 170$ МПа, а за пористості 3–5 % – $\sigma_b = 130 - 150$ МПа; $\delta = 6 - 13\%$. Значно зміцнюють алюмінієві пористі деталі Mg, Ni. Уведення 0,1–5,0%Si та 4,0%Sn підвищує зносостійкість алюмінієвих деталей, а введення 0,1–5%Mg поліпшує їх антифрикційні властивості [4]. Склади і можливі застосування деяких порошкових деталей на основі Al наведено в табл. 1.6 [4].

Тертьові деталі на основі алюмінію, які містять Cu або Mg, а також обидва ці елементи рекомендуються для виготовлення підшипників, що працюють за низьких питомих навантажень у вузлах тертя, де профілактичний ремонт є небажаним, наприклад в електричних приладах, офісних апаратах (табл. 1.6, п.1).

Комплексне легування спеченого алюмінію дозволяє значно розширити параметри й умови його роботи (табл. 1.6, п. 2). Висока жароміцність, зносостійкість і теплопровідність притаманні деталям на основі Al, що містять 5–10 % одного чи декількох металів з групи Fe, Ni, Cr і 0,5–5,0 Si (табл. 1.6, п.4). Оксид алюмінію підвищує зносостійкість деталі і дозволяє використовувати його у приладобудуванні [4]. Оксидна плівка на частинках Al запобігає заволакуванню пор під навантаженням, а м'яка основа забезпечує хорошу припрацьовуваність деталі.

Таблиця 1.6. Склади та використання деяких спечених алюмінієвих деталей [4]

Додавання графіту, сульфідів, оксидів, карбідів, галоїдних та

№ з/п	Масова частка в хімічному складі, %									Застосування
	Cu	Mg	Si	Sn	Cr	Pb	Fe	Ni	Інші домішки	
1	0,25	1,0	-	-	-	-	-	-	-	Підшипники сільсько-господарських машин, офісних апаратів
2	0,5–0,6	0,3–2,0	5,0–50,0	1,0–4,0	-	-	-	-	0,3–2,0 Sb, просочення пор Pb	Підшипники для підвищених навантажень
3	0,5–10,0	0,2–2,0	5,0–25,0	-	0,2–5,0	1,0–25,0	-	0,5–5,0	0,5–5,0 MoS ₂	Ковзні ущільнення
4	0,3–5,0	0,3–3,0	--	-	4,0–5,0	-	4,0–5,0	4,0–5,0	0,5–5,0 SiC	Поршні двигунів внутрішнього згорання

інтерметалідних сполук дозволяє використовувати сплави на основі Al для виготовлення деталей двигунів внутрішнього згорання [2, 4] і у вузлах тертя, що працюють без змащування. Уведення MoS₂ у пори алюмінієвої деталі забезпечує отримання на початку функціонування однакового коефіцієнта тертя на повітрі, в азоті та у вакуумі. За подальшої експлуатації значення коефіцієнта тертя зменшується у процесі тертя у вакуумі й азоті і збільшується на повітрі [4]. Властивості деяких порошкових антифрикційних деталей на основі алюмінію наведено у табл. 1.7 [4].

Як видно з табл. 1.7 значно поліпшує властивості алюмінієвих деталей графіт, який вводять до складу деталей (3 – 4 %), використовуваних у режимі самозмащування, здатних працювати за підвищених температур. Однак ці деталі повинні мати високу щільність, оскільки наявність графіту знижує їх міцність (табл. 1.7). Зносостійкі тертьові деталі мають густину $2,47 - 2,7 \text{ г/см}^3$, питому міцність (відношення міцності під час вигинання до густини) від 12 до 18 порівняно з 5 до 6 для сплавів на основі міді, густина якої 8 г/см^3 . За даними [4] зносостійкість алюмінієвих деталей у 1,5 – 2 рази вища, ніж відомих деталей на мідній основі.

Таблиця 1.7. Властивості графітізованих алюмінієвих деталей пористістю 5–10% [4, 21]

Характеристика	АЖГр6–3	АМГр10–3
Густина, г/см^3	2,6 – 2,8	2,8 – 2,9
Міцність на стискання $\sigma_{\text{ст.}}$, МПа	140 – 150	230 – 240
Твердість НВ, МПа	200 – 240	300 – 350
Ударна в'язкість a_k , Дж/м ² (зразки без надрізу)	4 – 5	–
Коефіцієнт тертя з мастилом	0,005 – 0,008	–
Допустимі навантаження, якщо $V=2-3 \text{ м/с}$, МПа	4,0 – 6,0	3,5 – 5,0
Граничнодопустима робоча температура, °С	100 – 120	100 – 120

При виготовленні композиційних антифрикційних деталей на основі Al, що працюють за підвищених температур, у вихідний порошок додають порошок твердого сплаву (у мас. %): 34–94 WC, 1– 60 TiC і 5–6 Co або 35–75 TiC, 15–50Ni, 5–15Co і 5–15Cr [4]. Поліпшення зносостійкості, термостійкості та корозійної стійкості спечених алюмінієвих тертьових деталей, що містять Mn, Mg, Si, Cu, Cr, Ni і Fe, досягається додаванням 2–50 % BN [4, 21]. Міцність під час вигинання зносостійкої деталі підвищується до $\sigma_{\text{виг.}}=380 \text{ МПа}$.

Узагальнюючи вищенаведені позитивні якості композиційних деталей на основі алюмінію слід підкреслити, що для них загальним характерним недоліком є висока вартість вихідних порошків і дорога технологія їх виготовлення.

Композитні матеріали на основі шліфувальних металевих відходів

Антифрикційні деталі у вузлах тертя формних, друкарських, офсетних циліндрів працюють за підвищених швидкостей обертання >500 об./хв., за навантажень 3,0–5,0 МПа на повітрі, що може спричинювати розігрів робочих поверхонь до $400\text{--}500^\circ\text{C}$. Для важких умов роботи розроблено і використовується нині великий асортимент литих і порошкових антифрикційних матеріалів на основі заліза, міді та ін. [1–3].

Головне, що їх об'єднує – це великий знос сполучених деталей, зростання коефіцієнтів тертя за таких умов, а в багатьох випадках ще й висока вартість [1–3].

Так, у теперішній час у вузлах офсетних циліндрів рулонних газетних машин типу Solna D390 та Solna D480 (Швеція), Heidelberg Speedmaster SM 102 FP+L застосовуються підшипники на основі литих бронз $\text{Cu}_{83}\text{Sn}_{7}\text{Zn}_{3}\text{Pb}_{7}$ або $\text{Cu}_{85}\text{Sn}_{5}\text{Zn}_{5}\text{Pb}_{5}$ (Стандарт США ASTM C93200). Такі бронзові підшипники працюють лише в умовах змащування рідким маслом [1–3].

У цих умовах змащувальне мастило стає неефективним за високих швидкостей обертання через викидання його із зони контакту під дією відцентрових сил. У результаті цього поверхні тертя залишаються незахищеними. Крім того контактні поверхні інтенсивно окиснюються під дією температур, що виникають під час тертя на повітрі.

Описані умови призводять до схоплювання поверхонь контакту, що веде до повної деструкції вузла тертя офсетного циліндра.

Це повною мірою стосується деталей контактних пар на основі литих алюмінієвих сплавів, які піддаються тертю та зношуванню у помірних і легких режимах навантаження, зокрема, у вузлах постдрукарських машин таких, як автоматичні машини для виробництва паперових харчових пакетів Victoria C-420 (Компанія «Вікторія Трейдинг», Китай), апарати для вклеювання полімерних віконць «Heidelberg+Schroder» (Німеччина), машини для вклеювання прозорих віконць в упаковку типу WFD-600 (Китай), каширувально-склеювальні лінії для склеювання картону-лайнера та мікрогофрокартону Heidelberg та Bobst (Німеччина), автоматичні

високошвидкісні лінії з виробництва коробок з віконцем JMD-T1020C/JMD-T1200C (Китай) тощо.

Окремо слід сказати, що всі литі матеріали мають суттєвий недолік. Вони не здатні поєднувати у своєму складі абсолютно різні за природою речовини, а саме, з одного боку, для формування міцної матриці, а з іншого боку, містити антизадирні добавки у вигляді сульфідів, оксидів, халькогенідів, фторидів для мінімізації тертя та зношування [2, 4].

Таким чином, поєднання різних за природою речовин є неможливим за використання традиційної технології переплаву та лиття.

Це є причиною швидкого зносу литих деталей, виходу з ладу вузлів тертя і машин загалом, а також до великих матеріальних і фінансових витрат.

Порошкові антифрикційні матеріали позбавлені цих недоліків і мають перед литими матеріалами багато переваг та широкий спектр можливостей, коли стає можливим поєднувати ті речовини, які методами лиття не поєднуються [1, 2, 4].

Однак, суттєвим негативним фактором для порошкових матеріалів є їх дуже висока вартість, внаслідок дорогих вихідних порошків, складності та дорожнечі обладнання для їх виготовлення. Це стримує широке використання композитних матеріалів.

З іншого боку сучасний розвиток техніки вимагає від учених твердо дотримуватися сукупного поєднання технологічних і технічних аспектів розробок з економічними під час розроблення та впровадження у виробництво нових матеріалів та деталей з них для об'єктів нової техніки.

Потрібен пошук дешевих, широкодоступних, економічно вигідних видів сировини для створення антифрикційних матеріалів, здатних забезпечити надійність, довговічність, високу працездатність вузлів тертя, особливо у важких умовах роботи.

При цьому такі матеріали та деталі з них мають бути виготовлені за нескладною технологією і з недорогої сировини.

З цього приводу автори монографії звернули особливу увагу на те, що в сучасному машинобудуванні існують великі сировинні резерви, які практично не використовуються при виготовленні деталей різного призначення [1, 2, 25, 28–30, 39–60].

Такою дешевою, доступною і у великих кількостях сировиною є шліфувальні відходи кольорових і чорних металів і сплавів машинобудівного та приладобудівного виробництва. Ці відходи щодня з'являються на операціях шліфування штампів, ріжучого інструменту, шарикопідшипників, поршнів двигунів та інших конструкційних деталей. Вони безповоротно йдуть у відвали і не використовуються в подальшому циклі виробництва через їхнє забруднення абразивом від шліфувальних кругів [1, 2, 25, 28–30, 39–60].

Це викликає необхідність у будівництві безлічі додаткових полігонів для захоронення таких відходів у всіх країнах, що непоправно забруднює екосистему та біосферу і є гострою екологічною проблемою глобального масштабу.

Багато вчених в усьому світі присвячують свої дослідження проблемі утилізації і повторного використання відходів чорних і кольорових металів. Зазвичай такі відходи являють собою металеву стружку, скраб тощо [2, 61–63]. Такі відходи є вихідною сировиною для виробництва нових конструкційних деталей, інструменту, які виготовляються за різними технологіями.

Втім шліфувальні металеві відходи не використовуються у повторному циклі виробництва в наслідок їх забрудненості абразивом від шліфувальних кругів [1, 2, 25, 28–30, 39–60].

Водночас, металеві шліфувальні відходи чорних і кольорових сплавів містять у своєму складі цінні легувальні елементи Cr, Mo, W, Si, Ni, V, Al, Co, Ti, Nb, Cu, Mg, Mn та ін.

Присутність у шліфувальних відходах перелічених легувальних елементів, які в різних кількостях і комбінаціях містяться у вторинній сировині, зробила їх привабливими для подальшого використання з метою

одержання з них якісних високолегованих композитів антифрикційного призначення та деталей з них [1, 2, 25, 28–30, 39–60].

Використання промислових шліфувальних відходів є безумовно важливим фактом з багатьох причин. По-перше, це найдешевша сировина; по-друге, ця сировина надзвичайно цінна з точки зору наявності легуючих елементів у порошках-відходах, і, нарешті, по-третє, доступність сировини у великих кількостях для реалізації завдань пошуку нових видів сировини.

Більш того, завдяки утилізації такої цінної сировини у великих кількостях і використанні її у повторному циклі виробництва, одночасно частково може вирішуватися глобальна екологічна проблема захисту довкілля від забруднень.

Паралельно відкриваються широкі можливості для використання дешевих, доступних і ефективних видів сировини, і створення інноваційних ресурсо- та енергозберігаючих технологій.

Шліфувальні відходи утворюються на фінішних операціях виготовлення різноманітних деталей з чорних і кольорових сплавів, а саме, на операції шліфування. Оскільки процес шліфування здійснюється з використанням абразивного інструменту (абразивних кругів), то частинки абразиву неминуче змішуються з металевою мікростружкою.

Це є серйозною перешкодою для подальшого використання металевих відходів, тому такі шліфувальні відходи відвозять у відвали на полігони.

Одним із головних завдань є отримання очищеної вихідної сировини зі шліфувальних відходів для її подальшого використання під час створення нових матеріалів.

Автори монографії ч.2 [39–60] розробили технологію регенерації відходів і отримали перші позитивні результати зі створення нових високотемпературних антифрикційних композитів на основі регенованих шліфувальних відходів сталей ШХ15СГ, Р6М5, 7ХГ2ВМФ (аналог кулькопідшипникової сталі 52100, швидкорізальної сталі М2, інструментальної сталі АМ6Ф2, AISI стандарт, США, відповідно).

Композити на основі порошків-відходів цих сталей з домішками твердого мастила CaF_2 виявились здатними працювати при підвищених температурах, а також витримувати підвищені навантаження в умовах окислювального середовища – повітря [39–60].

Окремо слід приділити увагу шліфувальним відходам алюмінієвих сплавів.

Алюміній є одним із найбільш переробних та придатних для повторного використання матеріалів, що використовуються сьогодні. Високоякісний та нескінченно придатний для повторного використання алюміній – це матеріал, цінний для більш замкнутої та стійкої економіки [61–63].

У світі багато підприємств успішно реалізують масштабну переробку алюмінієвих промислових відходів. Це, насамперед, переробка банок від напоїв і харчових продуктів, алюмінієвий скрап, відходи електричної галузі тощо [61–63].

Вторинне виробництво – це екологічно безпечний процес, який приблизно на 95% енергоефективніший, ніж первинне виробництво [61–63]. Збільшення використання переробленого алюмінію у виробництві принесло значні економічні та екологічні переваги як промисловості, так і споживачам. Понад 80 відсотків виробництва в США сьогодні припадає на виробництво переробленого (або вторинного) алюмінію [61–63].

Незалежно від галузі інноватори покладаються на алюміній для отримання екологічніших і сталих рішень.

Пошук таких рішень повною мірою стосується і поліграфічної галузі. Друкарське і пост-друкарське обладнання містить багато деталей з алюмінієвих сплавів, у тому числі антифрикційних, які працюють при швидкостях ковзання до 3.0 м/с і навантаженнях до 4.0 МПа.

Довговічність систем, вузлів тертя і окремих контактних деталей такого обладнання визначає якість друкарської продукції.

В секціях та вузлах тертя вище означеного постдрукарського обладнання використовуються антифрикційні деталі з литих алюмінієвих сплавів, що

працюють з рідким мастилом. Такі деталі виготовляються з легованих ливарних або деформованих алюмінієвих сплавів типів EN AB- AlSi9Mg , EN AB- AlSi10Mg , EN AB- AlSi9Cu1Mg , EN AB- AlSi12CuNiMg (стандарт EN 1676:2020), сплавів A13320, A03360, A13600, A14130, A04130 (ASTM V108, V179, V179, стандарти USA), сплавів ADC3, AC8A, AC3A, 2117, 2014 (JIS H 5202, JIS H4000, JIS H4140, стандарти Japan), сплавів LM9, LM20, 4L33, L75, LM13, 2024 (серія BS, стандарти UK) та ін.

Все, що об'єднує такі литі алюмінієві антифрикційні деталі, це незадовільні функціональні властивості при роботі з рідким мастилом.

Така проблема пов'язана з не завжди стабільною подачею мастила у зону контакту, при раптовій зупинці подачі мастила, закупорці подавальних пристроїв в наслідок полімеризації мастила або в інших аварійних ситуаціях.

У таких випадках має місце безпосередній контакт деталей, що призводить до їх швидкого зносу. В наслідок цього істотно погіршується якість друкарських виробів або взагалі має місце брак продукції, який потребує утилізації і подальшої переробки. Це викликає додаткові фінансові і матеріальні витрати.

В такій ситуації знос окремих литих алюмінієвих деталей призводить до виходу з ладу всього вузла або секції, і, як наслідок, друкарської машини загалом. Це викликає зупинку обладнання, потребу у ремонтних роботах, заміну і встановлення запасних частин і т.п., що значно здорожчує продукцію друкарства.

Описана проблема потребує вирішення для стабілізації роботи як окремих антифрикційних алюмінієвих деталей, так і постдрукарського обладнання у цілому.

Для цього одним зі сталих і екологічних рішень стало використання методів порошкової металургії для створення алюмінієвих композитів антифрикційного призначення, що досліджувалось авторами робіт [64–73], про що буде сказано нижче.

Автори [4, 21] досліджували алюмінієві композити зі стандартних чистих порошків, зміцнені сталевими частинками з добавками графіту як твердого мастила. Отримані результати показали механізм зношування Al-композиту при швидкості 80 об./хв. В роботах [4, 21] розглянуто антифрикційну поведінку Al композитів з додаванням різних твердих мастил. Розроблені композити мали достатньо високі механічні і трибологічні характеристики для різних умов роботи. Ці композити були рекомендовані для конструкційного застосування в аерокосмічній, автомобільній та військовій промисловості [4–21].

Але, не зважаючи на високий рівень властивостей, всі порошкові композити об'єднує їх висока вартість. Як було зазначено вище, це пов'язано з високою вартістю вихідної сировини – порошків та обладнання для їх виготовлення.

Вирішити означену проблему можна шляхом застосування інноваційних технологій і нових матеріалів з високими функціональними властивостями, що виготовлені з ефективної сировини.

Такою альтернативною і ефективною сировиною є шліфувальні відходи алюмінієвих сплавів. Велика кількість таких шліфувальних відходів утворюється щоденно на промислових підприємствах.

Шліфувальні Al відходи утворюються на операціях шліфування литих алюмінієвих деталей. Ці відходи є забрудненими абразивом від шліфувальних кругів і не використовуються у повторному циклі виробництва, не зважаючи на вміст цінних легуючих елементів у них (Cu, Mn, Cr, Ni, Si, Ti, Cd та ін.) [64–73].

Такі шліфувальні відходи вивозяться на полігони, збільшуючи їх щоденно, і являють собою загрозу для природної екосистеми.

Тем не менш, такі дослідження ще залишаються піонерськими, вони не охоплюють багатьох марок алюмінієвих сплавів, багато технологічних і наукових питань є не з'ясованими, що не дозволяє зробити узагальнень.

До числа невивчених питань належать аспекти можливого використання ширшої номенклатури шліфувальних відходів різних марок сталей та алюмінієвих сплавів, можливості їх застосування для створення ефективних нових композитів і антифрикційних деталей з них, закономірностей формування їх структури та комплексу властивостей, поведінка деталей з нових композитів у різних умовах експлуатації та ін.

Тому питання створення нових композиційних антифрикційних матеріалів і ефективних деталей з них, що мають високі експлуатаційні властивості для широкого діапазону умов роботи контактних з'єднань друкарського і постдрукарського обладнання, зокрема, на основі заліза та алюмінієвих сплавів, і такі, що виготовлені з дешевої і цінної сировини, є вельми актуальним і потребує виконання глибоких досліджень.

Вказані аргументи стали мотивацією для проведення наукових досліджень авторів монографії ч. 2 для розширення можливостей використання шліфувальних відходів цінних сталевих і алюмінієвих сплавів для їх подальшого ефективного використання з одночасним частковим вирішенням екологічного питання зі зменшення навантаження на екосистему, оскільки екологічні проблеми із забруднення довкілля набули великого значення у світі в останні десятиріччя.

1.4. Фінішне абразивне оброблення антифрикційних деталей друкарського і постдрукарського обладнання

Кожна деталь друкарської машини повинна мати певні експлуатаційні властивості - міцність, зносостійкість, довговічність і т.д. Однак залежать вони не тільки від матеріалу, з якого деталь виготовлена, а й значною мірою від шорсткості поверхні деталі.

Чистова обробка відповідних тертьових деталей виконується не тільки для отримання точної та гладкої поверхні, але і для найбільш високих механічних і фізичних властивостей поверхневого шару.

Бурхливе зростання технічного прогресу пред'являє все більші вимоги до сучасних машин, а це змушує розробників шукати нові більш досконалі методи обробки поверхні деталей. Це повною мірою відноситься до тертьових деталей поліграфічної техніки.

На сьогодні для механічної обробки деталей друкарських і постдрукарських машин широко застосовують різноманітні відомі і відпрацьовані методи абразивної обробки.

Загалом, як відомо [74–82], абразивне оброблення – процес формотворення деталей різанням значною кількістю абразивних часток (зерен), і є досить поширеним у всіх сферах машинобудівного виробництва. Так, на підприємствах автомобілебудування абразивними інструментами працюють до 30%, а у підшипниковій промисловості – до 80% верстатів. Деякі матеріали (кераміка, тверді сплави, природний камінь) взагалі не можуть бути ефективно оброблені іншими механічними методами.

Робочі процеси абразивного оброблення розрізняються за видом використовуваного інструменту, технологічного середовища, матеріалом абразивних часток, кінематикою робочих рухів та ін. Сутністю оброблення, є направлене абразивне (механічне) зношування матеріалу заготовки у результаті ріжучої або дряпаючої дії твердіших часток інструменту [74–82].

За призначенням процес алмазного абразивного оброблення прийнято поділяти на обдирне, чорнове та чистове шліфування і викінчувальні (фінішні) методи [74–84]:

- Обдирне (силове) шліфування застосовують при обробленні поверхонь, для яких припустимі значні відхилення форми, велика глибина дефектного шару. Продуктивність оброблення може сягати 5 кг/хв.

- Чорнове (напівчистове) шліфування виконують перед подальшим чистовим обробленням, або при обробленні поверхонь з низькими вимогами щодо точності і шорсткості (точність оброблення 8–10 квалітет, $Ra = 2,5 - 6,3$ мкм).

- Чистове шліфування використовують як остаточний метод оброблення

або перед подальшим викінчувальним (фінішним) обробленням поверхонь (точність оброблення 6 – 8 квалітет і шорсткість поверхні $R_a = 0,16 - 1,25$ мкм).

• Викінчувально-абразивні методи [74–82] застосовують для задоволення найвищих вимог щодо точності оброблення, шорсткості поверхні, фізико-механічних властивостей поверхневого шару. Це тонке шліфування, хонінгування, суперфінішування, доведення, абразивне оброблення гнучкими стрічками і пелюстковими кругами, полірування, віброабразивне, магнітно-абразивне оброблення, полірування ущільненим потоком абразиву та ін. При цьому забезпечується точність у межах 5 – 6 квалітетів і шорсткість поверхні $R_a = 0,04 - 0,16$ мкм (тонке шліфування) та 3 – 5 квалітетів $R_a = 0,04 - 0,16$ мкм при притиранні.

1.4.1. Огляд абразивних матеріалів

Як відомо, всі абразивні матеріали [85, 86] поділяють на дві групи: натуральні (природні) і штучні (синтетичні).

Природні матеріали (кремінь, наждак, корунд, гранат, алмаз та ін.) не знаходять широкого використання в абразивних інструментах. Більш часто для процесів полірування і доведення використовуються: пемза, польовий шпат, крокус, крейда, тальк, каолін, віденське вапно.

Серед штучних абразивних матеріалів розрізняють абразиви високої твердості (електрокорунд, карбід кремнію, карбід бору) і надтверді матеріали (НТМ) – синтетичний алмаз (АС) і кубічний нітрид бору (КНБ). Наприклад, КНБ випускається під такими торгівельними марками: кубоніт – Україна; ельбор – країни бувшого СРСР; белбор – Білорусь; борозон (borozon) – США; CBN (cubic boron nitride) – Японія і Китай.

Сировиною для виробництва абразивів високої твердості служать руди і мінерали, що містять велику кількість кристалів, таких як оксид алюмінію (Al_2O_3) і кварц (SiO_2).

Надтверді абразивні матеріали отримують у результаті синтезу при надвисокому тиску і температурі з графіту (синтетичний алмаз) і

гексагонального нітриду бору (КНБ) з подальшим подрібненням шихти, очищенням і розсіванням.

Електрокорунд – це кристалічний оксид алюмінію Al_2O_3 , що є очищеним продуктом плавки глинозему (бокситів). Розрізняють декілька видів електрокорунду: нормальний, білий, хромистий, титановий, монокорунд і сферо корунд [85, 86].

Електрокорунд нормальний (марки: 16А, 15А, НА, 13А, 12А) найширше використовується у промисловості. Застосовується при чорновому, напівчистовому і чистовому шліфуванні сталей і чавунів, а також для загострювання ріжучого інструменту з інструментальної сталі [85, 86].

Електрокорунд білий (марки: 25А, 24А, 23А, 22А) містить менше домішок, тому перевершує за своїми різальними властивостями електрокорунд нормальний. Він застосовується при шліфуванні міцних і в'язких сталей (незагартованих і загартованих), ковкого чавуну, для загострювання інструментів з швидкорізальної сталі [85, 86].

Електрокорунд хромистий (34А, 33А, 32А) отримують при плавці в електропечах глинозему з додаванням хромистої руди. Зерна його мають рожеве забарвлення. Вміст Al_2O_3 не менше 97 % і до 2% CrO [85, 86].

Електрокорунд титановий (37А) містить не менше 97 % Al_2O_3 і 2 % TiO_2 .

Висока в'язкість зерен і стабільність інших фізико-механічних властивостей електрокорунду хромистого і титанового створюють передумови для їх використання при напружених режимах шліфування вуглецевих і конструкційних сталей, а також для високоточних робіт і операцій доведення [85, 86].

Монокорунд (45А, 44А, 43А) містить 97 – 98 % Al_2O_3 . Застосовується для оброблення досить міцних конструкційних сталей, ковкого чавуну, швидкорізальної сталі [64].

Сфорокорунд – у вигляді порожнистих корундових сфер. У нім міститься більше 99 % Al_2O_3 і невелика кількість домішок. Він знаходить застосування при шліфуванні м'яких, в'язких і специфічних матеріалів – шкіри, гуми,

деревини, пластмас, кольорових металів. Інколи використовується як пороутворювач [85, 86].

Формокорунд містить 80–87% Al_2O_3 і Fe_2O_3 – не більше 15%. Виробляється у вигляді зерен циліндричної (С) і призматичної (Р) форм із розмірами: діаметр або ширина квадратного перетину 1,2 – 1,8 мм, довжина 3,8 – 8 мм. Переважно використовується для важких обдирних робіт.

Карбід кремнію (SiC) випускається двох видів: чорний – марок 52С, 53С, 54С, 55С (95–98% SiC) і зелений – марок 62С, 63С, 64С (98–99% SiC) [85, 86].

Якіснішим, але й дорожчим є зелений карбід кремнію. Він застосовується для загострювання твердосплавного інструменту. Карбід кремнію чорний є крихкішим і використовується для оброблення матеріалів з низькою межею міцності (чавуну, бронзи), в'язких металів і сплавів (м'якої латуні, алюмінію, міді), а також для оброблення таких неметалічних матеріалів, як шкіра, скло, мармур тощо.

У теперішній час для спрощення використовується позначення карбіду кремнію зеленого і чорного відповідно 6С і 5С, електрокорунду білого – 2А і т.д.

Карбід бору (B_4C) – складається з кристалічного карбіду бору (84 – 93 %) і невеликої кількості домішок. За твердістю та абразивною здатністю поступається тільки нітриду бору і алмазу. Застосовують в основному для приготування паст і суспензій для доведення і полірування твердих матеріалів. Може використовуватися для доведення твердосплавного інструменту, оскільки забезпечує мінімальний радіус округлення ріжучого леза до 6 – 10 мкм (електрокорунд – до 15 мкм), а також при обробленні досить твердих матеріалів, наприклад рубіна, корунду, кварцу тощо [31, 32, 35, 36, 85, 86].

Оксид алюмінію (Al_2O_3 – глинозем). Пасти на його основі використовуються для притирання і доведення сталевих і чавунних деталей [31, 32, 35, 36].

Оксид заліза (Fe_2O_3) – полірувальний порошок коричневого кольору (крокус). Застосовується для полірування скла, благородних і кольорових

металів [85].

Оксид хрому (Cr_2O_3) – твердий дрібнокристалічний абразивний матеріал темно-зеленого кольору або майже чорного кольору. Є найбільш ефективним матеріалом, вживаним для виготовлення полірувальних паст [31, 32, 35, 36].

Однією з найважливіших характеристик абразивних матеріалів є зернистість. За зернистістю абразивні матеріали поділяють на наступні групи [85, 86]: шліфзерно – 200, 160, 125, 100, 80, 63, 50, 40, 32, 25, 20, 16; шліф-порошки – 12, 10, 8, 6, 5, 4, 3; мікропорошки – M63, M50, M40, M28, M20, M14; тонкі мікропорошки – M10, M7, M5. Це умовне позначення шліфувального матеріалу, що пов'язане з розміром абразивних зерен основної фракції. Основною фракцією називається сукупність зерен певного розміру, що переважають у складі даного порошку за масою (у шліфзерні і шліф-порошках) або за числом зерен (у мікропорошках).

Зернистість шліфзерна і шліф-порошків визначається розміром сторони отвору нижнього контрольного сита для основної фракції (у сотих долях міліметра). Наприклад, шліфзерно 200 при просіюванні залишається на ситі з номінальними розмірами отворів сітки на просвіт, рівним 2000 мкм.

Алмазний порошок у загальному випадку – це сукупність кристалів і полікристалів розміром не більше 3000 мкм [85, 86].

Алмазні порошки прийнято поділяти на чотири основні групи [85, 86]: шліф-порошки (з розміром зерен 2500 – 60 мкм), мікропорошки (60 – 1 мкм), субмікропорошки (1 – 0,1 мкм) і нанопорошки (10^{-3} – 10^{-4} мкм).

Позначення марок алмазних шліф-порошків складається з буквених і цифрових індексів. Буквами АС позначаються порошки з синтетичних монокристалічних алмазів (буквою А – природний алмаз), АР – із синтетичних алмазних полікристалів. При цьому до індексу АР додається буква, що позначає тип вихідного полікристалічного алмазу: В – баллас, К – карбонадо, С – спеки. До буквених позначень додається цифровий індекс, що виражає для порошків АС значення міцності на стискування (не менше) у ньютонках, а у шліф-порошках АР – у сотих долях ньютонка.

Шліф-порошки синтетичних монокристалічних алмазів випускаються в Україні 12 марок міцності (ДСТУ 3292 – 95) починаючи з АС2 (4, 6, 15, 20, 32, 50, 65, 80, 100, 125) до АС160. Якщо порошок додатково розсортований за якою-небудь окремою властивістю після цифрового індексу додається відповідна буква: Т – термоміцні (термостійкі); Н – немагнітні, не електропровідні; А – підвищеної адсорбційної активності тощо.

У Інституті надтвердих матеріалів (ІНМ) НАН України розроблені і виробляються алмазні порошки підвищеної міцності марок АС200, АС250, АС300, АС350, АС400 (ТУ 88.090.029 – 98). Ці порошки застосовуються: у інструментах на металевих зв'язках; у правлячих інструментах; в інструментах для різання, свердління природного каменя, кераміки, бетону і бурових робіт [86].

Мікропорошки нормальної абразивної здатності, які позначаються індексом АСМ (алмазний синтетичний мікропорошок), і порошки підвищеної абразивної здатності (індекс АСН), випускається зернистістю від 60/40 до 1/0 мкм.

Зернистість шліф-порошку з надтвердих матеріалів визначається і характеризується розміром зерен основної фракції і позначається, на відміну від традиційних абразивів, дробом, чисельник якого відповідає розміру отворів верхнього сита, а знаменник – розміру отворів нижнього сита, на яких залишаються зерна розсіюваної фракції, утворюючи масу порошку певної зернистості, наприклад 400/315. Цифри відповідають розмірам отворів сит у мкм [86].

Для позначення субмікропорошків до буквених індексів додається цифра 5 або 1, що позначає вміст у порошку зерен крупної фракції (відповідно не більше 5 або 1 %). Субмікропорошки випускаються 6 зернистостей: АСМ5 1/0,5 (0,7/0,3; 0,5/0,1) і АСМ1 0,5/0 (0,3/0; 0,1/0).

Для отримання мікро- і субмікропорошків спеціального призначення застосовують різні методи модифікування їх поверхонь. У цьому випадку до основних індексів додаються нові: О – овалізовані, Д – діамагнітні, Ф100 –

гідрофобізовані, Ф700 – гідрофілізовані тощо.

Нанометричні ультрадисперсні алмази (УДА) з розміром часток 1 – 100 нм синтезується шляхом детонації заряду вибухової речовини у спеціальних камерах у середовищі з негативним кисневим балансом. У даний час вже відомо, що добавки УДА у різні матеріали сприяють формуванню дрібнозернистих структур з принципово новими властивостями.

Кубічний нітрид бору є більш термостійким матеріалом, ніж алмаз і застосовується там, де не може використовуватися алмаз, тобто при великих навантаженнях і високій температурі.

В Україні шліф-порошки кубоніта та ельбора з розмірами зерен від 250 до 40 мкм виробляються трьох марок: звичайної (КО), підвищеної (КР) і високої (КВ) міцності.

Основною характеристикою мікропорошків із кубоніту (КМ) є підвищена абразивна здатність. Діапазон зернистостей такий же, як і в алмазів, тобто від 60/40 мкм до 1/0 мкм.

Для субмікропорошків визначення зернистості і зернового складу проводиться на електронному мікроскопі при збільшенні не менше $\times 10000$.

1.4.2. Абразивні інструменти

На практиці абразивний інструмент поділяють на три основні види [31, 32, 35, 36, 74–84]:

- інструмент на жорсткій основі, в якому зерна 1 шліфувальних матеріалів (рис. 1.5) жорстко скріплені між собою зв'язкою 2 (керамічною, органічною, металевою тощо);
- інструмент, виготовлений на гнучкій основі (фібра, папір, синтетичні волокна, тканина або їх комбінація, нетканий матеріал) шліфувальна шкурка і вироби з неї (нескінченні шліфувальні стрічки, стрічки, бобіни, конуси, диски, пелюсткові круги), та інший гнучкий або еластичний абразивний інструмент;

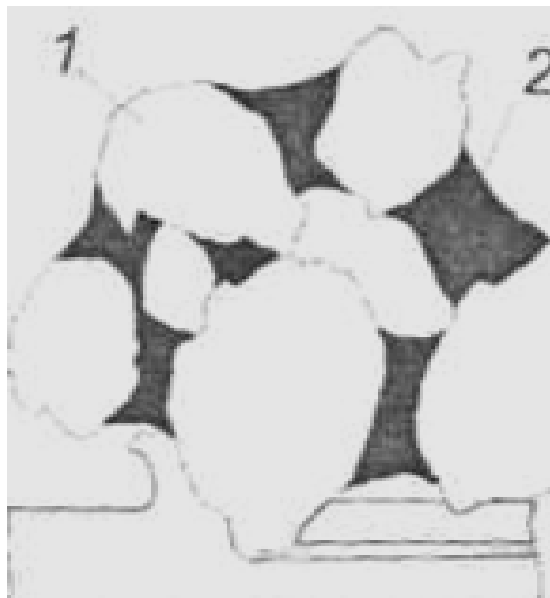


Рисунок 1.5. Схематична структура абразивного інструмента

- пасти твердої і рідкої консистенції, що є композицією з шліфувальних матеріалів і органічних зв'язок, що здатні закріплювати абразивні зерна так, що при роботі вони мають значну свободу переміщень у зоні оброблення, також можуть додаватись мастильні і поверхнево-активні речовини.

Найбільшого поширення у виробництві набув абразивний інструмент на жорсткій основі [31, 32, 35, 36, 85, 86]:

- шліфувальні круги – абразивні інструменти у вигляді тіла обертання циліндричної або спеціальної форми;
- шліфувальні головки – шліфувальні круги різних форм і розмірів з глухими отворами для кріплення на металевих хвостовиках-оправках;
- шліфувальні сегменти, що є складовою частиною збірного або складеного шліфувального круга;
- шліфувальні бруски призматичної або циліндричної форми, що використовуються у хонах або суперфінішних головках;
- шліфувальні шевери – абразивні інструменти, що мають форму зубчастого колеса, використовуються для фінішного оброблення зубчастих коліс;
- абразивні галтувальні тіла у формі призм, зірочок та інших довільних

геометричних форм, що використовуються при віброабразивному обробленні у галтувальних барабанах.

За своїми формами або профілями шліфувальні круги поділяються на 13 типів, наприклад, прямого (циліндричного) або конічного профілів, у вигляді кілець, чашок, тарілок, зі спеціальними виточками і т. п. Крім того, правкою може бути забезпечений будь-який інший спеціальний профіль, необхідний для конкретної операції шліфування [31, 32, 35, 36, 85, 86]:

Окрім типу і розмірів, характеристика шліфувального круга включає: матеріал і марку абразиву, його зернистість, твердість і номер структури круга, тип і марку зв'язки. Особливістю алмазно-абразивного інструменту є наявність характеристики – концентрації алмазних зерен і відсутність характеристик – твердість і номер структури. До складу характеристики входять також робоча швидкість інструменту, його ступінь точності і клас неврівноваженості мас [31, 32, 35, 36, 85, 86].

Як відомо, до основних видів шліфування відносяться [31, 32, 35, 36, 87–96]:

- зовнішнє кругле (з поздовжньою або осьовою подачею, з поперечною подачею, безцентрове);
- внутрішнє (при заготовці, що обертається: з поздовжньою і поперечною подачами, безцентрове; при нерухомій заготовці – планетарне);
- плоске (периферією, торцем круга);
- спеціальне (профільне, різбове, фасонне і т. п.).

Зв'язка, як відомо [31, 32, 35, 36, 87–96], разом з маркою зерна і зернистістю, є найважливішою характеристикою абразивного інструменту і визначає область його застосування, ріжучу здатність, економічну ефективність. Зв'язка повинна забезпечувати не тільки високу ріжучу здатність круга, але й найповніше використання абразивного зерна в інструменті. Вона не тільки утримує ріжучі зерна в крузі, але і взаємодіє з оброблюваним матеріалом, істотно впливає на процеси, що відбуваються в зоні контакту.

В результаті тертя зв'язки утворюється тепло, кількість якого залежить від її складу і фрикційних властивостей. Вона повинна мати високу адгезію до поверхні абразивного зерна, забезпечувати розкриття нових ріжучих зерен і видалення затуплених, тобто постійну роботу круга з самозаточуванням. Інакше зношені зерна не випадатимуть із зв'язки, що приведе до залипання ріжучої кромки і втрати працездатності круга [31, 32, 35, 36, 87–96].

Абразивний інструмент на бакелітовій зв'язці має високу міцність, особливо на стиск і ударну міцність, перевершуючи за цими показниками інструмент на основі кераміки. Висока міцність бакелітової зв'язки дозволяє абразивному інструменту працювати при великих навантаженнях і високих швидкостях обробки – вище 80 м/с.

Тому увага авторів монографії ч. 2 була прикута до органічних зв'язок, насамперед, до бакелітної та бакелітно-гумової.

Багаторічний досвід авторів монографії показав [31, 32, 36, 37, 87–96], що використання керамічної зв'язки є недоцільним в наслідок її високої крихкості.

В результаті круги на цій зв'язці не можуть використовуватися при ударних навантаженнях (обдирне і силове шліфування), а їх низька межа міцності при згинанні не допускає застосування таких кругів для відрізних робіт.

Таким чином, детальний аналіз технічних можливостей різних методів фінішної абразивної обробки, показує, що забезпечити вимоги, які висуваються до якості оброблюваних поверхонь деталей тертя з антифрикційних композитів для контактних з'єднань друкарського і постдрукарського обладнання може тонке шліфування з використанням різного абразивного інструменту.

У монографії ч. 2 автори приділили велику увагу дослідженням плоского, зовнішнього і внутрішнього круглого шліфування, оскільки деталі тертя поліграфічної техніки складного фасонного профілю і відповідних до таких деталей видів тонкого шліфування не розглядались.

Висновки до розділу 1

Постійне підвищення вимог до деталей тертя, які працюють в умовах інтенсивного зношування у контактних з'єднаннях друкарського і постдрукарського устаткування викликає необхідність у створенні нових та удосконаленні існуючих технологій виготовлення та тонкої обробки такого типу деталей.

Аналіз літературних джерел щодо технологій виготовлення та застосування антифрикційних деталей у вузлах тертя друкарського і постдрукарського обладнання, матеріалів для їх виготовлення та методів механічної обробки їх поверхонь дозволяє зробити наступні висновки:

- Показано, що антифрикційні деталі тертя, зокрема, втулки підшипників ковзання, що використовуються нині у вузлах швидкісного поліграфічного обладнання, зазвичай виготовляються з литих латуней і бронз. Такі деталі мають незадовільні функціональні характеристики і здатні працювати лише при змащуванні рідким мастилом, котре стає неефективним через викидання його із зони тертя відцентровими силами. Як наслідок – поверхні деталей залишаються не захищеними і піддаються швидкому зносу.

- Проілюстровано, що композитні матеріали у порівнянні з литими мають багато суттєвих переваг: економія металу за рахунок одержання точних розмірів деталей, скорочення витрат при механічній обробці, розміри спеченої деталі, як правило, перебувають у межах допусків згідно креслення; зниження відходів виробництва та маси виробу на 20-30% за рахунок пор; значне скорочення парку металообробного обладнання; можливість одержувати матеріали з наперед заданими властивостями, особливо у випадках, коли традиційними методами це неможливо або малоефективно.

- Істотним загальним недоліком, який об'єднує всі розглянуті композитні матеріали, є вельми висока вартість вихідних порошків, що пов'язано, перш за все, з трудомісткістю та високою вартістю процесу виготовлення порошків, дорогим устаткуванням для виробництва порошків, дефіцитністю кольорових металів.

Тому у багатьох випадках з економічних причин перевага віддається традиційним литим матеріалам для виготовлення антифрикційних деталей для високошвидкісних вузлів друкарського устаткування.

- Здійснено аналіз характеристик тертьових деталей на основі алюмінію, як литих, так і композиційних, що застосовуються у вузлах постдрукарського обладнання, показано їх переваги та недоліки.

- Проаналізовано режими роботи, при яких працюють литі деталі на основі алюмінію у постдрукарському обладнанні, а саме у фальцапаратах, фальцювальних-склеювальних машинах, машинах для вклеювання віконць в упаковку, різальних машинах, автоматичних кашировальних машинах та ін., та причини, що викликають їх інтенсивний знос.

- Показано, що застосування тертьових деталей на основі алюмінію для постдрукарського обладнання, одержаних методами лиття, викликає їх швидке зношування, потребує великої кількості зносостійких частин та часу їх заміни, а також призводить до збільшення браку друкарської продукції, що пов'язане з недосконалістю традиційних технологій виготовлення і механічної обробки таких деталей.

- Продемонстровано переваги функціональних характеристик композиційних деталей у порівнянні з литими тертьовими деталями на основі алюмінію, проте суттєвим недоліком композиційних деталей є висока вартість вихідних чистих порошків та складна технологія їх виготовлення.

- Показано, що в сучасному машинобудуванні існують великі сировинні резерви, які практично не використовуються при виготовленні деталей різного призначення. Це - металеві шліфувальні відходи чорних і кольорових сплавів містять у своєму складі цінні легувальні елементи Cr, Mo, W, Si, Ni, V, Al, Co, Ti, Nb, Cu, Mg, Mn та ін.

Присутність у шліфувальних відходах перелічених легувальних елементів, які в різних кількостях і комбінаціях містяться у вторинній сировині, зробила їх привабливими для подальшого використання з метою

одержання з них якісних високолегованих композитів антифрикційного призначення та деталей з них.

- Визначено, що питання створення нових антифрикційних композитів з дешевої і цінної сировини, якою є шліфувальні відходи чорних і кольорових металів і сплавів, та виготовлення ефективних деталей з них, що матимуть високі експлуатаційні властивості у широкому діапазоні умов роботи контактних з'єднань друкарського і постдрукарського обладнання, є вельми актуальним і потребує виконання глибоких досліджень.

- Обґрунтовано важливість фінішної обробки робочих поверхонь тертьових деталей постдрукарських машин, як передумову підвищення зносостійкості деталей і довговічності постдрукарських машин у цілому.

- Розглянувши фактори, що впливають на надійність та довговічність друкарських і постдрукарських машин показано, що довговічність пар тертя залежить не тільки від об'ємних властивостей деталі, але й від якості механічного оброблення робочих поверхонь, що дозволяє зменшити час припрацювання та знизити ризик виникнення таких дефектів як задири, схоплювання, попадання паперового пилу та агресивних речовин між поверхнями тертя у процесі роботи друкарської техніки.

РОЗДІЛ 2. ПРИНЦИПИ ВИГОТОВЛЕННЯ, ОБРОБКИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ КОМПОЗИТНИХ АНТИФРИКЦІЙНИХ ДЕТАЛЕЙ НА ОСНОВІ ШЛІФУВАЛЬНИХ ВІДХОДІВ СТАЛЕЙ І АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ДЛЯ ПОЛІГРАФІЧНОЇ ТЕХНІКИ

2.1. Технологічні основи синтезу антифрикційних композитів на основі відходів легованих інструментальних сталей

2.1.1. Вибір вихідних компонентів для виготовлення високошвидкісних антифрикційних композитів на основі відходів сталей

Як показано у розділі 1 монографії, антифрикційні композитні деталі мають істотні переваги перед литими, втім їх використання є обмеженим, перш за все, в наслідок дорожнечі вихідних порошків і відповідного обладнання для їх виготовлення.

У останні роки за ідеями авторів монографії [1, 2, 25, 39, 40–60, 64–73] було започатковано дослідження та науково-практичні роботи зі створення антифрикційних матеріалів, призначених для широкого спектру умов роботи, що синтезовані не зі звичайних, стандартних порошків, а з порошків – вторинної сировини, якими є багаточисельні промислові шліфувальні відходи металів і сплавів.

Промислові металеві шліфувальні відходи є дешевою і водночас цінною вихідною сировиною, оскільки містять у собі велику кількість цінних легувальних елементів W, Mo, V, Co, Al, Ti, Cr, Nb та ін. [2, 25, 39, 40–60, 64–73].

Такі шліфувальні відходи чорних і кольорових сплавів утворюються на операціях фінішного шліфування найрізноманітніших литих конструкційних деталей [1, 2, 25, 39, 40–60, 64–73].

Ці відходи безповоротно вивозяться на звалища внаслідок їх забруднення абразивом і компонентами мастильно-охолоджуючої рідини, та не використовуються у повторному циклі виробництва, тим самим розширюючи мережу спеціальних полігонів і створюючи небезпеку для екосистеми [40–60, 64–73].

Такі металеві шліфувальні відходи містять цінні легуючі елементи, що зробило їх привабливими для можливості застосування при створенні нових антифрикційних композитів [2, 25, 39, 40–60, 64–73] з одночасним вирішенням завдань пошуку нових видів сировини, економії ресурсів і часткового вирішення екологічної проблеми.

Автори монографії розробили комплексну технологію виготовлення деяких принципово нових антифрикційних композитів на основі окремих типів шліфувальних відходів, зокрема, інструментальних штампових, швидкоріжучих сталей, деяких силумінів та ін., що включала технологію регенерації забруднених шліфувальних відходів і подальші операції консолідації матеріалів [2, 25, 39, 40–60, 64–73].

У монографії ч. 1 автори надали розгалужені результати досліджень з розробки технології синтезу та фінішної обробки антифрикційних композитів на основі шліфувальних відходів сталей 85Х6НФТ, 5Х3ВЗМФС, 7ХГ2ВМФ, Р6АМ5, Р2АМ9К5, ШХ15СГ та 4Х2В5МФ.

У монографії ч. 2 представлено результати досліджень, що є продовженням наукових напрацювань, започаткованих авторами монографії у частині 1.

Хімічний склад шліфувальних відходів інструментальних легованих сталей як основи антифрикційних композитів, що досліджувались у частині 2 монографії, наведено у табл. 2.1.

Таблиця 2.1. Хімічний склад шліфувальних відходів сталей

Сталь	Склад, мас. %								
	С	W	Cr	Mo	Si	Mn	V	Co	Fe
Р6М5	0,82-0,90	5,50-6,50	3,80-4,40	4,8-5,3	до 0,50	до 0,50	1,7-2,1	-	Осн.
2Х6В8М2К7	0,22-0,30	7,0-8,0	6,5-7,0	1,8-2,3	0,3-0,6	0,2-0,4	0,1-0,25	6,8-7,5	Осн.
11РЗАМЗФ2	1,02-1,12	2,5-3,3	3,8-4,3	2,5-3,0	0,3-0,5	0,3-0,5	2,3-2,7	<u>N</u> 0,05-0,10	Осн.

Примітка: У марках сталей вміст S та P кожного елементу до 0,03 мас. %.

Слід також зазначити, що зносостійкість будь-якого антифрикційного матеріалу залежить від великої кількості одночасно діючих як зовнішніх факторів, що обумовлені параметрами функціонування пари тертя, так і внутрішніх чинників, пов'язаних з якісним і кількісним складом композиту.

Залежно від умов тертя функціональні властивості антифрикційного матеріалу можуть бути різними. В умовах тертя без змащування рідким мастилом при одночасній дії додаткових навантажуючих факторів (швидкість, температура, тиск) стійкість проти зносу буде залежити також від комплексу фізико-механічних властивостей матеріалу, що обумовлюють його загальну конструкційну міцність [1–4].

У важких умовах роботи антифрикційних композитів, особливо за наявності впливу високих швидкостей обертання (>1000 об./хв.), підвищених навантажень (до $5,0$ МПа) та виникаючих в результаті тертя температур (300°C і вище), коли жодне рідке мастило не є працездатним, застосовують антизадирині домішки, що виконують роль твердого мастила, які вводяться до складу матеріалів на етапі їх виготовлення.

Як відомо [97, 98], залежно від умов роботи широко застосовуються різні тверді мастила, серед них фториди лужноземельних металів є ефективними саме для роботи при високих швидкостях, підвищених температурах або у агресивному середовищі – на повітрі.

Так, змащувальні властивості фториду кальцію CaF_2 наведені у роботах [1, 2, 4, 97, 99–105], де було показано ефективність його застосування у підвищених і важких умовах тертя, насамперед, за підвищених і високих температур, навантажень або високих швидкостей обертання.

2.1.2. Регенерація вихідних порошків шліфувальних відходів сталей

Автори монографії перш за все приділяли увагу такому важливому питанню, як підготовка вихідної сировини (відходів) [2, 25, 39, 40–60].

У дослідженнях та експериментах використовували шліфувальні сталеві відходи табл. 2.1), що початково були забруднені частинками абразивної крихти (корунду Al_2O_3) від шліфувальних кругів.

Для очищення порошків-відходів від абразивної крихти було використано методику магнітної сепарації, розроблено і виготовлено магнітний сепаратор. Детальний опис методики магнітної сепарації подано авторами у монографії ч. 1.

Метод магнітної сепарації забезпечив зниження кількості абразивних частинок до 2% [2]. Дисперсність частинок, очищених таким способом відходів, складає 0,05–0,17 мм.

Далі виконувалася обов'язкова операція зниження загального вмісту кисню в шліфувальних відходах, оскільки такі порошки є окисненими в процесі їх утворення при шліфуванні деталей. Відновлюваний високотемпературний відпал при 900–1000°C забезпечив зниження загальної кількості кисню вдвічі [2, 25, 39, 40–60].

Після відновлювального відпалу конгломерати зазнавали дроблення на дробильній машині та розсіювання по фракціях через сита.

Очищені порошки сталей мають вигляд мікростружок, що зображено на рис. 2.1.

В результаті наведених вище підготовчих операцій регенеровані порошки інструментальних сталей з розмірами 125–160 мкм використовувались для приготування вихідної шихти для наступного виготовлення антифрикційних композитів.



Рисунок 2.1. Загальний вигляд порошків сталі Р6М5 після очищення

2.1.3. Відпрацювання технологічних режимів виготовлення антифрикційних композитів на основі відходів інструментальних сталей

Серед основних вимог до технології виготовлення матеріалів для вузлів тертя є технологічність процесу, його простота, використання недефіцитної вихідної сировини, допоміжних матеріалів та обладнання, високий рівень механізації та автоматизації. Ці вимоги було враховано під час розроблення технологічних процесів виготовлення нових підшипникових матеріалів підвищеної зносостійкості з використанням як основи для них шліфувальних відходів інструментальних сталей.

Наступним кроком при розробці технології виготовлення композитів було проведення операції приготування вихідної шихти (операція змішування) [2, 25, 39, 40–60].

Оскільки кількість доданого в шихту твердого мастила у всіх випадках становила понад 3,0 мас.%, а саме, 4,0–8,0 мас.%, то згідно з рекомендаціями [4, 21] застосовували вологе змішування для запобігання такого негативного явища, як поява сегрегацій. Як зволожувач використовували до 1–2 об.% бензину або етилового спирту.

Технологічну операцію змішування компонентів шихти (відходи сталей та CaF_2) здійснювали у банковому змішувачі з йоржами з нікелю протягом 4 год.

У нашому дослідженні були використані порошки фракцій 0125 (CaF_2) та порошків-відходів фракції 0160.

Після змішування здійснювали оцінку якості підготовлених сумішей, для чого як критерій приймали середнє квадратичне відхилення вмісту CaF_2 у пробах за коефіцієнтом однорідності K [2, 4, 21].

При ідеальному змішуванні, тобто коли досягається вміст компоненту у будь-якій пробі суміші такий, що задано, коефіцієнт $K=0$. Чим менше ступінь однорідності суміші, тим вище значення K .

У наших експериментах коефіцієнт K коливався у межах 5,8–6,4, що є задовільним результатом.

Коефіцієнт однорідності K для досліджуваних сумішей показав, що вміст CaF_2 перебуває у межах (4–8) мас. %. Тому саме таку кількість твердого мастила CaF_2 було додано до вихідної шихти при виготовлення антифрикційних композитів на основі шліфувальних відходів сталей Р6М5, 11РЗАМЗФ2 та 2Х6В8М2К7.

При відпрацюванні технологічної операції пресування у процесі експериментів було встановлено, що кращу пресувальність (ущільненість та формувальність) мають композиції в інтервалі навантажень (800–900) МПа [2, 25, 39, 40–60].

Збільшення тиску надалі призводить до розшарування брикетів та їх руйнування через наявність непластичної змащувальної речовини CaF_2 .

Пресування виконували з використанням гідравлічного пресу з максимальним зусиллям 160 тс.

Наступна операція, що відпрацьовувалась під час розроблення технологічних режимів виготовлення підшипникових композитів зі сталевих відходів, це технологічна операція – спікання [2, 25, 39, 40–60].

При нагріванні будь-якого деформованого полікристалічного тіла, у тому числі композиційного, у ньому протікають рекристалізаційні процеси.

Вони пов'язані з переходом мікроструктури у більш стабільний стан, сюди відносяться: зростання зерна внаслідок прагнення до зниження надлишкової вільної граничної енергії і, у зв'язку з міграцією границь при

зменшенні енергії, яку накопичено у зразках при пластичній деформації, протікання первинної рекристалізації [2, 4, 21, 38].

Для досліджуваних антифрикційних композитів протікання рекристалізаційних процесів ускладнено наявністю пор та специфікою будови границь зерен. Пори, як і включення, є перешкодами на шляху переміщення границь.

Відрив границі від пори термодинамічно не вигідний у зв'язку з підвищенням при цьому вільної граничної енергії.

Границі відіграють суттєву роль як стоки для вакансій, що забезпечують вихід їх на зовнішню поверхню.

Стисло описані явища демонструють перш за все зміни у структурі порошкових матеріалів при рекристалізаційних процесах, що відбуваються при спіканні, і, власне визначають рівень майбутніх властивостей заготовок.

Процес спікання зразків здійснювали у муфельній печі у середовищі висушеного водню (точка роси = -40°C) при температурі 1150–1200 С. Відпрацювання технологічної операції спікання детально описані у монографії ч. 1.

Витримка при кожній температурі спікання становила 2 години, а у ролі засипки використовували прокалений (у середовищі водню при 1000°C) глинозем.

Процеси, що проявляються при спіканні порошкових матеріалів, супроводжуються суттєвими змінами металографічної структури і властивостей у бік їх наближення до властивостей компактних тіл [2, 4, 21, 38].

Отже, було встановлено, що спікання доцільно проводити за температур 1150–1200 $^{\circ}\text{C}$, які забезпечують одержання максимальної щільності.

Після спікання пористість композитів становила 11–13% і сформувались достатньо високі механічні властивості.

Загальний вигляд заготовок антифрикційних втулок з досліджуваних композитів, одержаних після спікання, наведено на рис. 2.2.



Рисунок 2.2. Заготовка втулки з композиту $2X6B8M2K7+6\%CaF_2$ після спікання, укрупнення 1:2

Після операцій виготовлення заготовки втулок з нових антифрикційних композитів після спікання піддаються додатковій тонкій механічній обробці для одержання високих параметрів якості робочих поверхонь, про що буде викладено у розділі 4.

Узагальнюючи наведені вище результати досліджень слід підсумувати, що чітке дотримання технологічних режимів синтезу нових антифрикційних композитів, що включають змішування, пресування і спікання, здатне забезпечити формування такої структури, що забезпечить високий рівень комплексу властивостей.

2.2. Вибір вихідних компонентів та відпрацювання технологічних режимів виготовлення деталей на основі шліфувальних відходів алюмінієвих сплавів

2.2.1. Вихідні компоненти для композитних антифрикційних деталей на основі шліфувальних відходів алюмінієвих сплавів

Як показано у розділі 1, для роботи при навантаженнях 2,0 – 4,0 МПа, швидкості ковзання від 2,0 до 4,0 м/с зазвичай застосовують литі алюмінієві деталі, що працюють на тертя та знос. Втім внаслідок недосконалості технології виготовлення та механічної обробки вони мають незадовільні властивості, до того ж відрізняються високою ціною.

Втім наукові напрацювання авторів монографії ч. 2 [64–75] переконливо показали, що шліфувальні відходи ряду алюмінієвих сплавів після очищення

можна ефективно використовувати як основу для виготовлення нових антифрикційних деталей.

Представлені нижче результати досліджень ілюструють напрацювання авторів монографії ч. 2, де для синтезу нових композитів антифрикційного призначення як основу було обрано промислові шліфувальні відходи ливарних алюмінієвих сплавів АК12ММгН, АД35 та АМ4,5Кд.

Сплави АК12ММгН та АМ4,5Кд є складнолегованими сплавами на основі алюмінію вітчизняного виробництва (табл. 2.2).

Таблиця 2.2. Хімічний склад шліфувальних відходів алюмінієвих сплавів [64–73]

Марка сплаву	Склад, мас. %										
	Si	Cu	Mg	Ni	Cr	Mn	Zn	Cd	Fe	Ti	Al
АК12ММгН	11,0-13,0	1,2-1,6	0,9-1,2	0,8-1,3	0,05-0,2	0,3-0,6	0,3-0,5	-	0,5-0,8	0,05-0,20	Осн.
АМ4,5Кд	0,3-0,8	4,5-5,1	0,03-0,05	0,1-0,2	0,1-0,3	0,35-0,8	0,06-0,1	0,07-0,25	0,1-0,15	0,15-0,35	Осн.
АД35	0,7 – 1,3	до 0,1	0,6– 1,2		до 0,25	0,4 – 1,0	до 0,2	-	до 0,5	до 0,1	Осн.

Примітки: У сплаві АМ4,5Кд вміст Zr становить 0,1–0,15 мас. %. У всіх марках сплавів вміст складає, мас. %: Sn–0,01–0,02; Na –0,05–0,10.

Закордонними аналогами вітчизняних сплавів АК12ММгН, АМ4,5Кд та АД35 є сплави AlSi12CuNiMg (стандарт EN 1676) AlCu4MgSi (стандарт ISO 209-1:2002) та AlMgSi, AlMgSi1 або AlSi1MgMn (стандарти DIN 1745-1:1983 та ISO 209-1 відповідно), що традиційно застосовуються для виготовлення направляючих, скоб, планок тощо для контактних пар імпортного постдрукерського обладнання, такого, як ножові різальні машини типу WOHLBERG cut-tec 137, фальцапарати типу HEIDELBERG IF-50 ST, та типу «Stahl FK-47 A», машини для клеювання віконць в упаковку типу WFD-600, автоматичні високошвидкісні лінії з виробництва коробок з віконцем JMD-T1020C/JMD-T1200C та напівавтоматичні кашировальні машини типу NB 1100 B/1300B, каширувально-склеювальні лінії для склеювання картону-лайнера та мікрогофрокартону Heidelberg та Bobst та ін., які широко представлені на поліграфічних підприємствах України.

Низка цінних легувальних елементів (табл. 2.2) у мікрочастинках порошків-відходів сплавів АК12ММгН, АД35 та АМ4,5Кд має визначати високий рівень триботехнічних, фізичних та фізико-механічних властивостей композитів.

Кремній у складі евтектики Al-Si сприяє підвищенню зносостійкості матеріалу [2, 64–73]. Елементи Cu, Mg, Ni утворюють з алюмінієм тверді інтерметалідні сполуки, й тим самим за рахунок зміцнення твердого розчину сприяють підвищенню фізико-механічних властивостей силумінів [2, 64–73], до того ж Cu і Cr разом з Mn та Ni підвищують жароміцність сплаву. Титан, наявний у частинках сплаву, подрібнює зерно, а Zn та Sn підвищують антифрикційність матеріалу [2, 64–73], причому Sn більш ефективно. Навіть малі частки олова (масова частка становить 0,01-0,02%) значною мірою підвищують антифрикційні характеристики завдяки присутності Zn, що забезпечує утворення потрібної евтектики Al-Zn-Sn. Навіть залізо у допустимих дозах завдяки утворенню твердої хімічної сполуки FeAl_3 здатне підвищувати антифрикційні властивості.

Присутність кадмію та цирконію у складі сплаву АМ4,5Кд, забезпечує надання йому більш високих антифрикційних властивостей при одночасному підвищенні граничнодопустимих навантажень на пару тертя та робочих температур у порівнянні з матеріалом-прототипом. Це відбувається внаслідок позитивної дії кадмію та цирконію, котрі утворюють у структурі матеріалу додаткові фази, забезпечуючи створення складної гетерофазної структури підшипникового матеріалу.

Отже, порошки-відходи сплавів АК12ММгН, АМ4,5Кд та АД35 – найцінніша сировина, багата на легувальні елементи, яка після відповідної обробки здатна надати композиційному антифрикційному матеріалу низку корисних властивостей, що має забезпечити збільшення зносостійкості нових антифрикційних композитів і деталей з них в умовах експлуатації контактних з'єднань постдрукерського обладнання.

Для одержання композитів, що працюватимуть в умовах самозмащення, коли застосування рідких мастил є недопустимим, до вихідної шихти додавали тверде мастило MoS_2 .

Вибір твердого мастила дисульфиду молібдену MoS_2 і його кількості обумовлений рядом причин: по-перше, це відома твердозмащувальна речовина [2, 4, 21, 64–73], яка є хімічно і термічно стабільною до 600 С, що гарантує її наявність у незмінному вигляді в композиті як у процесі виготовлення, так і у процесі експлуатації матеріалу. По-друге, дисульфід молібдену є ефективною змащувальною речовиною саме на повітрі за неважких або середньоважких умовах експлуатації деталі [2, 4, 21, 64–73, 97]. По-третє, кількість MoS_2 , що додавалась до вихідної шихти, становила 9,0–12,0 мас. %. Авторами [2, 4, 21, 64–73, 97] встановлено, що кількість MoS_2 менша за 9,0 % недостатня для виконання функції змащування поверхонь. При вмісті MoS_2 більше за 12,0 % істотно зменшуються механічні властивості композитів, зокрема, пластичні характеристики, і втрачається конструкційна міцність матеріалу.

2.2.2. Регенерація вихідних порошків шліфувальних відходів алюмінієвих сплавів

Для виготовлення деталей тертя, що працюють в на повітрі при навантаженні 2,0–6,0 МПа та швидкості ковзання 2,0–4,0 м/с використовували промислові шліфувальні відходи алюмінієвого сплаву АК12ММгН.

Жорсткі вимоги до якості вихідної сировини (зокрема, стабільність властивостей кожної партії, чистота за наявності шкідливих домішок) – запорука високого рівня та стабільності властивостей деталей.

Тому вихідні порошки у складі шихти для нових деталей піддавались попереднім підготовчим операціям.

Шліфувальні відходи силуміну АК12ММгН, сплавів АМ4,5Кд та АД35 є відходами виробництва заводу «Київтрактородеталь» (м. Київ), що утворились під час операцій шліфування поршнів двигунів тракторів,

забруднені частками абразиву та компонентами мастильно-охолоджувальної рідини (МОР). Крім цього, у шламі міститься до 50 % вологи.

Через забрудненість відходи вивозять у відвали, що робить їх безповоротними втратами цінної сировини. Тільки на заводі КП «Київтрактородеталь» у відвали надходить близько 26 тонн на місяць. Аналогічна ситуація склалась і на інших машинобудівних підприємствах України [70; 73].

З метою раціонального використання такої цінної сировини, колектив авторів монографії ч. 2 розробив технологію регенерації таких шламових відходів, що передбачає виконання двох стадій: висушування від вологи з відпалом компонентів МОР та сепаративне очищення від абразиву.

Спільно з Інститутом газу НАН України та колективом авторів монографії було відпрацьовано режими сушіння та відпал порошоків-відходів силумінів від вологи і компонентів МОР (склад МОР: емульсії обробки заготовок поршнів; масло дистильатне 20 83 %; масло талове 7,3 %; асидол 7,3 %; сода каустична 0,9 %; спирт етиловий ректифікований технічний 1,2 %).

Для сушіння та відпалу порошоків-відходів силумінів від вологи і компонентів МОР було розроблено спеціальну установку (реактор), що являє собою трубу з товстостінної жароміцної та жаростійкої сталі.

В реактор за допомогою шнека подається силуміновий шлам. Для видалення МОР нагрівання здійснюється природним газом з випалюванням продуктів сушіння.

Нагрівання відбувається через випромінювання труби, яку нагріто до температури близько 400°C. Як відомо [97], максимальна температура спалаху мастильних речовин становить 300 – 350°C, саме тому для видалення МОР було обрано температуру до 400°C.

Висушений шлам після печі охолоджували на повітрі в бункері, де збирається сировина.

Після висушування від вологи та відпалу компонентів МОР проводили сепарацію силумінових відходів від абразиву методом електростатичних

полів, коли використовується така фізична властивість алюмінієвого сплаву, як його висока електропровідність (порівняно з абразивом).

Очищення відходів силумінів проводили за допомогою методу електродинамічної сепарації. Очищувати відходи чорних та деяких кольорових металів можна також за допомогою магнітного сепаратора [64–73], проте більшість кольорових сплавів, у тому числі і досліджувані силуміни, є парамагнетиками, очищення яких неможливе методом магнітної сепарації.

Тому очищення шламових відходів силуміну АК12ММгН, сплавів АМ4,5Кд та АД35 здійснювали за допомогою методу електродинамічної сепарації.

Електродинамічна (ЕД) сепарація базується на силовій взаємодії змінного електромагнітного поля з твердими електропровідними тілами, що мають різні значення електропровідності.

Електромагнітні сили, які діють на тіло, у загальному вигляді визначаються розподілом електромагнітного поля у зовнішній та внутрішній областях тіла, що описується в лінійній електродинаміці рівняннями Максвелла.

Індукцію магнітного поля у ЕД-сепараторах визначають, використовуючи рівняння Максвелла, за формулою [106]:

$$B = B_0 \cdot \cos(\omega \cdot t - a \cdot z), \quad (2.1)$$

де B – індукція магнітного поля; B_0 – амплітудне значення індукції магнітного поля; ω – кругова частота; t – час; z – координата розповсюдження хвилі; a – полюсне ділення індуктора.

Причому при теоретичному розгляданні плоский індуктор, що служить для створення цього поля, представляють необмеженою площиною, яка співпадає з площиною $y - z$ в системі координат x, y, z , по котрій протікає поверхневий струм щільністю A [106]:

$$A = A_0 \cdot \sin(\omega \cdot t - a \cdot z), \quad (2.2)$$

де A_0 – амплітудне значення поверхневої щільності струму, що має тільки одну координату (y) – ідеальний індуктор.

У теперішній час в техніці використовують двосторонні та циліндричні індуктори. Двосторонні індуктори представляють собою комбінацію двох плоских індукторів, а циліндричні – представляють собою циліндр, вздовж поверхні якого тече струм, щільність котрого визначається виразом (2.2).

Аналітичне розв’язання може бути знайдено лише для обмеженого типу задач, таких як тримірна задача осьової симетрії для проводячої кулі в полі кругового витку та двомірна задача для нескінченно довгого проводячого циліндра у поперечному полі. Приведення тримірних реальних задач, не маючих аналітичного розв’язання, до двомірних задач дозволяє оцінити порядок сил і характеристику силової взаємодії.

Якщо прийняти умову, що поле мало змінюється у межах об’єму тіла, то електродинамічна сила F визначається з виразу [106]:

$$F = -gradW = grad\left(\frac{1}{2} \cdot P_m \cdot B^0\right), \quad (2.3)$$

де W – електромагнітна енергія тіла; P_m – магнітний момент тіла; B^0 – індукція зовнішнього поля.

Внаслідок лінійності рівнянь електромагнітного поля одержуємо:

$$P_{mi} = V \cdot \alpha_{ik} \left(\frac{1}{\mu_0}\right) \cdot B_k^0, \quad (2.4)$$

де V – об’єм тіла; α_{ik} – коефіцієнт поляризованості тіла; μ_0 – магнітна проникність вакууму.

Отже, кінцевий вираз для визначення електродинамічної сили буде мати вигляд:

$$F = \frac{1}{2} \cdot V \cdot \alpha_{ik} \cdot gradP_{mi} \quad (2.5),$$

де $P_{mi} = \frac{1}{\mu_0} \cdot B_i^0 \times B_k^0$ – магнітний тиск; α_{ik} – дійсна частина коефіцієнту поляризованості тіла.

Таким чином, вираз (2.4) дозволяє, знаючи розподіл електромагнітного поля, знайти електромагнітну силу, що діє на поміщене в нього електропровідне тіло.

У залежності від умов взаємодії та характеру електромагнітного поля виділяють 4 класи ЕД-сепараторів:

- з обертовим магнітним полем;
- з бігучим магнітним полем лінійного асинхронного двигуна;
- з неоднорідним змінним магнітним полем;
- пристрої, в яких сила взаємодії виникає при переміщенні електропровідних частинок відносно неоднорідного магнітного поля, що створюється постійними магнітами.

Особливістю процесу електродинамічної сепарації є те, що електродинамічна сила впливає на більш електропровідну фракцію матеріалу, який піддається розділенню.

Це дозволяє з високою ефективністю вилучати кольорові метали навіть при їх невеликому вмісті у малоелектропровідних відходах.

Одним з видів ЕД-сепараторів з обертовим магнітним полем є однороторні сепаратори (рис. 2.3).

Обертове магнітне поле сепаратору (рис. 2.3) створюється багатополюсним ротором з незалежним приводом обертання. Магнітне поле ротору збуджується обмоткою, що живиться постійним струмом. Ротор міститься у середині барабану з нержавіючої сталі, який служить засобом для транспортування матеріалу, що піддається сепарації в зоні дії обертового магнітного поля. Частота обертання ротору – 17 c^{-1} .

Барабан (рис. 2.3) обертається під впливом електродинамічних сил взаємодії з полем ротору. Частота обертання барабану підтримується на рівні $0,11 \text{ c}^{-1}$ спеціальним демпфуючим пристроєм. В електропровідних частинках наводяться вихрові струми, які, взаємодіючи з полем ротору, приводять їх у рух. Відділений від абразиву порошковий матеріал рівномірно подається на барабан сепаратора, звідки електропровідні частинки шліфувальних відходів силуміну АК12ММгН, сплавів АД35 або АМ4,5Кд відкидаються полем ротору у дальній приймальний бункер, а не електропровідні частинки абразиву вільно падають з барабану у ближній бункер.

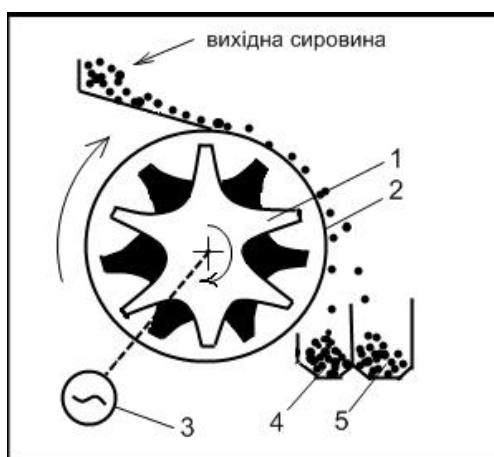


Рисунок 2.3. Схема однороторного ЕД-сепаратору: 1- багатополосний ротор; 2 - барабан; 3 - привід; 4 - абразивні частинки (не електропровідний матеріал); 5 - частинки відходів алюмінієвого сплаву (електропровідний матеріал)

Ряд промислових конструкцій електродинамічних сепараторів для очищення відходів металургійного виробництва кольорових металів і сплавів від забруднень було розроблено вітчизняними спеціалістами і впроваджено на металургійних комбінатах з метою подальшого переплаву очищених відходів і застосування виливків з вторинної сировини. Використання електродинамічної сепарації дозволяє за один цикл розділення вилучати до 90% алюмінію, міді та цинку з промислових відходів. Продуктивність потужних виробничих сепараторів залежно від конструкції складає 5–10 т/год.

З метою одержання якісної вихідної сировини для виготовлення композиційних антифрикційних деталей застосування електродинамічної сепарації виявилось ефективним для очищення від абразиву шліфувальних відходів силуміну АК12ММгН, сплавів АМ4,5Кд та АД35. Завдяки таким операціям було одержано майже чисті порошки сплавів АК12ММгН, АМ4,5Кд та АД35 з умістом абразиву до 2 об.% (рис. 2.4), що придатні для подальшого використання у процесі виготовлення деталей.



Рисунок 2.4. Загальний вигляд частинок порошків-відходів сплаву АК12ММгН після регенерації, $\times 32$

У ході експериментів визначено насипну щільність регенованих силумінових порошків, що становить $0,75 \text{ г/см}^3$ і є технологічним показником для забезпечення постійної усадки. Крім цього, було встановлено, що порошки-відходи силумінів мають задовільну ущільненість.

Наступним кроком при виконанні досліджень було відпрацювання технологічних операцій консолідації матеріалів задля отримання композиті з максимальною щільністю.

Останнім часом набули використання методи гарячого пресування для виготовлення антифрикційних деталей високої щільності. Цю методику було застосовано для відпрацювання технології виготовлення деталей з відходів силуміну АК12ММгН, сплавів АМ4,5Кд та АД35 [2, 4, 6], про що буде викладено нижче.

2.2.3. Відпрацювання технологічних режимів виготовлення деталей на основі шліфувальних відходів алюмінію

Умови роботи контактних пар постдрукарських машин, як відзначено вище, пов'язані з навантаженнями та швидкостями, а це в свою чергу вимагає високої конструктивної міцності деталей, що працюють у таких умовах. Це може бути досягнуто мінімізацією пористості композитів.

Після технологічних операцій регенерації порошок-відходів алюмінієвих сплавів послідовно виконували наступні операції змішування металевих і неметалевих порошоків твердого мастила MoS_2 (кількість 9,0–12,0 мас. % у випадку виготовлення самозмащувальних композитів), або безпосередньо до консолідації брикетів, якщо композит призначений для деталей, що працюють зі змащенням рідким мастилом.

Внаслідок того, що при навантаженнях нижче 400 МПа одержують брикети з пористістю більше 20% і вони швидко руйнуються, а вище 500 МПа подальше ущільнення не відбувається внаслідок розшарування брикетів [2, 4] через різну густину металевих і неметалевих компонентів, тому застосовували схему двостадійного ущільнення.

На першій стадії виконували холодне пресування при кімнатній температурі, навантаження попереднього холодного пресування становило 450–500 МПа. Холодне пресування виконували на гідравлічному пресі ПСУ-125.

Дослідні зразки на основі шліфувальних відходів силумінів пресували у прес-формах різних типорозмірів для наступних випробувань і досліджень комплексу властивостей:

- 1) у роз'ємній прес-формі розмірами 5×40 мм;
- 2) у втулковій прес-формі, $\text{Ø}32 \times 12$ мм;
- 3) у циліндричній прес-формі, $\text{Ø}32$ мм.

В результаті холодного пресування було одержано зразки з відносною щільністю 0,84–0,92. Тобто пресовки мали пористість від 16 до 8 % залежно від форми одержаних пресовок. Виявлено, що дослідні зразки, спресовані при питомому тиску ~ 500 МПа, мають такі значення відносної щільності відповідно для типорозмірів прес-форм: 1) – 0,88–0,84; 2) – 0,88–0,89; 3) – 0,90–0,92.

На другій стадії консолідації виконували операцію гарячого пресування попередньо спресованих зразків для мінімізації пористості за температури зовнішнього нагрівання 400 С та навантаження 300 МПа. Для уникнення

припікання зразків до прес-форм їх змащували дисульфідом молібдену MoS_2 . Власне гаряче пресування проводили на гідравлічному пресі для гарячого пресування номінальним зусиллям 1,6 МН. Застосування операції гарячого пресування забезпечує повноту дифузійної гомогенізації зразків деталей з відходів силуміну, мінімізує пористість, а відтак, підвищує конструкційну міцність матеріалу та дозволяє наблизити властивості композиту до властивостей литого сплаву [2, 4, 6]. Температуру гарячого пресування обирали відповідно до діаграми стану сплавів так, щоб вона була вищою від температури повного розчинення легувальних елементів у Al, але нижча за температуру плавлення (564°C) [21, 107] нерівноважної евтектики у сплаві АК12ММгН. Нагрівання понад температури нерівноважної евтектики може призвести до появи рідкої фази, що негативно впливає на міцність і, особливо, на пластичні властивості матеріалу. З таких же міркувань обиралась температура гарячого пресування для композитів на основі відходів сплаву АМ4,5Кд та АД35.

Так, після гарячого пресування заготовки з матеріалу на основі відходів силумінів майже не мали залишкової пористості – відносна щільність становила 0,98–0,99. При цьому густина порошкових зразків з композиту на основі відходів сплаву АК12ММгН дорівнювала $2,72\text{ г/см}^3$, для композиту на основі відходів сплаву АМ4,5Кд – $2,74\text{ г/см}^3$; для композиту на основі відходів сплаву АД35 – $2,73\text{ г/см}^3$ (для порівняння густина литого сплаву АК12ММгН – $2,75\text{ г/см}^3$) [107]. Загальна схема технології виготовлення антифрикційних деталей з Al-відходів показана на рис. 2.5.



Рисунок 2.5. Технологічна схема виготовлення антифрикційних композитних деталей на основі відходів сплавів АК12ММгН, сплавів АМ4,5Кд або АД35

Отже, використання розробленої нової технології виготовлення антифрикційних композитних деталей тертя із застосуванням як вихідної сировини шліфувальних відходів алюмінієвих сплавів АК12ММгН, сплавів АМ4,5Кд та АД35 дозволяє отримувати майже компактні заготовки, які за щільністю не поступаються литим сплавам.

На рис. 2.5 зображена технологічна операція змішування очищених порошків силумінів з твердим мастилом MoS₂, яке додавалось до вихідної шихти у кількості 9,0–12,0 мас.% у випадку виготовлення самозмащувальних композитів згідно рекомендаціям [2, 4, 21]. Ця операція застосовується при виготовленні деталей, що призначені для роботи без рідкого мастила, а саме,

для направляючих ножових друкарських машин типу WOHLBERG Trimtec 560, WOHLBERG Trimtec 607.

Заключною операцією було виконання тонкої механічної обробки робочих поверхонь нових композитних деталей (рис. 2.5), про що буде сказано нижче, у розділі 4.

2.3. Методи дослідження властивостей нових антифрикційних композитних деталей

Антифрикційні композитні деталі для широкого діапазону умов роботи друкарського і постдрукарського обладнання з метою забезпечення стабільного функціонування вузлів тертя повинні мати цілий комплекс фізичних, фізико-механічних, структурних, теплофізичних, триботехнічних, технологічних властивостей, параметрів якості робочих поверхонь та ін., які тільки у сукупності, при одночасному оптимальному поєднанні зможуть зробити роботу підшипника, вузла тертя та всієї друкарської машини тривалою та безперебійною.

У зв'язку з цим від точності вимірювань, коректності обраного вимірювального обладнання, достовірності, повторюваності результатів досліджень вищевказаних властивостей деталей залежить придатність того чи іншого з розроблених композитів, і, як наслідок, працездатність вузла і машини у цілому.

Тому при визначенні комплексу властивостей нових антифрикційних композитів використовували сучасні методики, що затверджені стандартами (ДСТУ, ІСО), сучасне вимірювальне і дослідницьке обладнання, та велику кількість спеціальних тонких методів досліджень.

2.3.1. Методи мікроструктурного та електронно-мікроскопічного аналізів

Для вивчення зернистої структури, поруватості, розподілення легуючих елементів і домішок, наявності тих чи інших фаз у твердому розчині,

застосовували методи оптичної металографії з використанням фотомікроскопу віддзеркаленого світла “Neophot-32” (Німеччина), що дає змогу досліджувати травлені та нетравлені мікрошліфи з матеріалів за збільшенням до $\times 1000$ та фотографувати їх.

Мікрошліфи виготовляли методом механічного полірування у два етапи: з грубим та дрібним абразивами (або полірувальною речовиною) відповідно. Зразки полірували на горизонтальному полірувальному крузі, що покритий сукном, полірувальною речовиною були суспензії з оксиду алюмінію, триоксиду хрому та алмазні порошки.

Нетравлені мікрошліфи використовували для аналізу дрібних фаз, пор та включень, а травлені – для визначення структурної будови досліджуваних композитів, виявлення утворених фаз, розподілу твердого мастила CaF_2 .

Травлення зразків на основі шліфувальних відходів легованих сталей проводили із застосуванням 4%-го розчину HNO_3 у спирті, зразків на основі шліфувальних відходів алюмінієвих сплавів – із застосуванням 5–10% розчину NaOH .

Нетравлені мікрошліфи використовували для аналізу дрібних фаз та вкраплень, а травлені - для вивчення механізму структурної будови досліджуваних деталей, виявлення зміцнювальних фаз, їх розподілення та властивостей.

Для проведення мікродюрметричних досліджень застосовували мікротвердомір ПМТ–3, при цьому навантаження становило 50 г, час витримки під навантаженням – 10 с.

Утворені структурні складники у деталях оцінювали методом кількісної металографії на приладі Лесо ІА-3001 (виробництва США), який є аналізатором зображення, і за допомогою відповідного програмного забезпечення автоматично ідентифікує фази, встановлює їх кількісне співвідношення та розподіл у матеріалі.

Автоматично відбувається фотографування обраних ділянок мікрошліфа з друкуванням їх на принтері.

Аналогічно було проведено дослідження макроструктури. Для виконання цього дослідження прилад Лесо ІА-3001 містить макростенд, що забезпечує збільшення до $\times 25$, фотографування та друкування зображень макроструктури у автоматичному режимі.

2.3.2. Методи дослідження фізико-механічних властивостей

При відпрацюванні технологічних режимів виготовлення нових композитів на основі шліфувальних відходів чорних і кольорових металів здійснювали визначення щільності матеріалів згідно зі стандартною методикою ISO 2738: Sintered metal materials, excluding hardmetals–Permeable sintered metal materials –Determination of density, oil content and open porosity. Це дозволило визначати показники пористості досліджуваних композитів. Одержані дані дають змогу контролювати поведінку того чи іншого матеріалу у процесі його виготовлення та оцінювати технологічність прийнятих складів композитів і режимів їх виготовлення.

При визначенні фізико-механічних характеристик одержаних підшипникових матеріалів було виготовлено стандартні зразки для проведення випробувань на міцність при згині, твердість та ударну в'язкість (ударний згин) згідно зі стандартами ISO 4498:2010: Sintered metal materials, excluding hardmetals– Determination of apparent hardness and microhardness; EN ISO 2740:2009. Sintered metal materials, excluding hardmetals – Tensile test pieces (ISO 2740:2009); ISO 5754:2017–Sintered metallic materials, except hard alloys – unnotched impact toughness test specimen; ICS: 77.160 Powder Metallurgy. 77.040.10 Mechanical Testing of Metals; ISO 14577–5:2022, Metallic materials- Instrumented indentation test for hardness and materials parameters – Part 5: Linear elastic dynamic instrumented indentation testing (DIIT); ASTM E290–14: Standard Test Methods For Bend Testing Of Material For Ductility.

Умови випробувань значно впливають на отримані результати. Тому необхідно було задати ці умови для того, щоб параметри фізико-механічних властивостей можна було порівнювати та відтворювати їх.

Наприклад, при вимірюванні твердості за Бринелем, HBS, стандартними умовами випробувань (ISO 4498:2010, ISO 4498-1-90), були навантаження 312,3 Н (31,25 кгс), діаметр сталевий кульки 2,5 мм, тривалість навантаження 15 с, тобто HBS 2,5/31,25/15.

Залежно від одержаного діаметра відбитка на зразках за складеними таблицями визначали значення твердості матеріалів за Бринелем.

При випробуваннях матеріалів на міцність при згині виготовлялись зразки зі стандартними розмірами 5×10×55 мм (ASTM E290–14), а сам процес випробування на деформування здійснювали на універсальній розривній машині МР–10.

Зразки вказаних розмірів укладались на опори з відстанню між ними 40 мм і піддавались згину. Межу міцності при згині R_{tr} визначали за формулою:

$$R_{tr} = 3P_K \times l / 2b \times h^2 ,$$

де P_K – руйнівне навантаження, Н; R_{tr} – межа міцності при згині, МПа; l – відстань між опорами, мм; b та h – відповідно ширина і товщина зразка, мм.

Випробування на ударний згин (ударну в'язкість) мають найбільше значення для визначення опору крихкому руйнуванню композитів, що досліджувались. Для цієї мети виготовлялися зразки, розмірами 10×10×55 мм (ISO 5754:2017), які піддавали випробуванням на маятниковому копрі КМ–1,5 (Німеччини), що працює за методом Шарпі (зразок розташовано на двох опорах). Для визначення ударної в'язкості K_C користувались формулою:

$$K_C = \frac{A_0}{S} ,$$

де K_C – ударна в'язкість, Дж/м²; S – площа поперечного перерізу зразка, м², A_0 – робота удару маятника, Дж.

2.3.3. Методика досліджень триботехнічних характеристик

При проведенні випробувань на тертя та знос використовували міжнародні стандартні методики - ISO 2795, Plain bearings — Sintered bushes — Dimensions and tolerances; JIS R1613: Testing Method for Wear

Resistance of High Performance Ceramics by Ball-on-Disk Method; ASTM G99: Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus; DIN 50324: Tribology; testing of friction and wear model test for sliding friction of solids (ball-on-disc system).

Зразки для випробувань на тертя та знос показано на рис. 2.6.

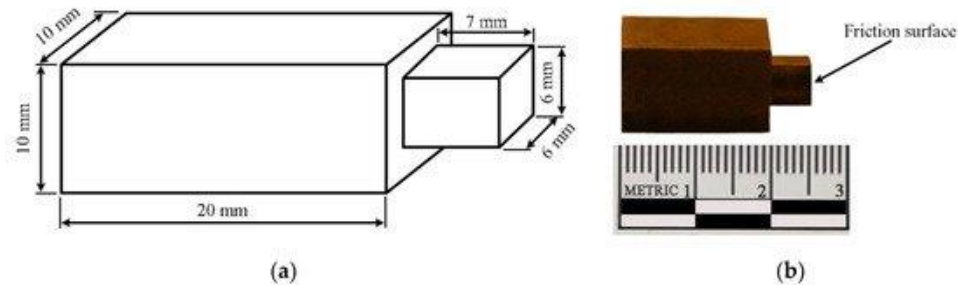


Рисунок 2.6. Зразок для триботехнічних випробувань

Триботехнічні випробування зразків з композитів на основі шліф-відходів сталей P6M5, 2X6B8M2K7 та 11P3AM3Ф2 виконувались у парі з контртілом із сталі P18 (HRC=56–58), у діапазоні швидкостей обертання 5000–7500 об./хв. та навантажень в інтервалі 3,0–5,0 МПа. Вказані умови трибовипробувань відповідають умовам експлуатації низки швидкісних друкарських апаратів і машин.

Вибір вищезначених марок сталей контртіл пов'язаний з їх відповідністю матеріалам реальних валів офсетних, друкарських і формних циліндрів імпортного друкарського обладнання, що виготовлені зі сталей-аналогів вищенаведених марок, таких, як швидкорізальна сталь T1 (AISI стандарт, США), що є аналогом вітчизняної сталі P18.

Випробування на тертя та знос композитних зразків на основі шліф-відходів алюмінієвих сплавів проводили на повітрі при швидкості ковзання 1 м/с, навантаженнях до 4,0 МПа в парі з контртілом із сталі 45 з твердістю HRC=45–48, яка є аналогом сталі 1045, A107, (AISI стандарт, США). Вибір означеної марки сталі контртіла пов'язаний з її відповідністю матеріалу реальних контр-деталей у контактних з'єднаннях постдрукарського обладнання. Для композитів на основі відходів алюмінієвих сплавів, що були виготовлені без додавання твердого мастила у вихідну шихту, при

трибовипробуваннях застосовували змащення мастилом “І-20” (для композитів на основі АК12ММгН) та синтетичним мастилом ПЕФ-240 (для композитів на основі АМ4,5Кд та АД35).

Триботехнічні характеристики у цьому дослідженні визначали за методикою трибометрії, розробленою авторами монографії. У процесі випробувань на універсальній трибометричній машині ВМТ-1 (рис. 2.7) параметри процесу випробування зразка залежно від умов тертя (швидкість, температура, навантаження) записуються у автоматичному режимі і зберігаються у базі даних.



Рисунок 2.7. Загальний вигляд установки ВМТ-1

В системі автоматичного запису без зупинення установки відбувається вимірювання і фіксація виникаючої сили тертя залежно від різних значень прикладених навантажень, температур або швидкостей ковзання для кожної пари тертя. Від сили тертя F при конкретних навантаженнях P не складно перейти до розрахунку коефіцієнта тертя μ згідно з формулою [2, 3]:

$$\mu = \frac{F}{P} .$$

2.3.4. Методика дослідження стану поверхонь тертя

Методика растрової електронної мікроскопії. Фрактографічні дослідження в даній роботі проводились в Центрі кристалофізичних

досліджень ІНМ ім. В. М. Бакуля НАН України з використанням методу растрової електронної мікроскопії на двох мікроскопах. Для одержання зображень поверхонь зразків виготовлених з шламових відходів силумінів застосовували растровий електронний мікроскопі EVO 50XVP (Німеччина, Carl Zeiss) дослідницького класу з великою аналітичною камерою, що має можливість підбору багаторівневої та гнучкої комплектації, що забезпечує отримання результатів високої якості.

Електронний мікроскоп забезпечує роздільну здатність 2–3 нм, високу точність позиціонування зразків та їх прецизійне переміщення в процесі роботи, дозволяє використовувати увесь спектр вакуумних режимів.

Особливістю мікроскопу є спеціально розрахована аналітична геометрія для рентгенівських спектрів, що працює в комплексі з дифракційними приставками, які забезпечують високу якість кінцевого результату за всім обсягом отриманих результатів.

У дослідженнях також використовували мікроскоп - мікроаналізатор "CamScan-4DV", основне призначення якого відтворення за допомогою електроннопроменевої трубки тривимірного зображення поверхні зразка за загальноприйнятою методикою. При цьому можливе дослідження мікротопографії грубих поверхонь і масивних зразків, що не досягається у випадку традиційних методів світлової і трансмісійної електронної мікроскопії. Роздільна здатність зображення при задовільних умовах зйомки може досягати 5–6 нм, а значна глибина фокуса виникає внаслідок малого кута розбіжності електронного пучка (приблизно 10 мрад), що більш ніж у 300 разів перевищує глибину фокуса у світловому мікроскопі, який працює в аналогічних умовах [108].

Взаємодія електронів первинного пучка з матеріалом досліджуваного зразка приводить до появи: 1) зворотно розсіяних електронів; 2) повільних і швидких вторинних електронів; 3) електронів, поглинених зразком; 4) Оже-електронів; 5) електромагнітного і рентгенівського випромінювання. Найбільший інтерес для аналізу представляють вторинні електрони малої

енергії (згенеровані в зразку пучком), а також високоенергетичні відбиті електрони (первинні електрони, відбиті від поверхні зразка). Детектування низькоенергетичних вторинних електронів здійснюється осцилятором з прикладанням «поточного» потенціалу 12 кВ. Сигнал від електронів даного виду дозволяє фіксувати зображення ділянок поверхні, які в силу їх геометрії не мають прямої видимості від осцилятора.

У випадку роздільного детектування сигналів від зворотно розсіяних електронів, що у даному приладі здійснюється за допомогою твердотілого чотирьохполісного детектора, можливе одержання додаткової інформації. Оскільки відношення зворотного розсіювання відбитих і падаючих електронів зростає зі зростанням атомного номера матеріалу зразка або його ділянки, даний режим зображення широко використовується у випадку контрасту, обумовленого різницею в атомних номерах аналізованих елементів або середнього електронного номера у випадку багатоелементних зразків (режим «фазового контрасту»). Дана методика дозволяє також детектувати поверхневі забруднення на зразку.

Методика визначення хімічного складу. Визначення хімічного складу поверхонь зразків, а також різних фаз і включень проводилось в даній роботі з використанням методу рентгеноспектрального мікроаналізу, сутність якого полягає в генерації рентгенівського випромінювання при падінні первинного електронного пучка на поверхню досліджуваного зразка [108].

Коли падаючий електронний пучок високої енергії досягає поверхні зразка, частина його енергії перетворюється в рентгенівські промені.

Випромінюваний рентгенівський спектр складається із спектра неперервного рентгенівського випромінювання, що включає рентгенівські промені всіх значень енергії, аж до енергії падаючого пучка, і з ліній характеристичного рентгенівського випромінювання (відомого як ряд ліній *K*-, *L*- і *M*-серій), за допомогою яких можна однозначно ідентифікувати хімічний склад зразка.

Детектування і аналіз рентгенівських променів, що випускаються поверхнею зразка під дією електронного пучка, проводилися за допомогою дисперсного енергетичного спектрометра LZ-5 з обробкою отриманих результатів, включаючи кількісний аналіз з урахуванням всіх похибок, у мінікомп'ютерній системі «Link-360».

Використання програми "Lintscan", що передбачає розбивку лінії сканування на 128 точок з наступним кількісним хімічним аналізом, дозволяє реєструвати та обробляти рентгенівське випромінювання досліджуваного зразка.

2.3.5. Профілометричний аналіз

Аналіз процесів тертя показує, що інтенсивність зношування поверхонь визначається вихідними параметрами якості робочих поверхонь, зокрема, параметрами шорсткості Ra [2, 31, 32, 35–37, 76, 80, 82, 109–125].

Саме формування необхідної вихідної геометрії поверхні антифрикційної композитної деталі в значній мірі визначає її наступну функціональну поведінку під час експлуатації друкарської машини [31, 32, 35–37, 76, 80, 82, 109–125].

Не менш важливим питанням є точність та достовірність експериментальних даних. Отримання високоточних даних про зміну шорсткості поверхні дає можливість цілеспрямовано регулювати режими тонкої механічної обробки поверхонь і тим самим отримувати необхідні параметри якості робочих поверхонь деталі [1, 3, 80, 82, 109–130].

Отримання точних експериментальних результатів вимірювання шорсткості неможливе без використання сучасного оптичного профілометричного обладнання, що є важливою обставиною для реалізації подальших оптимальних технологічних рішень.

Тому для вимірювання шорсткості робочих поверхонь антифрикційних композитів після тонкої механічної обробки та після триботехнічних випробувань використовували сучасний високоточний контактний профілометр MarSurf SD 26 (Mahr, Werl, Німеччина) та виконували

профілометричні дослідження обох контактних поверхонь досліджених композитів та контртіл згідно стандартів ISO 4287–96, ISO 4288–97, ISO 21920–1:2021, EN ISO 21920–1:2022: Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Profile – Part 1: Indication of surface texture (ISO 21920–1:2021), що охоплюють методику профілометрії і текстуру поверхні.

Порівняльні вимірювання з візуальною оцінкою поверхні проводили також за допомогою системи 3D-Image Viewer і електронного мікроскопа Hitachi TM–3000.

Вимірювання на профілометрії проводилися на п'яти вимірювальних лініях, кожна довжиною 4 мм, знятих в окремих місцях для кожного зразка, і на 20 вимірювальних доріжках довжиною 240 мкм для кожного з п'яти зображень, отриманих у вигляді 3D-зображень.

2.3.6. Методика вимірювання наклепу

Вимірювання наклепу в поверхневих шарах досліджених композитів, підданих пластичній деформації в результаті абразивної обробки, становить певні технічні труднощі.

Ці труднощі обумовлені як дрібністю вимірюваної величини ($5 \div 10$ мкм), так і мінливістю механічних властивостей наклепаної зони, що змінюються від максимальних відхилень в поверхневих шарах матеріалу до вихідних значень у глибинах.

Для дослідження закономірностей освіти наклепу застосовувалися сучасні методи вимірювань – рентгеноструктурний аналіз та металографічний аналіз.

2.3.6.1. Метод рентгеноструктурного аналізу

Рентгеноструктурне дослідження наклепу виконано на іонізаційній установці фірми «Сатеса» (Франція) у $K\alpha$ -Fe випромінюванні.

Величини наклепу оцінювалися за спотвореннями II роду ($\Delta a/a$) та розширенням інтерференційної лінії (311), $B(311)$, мм [1, 31, 32, 35–37, 76, 131–161].

Рентгеноструктурна зйомка проводилася за швидкості обертання зразка 0,5 град./хв. За вибраних умов рентгенівської зйомки та, відповідно до паспортних характеристик установки, інструментальна похибка вимірювань становить: за параметром $B(311)$ – 0,000011 мм, за параметром $\Delta a/a$ – 0,00001.

Для визначення глибини наклепаного шару проводилося пошарове травлення (електрополірування) зразків з кроком $4 \div 5$ мкм.

Товщина знятого шару вимірювалася на вертикальному оптичному мікрометрі JBТ із ціною поділки 1 мкм.

На кожному із травлених рівнів проводився повний цикл рентгеноструктурних вимірів.

Травлення тривало до досягнення глибинних шарів із параметрами необробленого зразка.

Для електрополірування застосовувався наступний склад електроліту: фосфорної кислоти – 85%, хромового ангідриду – 15%. Режим електрополірування: температура ванни – 80°C, щільність струму – 1,7 А/см², відстань між катодом та зразком – 40 мм, розташування електродів – вертикальне, час травлення – 15 с.

Вибір електрополірування, як засобу видалення наклепаних шарів у процесі дослідження, визначався рядом переваг електрополірування перед іншими методами обробки.

Ці переваги висвітлені в технічній літературі [31, 32, 35–37, 76, 80, 82, 162–191], і є, по суті, причиною широкого поширення електрополірування для різних досліджень, у тому числі й для досліджень закономірностей наклепу різних сталей та сплавів.

Основною особливістю електрополірування є можливість обробки досліджуваної поверхні без деформацій поверхневого шару та його структурних змін. Електрополірування не надає металу додаткової міцності,

не супроводжується виникненням наклепу, не обумовлює змін фізичних властивостей досліджуваних поверхонь.

Для визначення ступеня впливу електрополірування на параметри наклепу і в порядку попередньої обробки методики експерименту було здійснено порівняння параметрів наклепу зразків зі сплаву Mu-metall, підданих електрополіруванню та хімічному травленню. Зразки попередньо були оброблені методом чистового торцевого фрезерування дрібнозубою торцевою фрезою зі швидкорізальної сталі. Діаметр фрези—40 мм, кількість зубів—12. Режими фрезерування: ширина фрезерування — 30 мм, подача на зуб фрези — 0,08 мм, хвилинна подача —307 мм/хв., глибина різання — 3 мм, кількість обертів фрези — 320 об./хв., фрезерування - без рідини, що охолоджує. За таких умов обробки зразки мали глибину наклепаного шару в межах 150–180 мкм.

Після електрополірування та хімічного травлення на глибину 100 мкм параметри наклепу у двох партій зразків відрізнялися неістотно (не більше ніж на 5–10%).

Таким чином, електрополірування застосовувалось для дослідження глибини наклепу дослідженнях композитів за допомогою рентгеноструктурного аналізу.

Відомо [35–37, 76, 82, 108], що величина напружень другого роду σ_i знаходиться у прямій залежності від спотворень II роду, що визначаються методами рентгеноструктурного аналізу:

$$\sigma_i = E \cdot \frac{\Delta a}{a} \cdot 10^{-4}$$

де E – модуль нормальної пружності; a – параметр (період) кристалічної ґратки.

Таким чином, метод рентгеноструктурного аналізу у поєднанні з пошаровим електрополіруванням дозволяє визначити глибину наклепу в наклепаній поверхневій зоні деталі.

2.3.6.2. Метод металографічного аналізу при дослідженні наклепу

Метод металографічного аналізу набув широкого застосування при наукових дослідженнях, зокрема й у експериментах, виконаних авторами монографії.

Сутність методу полягає у визначенні наклепу вимірюванням мікротвердості шарів, що залягають на різній глибині від механічно обробленої поверхні.

Мікротвердість шарів по-різному віддалених від поверхні можна визначити за допомогою косих, прямих або паралельних зрізів.

Метод косих зрізів вносить деякі неточності в отримані результати, оскільки у процесі доведення косого зрізу досліджувана поверхня піддається додатковому наклепу, внаслідок чого мікротвердість може додатково підвищуватися на $10\text{--}15 \text{ кгс/мм}^2$ ($98\text{--}147 \text{ Н/мм}^2$) [1, 31, 32, 35–37, 76, 82].

Недоцільним для вимірювань глибини наклепу феромагнітних матеріалів є і метод прямих зрізів, який можна застосовувати при глибинах наклепу 500 мкм, що приблизно в 50–100 разів перевищує глибину наклепу, що утворюється при тонкому шліфуванні композитів.

Таким чином, у наших дослідженнях для вимірювання глибини наклепу антифрикційних композитів застосовувався метод паралельних зрізів з оцінкою мікротвердості на мікротвердомірах ПМТ–3 та SPT–31М (Великобританія).

Вимірювання глибини наклепу за допомогою металографічного аналізу виконувалося таким чином. Проводились вимірювання мікротвердості вихідних механічно не оброблених зразків.

Потім визначалася мікротвердість механічно обробленої досліджуваної поверхні. Стравлюючи пошарово наклепані шари з кроком 1–3 мкм, вимірювали мікротвердість на різних рівнях наклепаної зони [1, 31, 32, 35–37, 131–161, 165, 172–177, 183, 184, 187–191]. Одночасно з вимірюванням мікротвердості визначалася ступінь наклепу H_d/H_0 , де H_d – мікротвердість

після механічної обробки поверхні зразка; H_0 – мікротвердість вихідних необроблених зразків.

2.3.7. Вимірювання залишкових напружень у поверхневих шарах

Згідно з сучасними уявленнями, у формуванні залишкових напружень у поверхневому шарі деталей при абразивному шліфуванні беруть участь і впливають один на одного два протилежні фактори – силовий і тепловий вплив шліфувального круга на виріб. Пластична деформація від нормальних сил різання призводить до зміцнення поверхневого шару та появу стискаючих напружень, а високі температури в зоні різання викликають локальні термопластичні деформації та, відповідно, прояв залишкових напружень розтягування. Розрахунки величин залишкових напруг здійснювався за методикою Маталіна А. А. та Некрасова О. М., детально описаною у працях [1, 31, 32, 35–37, 76, 79, 82]. Експериментальне вивчення залишкових напружень проводилося методом Давиденкова Н. Н. і представлено у публікаціях [1, 31, 32, 35–37, 76, 192–197].

2. 4. Загальна методика виконання експериментальних досліджень з фінішного оброблення поверхонь композитів

Весь комплекс експериментальних досліджень процесів фінішного оброблення поверхонь тертя деталей поліграфічних машин, які виготовлені з новітніх зносостійких композитних матеріалів, виконувався на спеціальних технологічних зразках діаметром 20 мм і товщиною 1 мм. Це обумовлено прагненням знизити вартісні показники досліджень через складну схему виготовлення деталей пар тертя .

Для дослідження параметрів шорсткості поверхонь R_a , ступеню наклепу, глибини його проникнення у об'єм деталі, величини та знаку залишкових напружень поверхневого шару оброблення використовувались стандартні методики (металографічний, мікродюрOMETричний, рентгеноструктурний, електронно-мікроскопічний аналіз), опис яких наведено вище.

2.4.1. Вибір шліфувальних інструментів, верстатного обладнання і технологічних схем тонкої алмазно-абразивної обробки поверхонь антифрикційних композитів на основі відходів інструментальних сталей

Для забезпечення високих параметрів якості різних за призначенням машин і механізмів, у яких використовуються антифрикційні деталі, зокрема, підшипники ковзання, їх робочі контактні поверхні піддаються тонкій механічній обробці.

Геометричні розміри і необхідні параметри точності найчастіше забезпечують тонким абразивним шліфуванням, причому для обробки поверхонь внутрішніх отворів використовують прецизійне внутрішнє шліфування, для обробки зовнішніх діаметрів виробів - прецизійне зовнішнє кругле шліфування, а для обробки площинних поверхонь (у разі необхідності) – площинне шліфування з використанням відповідного верстатного обладнання, пристроїв і інструменту [1, 31, 32, 35–37, 76, 136–161, 192–197].

При виконанні досліджень, авторами монографії ч. 2 створено нові типи антифрикційних композитів на основі шліфувальних відходів легованих сталей [1, 2, 31, 32, 39–60] (табл. 2.1) які призначені для експлуатації у вузлах швидкісної друкарської техніки за підвищених навантажень (до 5,0 МПа) і швидкостях обертання до 7500 об/хв.

У цих умовах надзвичайно важливим є забезпечення розмірної стійкості підшипників ковзання і забезпечення відповідної якості поверхонь тертя.

Розроблені антифрикційні композити на основі шліфувальних відходів легованих сталей (табл. 2.1) відносяться до групи структурно-чутливих, які змінюють свої властивості (міцність, мікротвердість, глибину і ступінь наклепу) під дією навіть незначних навантажень, що значно менші ніж зусилля шліфування при обробці прецизійних отворів підшипників ковзання.

Внаслідок цих змін відбувається погіршення властивостей поверхневих шарів, що веде до погіршення експлуатаційних параметрів підшипників, а відтак і машин, а у ряді випадків – до створення аварійних ситуацій і простоїв відповідних технічних систем.

Тому, поряд з створенням нових марок матеріалів, для інженерної практики велике практичне значення мають дослідження процесів їх механічної обробки і розробка на цій базі технологічних процесів для виробництва.

У відповідності з розробленою авторами монографії методикою виконано вивчення впливу процесу шліфування на параметри якості поверхонь зразків з композитів на основі регенованих шліфувальних відходів низки легованих сталей (табл. 2.1) з використанням шліфувальних кругів з боразону та алмазу.

Технічні параметри зносостійкості поверхонь деталей тертя (незалежно від матеріалу деталі) визначаються кінцевими значеннями показників параметрів якості поверхонь після їх фінішної механічної обробки [1, 32, 32, 35–37, 76, 82, 136–161, 192–197].

З фундаментальних засад технології машинобудування відомо, що якість поверхні – комплексне поняття, яке включає в себе геометричну точність, шорсткість, параметри наклепу поверхневого шару (ступінь наклепу та глибина його залягання у поверхневих шарах деталі), а також рівень і знак (розтягування чи стискання) залишкових напружень поверхні оброблення [1, 32, 32, 35–37, 74–84].

У зв'язку з тим, що новітні антифрикційні та високозносостійкі композити на основі шліфувальних відходів (табл. 2.1.) розроблені авторами монографії відносно нещодавно на даний час розгалужених досліджень якості поверхонь їх механічного оброблення ще замало, є лише окремі напрацювання авторів монографії.

Виходячи із загальноприйнятих технологічних поглядів, встановлено, що на параметри якості впливають методи фінішного оброблення (тонке шліфування, прецизійна машинна доводка, суперфінішування, хонінгування, магнітно-абразивне оброблення), тип абразивного інструменту (карбід кремнію зелений, електрокорунд білий, монокорунд, карбід кремнію чорний, електрокорунд хромчастий, електрокорунд білий титанистий, надтверді

синтетичні матеріали – алмаз синтетичний, кубічний нітрид бору, ельбор, боразон, кермети різного складу), зернистість абразивного інструменту (крупнозернистий, дрібнозернистий), застосування та склад мастильно-охолоджуючого середовища, точності параметрів верстатного обладнання, прецизійність технологічних пристроїв, приладів та спеціального нестандартного обладнання [1, 32, 32, 35–37, 74–84].

На жаль, усі ці найважливіші питання у комплексі взаємодії різних факторів (абразиви, верстати, режими різання, вплив на якість поверхні параметрів силового та температурного полів та ін.) всебічно не досліджено. Це на практиці обумовлювало появу різноманітних схем побудови технологічного процесу фінішної обробки поверхонь тертя деталей, що були виготовлені з нових композитів. Здебільшого ці процеси не завжди були науково обґрунтованими чи оптимальними і найчастіше мали на меті забезпечити будь-яку механічну обробку, що базується на конкретних можливостях підприємства (верстати, абразивні інструменти, наявність пристроїв та інструментальне забезпечення, а також відповідна кваліфікація робітників-верстатників). Найчастіше такі промислові підприємства вирішували конкретні поточні завдання, не зважаючи на якісні характеристики.

Саме тому актуальним є виконання технологічних досліджень щодо всебічного вивчення впливу різних факторів тонкої механічної обробки на якість поверхонь оброблення антифрикційних деталей поліграфічних машин з новітніх сучасних марок зносостійких композитів, що стало об'єктом прискіпливої уваги авторів монографії.

Нижче наведені особливості методологічного забезпечення параметрів якості поверхонь оброблення деталей з нових композитів при алмазно-абразивній обробці їх робочих поверхонь.

2.4.1.1. Верстатне обладнання для фінішної обробки деталей тертя

Для фінішного оброблення поверхонь тертя деталей з новітніх антифрикційних композитів (табл. 2.1) використовувалось найсучасніше

прецизійне верстатне обладнання провідних фірм Німеччини, Швейцарії, США, Японії, Італії, Великобританії та України.

Зокрема, для операцій тонкого абразивного шліфування плоских поверхонь деталей застосовувались прецизійні плоско-шліфувальні верстати моделей FF – 250, FF – 350 фірми “Abawerk” (Німеччина) [1, 3, 31, 32, 35–37, 76, 82].

Зовнішнє кругле абразивне шліфування виконувалось на прецизійних верстатах SS – 250, SS – 350 фірми “Werkzajt” (Німеччина) [1, 3, 31, 32, 136–161, 192–197].

Для прецизійної абразивної обробки отворів деталей тертя (отворів швидкісних композитних підшипників ковзання) використовувались внутрішньошліфувальні верстати надвисокої точності AS–125 фірми “Studder” (Швейцарія) [1, 3, 31, 32, 35–37, 136–161, 192–197].

2.4.1.2. Абразивні інструменти для фінішної обробки деталей з антифрикційних композитів на основі шліфувальних відходів сталей

Для дослідження технологічних процесів надтонкої прецизійної обробки антифрикційних деталей пар тертя, що виготовлені з новітніх високотносостійких композиційних матеріалів використовувались абразивні інструменти з синтетичних надтвердих матеріалів – боразону та алмазу [1, 3, 31, 32, 35–37, 85, 86, 89, 156, 161, 184].

Перед застосуванням ріжучу поверхню шліфувальних абразивних кругів щільно правили за допомогою алмазних олівців [1, 31, 32, 35–37].

Комплекс технологічних досліджень з вивчення закономірностей тонкого боразонового та алмазного шліфування новітніх високотносостійких композитів для деталей тертя поліграфічних машин виконувався з застосуванням шліфувальних кругів із синтетичних алмазів (АС) та боразону (Во) [1, 3, 31, 32, 35–37, 85, 86, 89, 156, 161, 184].

Зернистість шліфувальних кругів складала гаму інструментів з розміром основної фракції абразивного зерна 100, 50, 28, 20, 14, 10 та 7 мкм [85, 86].

Усі досліді були виконані шліфувальними кругами на металевій (М), керамічній (К), бакелітній (Б) та бакелітно-гумовій (Бр) зв'язках [1, 3, 31, 32, 35–37, 85, 86, 89, 156, 161, 184] для порівняння їх впливу на якість поверхні оброблення.

При виконанні експериментальних досліджень процесів тонкого боразонового та алмазного шліфування нових високозносостійких композитних матеріалів, синтезованих на основі високолегованих шліфувальних відходів сталей, застосовувались круги синтетичних надтвердих матеріалів зі 100%-ю концентрацією основної зеренної фракції [1, 3, 31, 32, 35–37, 85, 86].

2.4.1.3. Мастильно-охолоджуючі середовища для фінішного оброблення деталей зі зносостійких антифрикційних композитів

Як відомо з численних наукових джерел та практичного досвіду машинобудівних підприємств [1, 3, 31, 32, 35–37, 85, 86, 89] застосування для технологічних процесів фінішного абразивного оброблення різних мастильно-охолоджуючих рідин суттєво впливає на показники якості поверхонь деталей, що обробляються різними за своєю технічною сутністю методами оздоблювання (тонке абразивне, алмазне, кубонітове, ельборове та боразонове шліфування, суперфінішування, хонінгування, прецизійна машинна доводка плоских поверхонь, магнітно-абразивне оброблення).

Головною метою прецизійної обробки з використанням мастильно-охолоджуючих рідин (МОР) є намагання досягти мінімальних значень параметрів шорсткості поверхонь R_a , мінімальних величин ступеня наклепу та глибини його проникнення у матеріал деталі оброблення, а також оптимізація рівня залишкових напружень у поверхневому шарі оброблюваної деталі. Реалізація цієї мети є досить складною задачею, яка вимагає виконання специфічних досліджень безпосередньо у зоні зрізання надтонких стружок, оцінки одночасної дії силового і температурного полів, що виникають на ріжучому лезі окремого абразивного зерна. Крім того, важливе значення

мають процеси тертя при фінішній абразивній обробці. Саме для їх зменшення у складі технологічних охолоджуючих рідин присутні у тій чи іншій кількості мастильні речовини.

Важливе значення (окрім складу МОР) є технологія подачі мастильно-охолоджуючих речовин у зону обробки [1, 3, 31, 32, 35–37, 118, 145].

Залежно від типу композиту (на основі швидкорізальних сталей, нікелю, міді чи алюмінію) та методу фінішного абразивного оброблення (тонке абразивне чи алмазне шліфування, суперфінішування, хонінгування, прецизійна машинна доводка чи МАО) призначають всебічно досліджені мастильно-охолоджуючі речовини і, з метою досягнення найліпших показників якості створюють оригінальні МОР.

Таким чином, застосування мастильно-охолоджуючої рідини обумовлено конкретними умовами виробництва і необхідністю забезпечення нормованих параметрів якості продукції.

З урахуванням зазначених факторів, тонке абразивне - боразонове та алмазне шліфування здійснювалось з використанням наступних МОР: «Укрінол – 1», «Укрінол–12», «Укрінол–14», «Аквол–10», «Cindolibe 173 Ep» та водного розчину сульфофрезолу.

2.4.2. Методика тонкого ельборового шліфування зносостійких деталей з композитів на основі шліфувальних відходів алюмінієвих сплавів

При виконанні досліджень, авторами монографії ч. 2 створено нові типи антифрикційних композитів на основі шліфувальних відходів легованих алюмінієвих сплавів (табл. 2.2) [64–73], що призначені для роботи у контактних з'єднаннях постдрукерських машин за підвищених навантажень 2,0 – 4,0 МПа і швидкостях ковзання від 2,0 до 4,0 м/с.

Відомо [1–3, 64–73], 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.

У зв'язку з тим, що нові композити 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 окремі публікації, присвячені дослідженню впливу складу інструменту та режимів різання на параметри шорсткості поверхонь при тонкому абразивному шліфуванні композитів на основі шліф-відходів алюмінієвих сплавів [31, 32, 35–37, 64–73].

Виходячи із загальних положень теорії абразивного оброблення матеріалів [74–82] та враховуючи специфічні властивості композиційних матеріалів на основі алюмінію, доцільним є обробка високоточних плоских поверхонь деталей тертя з композитів на основі відходів алюмінієвої сировини за схемою – «доводка плоских поверхонь, хонінгування циліндричних поверхонь». Така схема оброблення гарантує отримання надвисоких вимог до поверхонь тертя композитних деталей, які є засадничими для забезпечення високих параметрів надійності пар тертя (зносостійкості, довговічності, ремонтоздатності та коефіцієнта готовності). Наприклад, для прецизійних опор подавальних систем поліграфічних комплексів, ці вимоги складають – параметр шорсткості поверхні оброблення R_a повинен знаходитись у межах 0,020 мкм – 0,040 мкм, неплоскостність на базі 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 тонкого ельборового шліфування та хонінгування деталей з антифрикційних композитів на основі регенерованих шліфувальних відходів алюмінієвих сплавів.

Це пояснюється тим, що такі нові композити лише нещодавно були створені [64–73]. Тому всебічних технологічних досліджень із забезпечення

якості поверхонь деталей з таких композитів та оптимізації режимів оброблення х поверхонь ще проводилось не достатньо.

Втім, автори монографії накопичили низку напрацювань з дослідження параметрів шорсткості поверхонь деталей з алюмінієвих композитів при тонкому абразивному ельборовому шліфуванні плоских поверхонь, поверхонь отворів та зовнішніх циліндричних поверхонь деталей обертання та розробили оптимальні режими різання, здійснили вибір структури і складу шліфувальних інструментів [64–73], про що буде викладено у розділі 5 монографії.

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) [1, 3, 31, 32, 35–37, 76, 82]. Нажаль, розгалужених досліджень у цьому напрямку до сьогодні не велось. Це, безумовно, є перешкодою для повного використання усіх можливостей підвищення зносостійкості за рахунок використання, притаманних лише їм, властивостей новітніх марок композитів на основі регенованих шліф-відходів алюмінієвих сплавів 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 [1, 3, 31, 32, 35–37, 76, 82, 85, 86]. Науковцями та практикою провідних машинобудівних підприємств доведено, що застосування ельборового шліфування (перш за все, завдяки особливостям інструменту) дозволяє отримати найкращі показники якості оброблюваних поверхонь. Однак, відсутність науково обґрунтованих рекомендацій з високоточного оброблення деталей з композитних матеріалів на основі алюмінію 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 тонкого ельборового шліфування композиційних матеріалів на основі відновлених шліфувальних відходів промислових алюмінієвих сплавів є актуальним питанням, що має як наукове, так і практичне значення для технологів-виробників

Вибір ельбору (ЛО) для тонкого шліфування зносостійких композитів на основі алюмінію було здійснено з урахуванням результатів досліджень по вивченню взаємодії матеріалів поверхонь тертя ріжучих абразивних інструментів з різними фізико-механічними властивостями (електрокорунд 32А, карбід кремнію зелений 63С, монокорунд 44А, алмаз синтетичний АС, ельбор ЛО) та високолегованих композитів різного складу [35–37, 76, 82, 85, 86].

З урахуванням сучасних уявлень про особливості абразивного інструменту різної природи та специфіки оброблюваних матеріалів було визначено, що найкращі результати по дослідженню параметрів якості поверхонь оброблення високолегованих складнооброблюваних композитів забезпечує застосування тонкого шліфування абразивними кругами з ельбору (ЛО).

Крім того, для збільшення продуктивності шліфування у такому випадку більш прийнятними є зерна ельбора (ЛО), що мають гексагональну форму побудови, ніж зерна синтетичного алмазу АС, які мають кубічну форму [82, 85, 86].

Для фінішного оброблення поверхонь тертя деталей з новітніх антифрикційних композитів (табл. 2.2) використовувалось найсучасніше прецизійне верстатне обладнання провідних фірм Німеччини, Швейцарії, США, Японії, Італії, Великобританії та України.

Зокрема, для операцій тонкого абразивного шліфування плоских поверхонь деталей застосовувались прецизійні плоскошліфувальні верстати

моделей FF – 250, FF – 350 фірми “Abawerk” (Німеччина) [1, 3, 31, 32, 35–37, 76, 82].

Зовнішнє кругле абразивне шліфування виконувалось на прецизійних верстатах SS – 250, SS – 350 фірми “Werkzajt” (Німеччина) [1, 3, 31, 32, 136–161, 192–197].

Для прецизійної абразивної обробки отворів деталей тертя (отворів композитних деталей з композитів на основі алюмінію) використовувались внутрішньошліфувальні верстати надвисокої точності AS–125 фірми “Studder” (Швейцарія) [1, 3, 31, 32, 35–37, 136–161, 192–197].

Зернистість шліфувальних кругів складала гаму інструментів з розміром основної фракції абразивного зерна 100, 50, 28, 20, 14, 10 та 7 мкм [85, 86].

Усі досліді були виконані шліфувальними кругами на металевій (М), керамічній (К), бакелітній (Б) та бакелітно-гумовій (Бр) зв'язках [1, 3, 31, 32, 35–37, 85, 86, 89, 156, 161, 184] для порівняння їх впливу на якість поверхні оброблення.

При виконанні експериментальних досліджень процесів тонкого ельборового шліфування нових високозносостійких композитних матеріалів, синтезованих на основі високолегованих шліфувальних відходів алюмінієвих сплавів, застосовувались круги синтетичних надтвердих матеріалів зі 100%-ю концентрацією основної зеренної фракції [1, 3, 31, 32, 35–37, 85, 86].

За методикою обробка зразків виконувалась на плоскошліфувальних, кругло- і внутрішньо шліфувальних верстатах.

Зразки для експериментів були виготовлені методами порошкової металургії (п.2.1) з композиційних матеріалів на основі відходів алюмінієвих сплавів АК12ММгН та АК12ММгН + (9–12)% MoS₂.

2.4.3. Методика прецизійної машинної доводки зносостійких деталей з композитів на основі шліфувальних відходів силуміну АК12ММгН

Відомо [1–4], що композитні антифрикційні матеріали застосовують для забезпечення параметрів надійності, довговічності та ремонтоздатності

деталей тертя, які працюють в широкому діапазоні режимів експлуатації. Вказані параметри визначаються, в першу чергу, відповідними властивостями поверхневого шару (шорсткість поверхні, ступінь та глибина наклепу, рівень залишкових напружень), які отримують як результат фінішного оброблення поверхонь тертя деталей різного постдрукерського обладнання. Вони, як правило, забезпечуються технологічними процесами тонкого абразивного оброблення (шліфування, прецизійна доводка, суперфінішування, хонінгування, магнітно-абразивне полірування).

На сьогодні існує велика кількість літературних джерел, які присвячені дослідженню різних аспектів проблеми забезпечення якості поверхонь деталей тертя різними методами алмазно-абразивного шліфування та механічної прецизійної доводки [1, 3, 31, 32, 36, 37, 109 – 197].

Проте, досліджень з технологічних процесів прецизійної машинної доводки новітніх марок високолегованих композитів існує лише обмежена кількість. Це не дозволяє в умовах реального виробництва оптимізувати структурні схеми технологічних процесів, які були б спроможні забезпечити найвищі параметри якості поверхонь деталей тертя сучасних машин і механізмів.

Тому дослідження процесів прецизійної машинної доводки новітніх композитів на основі відновлених шліфувальних відходів алюмінієвих сплавів є актуальним питанням, що має безсумнівне як наукове, так і практичне значення, чому присвячені наукові напрацювання авторів монографії і про що викладено нижче.

Також слід зазначити, що для отримання необхідних технічних умов по забезпеченню високих параметрів якості плоских поверхонь деталей з композитних матеріалів на основі алюмінію при їх машинній доводці найголовнішою умовою є питання оптимізації вибору параметрів абразивних зерен [3, 31, 32, 35–37, 82]. З урахуванням цього для розгалужених досліджень шорсткості, точності та фізичних властивостей тонкого поверхневого шару (наклепу) деталей при їх прецизійній машинній доводці автори статті

використовували в якості абразивних доводочних мікропорошків зерна електрокорунду білого (23А), електрокорунду хромчастого із вмістом у складі абразивного оксиду хрому Cr_2O_3 до 2% (33А), електрокорунду титанового із вмістом титану TiO_2 до 2% (37А) та монокорунду (43А). Зернистість абразивних мікропорошків у всіх випадках коливалась у межах 1 – 7 мкм.

Мікропорошки карбіду кремнію зеленого (63С), які мають найгострішу форму зерна, не використовувались взагалі у зв'язку з тим, що вони мають пластинчасту структуру і не забезпечують необхідних параметрів якості поверхонь оброблення деталей, а також показників продуктивності при обробці [31, 32, 35–37, 82].

При дослідження впливу на параметр шорсткості поверхні матеріала зерна, зернистості абразивних мікропорошків, матеріалу доводочного диску та складу мастильно-охолоджуючої рідини (МОР) для різних композитних матеріалів на основі алюмінієвих сплавів застосовувалась швидкість обертання доводочного диску V_d близько 60 об/хв., а шпинделя з водило-кулісою V_k у межах 180 – 190 об/хв., яка складає рівень відносної швидкості різання 5 – 7 м/хв., що є характерним для технологічних процесів машинної доводки вільно шаржованим у притир абразивом та доводки не шаржовим абразивним матеріалом.

Зразки для експериментів були виготовлені методами порошкової металургії зі зносостійких композиційних матеріалів, синтезованих на основі використання відходів алюмінієвих сплавів АК12ММгН та АК12ММгН +(9–12)% MoS_2 (табл. 2.2).

2.5. Математична обробка результатів експериментів

2.5.1 Оцінка суттєвих різниць між експериментальними вибірками

Оцінка суттєвості різниці між вибірками. Порівняння і оцінка середніх величин, а також визначення достовірності отриманих результатів виконувалось методами теорії ймовірності та математичної статистики [1, 3, 31, 32]. Для оцінки випадковості чи суттєвості розходження середніх

арифметичних значень, розраховані за даними двох вибірок, застосовувався метод t -розподілення (Стюдента). При цьому розрахунки виконувались для таких принципово відмінних випадків вибірок.

1-й випадок – незалежні вибірки з нормальної сукупності. В цьому випадку розрахункове t -розподілення визначалось за формулою [76]:

$$t = \frac{\bar{x}}{S_x^-}, \quad (2.6)$$

де $\bar{x}$ - середнє арифметичне значення сукупності спостережених величин x_i з числом спостережень у сукупності n_1 .

$\bar{y}$ - середнє арифметичне значення сукупності спостережених величин y_i з числом спостережень у сукупності n_2 .

$$\bar{x} = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{i=n_1} x_i, \quad (2.7)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{i=n_2} y_i, \quad (2.8)$$

S_x^- - розраховується за формулою:

$$S_x^- = \sqrt{\frac{n_1 + n_2}{n_1 \cdot n_2}}, \quad (2.9)$$

Якщо розрахункове t більше (рівне) табличному значенню t_0 , то спостережені сукупності визнавались суттєво різними.

Табличне значення t_0 визначається за інтегральною функцією розподілення

$$F(t_0) = \int_{-\infty}^{t_0} \varphi(t) dt, \quad (2.10)$$

де

$$\varphi(t) = \frac{\frac{k-1}{2}}{\sqrt{k\pi} \cdot \frac{k-1}{2}! \cdot (1 + \frac{1}{k}t^2)^{\frac{k+1}{2}}}, \quad (2.11)$$

k - число ступенів вільності

$$k = n_1 + n_2 - 2. \quad (2.12).$$

Функція $F(t_0)$ для різних t і k наведена в таблицях [1, 3, 31, 32, 76, 82]. Величина t_0 обиралась при рівні суттєвості ε , рівному 5%.

2-й випадок для залежних вибірок з нормальної сукупності. Як і в 1-му випадку значення t розраховували за формулою (2.6). Проте, тут

$$S_x = \frac{S}{\sqrt{N}} \quad (2.13),$$

де N – число парних спостережень порівняних вибірок.

$$S = \sqrt{\frac{\sum n_x (x - \bar{x}_0)^2}{N - 1}} \quad (2.14),$$

n_x - частота спостережених значень різностей.

У формулі (2.15) x - поточне значення різниці спостережених пар вибірок x_i , y_i .

$$x = x_i - y_i \quad (2.15),$$

$\bar{x}_0$ – різниця середніх арифметичних двох порівняних вибірок

$$\bar{x}_0 = \bar{x} - \bar{y} \quad (2.16).$$

При виконанні умови $t \geq t_0$ спостережені сукупності визнавались суттєво різними.

Число ступенів свободи для величини t_0 визначалось із залежності:

$$k = N - 1. \quad (2.17)$$

У ряді випадків для оцінки суттєвості різниці між групами, що вивчалися, застосовувався метод серій [31, 32]. При цьому складались впорядковані величини $x_1, x_2, \dots, x_n$ однієї дослідженої групи і впорядковані

величини $y_1, y_2, \dots, y_n$ другої групи. Якщо виявлялось, що $x_1 < y_1, x_2 < y_2, \dots, x_n < y_n$, то вивчені сукупності визнавались суттєво різними.

В деяких випадках для встановлення нормального експериментального розподілу досліджених величин і для отримання можливості оцінки суттєвості різниць між вибірками за критерієм Ст'юдента застосовувався метод статистичного групування і відхилень від вибірових середніх ($\bar{x}$) в середині груп з об'єднанням вказаних відхилень за рядом груп, тобто з приведенням їх до $\bar{x} = 0$. Розрахувавши вирівнюючі частоти і виконавши відхилення за параметром ймовірності підтверджували гіпотезу щодо нормальності розподілу.

2.5.2. Методи дослідження статистичного зв'язку

Дослідження статистичного зв'язку. Для дослідження статистичного зв'язку між величинами, визначеними в результаті експерименту, застосовувався метод кореляційного аналізу як для випадків парної, так і для множинної кореляції. При парній кореляції для вивчення сили і характеру зв'язків між двома дослідженими факторами розраховується коефіцієнт кореляції r_k . Визначення коефіцієнта кореляції виконувалось за початковими ν і центральними μ моментами здобутків [31, 32, 76, 82].

$$r_k = \frac{\nu_{1/1} - \nu_{1(x)} \cdot \nu_{1(y)}}{\sqrt{\mu_{2(x)}} \cdot \sqrt{\mu_{2(y)}}}, \quad (2.18),$$

де $\nu_{1/1}$ – перший початковий момент здобутку двох випадкових спостережених значень; $\nu_{1(x)}, \nu_{1(y)}$ – перші початкові моменти досліджених значень; $\mu_{1(x)}, \mu_{1(y)}$ – другі центральні моменти досліджених значень.

Перший початковий момент здобутку двох випадкових спостережених значень розраховується наступним чином:

$$\nu_{1/1} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^{k_j} \sum_{i=1}^{k_i} n_{xy} \cdot \frac{x_j - a_x}{c_x} \cdot \frac{y_i - a_y}{c_y}, \quad (2.19),$$

де a_x, a_y - вибрані початкові значення (умовні нулі відліку); c_x, c_y - ціни розрядів спостережених величин; N - загальне число спостережених значень.

Початкові моменти h -го порядку визначались за формулою:

$$\nu_h = \frac{1}{N} \cdot \sum_i x_i^h. \quad (2.20).$$

Центральні моменти h -го порядку визначались за формулою:

$$\mu_h = \frac{1}{N} \cdot \sum_i n_i (x_i - \bar{x})^h. \quad (2.21).$$

Оцінка форми зв'язку виконувалась за допомогою кореляційного відношення η .

Завжди має місце співвідношення

$$\eta \geq |r_k|. \quad (2.22).$$

Якщо кореляція лінійна, то

$$\eta \approx |r_k|. \quad (2.23).$$

Чим ближче η до одиниці, тим статистичний зв'язок тісніший, а чим ближче до нуля, тим цей зв'язок слабкіше, тобто значення некорельовані.

При підрахунках відзначались значення η_y для кореляційного зв'язку y_i з x_i , тобто для залежності індивідуальних середніх $\bar{y}_x$ від x_i і η_x для кореляційного зв'язку x_i з y_i , тобто для залежності $\bar{x}_y$ від y_i .

У першому випадку вибіркове кореляційне відношення підраховувалось за формулою:

$$\eta_y = \frac{S(\bar{y}_x)}{S_y}, \quad (2.24),$$

де S_y визначалось за формулою:

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum n'_y \cdot y^2}{N} - \bar{y}^2}, \quad (2.25),$$

де n'_y - частота значень y_i :

$$S(\bar{y}_x) = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum n'_x (\bar{y}_x - \bar{y})^2}; \quad (2.26),$$

де n'_x - частота значень x_i .

У другому випадку при визначенні зв'язку x_i з y_i

$$\eta_x = \frac{S(\bar{x}_y)}{S_x}; \quad (2.27)$$

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum n'_x \cdot x^2}{N} - \bar{x}^2}, \quad (2.28)$$

$$S(\bar{x}_y) = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum n'_y (\bar{x}_y - \bar{x})^2}. \quad (2.29)$$

Підкореневі вирази у (2.26) і (2.29) є дисперсія часткових середніх $\bar{y}_x$, $\bar{x}_y$ відносно загальних середніх $\bar{y}$, $\bar{x}$ значень y_i , x_i .

Для встановлення існування лінійної кореляції між y_i і x_i можна порівняти кореляційне відношення η з коефіцієнтом кореляції r_k за критерієм Θ_{r_k} .

Якщо різниця між η_y і r_k чи η_x і r_k несуттєва, і кореляцію можна вважати лінійною, тоді

$$\xi = \frac{|\Theta_{r_k} - 1|}{\sigma_{\Theta_{r_k}}} < 3 \quad (2.30),$$

$$\Theta_{r_k} = \frac{n - s' - 2}{s' - 2} \cdot \frac{\eta^2 - r_k^2}{1 - \eta^2}; \quad (2.31).$$

де

$$\sigma_{\Theta_{r_k}} = \sqrt{\frac{2(n-4)}{(s'-2)(n-s'-4)}} \quad (2.32)$$

У формулах (2.31) і (2.32) s' означає число розрядів значень y_i , для яких розраховані r_k і $\eta_y(\eta_x)$.

Оцінка значущості коефіцієнта кореляції r_k виконувалась за критичним значенням r_0 .

Значення r_0 визначалось за таблицями [31, 32] з рівнем суттєвості $\varepsilon = 1\%$.

Якщо $r_k > r_0$, (2.33),

то з прийнятою ймовірністю $p = 1 - \varepsilon / 100$ можна вважати коефіцієнт кореляції r_k значущим, а зв'язок – реальним. При малому числі спостережень і відсутності даних про те, що експериментальні сукупності підкоряються закону нормального розподілення, оцінку значущості коефіцієнта кореляції r_k з деякою точністю виконують за середнім квадратичним відхиленням:

$$\sigma_r = \frac{1}{\sqrt{N-1}} \quad (2.34).$$

Якщо $\frac{|r_k|}{\sigma_r} = |r_k| \cdot \sqrt{N-1} \geq 3$, (2.35),

то вважають зв'язок реальним і r_k значущим.

При коефіцієнтах кореляції рівних 1, зв'язок вважається лінійним і функціональним. Кореляційне рівняння парного зв'язку визначалось за формулою:

$$y = \bar{y} - r_k \cdot \frac{\sqrt{\mu_2(x)}}{\sqrt{\mu_2(y)}} \cdot (x - \bar{x}). \quad (2.36).$$

За допомогою критерію Фішера підраховувались 95%-і довірчі інтервали:

$$L = t_0 \cdot s_r'; \quad (2.37),$$

$$\bar{s}_r = \sqrt{1 - r_k^2} \cdot \sqrt{\frac{\sum (y - \bar{y})^2}{n - 2}}. \quad (2.38)$$

У випадках, коли досліджений фактор є функцією декількох змінних аргументів, діючих одночасно, для визначення зв'язку між дослідженими факторами застосовувались методи множинної кореляції [76, 82].

Рівняння множинної кореляції у натуральному масштабі має вигляд:

$$x_{123\dots p} = b_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + \dots + b_p x_p, \quad (2.39),$$

де $x_{123...p}$ - середнє значення функції x_1 , що відповідає заданим значенням аргументів $x_2, x_3, \dots, x_p$;

$b_1, b_2, \dots, b_p$ - коефіцієнти рівняння:

$$\left. \begin{aligned} b_i &= \frac{\sigma_i}{\sigma_1}, i=1,2,3,4,\dots,p \\ b_1 &= \bar{x}_1 - b_2 \bar{x}_2 - b_3 \bar{x}_3 - \dots - b_p \bar{x}_p \end{aligned} \right\}, \quad (2.40),$$

де x_i, σ_i - відповідно середнє арифметичне і середнє квадратичне відхилення відповідних показників;

β_i - стандартизовані коефіцієнти множинної кореляції, які встановлюються з системи нормальних рівнянь

$$\left. \begin{aligned} r_{12} &= \beta_2 + \beta_3 r_{32} + \beta_4 r_{42} + \dots + \beta_p r_{p2} \\ r_{13} &= \beta_2 r_{23} + \beta_3 + \beta_4 r_{43} + \dots + \beta_p r_{p3} \\ &\vdots \\ r_{1p} &= \beta_2 r_{3p} + \beta_3 r_{3p} + \beta_4 r_{4p} + \dots + \beta_p \end{aligned} \right\}, \quad (2.41)$$

$r_{12}, r_{13}, r_{23}, r_{43}, r_{32}, r_{42}, \dots, r_{1p}, r_{p2}, r_{p3}$ - кореляційні коефіцієнти парної кореляції між факторами x_1 і x_2 , x_1 і x_3 , x_2 і x_3 , ..., x_1 і x_p .

Після визначення рівняння множинної кореляції розраховувався коефіцієнт множинної кореляції $R_{123...p}$. Величина коефіцієнта множинної кореляції $R_{123...p}$ характеризує тісноту зв'язку змінної x_1 з сукупністю змінних $x_2, x_3, \dots, x_p$. Чим більше значення $R_{123...p}$, тим зв'язок тісніший і реальніший.

$$R_{123...p} = \sqrt{\beta_2 r_{12} + \beta_3 r_{13} + \dots + \beta_p r_{1p}}. \quad (2.42)$$

Середня квадратична похибка коефіцієнта множинної кореляції σ_{O_R} розраховувалась за формулою:

$$\sigma_{O_R} = \frac{1 - R_O^2}{\sqrt{N}}, \quad (2.43)$$

де R_O - теоретичне значення коефіцієнта кореляції, який найчастіше замінюють на $R_{123...p}$.

Достовірність кореляційного зв'язку визначалась з ймовірністю $p = 99\%$ з умови, що

$$\frac{R_{123\dots p}}{\sigma_{O_R}} \geq 2,6 \quad (2.44)$$

Якщо умова (2.43) виконується, зв'язок вважається реальним (достовірним). В окремих випадках для встановлення зв'язку між дослідженими величинами застосовувались розрахунки за методом найменших квадратів [36]. На основі математичного аналізу, виконаного у відповідності з наведеною методикою, формулювались загальні висновки. Достовірність отриманих таким чином результатів характеризується рівнем ймовірності 95% при високих швидкостях обертання досліджуваних композитів в умовах дії підвищених навантажень на повітрі при терті без змащування рідким мастилом (у режимі самозмащування).

2.6. Оцінка ефективності технології виготовлення та тонкої обробки поверхонь антифрикційних композитних деталей на основі шліфувальних відходів алюмінієвих сплавів

Для оцінки ефективності технології виготовлення та тонкої обробки поверхонь антифрикційних композитних деталей на основі шліфувальних відходів алюмінієвих сплавів застосовували метод Фур'є аналізу [72] з використанням скануючої електронної мікроскопії (SEM) на мікроскопі Zeiss-EVO SOXVP, EVO50.04.47 з програмним забезпеченням.

Ефективність розробленої технології синтезу та тонкої обробки оцінювали методом Фур'є-спектроскопії шляхом дослідження ступеню ізотропності структури композиту, тобто рівень його анізотропії після виготовлення. Для цього проводили дослідження за допомогою того ж мікроскопа із програмним забезпеченням SIA 1.00, інтегрованим з методом аналізу Фур'є [201–207]. Для цих експериментів використовувались зразки композиту після трибологічних випробувань (тобто після всіх технологічних

операцій синтезу і фінішної обробки поверхонь), що дозволило оцінити структурні особливості як на поверхні тертя, так і в об'ємі композиту.

Метод Фур'є-спектроскопії дає можливість чітко проаналізувати ізотропність та текстуру матеріалу, а тому дозволяє оцінити правильність технології виготовлення. Ефективність та простота зробили цей метод визнаним в усіх галузях, де використовуються спектральні методи [202, 203].

У роботах [201, 204] показано, що за допомогою Фур'є-аналізу можна не тільки оцінювати особливості поверхні, а й виявляти властивості матеріалів. Окрім цього використання методу Фур'є-спектроскопії дає змогу виділити текстуру матеріалу, а також визначити переважну орієнтацію компонентів та напрямки їх групування.

Використання двовимірних дифракційних Фур'є-спектрів електронно-мікроскопічних зображень дозволяє визначити параметри структурних неоднорідностей та їх розподіл, коефіцієнт анізотропності розподілу дефектів та кут розорієнтації дефектів [201, 204].

Фур'є-аналіз отриманих спектрів проводили за допомогою програмного забезпечення SIA 1.00, адаптованого до найсучасніших комп'ютерів [201, 202, 204]. У цьому програмному забезпеченні аналізується двовимірний спектр Фур'є. Окремі ділянки мікроструктури по-різному відбивають скануючий промінь, що зумовлює зміну відбитого сигналу [201, 204].

Визначення ступеня ізотропності структури композиту здійснюється наступним чином.

Напруги структурного впорядкування завжди можна описати функціями зсуву, повороту та змін періодичності, а саме функціями $f(x, y, z)$, $f(\alpha, \beta, \gamma)$ та $P(x, y, z)$ відповідно [205–209]. Ці характеристики показують ступінь організації структури, рівень його ізотропії (чи анізотропії). Вони з'являються в спектрі і можуть бути зареєстровані та оцінені шляхом сканування вузьким пучком електронів на досліджуваній поверхні [201–204].

Ступінь ізотропності показує ізотропний матеріал чи анізотропний, і тим самим свідчить про ступінь однорідності матеріалу. Рівень анізотропії

показує, як структурні елементи розподілені у композиті після технологічних операцій в процесі виробництва.

Раніш автори [201] успішно застосовували метод Фур'є-аналізу з використанням програмного забезпечення SIA 1.00 для оцінки коректності технології виготовлення інших композитів. В результаті цього були сформовані рекомендації для коригування технологічних режимів виготовлення матеріалів. Це дозволило отримати більш однорідну структуру композиту і вищий рівень властивостей.

У другому режимі визначається складність структурного стану (кількість коефіцієнтів у рівнянні Фур'є, розрахована за програмою SIA 1.00), ступінь структурної організації, іншими словами, анізотропія в об'ємі та кількісна оцінка ступеня впорядкованості структури на поверхні були якісно оцінені за шириною та складністю фрактограм [201, 204]. Виконувалось пряме і зворотне сканування поверхні зразка.

Кут між віссю інерції та віссю абсцис для кожного елемента зображення визначається прямим скануванням електронного променя на поверхні зразка (рис. 2.8).

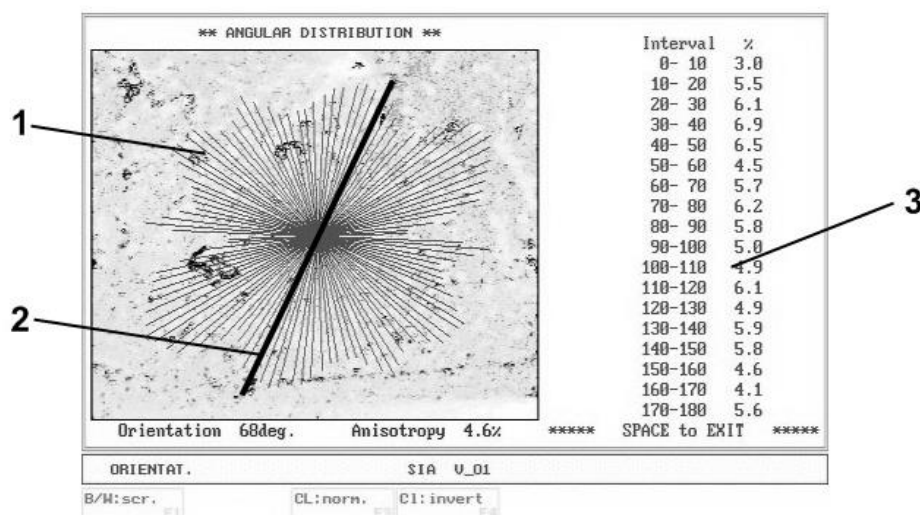


Рисунок 2.8. Гістограма орієнтації елементів зображення, побудована за допомогою SIA 1.00: 1 – довжини хорд елементів зображення для кожного кутового діапазону; 2 – головний вектор орієнтації структурних елементів зображення; 3 – кількість блоків структурних складових для кожного кутового діапазону, %

При зворотному скануванні (рис. 8) розраховується гістограма довжини хорди елементів зображення для кожного з діапазонів кутів зображення (від 0° до 180° з інтервалом 10°) [201, 204]. Гістограма обчислюється шляхом підрахунку кількості звернень випадкового значення до вказаних класів. Випадковими значеннями в даному випадку є довжини осі інерції на зображенні елементів.

Статистичний аналіз орієнтації елементів зображення підсумовується основним вектором орієнтації елементів зображення на обраному напрямку сканування, з'єднаним з віссю абсцис [201, 204].

Аналіз складності структурного стану і реологічних особливостей поверхні тертя проводили за двовимірним дифракційним спектром. Він визначає усередині розміри структурних складових, відстань між ними, концентрацію, довжину між фазних границь і дозволяє досліджувати анізотропію структури в цілому, пов'язану з анізотропією оптичних, механічних і інших властивостей.

Результати порівняльного аналізу гістограм поверхні при однакових збільшенні і напрямку сканування на електронно-растровому зображенні дозволяють оцінювати характер пакування і розмір елементів структури, робити порівняльну оцінку анізотропії досліджуваних поверхонь за шириною гістограми і кількості максимумів на ній.

Одночасно з аналізом анізотропії поверхні проводився якісний аналіз її текстури за фоновими ознаками: яскравість, розмір, форма, просторова орієнтація (може бути випадковою, з парною взаємодією між ознаками, що характеризують текстуру, та ін.). Текстура поверхонь формується під впливом зовнішніх силових факторів і мікрометалургійних процесів. Оскільки, як відомо [201, 205–209], текстури характеризують орієнтацію напруг по границях структурних складових, це виявилось важливим при дослідженнях ефективності застосованої технології виготовлення та тонкої обробки нових антифрикційних композитів.

Висновки до розділу 2

1. Обґрунтовано об'єкти досліджень – нові антифрикційні композити на основі промислових шліфувальних відходів високолегованих інструментальних сталей та легованих алюмінієвих сплавів, які містять у своєму складі домішки твердих мастил CaF_2 та MoS_2 відповідно, що призначені для оснащення вузлів тертя високообертового друкарського обладнання та контактних з'єднань постдрукарських машин, як альтернатива застосованим нині традиційним литим сплавам.

2. Розроблено ефективні методи регенерації вихідних шліфувальних відходів інструментальних сталей та алюмінієвих сплавів, як цінної вихідної сировини для синтезу новітніх антифрикційних композитів, та технологічні режими їх виготовлення з використанням методів порошкової металургії.

3. Обґрунтовано вибір твердих змащувальних речовин – CaF_2 та MoS_2 для композитів на основі відходів сталей і алюмінієвих сплавів відповідно, як ефективних твердих мастил для важких і помірних умов роботи, та визначено доцільність застосування твердого мастила CaF_2 у кількості 4,0 – 8,0 мас. % для сталевих композитів, та MoS_2 – у кількості 9,0 – 12,0 мас. % для алюмінієвих композитів відповідно з урахуванням їх призначення.

4. Визначено комплексну методику дослідження властивостей нових антифрикційних композитів на основі шліфувальних відходів інструментальних сталей та алюмінієвих сплавів, яка об'єднує низку сучасних методів: металографічний, рентгеноструктурний, електронномікроскопічний аналізи, визначення фізико-механічних характеристик, триботехнічні випробування, профілометричний, мікродюрOMETричний аналізи та метод Фур'є-спектроскопії. Означений методологічний підхід здатний забезпечити достовірну та всебічну інформацію.

5. Сформовано комплексне методологічне забезпечення тонкої алмазної та абразивної обробки поверхонь нових композитів, що включає:

- вибір високоточного верстатного обладнання для прецизійної фінішної обробки поверхонь деталей з нових марок антифрикційних композитів на

основі шліф-відходів сталей і алюмінієвих сплавів для отримання найвищих параметрів якості робочих поверхонь при різних методах тонкої фінішної обробки відповідно до природи оброблюваних матеріалів композитних деталей;

- вибір низки раціональних типів сучасних алмазних і абразивних інструментів, які доцільно застосовувати для вивчення технологічних процесів тонкої обробки нових типів композитів та дослідження закономірностей впливу різноманітних факторів (режими різання, взаємодія силового та температурного полів та ін.) на параметри якості поверхонь обробки деталей тертя, їх зносостійкості та довговічності;

- раціональне застосування мастильно-охолоджуючих рідин для абразивного та алмазного шліфування.

7. Обробку отриманих даних виконували із застосуванням методів математичної статистики і теорії ймовірності, що підтвердило достовірність отриманих результатів.

РОЗДІЛ 3. БУДОВА І ВЛАСТИВОСТІ АНТИФРИКЦІЙНИХ КОМПОЗИТНИХ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ КОНТАКТНИХ З'ЄДНАНЬ ДРУКАРСЬКИХ І ПОСТДРУКАРСЬКИХ МАШИН

3.1. Аналіз структури антифрикційних композитів на основі регенованих шліфувальних відходів інструментальних сталей

В результаті розроблених авторами монографії технологічних режимів виготовлення (розділ 2) у всіх антифрикційних композитів на основі шліф-відходів інструментальних сталей (розділ 2, табл. 2.1) утворилась складна гетерогенна структура, що складається з металевої матриці та рівномірно розподілених у ній частинок твердого мастила CaF_2 .

Як відомо [2, 4, 21], структура матеріалу має бути гетерогенною, з рівномірним розподілом дрібнодисперсної зміцнюючих фаз для формування високого рівня антифрикційних властивостей.

У всіх досліджених матеріалах на основі відходів інструментальних легованих сталей присутня низка легувальних елементів, таких, як V, W, Mo та Cr, що є карбідоутворювальними й формують ряд складних карбідів разом із Fe, та у сталі 11P3AM3Ф2, додатково легованої азотом, карбонітридів, які описуються формулами $Me_{23}C_6$, Me_7C_3 , Me_6C , Me_3C і MeC (фази проникнення), $Me(C,N)$, $Me_6(C,N)$ та сприяють формуванню високого рівня комплексу властивостей [2, 210–219].

Отже, застосування розробленої технології виготовлення [1, 2, 25, 40–60, 218, 219] забезпечило формування гетерофазної структури антифрикційних композитів, яка являє собою ферито-перлітну, перлітно-карбідну або перлітно-карбідну-карбонітридну матрицю (залежно від хімічного складу відходів сталі, розділ 2, табл. 2.1), в якій рівномірно розподілені частинки твердого мастила – CaF_2 .

На рис. 3.1–3.3 зображено мікроструктуру антифрикційних композитів на основі шліфувальних відходів різних за хімічним складом інструментальних сталей. Фрагмент перлітно-карбідної структури металевої матриці композиту 11P3AM3Ф2+6% CaF_2 представлено на рис. 3.1.

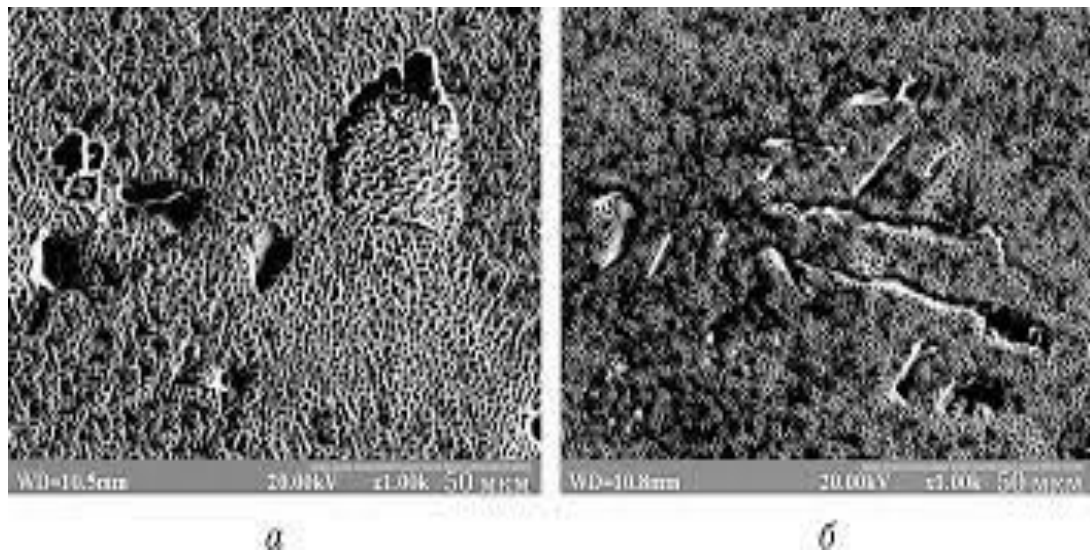
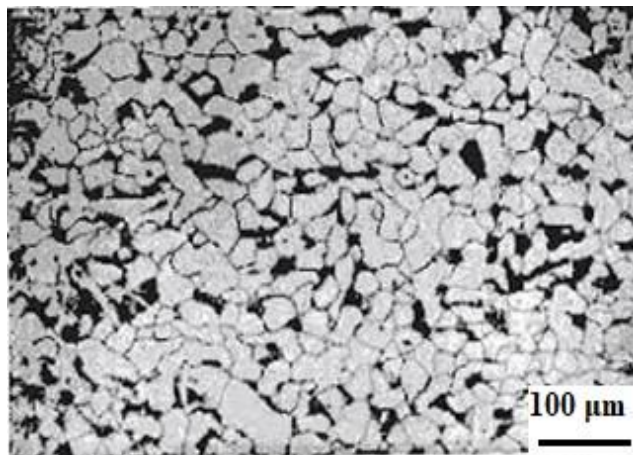
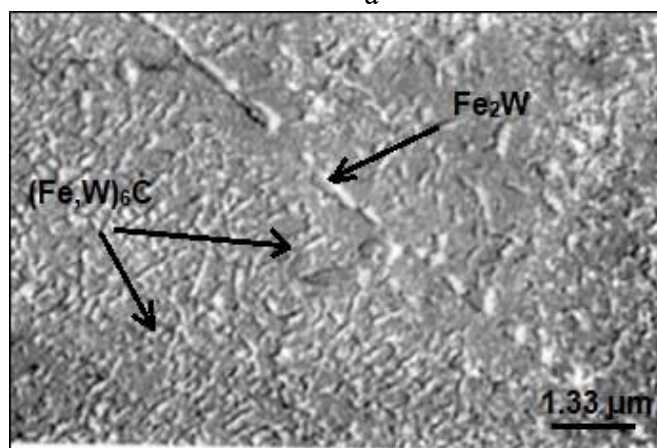


Рисунок 3.1. Мікроструктура перлітно-карбідної матриці композиту 11P3AM3Ф2+6% CaF_2 : а- дрібнодисперсний перліт; б- виділення карбонітридної фази, електронна мікроскопія



а



б

Рисунок 3.2. Структура композиту 2X6B8M2K7+6%CaF₂: а – оптична металографія; б – карбіди (Fe,W)₆C та фази Лавеса Fe₂W у металевій матриці, електронна мікроскопія

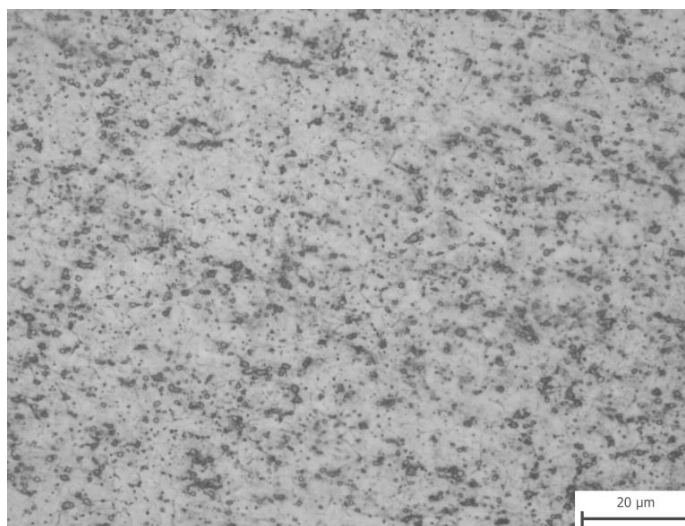


Рисунок 3.3. Структура композиту P6M5+6%CaF₂, шліф не травлений

Як відомо, ванадій, вольфрам, молібден і хром є сильними карбідоутворювачами [210–219]. Карбіди хрому, молібдену, вольфраму та

ванадію сприяють підвищенню механічних властивостей та розширюють зону нормального зношування в процесі тертя.

Металева матриця досліджених композитів містить такі складні карбіди [2, 25, 39–60, 210–217]:

- типу $Me_{23}C_6$ – (Cr, Fe, Mo, W, V) $_{23}C_6$ – складний карбід хрому, що має розміри 3–5 мкм та зберігає високу дисперсність унаслідок малої схильності до коагуляції [210–217];

- типу Me_7C_3 – (Cr, Fe, Mo, W, V) $_7C_3$ – складний карбід хрому, в якому розчинені V, W і Mo, підвищує стійкість сталей проти знеміцнення під час нагрівання у процесі спікання. Завдяки цьому карбиду значно підвищується зносостійкість композитів [210–217], що також сприяє підвищенню їх антифрикційних властивостей при їх експлуатації у важких умовах тертя, насамперед, при високих швидкостях обертання у вузлах друкарських машин.

- типу Me_6C – (Mo, Fe, Cr, W, V) $_6C$ – складний карбід, який має високу твердість і за його наявності також підвищується зносостійкість та зменшується значення коефіцієнта тертя [210–217];

- типу Me_2C та MeC – це карбіди Mo та W (Mo_2C , W_2C) та карбіди VC (фази інфільтрації). Ці карбіди сприяють підвищенню твердості [210–217].

Відомо [217], карбіди типу Me_6C та $Me_{23}C_6$ є основними зміцнювальними фазами металевої матриці всіх досліджених композитів, які істотно підвищують фізико-механічні властивості нових композитів.

Як видно з рис. 3.1–3.4, у складі всіх нових композитів містяться зміцнюючі фази, насамперед, карбіди та карбонітриди легувальних елементів і виділення інтерметалідних фаз.

Кількість зміцнюючих фаз, таких як карбіди, карбонітриди та інтерметаліди, визначається вмістом вуглецю і карбідо- та карбонітридоутворювальних елементів, а також наявністю і кількістю інтерметалідоутворювальних хімічних елементів.

Так, у композиті на основі відходів швидкорізальної сталі 11P3AM3Ф, міститься більша кількість карбідів порівняно з композитами на основі сталей

Р6М5 та 2Х6В8М2К7, що обумовлено, перш за все, наявністю великої кількості вуглецю.

Всі легувальні елементи, що перебувають у складі відходів сталей, сприяють підвищенню гранично-допустимих навантажень. Як відомо, найбільше граничне навантаження забезпечують вуглець, вольфрам, молібден і ванадій [2, 4, 25, 39–60, 210–219]. Це дозволяє інтенсифікувати режими навантаження в умовах роботи нових композитів.

Окремо слід наголосити на роль азоту у композиті на основі порошків-відходів сталі 11РЗАМЗФ. Як відомо [217], особливо суттєва роль азоту проявляється при його наявності у карбідах типу Me_6C та MeC , а саме, у карбідах Cr_6C , $\text{Fe}_3\text{Mo}_3\text{C}$, $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$, $\text{Fe}_4\text{Mo}_2\text{C}$, $\text{Fe}_4\text{W}_2\text{C}$, W_6C , Mo_6C , $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{V})_6\text{C}$, $(\text{W}, \text{V})_6\text{C}$, $(\text{Mo}, \text{V})_6\text{C}$, VC , коли азот забезпечує виникнення дисперсних карбідних та карбонітридних фаз, тим самим сприяючи утворенню дрібного зерна у структурі композитів та гальмуванню зростання зерна при високотемпературному нагріві (зокрема, при спіканні).

Азот міститься у композиті на основі сталі 11РЗАМЗФ у частково розчиненому вигляді у складі α -твердого розчину, а також у вигляді самостійних малорозчинних нітридів або карбонітридів легувальних елементів, коли він частково заміщає вуглець у карбідах типу Me_3C , Me_6C , Me_{23}C_6 та MeC відповідно [2, 4, 25, 39–60, 210–217].

Дія азоту проявляється наступним чином. Частина азоту при нагріванні у процесі спікання композитів переходить у легований α -твердий розчин, а при охолодженні виділяється з нього, переходячи як у карбіди цементитного типу – Fe_3C , $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$, $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$ з утворенням карбонітридів $\text{Fe}_3(\text{C}, \text{N})$, $(\text{Fe}, \text{Mn})_3(\text{C}, \text{N})$, $(\text{Fe}, \text{Cr})_3(\text{C}, \text{N})$, так і у карбіди легувальних елементів типу Me_6C , заміняючи в них частку вуглецю – $\text{Cr}_6(\text{C}, \text{N})$, $(\text{Fe}, \text{Mn})_6(\text{C}, \text{N})$, $(\text{Fe}, \text{Mo})_6(\text{C}, \text{N})$, $(\text{Fe}, \text{W})_6(\text{C}, \text{N})$, $\text{W}_6(\text{C}, \text{N})$, $\text{Mo}_6(\text{C}, \text{N})$, $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{V})_6(\text{C}, \text{N})$ та $\text{V}(\text{C}, \text{N})$ [94, 95, 210–217]. Завдяки цьому додатково зростає вторинна твердість, стійкість проти зворотного знеміцнення та зносостійкість матеріалу.

Таким чином, присутність азоту впливає на формування дрібнодисперсних карбонітридних фаз. Це запобігає появі різнозернистості структури, що, у свою чергу, сприяє збільшенню ізотропності та стабільності фізико-механічних і триботехнічних властивостей композиту на основі відходів сталі 11РЗАМЗФ.

Хром, як обов'язковий хімічний елемент всіх інструментальних сталей, присутній у вигляді карбідної фази у всіх досліджених композитах (також у вигляді карбонітридної фази у композиті на основі 11РЗАМЗФ); він збільшує стійкість композитів проти окиснення і зношування [210–217].

Крім того, як відомо, легування хромом розширює область нормального зносу при сталому процесі тертя, що характеризується мінімальним коефіцієнтом тертя і інтенсивності зношування [2, 4, 25, 39–60, 210–219].

Ванадій міститься у цілому ряді складних карбідів: Me_{23}C_6 , Me_7C_3 , Me_6C , а також утворює карбід типу MeC (рис. 3.4), зменшуючи одночасно частку карбіду Me_6C , як більш сильний карбідоутворювальний елемент.

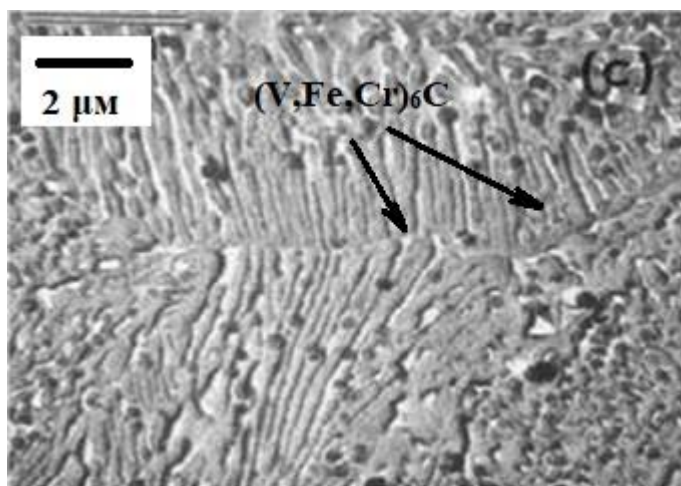


Рисунок 3.4. Карбіди $(\text{V,Fe,Cr})_6\text{C}$ у структурі композиту Р6М5+6%CaF₂, тонка фольга

Карбіди типу MeC , не розчинні в аустеніті і присутні у вигляді надлишкової фази, та сприяють збереженню дрібного зерна і підвищенню зносостійкості [2, 4, 25, 39–60, 210–217].

Наявність ванадію (також у складі карбідів і карбонітридів) сприяє підвищенню теплостійкості композитів [210–217]. Так, на мікрофотографії (рис. 3.4) з тонкої фольги спостерігаються карбіди VC з видовженими виділеннями.

Окрім цього ванадій здатний утворювати більш міцні карбіди порівняно з вольфрамом, молібденом і хромом [210–217], тому у присутності ванадію значна частина вуглецю зв'язана саме у важкорозчинні карбіди ванадію VC.

Оскільки залізні кути потрійних діаграм стану систем Fe–Mo–C і Fe–W–C мають велику подібність [210–217], то вплив молібдену і вольфраму на структуру досліджуваних композитів майже однаковий: вони переважно утворюють карбіди типу Me_6C (рис. 3.2б).

Одночасна присутність Mo та W сприяє формуванню дрібнодисперсних карбідів або карбонітридів та рівномірному їх розподілу в об'ємі композиту. Однак вплив Mo та W на фізичні властивості матеріалів дещо відрізняється.

Молібден сприяє збільшенню в'язкості сталей (на відміну від вольфраму), оскільки він як горофільний елемент перешкоджає виділенню карбідних частинок по границям зерен. Також молібден у меншому ступені погіршує теплопровідність, ніж вольфрам [210–217], що є важливим фактором для матеріалів, які сприймають на себе дію високих швидкостей, що у свою чергу, може викликати підвищення температури на контактних поверхнях.

Серед досліджених антифрикційних композитів на основі шліфувальних відходів інструментальних сталей (табл. 2.1) композит 2X6B8M2K7+(4–8)%CaF₂ містить у своєму складі кобальт.

Кобальт не є карбідоутворювальним елементом [2, 4, 210–217], і на відміну від вольфраму, молібдену, ванадію, хрому та ніобію не утворює власних карбідів і нітридів та присутній у α -фазі металевої матриці композиту 2X6B8M2K7+(4–8)%CaF₂, у карбідах типу Me_6C , наприклад, у карбіді $(Fe,W)_6C$, де він заміщає частину атомів карбідоутворювальних металів [2, 4, 217, 220], а також у θ -фазі, яка являє собою інтерметаліди, що виникають

внаслідок присутності кобальту, а саме, типу $(\text{Co,Fe})_7(\text{W,Mo})_6$ та $(\text{Fe,W})_3\text{Co}$ (рис. 3.5.

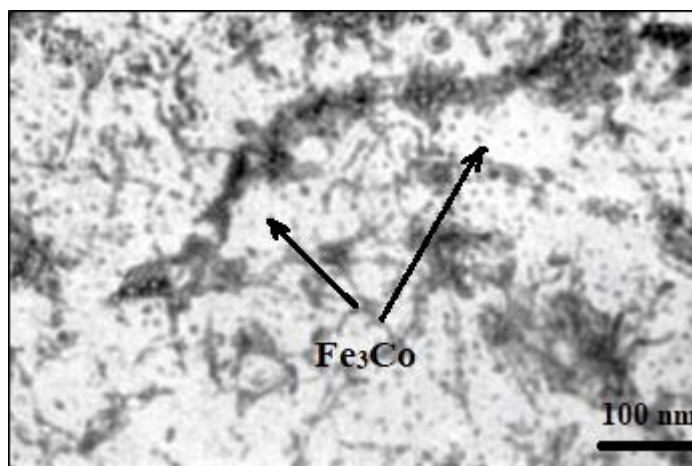


Рисунок 3.5. Тонка фольга. Інтерметалідні сполуки типу Fe_3Co у композиті $2\text{X6B8M2K7} + 6\% \text{CaF}_2$

Інтерметаліди кобальту збільшують стійкість α -твердого розчину проти знеміцнення при розігріві поверхонь контакту в умовах експлуатації композитів, підвищуючи температуру початку $\alpha \rightarrow \gamma$ – перетворення, а також уповільнюють коагуляцію карбідних фаз інших елементів при нагріванні у процесі виготовлення композиту (при спіканні).

До того ж кобальт – єдиний легувальний елемент інструментальних сталей, який значно підвищує теплостійкість і вторинну твердість композитів, забезпечуючи збереження твердості і міцності в умовах роботи за високих швидкостей і навантажень, що, як наслідок, сприяє стабілізації високих триботехнічних властивостей [217].

Також кобальт, як відомо [2, 210–217], надає композиту $2\text{X6B8M2K7} + (4–8)\% \text{CaF}_2$ підвищеної теплопровідності, знижуючи температуру в зоні тертя, і значно знижує коефіцієнт термічного розширення, що є позитивними факторами, які забезпечують стабільність конструкційних зазорів між підшипником і валом при підвищенні температури поверхні, а це, у свою чергу, запобігає схопленню контактуючих поверхонь тертя в умовах експлуатації вузла друкарської машини.

Для всіх досліджених нових антифрикційних композитів на основі шліф-відходів сталей позитивною структурною особливістю є відсутність карбідної

ліквациї, яка є вкрай негативним структурним фактором, притаманним для всіх литих інструментальних, швидкорізальних, штампових і кулькопідшипникових сталей, що проявляється у вигляді карбідної смужчастості [217]. Наслідком цього негативного явища є нерівномірність властивостей по об'єму сплаву.

На відміну від литих інструментальних сталей відсутність карбідної ліквациї у досліджених антифрикційних композитах пов'язана з вихідною подрібненістю порошків-відходів сталей, які по суті є мікровиливками, в котрих відсутні ліквацийні явища.

Також слід зауважити, що після охолодження від температур спікання 1150–1200°C, які відповідають температурам гомогенізуючого відпалу, забезпечується більш повне розчинення карбідів та карбонітридів, що викликає розчинення карбідної ліквациї [2, 25, 39–60].

3.2. Структура антифрикційних композитів на основі регенованих шліфувальних відходів алюмінієвих сплавів

В результаті технологічних операцій виготовлення (розділ 2, п. 2.2.3) утворилась гетерофазна структура композитів на основі відновлених шліфувальних відходів алюмінієвих сплавів АК12ММгН, АМ4,5Кд та АД35.

Слід звернути увагу на те, що при виготовленні композитів, а саме, при проведенні гарячого пресування при 400°C одночасно відбувалося здійснення операції гомогенізуючого відпалу матеріалу. Внаслідок чого, як відомо [107], усуваються нерівноважні структурні складники біографічного походження, що виникли у алюмінієвому сплаві та присутні в порошках-відходах через неповноту протікання процесів ще на етапі кристалізації виливку. Тому в результаті операції гарячого пресування структура Al-композиту стає більш однорідною, вирівнюється хімічний склад вздовж перетину зерна.

Так, в результаті технологічних операцій синтезу відбувається формування складної гетерофазної структури деталей на основі силумінового сплаву АК12ММгН. Вона складається з високолегованого α -твердого розчину на основі алюмінію, в якому спостерігається присутність евтектики, що

утворюється, як відомо, при вмісті кремнію 11,6% [107] та залягає за стільниковим малюнком зерен α -твердого розчину (рис. 3.6). Крім цього присутність великої кількості легувальних елементів спричинює утворення в структурі чималої частки дрібнодисперсних зміцнюючих фаз – інтерметалідів. Частина нерівноважних інтерметалідів, розташованих між гілками – осями дендритів α -твердого алюмінієвого розчину, при нагріванні до 400°C розчиняється у цьому розчині, а при охолодженні інтерметаліди знову виділяються у дрібнодисперсній формі та рівномірно розподіляються вздовж перерізу зразка [64–73, 107, 221].

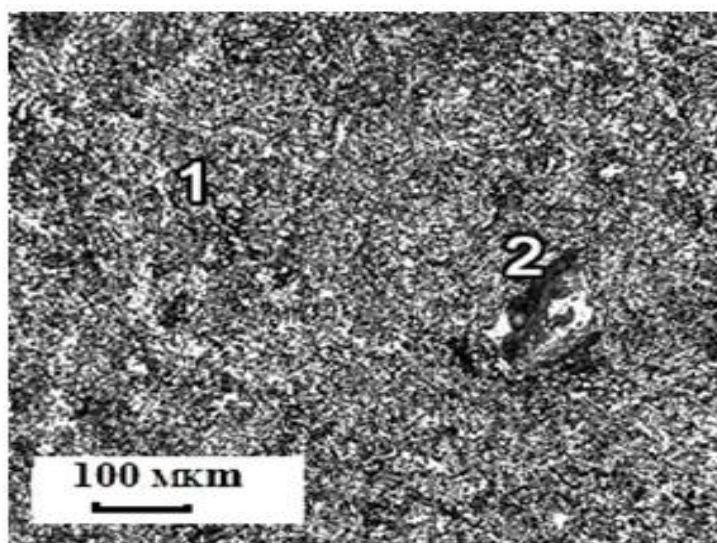


Рисунок 3.6. Мікроструктура композиту на основі шліфувальних відходів сплаву АК12ММгН: 1, 2 - залишки абразивних частинок, травлення у 5% розчині NaOH

Використання методу рентгеноструктурного аналізу із застосуванням рентгенівського мікродифрактометра JDX-MAPI (Японія) дозволило виявити структурні лінії рентгенівських інтерференційних максимумів, характерних для фаз з різноманітними типами кристалічних ґраток, що присутні у α -твердому розчині на основі алюмінію.

Для ідентифікації тієї або іншої фази і визначення її кристалічної структури робили порівняння експериментальних даних про міжплощинні відстані й інтенсивності ліній із табличними [108, 222, 223].

У результаті експериментів було виявлено присутність у структурі сплаву АК12ММгН складних подвійних та потрійних інтерметалідних сполук:

Mg₂Si з кубічною граткою з параметром $a = 0,636$ нм; фазу T(AlCu₂Mn), що має кубічну гратку з періодом $a = 0,590$ нм; CuAl₂ (θ-фаза), яка має тетрагональну гратку – $a = 0,605$ нм; $c = 0,987$ нм; фазу S(Al₂CuMg) з гексагональною граткою – $a = 0,509$ нм; $c = 0,840$ нм; MnAl₆ - орторомбічна гратка з $a = 0,605$ нм; $b = 0,755$ нм, $c = 0,887$ нм; NiAl₃ (ε-фаза) - ромбічна гратка з $a = 0,6611$ нм; $b = 0,7366$ нм; $c = 0,4812$ нм; FeAl₃ - орторомбічна гратка з $a = 4,743$ нм; $b = 1,446$ нм; $c = 0,808$ нм; TiAl₃ - гексагональна гратка з $a = 0,577$ нм; $c = 0,462$ нм; фаза N(Al₇Cu₂Fe) - тетрагональна гратка з $a = 0,632$ нм; $c = 1,478$ нм; AlFeSi (α-фаза) - гексагональний тип гратки з $a = 1,23$ нм; $c = 2,62$ нм; Al₆Cu₃Ni з кубічною (викривленою) граткою з періодом $a = 0,411$ нм.

Проте, при аналізі картин мікродифракції ряд окремих рефлексів на електронограмах та рефлексів, що складуючись, утворюють кільця, розшифрувати не вдалося.

Оцінити симетрію дифракційної картини і тим самим ідентифікувати ту чи іншу фазу (її структуру та періоди гратки) виявилось неможливим. Можна зробити припущення, що це, вірогідно, пов'язано з утворенням більш складних металевих сполук з власним кристалографічним порядком. Можливо, виникнення цих сполук викликано різноманітністю та великою кількістю присутніх легувальних елементів у сплаві АК12ММгН, що впливають один на одного.

Наявність у складному гетерофазному α-твердому розчині на основі алюмінію виявлених подвійних і потрійних сполук підвищує ступінь легованості матеріалу і надає йому високий рівень фізико-механічних властивостей. Легування силумінів магнієм у кількості до 3% (у нашому випадку вміст магнію складає 0,9–1,2%) призводить до утворення потрійного сполучення MgCuAl₂ і стійкого металевого сполучення Mg₂Si, що відрізняються високою твердістю і сильно зміцнюють α-твердий розчин.

Крім того, фаза Mg₂Si, виділяючись у формі дрібних дисперсних часток (наночастинок), перешкоджає міжкристалітній корозії алюмінієвих сплавів, що містять мідь, змінюючи потенціал α-твердого розчину в негативну сторону

[107] і тим самим запобігаючи корозійному руйнуванню міжзеренного прошарку.

Марганець, що присутній у силумінах у кількості до 1,5%, перебуваючи у твердому розчині або у вигляді структурно-вільних сполук, подібно магнію, захищає матеріал від міжкристалітної корозії. Крім цього, марганець створює на поверхні сплаву оксидну плівку, що має захисні властивості [107].

Присутність у матеріалі значної кількості кремнію також сприяє підвищенню корозійної стійкості матеріалу за рахунок утворення захисної плівки, що містить SiO_2 , яка наближається за властивостями до Al_2O_3 і має товщину $5 \cdot 10^{-9}$ – $1 \cdot 10^{-7}$ м. Крім цього, перебуваючи у твердому розчині у вигляді подвійних і потрійних сполук, кремній сприяє зміцненню матеріалу.

Присутність міді в матеріалі у вигляді θ -фази (CuAl_2), що має високу твердість – $\text{HB}=5000$ МПа, та у вигляді потрійних сполук Cu_2FeAl_7 , MgCuAl_2 , MnCu_2Al і NiCu_3Al_6 сприяє підвищенню твердості, жароміцності, покращує оброблюваність різанням [64–73, 107, 220, 221].

Нікель, що утворює подвійну сполуку NiAl_3 або потрійні інтерметаліди, практично не розчиняються у алюмінії. При кількості $\text{N} \sim 1\%$, він, майже, повністю перебуває у вигляді металевих сполук з Al чи з іншими металами, які також зміцнюють матрицю.

Залізо, що є шкідливою домішкою у литих сплавах, у композиційному сплаві на основі АК12ММгН утворює сполуку FeAl_3 , що не розчиняється у Al, але наявність FeAl_3 у вигляді рівномірно розподілених включень (на відміну від литого сплаву, для якого характерні ліквіаційні явища) забезпечує зниження коефіцієнту тертя та підвищує здатність витримувати більші навантаження, що є важливою обставиною для антифрикційного матеріалу.

Присутність навіть незначної присадки Sn (0,2–0,3%) сприяє підвищенню стійкості проти задирів внаслідок утворення у присутності Zn потрійної легкоплавкої евтектики Al–Zn–Sn (з температурою плавлення на 30°C нижче температури плавлення подвійної евтектики Al–Sn, що присутня у традиційних підшипникових Al–Sn сплавах), а це також покращує

антифрикційні характеристики матеріалу та знижує знос антифрикційних поверхонь.

Ще на етапі кристалізації сплаву складної гетерогенної системи Al–Si–Cu–Mg–Ni–Mn–Ti частина легувальних елементів виділяється з розплаву у вигляді первинних інтерметалідів, сприяючих подрібненню структури виливку.

Легувальні елементи, що залишились у пересиченому твердому розчині після кристалізації частково виділяються при гомогенізації композиційного сплаву (при 400 °C) у вигляді дрібних вторинних інтерметалідів, кристалічна ґратка яких на ранній стадії зародження і зростання повністю когерентна ґратці матриці. Наявність такої дрібнодисперсної фази суттєво підвищує механічні властивості композиту та сприяє подрібненню зерна, про що буде сказано далі.

Мікроструктуру одержаного порошкового матеріалу AK12MMgH досліджували методами кількісної металографії на аналізаторі зображення Leco IA3001 Image System (США). Первинні інтерметаліди оцінювали на не травлених шліфах (рис. 3.7а), а вторинні – методом просвічуючої електронної мікроскопії на мікроскопі ЕМ–200 (м. Суми) (рис. 3.7б).

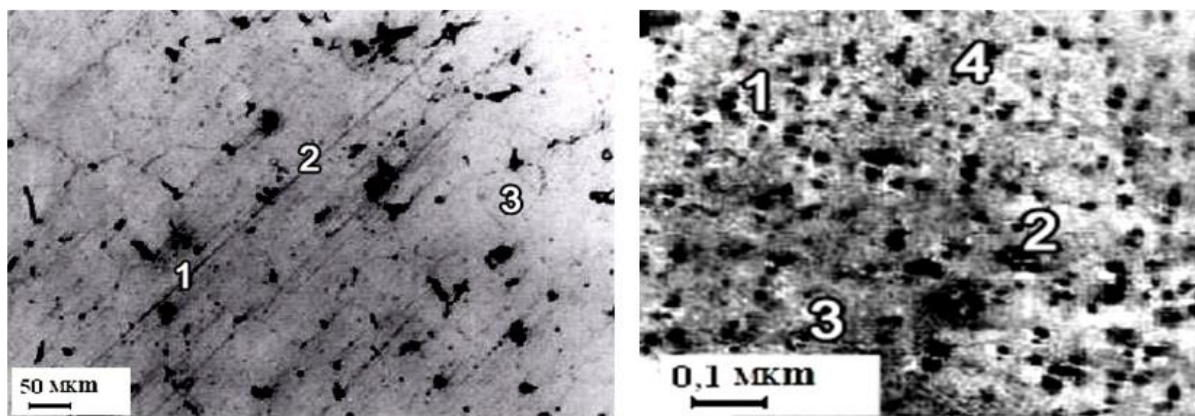


Рисунок 3.7. Інтерметаліди в композиційному матеріалі AK12MMgH: (а) первинні інтерметаліди: 1 – CuAl_2 , 2 – Mg_2Si , 3 – NiAl_3 ; (б) вторинні: 1 – AlCu_2Mn , 2 – TiAl_3 , 3 – Al_2CuMg , 4 – MnAl_6

Структурні дослідження (рис. 3.7) свідчать, що наявні у матеріалі зміцнюючі фази (первинні та вторинні інтерметаліди) мають високу густину та рівномірність розподілу за перерізом зразку, що сприяє зменшенню розміру зерна та, відповідно, підвищенню фізико-механічних та антифрикційних властивостей.

Окрім вище описаного композиту на основі відновлених порошків силуміну АК12ММГН також були виготовлені (розділ 2) і досліджені композити на основі шліфувальних відходів сплаву АК12ММГН з додаванням до вихідної шихти твердого мастила – дисульфиду молібдену MoS_2 у кількості 9,0–12,0 мас.%, які призначені для роботи в умовах самозмащення, про що йшлося у розділі 2, п. 2.2.3 монографії.

Структура отриманого композиту АК12ММГН+(9,0–12,0)% MoS_2 представляє собою металеву матрицю α -твердого розчину на основі алюмінію з рівномірно розподіленими у ній включеннями другої фази – твердого мастила дисульфиду молібдену, яка наведена на рис. 3.8.

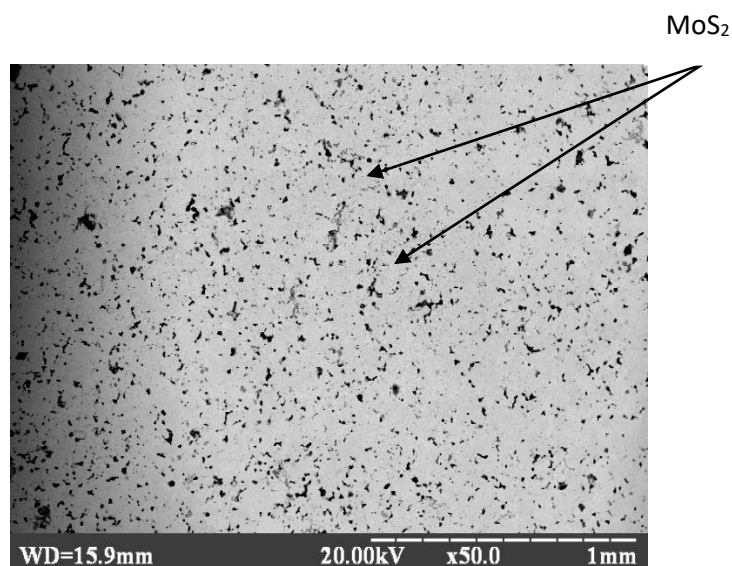


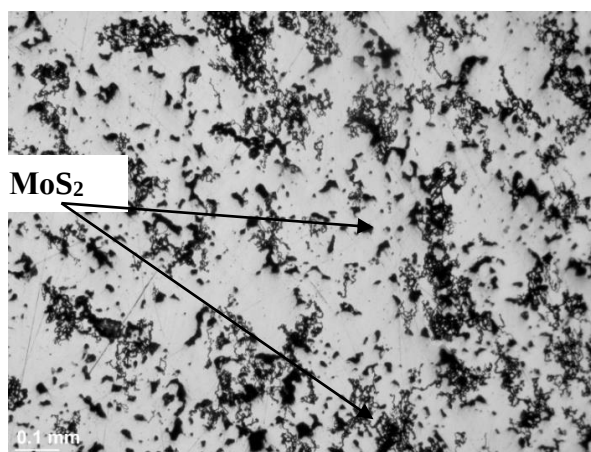
Рисунок 3.8. Структура зразку з регенованих шліф-відходів сплаву АК12ММГН + 9% MoS_2 (шліф не травлений)

Структурні дослідження (рис. 3.8) вказують на те, що додані порошки дисульфиду молібдену не тільки рівномірно розподілені по всьому об'єму без сегрегаційних скупчень, але й являють собою дрібнодисперсну складову, що є позитивним фактором при роботі на тертя та зношування.

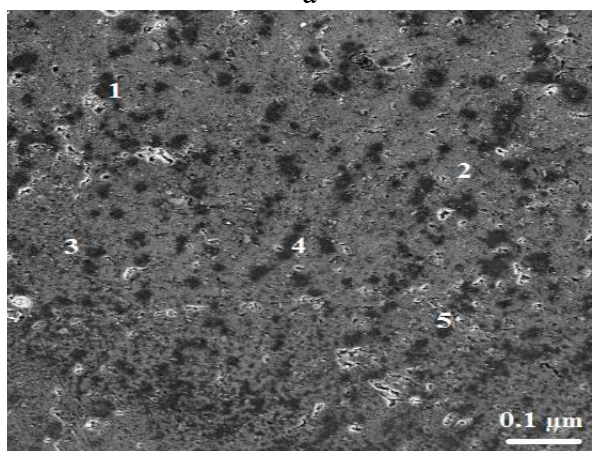
Розроблені технологічні заходи (розділ 2 монографії) з виготовлення заготовок з регенованих шліфувальних відходів сплаву АМ4,5Кд полягають у поєднанні ресурсозберігаючої технології з методами порошкової металургії. В результаті отримано складну гетерогенну структуру нового матеріалу на основі шліфувальних відходів з домішками твердого мастила MoS_2 (рис. 3.9).

Дослідження показали, що твердозмащувальна речовина MoS_2 не утворює сегрегацій у об'ємі зразка і рівномірно розташована у структурі досліджуваного композиту (рис. 3.9), що вказує на правильність застосованих технологічних операцій виготовлення.

Структура дослідженого композиту являє собою алюмінієву металеву основу у вигляді легovanого α -твердого розчину, в якій рівномірно розташовані частинки твердозмащувального компонента – дисульфиду молибдену MoS_2 (рис. 3.9).



а



б

Рисунок 3.9. Структура композиту АМ4,5Кд+10% MoS_2 : а – представлено розподіл MoS_2 , вказано стрілками, шліф не травлений; б – інтерметалідні фази (1 – CuAl_2 , 2 – MnAl_6 , 3 – NiAl_3 , 4 – TiAl_3 , 5 – Al_2CuMn), шліф травлений (NaOH), оптична металографія

У свою чергу гетерофазна структура металевої матриці (α -твердого розчину) антифрикційного композиту на основі відходів сплаву АМ4,5Кд має вигляд:

$\text{Al}(\text{Cu}) + \text{евтектика } [\text{Al}(\text{Cu}) + \text{Si} + \text{CuAl}_2] + \text{CuAl}_2 + \text{TiAl}_3 + \text{MnAl}_6 + \text{Al}_2\text{CuMn} + \text{NiAl}_3$.

Дисульфід молібдену MoS_2 має термічну стабільність до температур 550–600 С, що гарантує його присутність у складі матеріалу у незмінному вихідному стані, як у процесі виготовлення, так і в умовах експлуатації [97]. Розподіл MoS_2 в металевій матриці досліджуваного матеріалу наведено на рис. 3.9а.

Вказані феноменологічні особливості розподілу і дисперсності твердого мастила MoS_2 (рис. 3.9а) є позитивним фактором. Це проявляється у безперервному намащуванні його на обидві контактуючі поверхні тертьової пари, а саме, на поверхню антифрикційної деталі, і сполученого контртіла у процесі експлуатації.

Сформовані ще на етапі виробництва сплаву АМ4,5Кд фази CuAl_2 , ефективні зміцнювачі – інтерметаліди NiAl_3 , TiAl_3 разом з фазами MnAl_6 , Al_2CuMn зміцнюють твердий розчин на основі алюмінію і підвищують механічні властивості композитного матеріалу [64–73, 220–223].

Розподіл зміцнюючих фаз в структурі дослідженого матеріалу, що виявлені за допомогою рентгенівського мікродифрактометра JDX-MAPI (Японія), наведено на рис. 3.9б.

Наявність у металевій матриці міцної сполуки Al_2CuMn , стійкої при підвищених температурах, а також присутність інтерметалідів CuAl_2 , NiAl_3 , TiAl_3 , обумовлює здатність сплаву зберігати високі механічні властивості [107, 220, 223]. Присутність кадмію та цирконію в алюмінієвій матриці, котрі утворюють у структурі матеріалу власні фази, сприяють формуванню складної гетерофазної структури антифрикційного матеріалу.

Кадмій практично не розчиняється в алюмінії у твердому стані і перебуває в металевій матриці у вигляді окремих кристалів. Призначення Cd – уповільнення руху вакансій до границь зерен, що сприяє утворенню

петлевих дислокацій та підсилює зв'язок між виділеннями зміцнюючих фаз і металевою матрицею твердого розчину [64–73, 107].

Відомо [107], що цирконій Zr є майже нерозчинним металом у алюмінієвій основі сплаву. Цирконій формує інтерметалідні включення типу $ZrAl_3$ ще на етапі ливарного виробництва сплаву АМ4,5Кд, котрі виступають сильними подрібнювачами зерна та сприяють збільшенню температури рекристалізації матеріалу.

Крім того, наявність Sn у металевій матриці матеріалу, який вводиться до складу сплаву АМ4,5Кд у процесі ливарного виробництва, сприяє збільшенню пластичності композиту [2, 107]. Вказаний факт позитивно позначається на здатності деталі швидко припрацьовуватись у пускові і налагоджувальні періоди роботи устаткування. Окрім цього олово, як м'який метал, робить додатковий внесок у процес здійснення масоперенесення при роботі контактної пари через його властивість розподілятися вздовж границь зерен у об'ємі металу [2, 107]. Це є особливо важливим при експлуатації деталі складної напівкруглої форми за середньо навантажених режимах роботи в умовах дискретного прикладання зовнішніх навантажень.

Після гарячого пресування сформувалась структура композиту на основі регенованих шліфувальних відходів сплаву АД35, яка представлена на рис. 3.10.

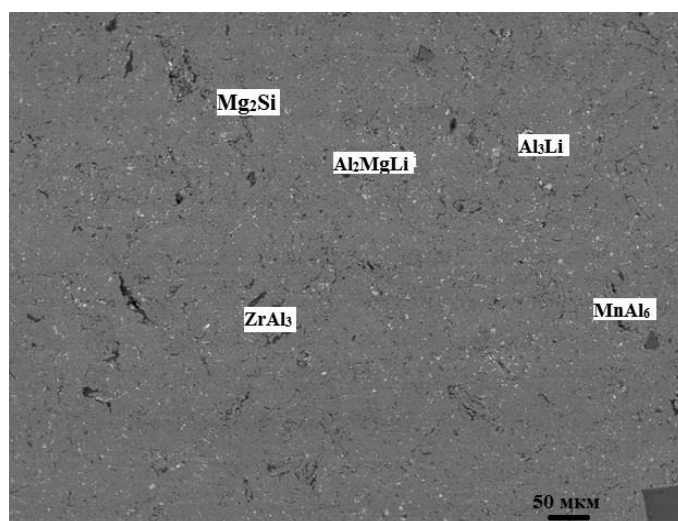


Рисунок 3.10. Структура антифрикційного композиційного матеріалу на основі шліфувальних відходів сплаву АД35

Структура дослідженого матеріалу (рис. 3.10) являє собою легований α -твердий розчин на основі алюмінію, в якому рівномірно розподілені зміцнюючі фази – інтерметаліди і силіциди, що були виявлені методом рентгеноструктурного аналізу за допомогою рентгенівського дифрактометру Shimadzu XRD-7000.

Ефективні зміцнюючі фази Mg_2Si , $MnAl_6$, $TiAl_3$, Al_3Li , $ZrAl_3$, Al_2MgLi були утворені у складі авіалі АД35 ще на етапі виготовлення литого сплаву та його наступної термічної обробки. Як відомо, ці фази зміцнюють твердий розчин на основі алюмінію і тим самим підвищують фізико-механічні властивості сплаву [107, 221]. Магній, що присутній у алюмінієвій основі сплаву, є одним з головних зміцнюючих легувальних елементів, який при його вмісті до 2% повністю розчиняється у металевій матриці, та зміцнює твердий розчин і забезпечує високу ефективність деформаційного зміцнення.

Марганець у авіалі сприяє підвищенню пластичності сплаву і одночасно зміцнює матеріал завдяки утворенню інтерметалідів $MnAl_6$. Присутній у металевій матриці кремній утворює ефективні зміцнюючі силіциди Mg_2Si , що позитивно впливає на механічні властивості матеріалу [2, 107, 221].

Наявність титану у сплаві АД35, навіть у невеликих кількостях, забезпечує формування дрібних інтерметалідів $TiAl_3$, які ефективно зміцнюють матеріал, що сприяє стабілізації механічних властивостей при експлуатаційних навантаженнях.

Цирконій формує інтерметалідні включення типу $ZrAl_3$ оскільки він практично не розчиняється у алюмінії. Ці інтерметаліди є сильними подрібнювачами зерна та сприяють збільшенню температури рекристалізації матеріалу. Цей факт є важливим для збереження конструкційної міцності композиційного матеріалу у моменти не передбачуваного збільшення навантажень при роботі деталі [2, 107, 221–223].

Літій, що присутній у алюмінієвій матриці, забезпечує утворення додаткових зміцнюючих фаз – інтерметалідів фази $\delta-Al_3Li$. В результаті зростає міцність та довговічність матеріалу, що у свою чергу, підвищує

антифрикційні властивості, зокрема, зносостійкість. Поряд з δ -фазою завдяки вмісту магнію утворюються виділення потрібної фази $S-Al_2MgLi$, яка додатково зміцнює матеріал, що сприяє зростанню зносостійкості [2, 107, 221–223].

Дрібнозернисті фази $\delta-Al_3Li$, $S-Al_2MgLi$, $TiAl_3$ та $ZrAl_3$ [221–223] окрім підвищення зносостійкості гальмують процеси рекристалізації матеріалу і тим самим дозволяють форсувати режими навантаження нового матеріалу, збільшуючи гранично-допустимі навантаження і швидкості ковзання.

Наявність зміцнюючих фаз призводить до гальмування процесів знеміцнення матеріалу за підвищених навантажень і швидкостей при терті, що забезпечує стабільність структури та властивостей композиційного матеріалу при його експлуатації.

У підсумку гетерофазна структура антифрикційного композиційного матеріалу на основі шліфувальних відходів сплаву АД35 має вигляд:

α -фаза (Al- твердий розчин) + Mg_2Si + $MnAl_6$ + $S-Al_2MgLi$ + $\delta-Al_3Li$ + $TiAl_3 + ZrAl_3$.

Сформована структура нового композиту антифрикційного призначення здатна забезпечити високий рівень властивостей, про що буде викладено нижче.

3.3. Фізико-механічні та триботехнічні властивості антифрикційних композитів на основі шліфувальних відходів інструментальних сталей

Описані у п. 3.1 різні види складної гетерофазної структури досліджуваних антифрикційних композитів, що сформувались під впливом технологічних операцій синтезу, є найбільш сприятливими для найкращого поєднання фізико-механічних і триботехнічних властивостей з погляду загальних закономірностей для матеріалів антифрикційного призначення [2,4].

Втім рівень сформованих властивостей різний у композитів з різною матричною металевою основою та визначається природою, кількістю і співвідношенням утворених фаз у структурі матеріалів (табл. 3.1).

Для порівняльних випробувань були виготовлені зразки з литої латуні Л63, закордонним аналогом якої є латунь CuZn37, CW508L (EN стандарт) або C27200 (ASTM стандарт, США).

Таблиця 3.1. Властивості досліджених антифрикційних композитів

№ з/п	Склад, % мас.	Границя міцності при поперечному згині, R_{tr} , МПа	Ударна в'язкість, КС (ISO 5754-78), Дж/м ²	Твердість HBS 2,5/62,5/10 (ISO 4498-1-90)	Швидкість, об./хв.			Гранична швидкість, об./хв./навантаж., МПа
					3000	5000	7000	
					Коеф. тертя/знос, мкм/км	Коеф. тертя/знос, мкм/км	Коеф. тертя/знос, мкм/км	
1	P6M5 + 6 CaF ₂	570-590	690-710	82,0-86,5	0,19/59	0,26/92	-	5000/3,0
2	11P3AM3Ф2 + 6 CaF ₂	650-690	690-750	85,0-88,0	0,17/52	0,18/71	0,20/79	7500/5,0
3	2X6B8M2K7 + 6 CaF ₂	540-570	800-830	76,0-84,0	0,18/54	0,23/80	0,24/128	7000/5,0
4	Лита латунь Л63 [107, 224]	340-420	680-720	77,0-82,0	0,47/980	Пластичне деформування		(800-1000)/1,0

Примітки: №1 - випробування при 2,0–4,0 МПа, №№ 2, 3 - випробування при 2,0 – 5,0 МПа, контргіло у всіх випадках - сталь Р18; № 4— тертя без змащування рідким мастилом, випробування при 1,0 МПа.

Найвищі значення границі міцності при поперечному згині, R_{tr} , та твердості за Бринелем, HBS, демонструє композит №№ 2 (табл. 3.1), що пов'язано з низкою факторів, а саме, з високим вмістом вуглецю та присутністю азоту в композиті на основі відходів сталі 11P3AM3Ф2, що обумовлює наявність великої кількості складних карбідів легувальних елементів, нітридів і карбонітридів, а також з присутністю комплексних інтерметалідів легувальних елементів, фаз Лавеса.

Така комбінація зміцнюючих фаз у поєднанні із змащувальною дією твердого мастила CaF₂ забезпечила найвищі антифрикційні властивості композиту №№ 2 (табл. 3.1), сприяла стабільності його триботехнічних характеристик за більш високих швидкостей і навантажень порівняно з іншими дослідженими композитами.

Кількість зміцнюючих фаз у композитів №№ 1, 3 (табл. 3.1) на основі шліф-відходів сталей Р6М5 та 2Х6В8М2К7 дещо менша за кількість цих фаз у композиті №1, оскільки в цих матеріалах відсутній азот, а, відтак, нема

нітридів і карбонітридів. Втім композити №№ 1 та 2 демонструють стабільно високі антифрикційні властивості за швидкостей до 5000 та 7000 об./хв. і навантажень до 3,0 та 5,0 МПа відповідно.

Більш високі гранично-допустимі швидкості і навантаження характерні для роботи композиту № 3, оскільки в структурі композиту на основі шліф-відходів сталі 2Х6В8М2К7+CaF₂ присутня велика кількість не тільки карбідних, але й інтерметалідних зміцнюючих фаз.

Для композиту № 1 на основі відходів сталі Р6М5 характерним є достатньо високі фізико-механічні властивості (табл. 3.1) завдяки високому вмісту вуглецю та присутності карбідоутворювальних легувальних елементів Мо, W, Cr, V, що утворюють карбіди типів Me₂₃C₆, Me₇C₃, Me₆C, Me₃C і MeC. Проте, не зважаючи на наявне у композиті тверде мастило CaF₂, таких фаз не достатньо для формування високих антифрикційних властивостей за важких умов навантаження.

Втім композит № 1 може бути ефективно застосованим за умов роботи при швидкостях до 5000 об./хв. і навантажень до 3,0 МПа у відповідному поліграфічному устаткуванні.

Окремо слід наголосити, що всі досліджені антифрикційні композити на основі шліф-відходів демонструють істотні переваги перед литою латунню Л63 [107, 224], що є аналогом латуні CuZn37, CW508L (EN стандарт) [224] і якою нині оснащені вузли формних циліндрів друкарських машин типу КВА «Rapida-105» та Heidelberg Speedmaster SM 102 FPL, що працюють при швидкостях > 1000 об./хв.

Лита латунь Л63 [107, 224] здатна ефективно працювати у вузлах тертя лише за умови постійного змащування рідким мастилом, яке стає абсолютно непрацездатним за високих швидкостей обертання і виноситься із зони фрикційного контакту відцентровими силами тим більше, чим більше зростає швидкість обертання деталі.

В наслідок чого поверхні зразків з латуні Л63 виявляються ювенільними, не захищеними від безпосереднього контакту з матеріалом контртіла. Це

призводить до значного розігріву поверхонь тертя, втрати міцносних характеристик, наслідком чого є адгезія контактуючих поверхонь.

А за умов швидкостей обертання >3000 об./хв. за одночасній дії підвищених навантажень латунні деталі пластично деформуються і не здатні виконувати свої функції.

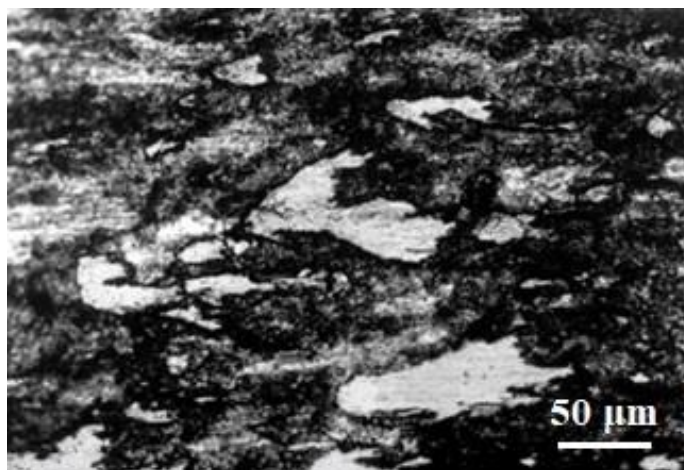
У той час як всі досліджувані композити з відходів, які містять у своєму складі тверде мастило CaF_2 , у процесі тертя перманентно утворюють антифрикційну захисну розділову плівку на поверхнях контакту (рис. 3.11–3.13).

Такі змащувальні антизадирні шари утворюються у два етапи (рис. 3.11): спочатку на поверхні з'являються окремі плями білого кольору (тверде мастило CaF_2), котрі у подальшому «розмазуються», утворюючи однорідну гладку поверхню.

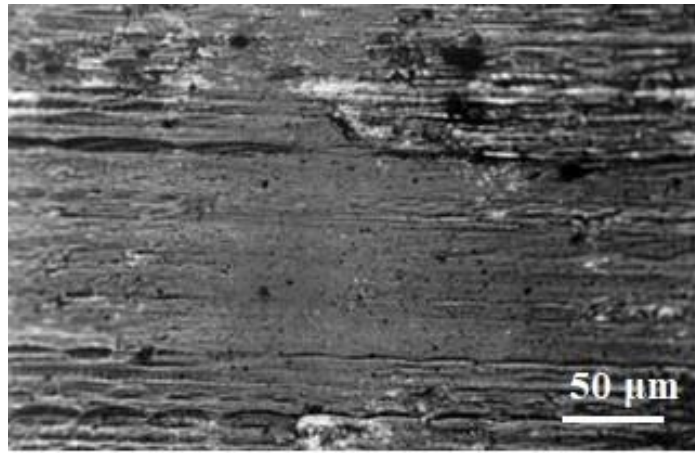
В наслідок цього реалізується ефект «беззношуваності» композиту, що стабілізує роботу вузла тертя.

Зображення поверхонь тертя композиту $2\text{X6B8M2K7}+6\%\text{CaF}_2$ і контртіла наведено на рис. 3.12. Видно, що антизадирні плівки повністю покривають як поверхню матеріалу, так і контртіла.

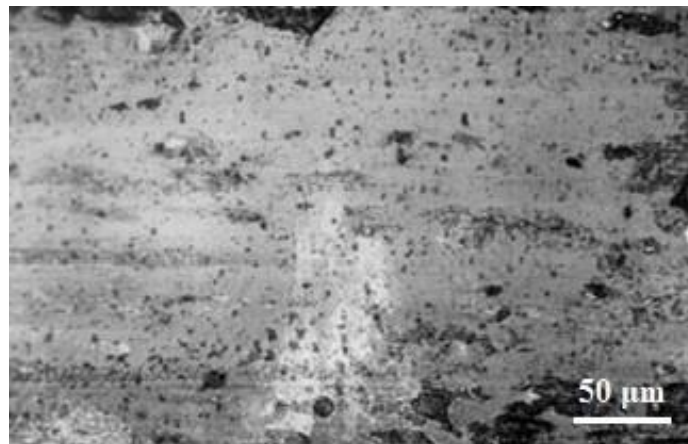
За швидкості обертання 7000 об./хв. і навантаженні $5,0$ МПа антифрикційні плівки постійно утворюються і одночасно зношуються в таких умовах навантаження (рис. 3.13).



а

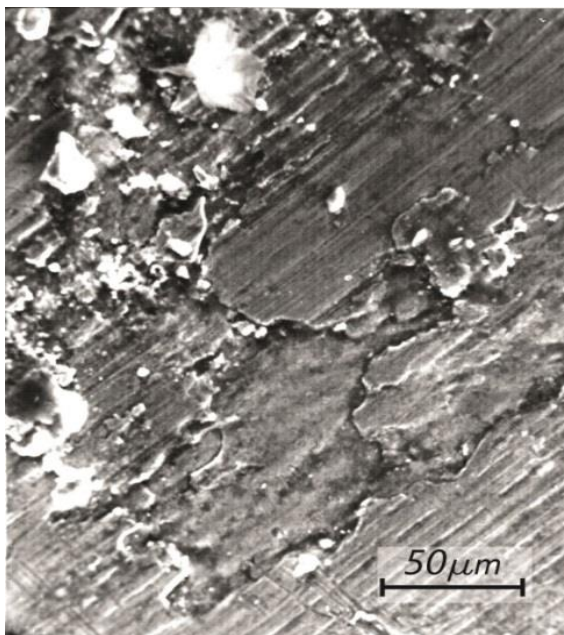


б

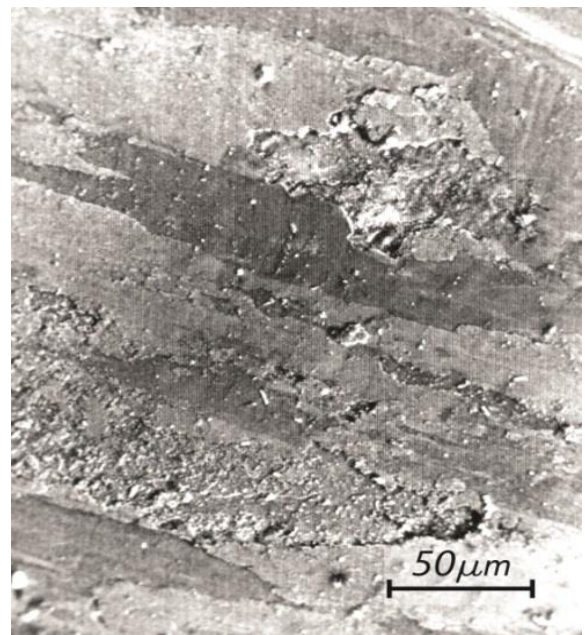


в

Рисунок 3.11. Поверхні тертя після випробувань при $V = 7000$ об./хв., $P = 5,0$ МПа: а) - зразка з матеріалу $2X6B8M2K7 + 6\% CaF_2$; б) та в) - контртіла зі сталі P18 на початку та у кінці утворення плівки тертя.



а



б

Рисунок 3.12. Поверхні тертя після випробувань при $V = 5000$ об./хв., $P = 3,0$ МПа: (а) композит $P6M5+6\%CaF_2$; (б) контртіло з швидкорізальної інструментальної сталі P18.

Процес перманентної фрагментації плівок у процесі тертя та зношування показано на рис. 3.13 на прикладі композиту – 11РЗАМЗФ2+6%CaF₂ при роботі за швидкостей 7500 об./хв. і навантажень 5,0 МПа.

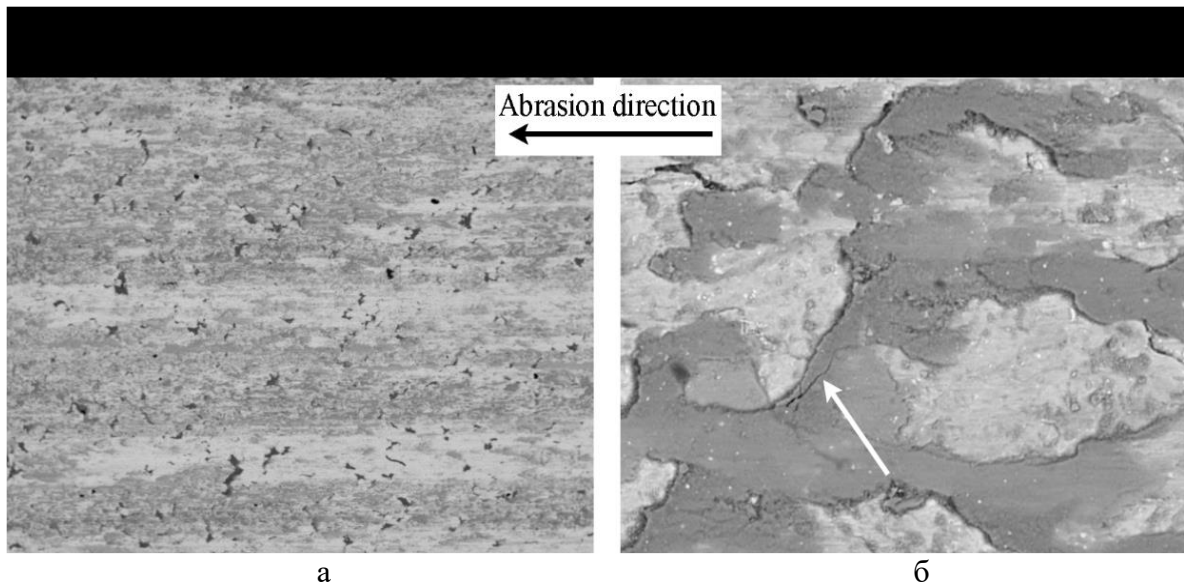


Рисунок 3.13. Поверхня тертя композиту 11РЗАМЗФ2+6%CaF₂ після випробувань при 7500 об./хв. і навантаженні 5,0 МПа: (а) загальний вигляд; (б) фрагментація антифрикційної плівки

Як видно з рис. 3.13, поверхні контактної пари повністю покриті суцільною антифрикційною плівкою, яка є сформованим у процесі тертя змащувальним компонентом. Це – так звані вторинні структури.

Процес формування плівок вторинних структур динамічний і безперервний. На рис. 3.11б зафіксовано процес відшарування плівки у процесі її зношування (показано стрілкою).

Така антизадирна плівка постійно присутня на місцях контакту в наслідок сталого утворення її нових фрагментів на місцях зношення плівки за швидкостей обертання 7500 об./хв. і підвищених навантажень до 5,0 МПа, тобто за означених умов тертя спостерігається стійкий баланс між зношуванням плівки і її формуванням на зношених ділянках.

Завдяки цьому реалізується ефект самозмащення пари тертя, і, як результат, високі триботехнічні властивості у важких умовах роботи (табл. 3.1).

Із зростанням навантажуючих факторів – $V = 8000$ об./хв. і вище, $P > 5,0$ МПа спостерігається зростання коефіцієнту тертя і інтенсивності зношування,

про що свідчить утворювана дискретність плівок вторинних структур, які за таких умов випробувань не покривають повністю контактуючі поверхні, і виступають як абразив (рис. 3.14).

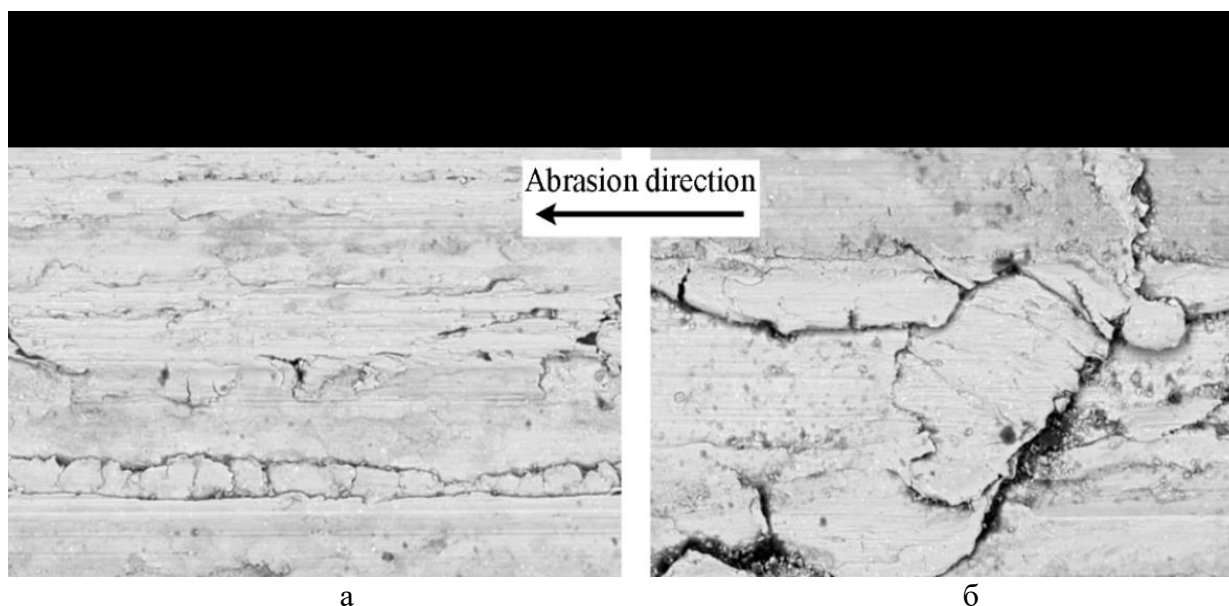


Рисунок 3.14. Поверхня тертя композиту 11РЗАМЗФ2+(4–8)%CaF₂ після випробувань при V=8000 об./хв., P=5,0 МПа: (а) загальний вигляд; (б) викришування та тріщини.

Наступним кроком при виконанні досліджень було визначення складу сформованих плівок тертя, коли композити демонструють найвищі функціональні характеристики (табл. 3.1).

На рис. 3.15 наведено результати мікрорентгеноспектрального аналізу поверхневих антифрикційних плівок, що утворились на поверхні антифрикційного композиту на основі шліф-відходів сталі 11РЗАМЗФ2 + 6%CaF₂ у процесі триботехнічних випробувань за швидкостей обертання 7500 об./хв. і навантажень до 5,0 МПа, за яких композит демонстрував високі триботехнічні властивості (табл. 3.1).

Хімічний склад (ат. %) плівки тертя в області «Спектр 1» (рис. 3.15):
Fe – 68,18; C – 24,22; O – 28,71; F – 0,03; Na – 0,70; Si – 1,12; P – 0,34; S – 0,19;
Mo – 0,87; Ca – 0,78; W – 0,70; V – 1,42; Nb – 0,12; Cr – 2,12 .

Хімічний склад (ат. %) плівки тертя в області «Спектр 2» (рис. 3.15):

Fe –21, 03; C –1, 12; O – 18,03; K – 0,04; F – 0,52; Si – 1,03; P – 0,18; S – 0,22; Ca – 0,88; Mo –1, 03; W–0,71; V–1,21; Nb – 0,31; Cr – 1,34.

Результати мікрорентгеноспектрального аналізу (рис. 3.15) показали, що контактні поверхні дослідженого матеріалу і контртіла вкриті суцільними антизадирними плівками тертя, що утворилися протягом триботехнічних випробувань за визначених умов навантажуючих факторів.

Вони містять як хімічні елементи дослідженого композиційного матеріалу, так і контртіла зі сталі P18, та кисень повітря.

При цьому найбільш інтенсивно формують плівки тертя ті складники, що мають найбільшу схильність до активації і пасивації під дією зовнішніх навантажуючих факторів і кисню повітря, а саме, такі елементи пари тертя, як Fe, Cr, W, Mo, V, Si, O, Ca, та F [1, 2, 25, 39–60, 225–227], що є особливо значущим у пускові періоди роботи вузла тертя друкарської машини.

З позиції якісної оцінки просторового розподілу елементів в поверхневому шарі антифрикційної зони виявлено, що інтенсивність і розмір областей скупчень Ca, W, Cr, V і Mo досить висока. Для заліза характерним є розподіл окремих округлих ділянок скупчень розміром десяти частки мікрметра. У той же час для Ca, O, Cr, V, W і Mo області їх інтенсивної концентрації начебто розмазані вздовж поверхні і займають майже половину її площі.

Рентгеноструктурний мікроаналіз показав насиченість киснем антифрикційної зони (рис. 3.15), який приймає безпосередню участь у формуванні антизадирного шару, вступаючи у хімічні реакції з елементами контактної пари з утворенням різного складу оксидів, і забезпечуючи окиснювальний характер зносу [1, 2, 25, 39–60, 225–227]. Періодична теплова дія внаслідок високих швидкостей обертання у поєднанні з навантаженням при терті полегшувала його протікання.



Рисунок 3.16. Загальний вигляд констрит після триботехнічних випробувань з утвореними плівками тертя

3.4. Фізико-механічні та триботехнічні властивості антифрикційних композитів на основі шліфувальних відходів алюмінієвих сплавів

Дослідження комплексу фізико-механічних та триботехнічних характеристик проводили за методиками, викладеними у розділі 2 монографії.

Значення властивостей композиційних матеріалів на основі відновлених шліфувальних відходів сплавів АК12ММГН, АМ4,5Кд та АД35 у порівнянні з литими сплавами тих самих марок, наведено у табл. 3.2.

Таблиця 3.2. Фізико-механічні та антифрикційні властивості композитів на основі шліф-відходів алюмінієвих сплавів

№	Матеріал	Межа міцності на розтяг, МПа	Твердість, НВ, МПа	Ударна в'язкість, Дж/м ²	Коеф. тертя, за навантаження, МПа		Знос зразка, мкм/км, за навантаження, МПа		Знос констритла, мкм/км, за навантаження, МПа		Гранично-допустиме навантаження, МПа
					5	7	5	7	5	7	
1	Композит АК12ММГН	180-185	550-570	180-300	0,0075-0,0080	0,03-0,032	3,9	14,8	сліди	6,4	7
2	Литий сплав АК12ММГН [107]	186	620	300-400	0,0250	0,06-0,067	6,0	28,6	2,5	18,6	3,5
3	Композит АМ4,5Кд	187-190	580-600	220-340	0,0077-0,0082	0,02-0,031	5,3	12,4	0,005	5,3	7
4	Литий сплав АМ4,5Кд [107]	194	650	340-420	0,0198	0,05-0,055	9,4	31,0	3,7	16,3	4
5	Композит АД35	188-196	560-590	218-355	0,0073-0,0081	0,03-0,033	4,8	15,1	0,004	6,2	7
6	Литий сплав АД35 [107]	198	640	340-410	0,020	0,05-0,06	8,6	36,0	3,4	15,8	4

Примітка: випробування зі змащенням рідким мастилом, швидкість ковзання 1,0 м/с

Випробування на тертя та знос проводили на повітрі при швидкості ковзання 1,0 м/с, навантаженнях до 7 МПа в парі з контртілом із сталі 45 (HRC= 45–48), змащуванні мастилом “І-20” (для композиту АК12ММгН) та синтетичним мастилом ПЕФ-240 (для композитів АМ4,5Кд, АД35).

Аналіз даних табл. 3.2 показує, що всі нові композити на основі відходів сплавів АК12ММгН, АМ4,5Кд та АД35 за міцносними характеристиками не поступаються литим сплавам тих самих марок [107, 224], а за антифрикційними – перевищують їх.

Така поведінка нових композитів криється в суттєвих відмінностях структуроутворення порошкових матеріалів та литих сплавів, що виникають в наслідок різних принципів синтезу матеріалів.

Суттєвим недоліком, зокрема литого сплаву – силуміну АК12ММгН є те, що присутність значної кількості кремнію (до 13%), який має обмежену розчинність в алюмінії та не створює з ним хімічних сполук [107, 224], призводить до утворення твердих структурних складових – кристалів Si, що мають високу твердість та крихкість, а головне – роблять структуру сплаву нерівномірною, викликаючи підвищений знос сполучених контактних деталей.

Крім цього нерівномірно розподілені евтектичні кристали кремнію підвищують вірогідність їх викришування при терті, наслідком чого є задири та підвищений знос поверхонь ковзання. Навіть присутність Ti, який зазвичай додається як модифікатор макрозерна сплаву АК12ММгН, внаслідок відсутності для Al–Si-сплавів чітких кореляцій між значеннями механічних характеристик та величиною макрозерна (внаслідок виділення по границям зерен подвійної евтектики Al–Si, що нівелює вплив границь зерен), втрачає свою ефективність [107, 224].

Слід також відмітити, що виявлені рентгеноструктурним аналізом зміцнюючі інтерметалідні фази, насамперед, фази θ (CuAl_2), S (Al_2CuMg), ефективні зміцнювачі Mg_2Si , NiAl_3 разом з тугоплавкими інтерметалідами N ($\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$) та α (AlFeSi) утворюють ободки навколо дендритних комірок,

підвищуючи міцність сплаву АК12ММгН. Висока температура плавлення таких евтектичних утворень, сприятлива форма кристалів евтектики, що складають каркас по границям зерен твердого розчину, наявність у складі евтектики міцної сполуки $T(Al_2CuMn)$, стійкої при підвищених температурах, а також присутність хімічної сполуки $TiAl_3$ – все це обумовлює здатність сплаву зберігати високі міцносні властивості при температурах до 100-120 °С [64–73, 107], що є характерними структурними особливостями як для литого, так і для композитного матеріалу.

Втім, всі ці позитивні властивості для литого сплаву визначають, з одного боку, його високу зносостійкість, а з іншого – високу вірогідність зношування поверхонь ковзання контактуючих з деталями внаслідок значної нерівномірності розподілу інтерметалідних фаз вздовж перетину виливку.

Перелічені явища повністю відсутні у композиційному матеріалі на основі відходів силуміну АК12ММгН. В ньому структурні утворення кремнію, тверді сполуки інтерметалідів знаходяться у мікрочастинках вихідної сировини (відходах) і таким чином вже первісно рівномірно розташовані в структурі матеріалу, не створюючи сегрегацій.

Це сприяє суттєвому зменшенню інтенсивності зношування та коефіцієнту тертя.

Присутня на вихідних частинках відходів сплаву АК12ММгН складна оксидна плівка [64–73, 225–228] запобігає затягуванню мікропор при навантажуванні, що сприяє утриманню мастила у мікропорах при терті зі змазкою, а більш м'яка основа частинок забезпечує добре припрацьовування матеріалу.

Слід відмітити, що в реальних умовах роботи антифрикційні деталі машин і устаткування поліграфічної галузі в окремі моменти часу або протягом всієї експлуатації також працюють в режимі, при якому відбуваються локальні порушення мастильної плівки, що призводить до підвищеного тертя, зношування і утворення задирів.

У такому режимі перебувають всі механізми постдрукерського обладнання в моменти пуску, зупинки, реверсування руху і в процесі припрацьовування.

Окрім цього антифрикційні алюмінієві деталі ряду контактних з'єднань постдрукерського обладнання, наприклад, скоби у машинах для вклеювання віконця в упаковку «Heiber & Schroeder wp 800 d» і т.п., мають працювати без змащування, оскільки застосування рідкого мастила є недопустимим через можливе забруднення друкарської продукції.

В зв'язку з цим, при виготовленні антифрикційних композитних деталей на основі шліф-відходів сплавів АК12ММгН, АМ4,5Кд та АД35 для уникнення застосування рідкого мастила у вихідну шихту додавали порошок MoS_2 у кількості 9,0–12,0%, що виконував функцію твердого мастила.

Триботехнічні властивості визначали на повітрі при швидкості ковзання 2,0–4,0 м/с, навантаженнях на пару тертя 2,0–4,0 МПа в парі з контртілом із сталі 45 (HRC=45–48), що відповідає реальним умовам роботи.

У табл. 3.3 наведено триботехнічні властивості антифрикційних деталей на основі шліфувальних відходів алюмінієвих сплавів АК12ММгН та АМ4,5Кд з додаванням твердого мастила MoS_2 .

Таблиця 3.3. Триботехнічні характеристики антифрикційних композитів на основі відходів сплавів АК12ММгН та АМ4,5Кд з домішками MoS_2

Склад, мас.%	Гранично-допустиме навантаження, МПа	Коефіцієнт тертя (f) та інтенсивність зношування (I), мкм/км, при навантаженнях МПа				Гранично-допустима швидкість ковзання, м/с
		2,0		4,0		
		f	I	f	I	
AK12M2MgH + (9–12)MoS ₂	4,0	0,094	12,38	0,11	12,66	5,0
Литий сплав AK12M2MgH [107]	2,0	0,36	218	Пластичне деформування		-
AM4,5Kд+(9–12)MoS ₂	4,0	0,091	12,42	0,13	12,69	5,0
Литий сплав АД35 [107]	2,0	0,34	243	Пластичне деформування		-

Наведені у табл. 3.3 дані показують, що присутність дисульфиду молибдену MoS_2 у складі досліджуваних зносостійких матеріалів на основі

відходів сплавів АК12ММгН та АМ4,5Кд забезпечує надання їм істотно вищих триботехнічних характеристик у порівнянні з антифрикційними властивостями литих матеріалів тих самих марок сплавів, що піддавались випробуванням за ідентичних умов.

Така поведінка нових композитів криється в суттєвих відмінностях структуроутворення порошкових і литих матеріалів, що виникають внаслідок різних принципів синтезу матеріалів, про що йшлося вище, а також в наслідок постійного змащення поверхонь зразка і контртіла присутнім MoS_2 у об'ємі композитів.

Після триботехнічних випробувань утворились рівномірні плівки тертя як на поверхнях зразків з досліджених композитів, так і на поверхнях контртіл, що показано на рис. 3.17.

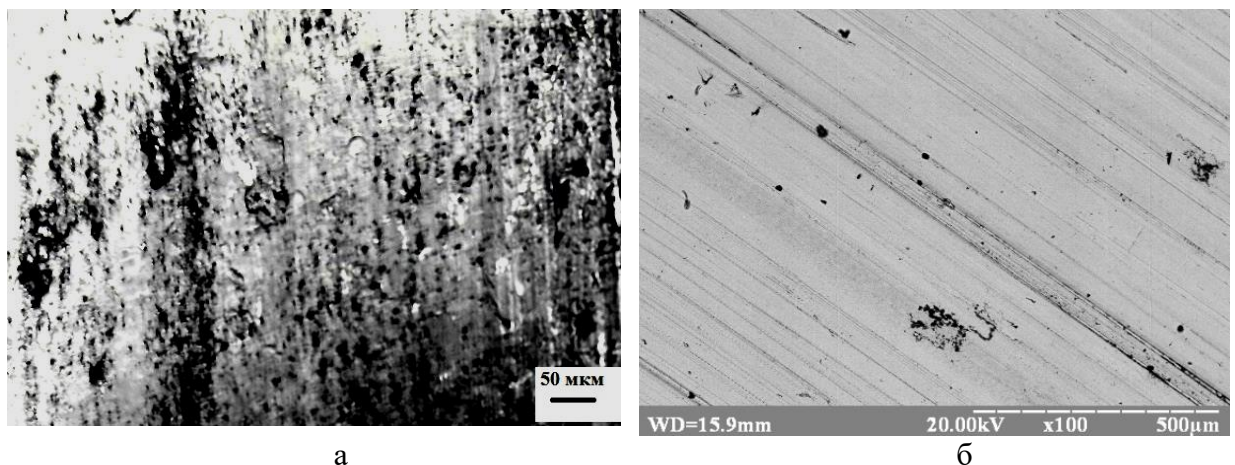


Рисунок 3.17. Контактні поверхні тертя після триботехнічних випробувань, швидкість 2,0 м/с; навантаження 4,0 МПа: а – плівка тертя на поверхні зразка з композиту АМ4,5Кд+(9–12)% MoS_2 ; б – поверхня контртіла зі сталі 45

Як видно з рис. 3.17, контактні поверхні тертя відрізняються гладкістю і не мають ознак схоплення і абразивного зношування за умов випробувань при швидкості ковзання до 2,0 м/с і навантаженні до 4,0 МПа. Це підтверджується високими триботехнічними характеристиками за таких умов випробувань (табл. 3.3).

Втім збільшення навантажень на контактну пару вище 4,0 МПа призводить до зростання коефіцієнту тертя та інтенсивності зношування, що

викликає появу грубих пошкоджень плівки тертя у вигляді ділянок схоплень і задирів. Аналогічні явища спостерігаються зі збільшенням швидкості ковзання вище 2,0 м/с, коли за таких умов рідке мастило стає неефективним і поверхні матеріалів пари тертя залишаються не захищеними. В цьому випадку має місце безпосередній контакт антифрикційного матеріалу і контртіла.

Зображення поверхонь тертя зразка з композиту $AM4,5K_d+(9-12)\%MoS_2$ після триботехнічних випробувань при навантаженнях 5,0 МПа і швидкості ковзання 3,0 м/с представлено на рис. 3.18.

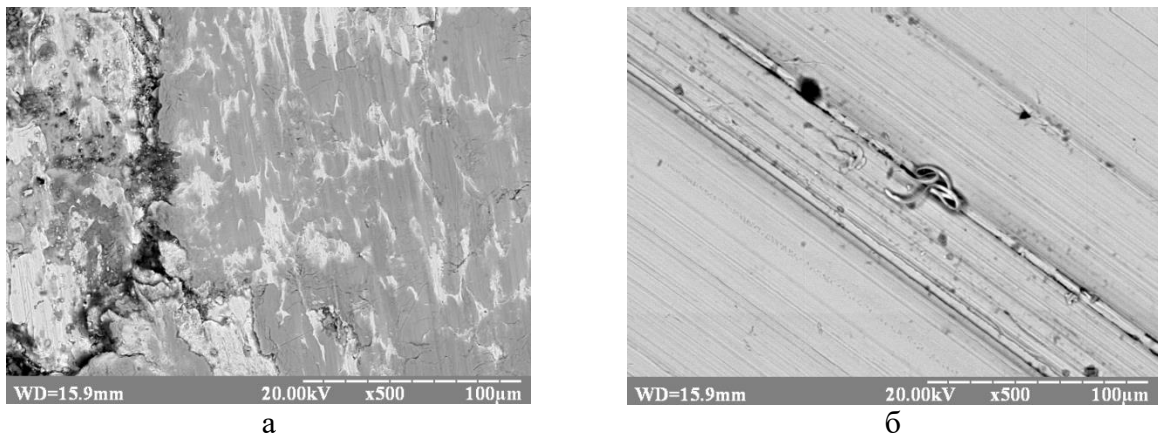


Рисунок 3.18. Контактні поверхні тертя після триботехнічних випробувань, швидкість 3,0 м/с; навантаження 5,0 МПа: а – зразок з композиту $AM4,5K_d+(9-12)\%MoS_2$; б – контртіло зі сталі 45

Наведені на рис. 3.18 зображення контактних поверхонь свідчать, що за умов експлуатації, які перевищують швидкості ковзання вище 2,0 м/с та навантаження вище 4,0 МПа спостерігаються явища суттєвих пошкоджень треків тертя як на поверхні композиційного матеріалу (рис. 3.18а), так і на поверхні контртіла (рис. 3.18б), що зумовлює зниження триботехнічних характеристик.

За таких умов випробувань плівка тертя перебуває у дисбалансі, тобто темп її зношування перевищує темп формування нових ділянок плівки, настає контакт не захищених поверхонь.

А при безпосередньому контакті пари тертя контртіло, як більш твердий матеріал, врізається у м'який компонент пари тертя – у антифрикційний композиційний матеріал, залишаючи подряпини і задири.

Аналогічні явища спостерігались при випробуваннях інших композитів на основі відновлених відходів алюмінієвих сплавів.

Отже, завдяки присутності дисульфиду молібдену у процесі тертя на поверхнях формується антизадирна змащувальна розділювальна плівка, що складається з MoS_2 та комплексних хімічних сполук елементів пари тертя – зразка і контртіла.

Вигляд поверхонь тертя зразка з матеріалу на основі відходів сплаву $\text{AK12MMgH} + 10\%\text{MoS}_2$ та контртіла зі сталі 45 зображено на рис. 3.19.

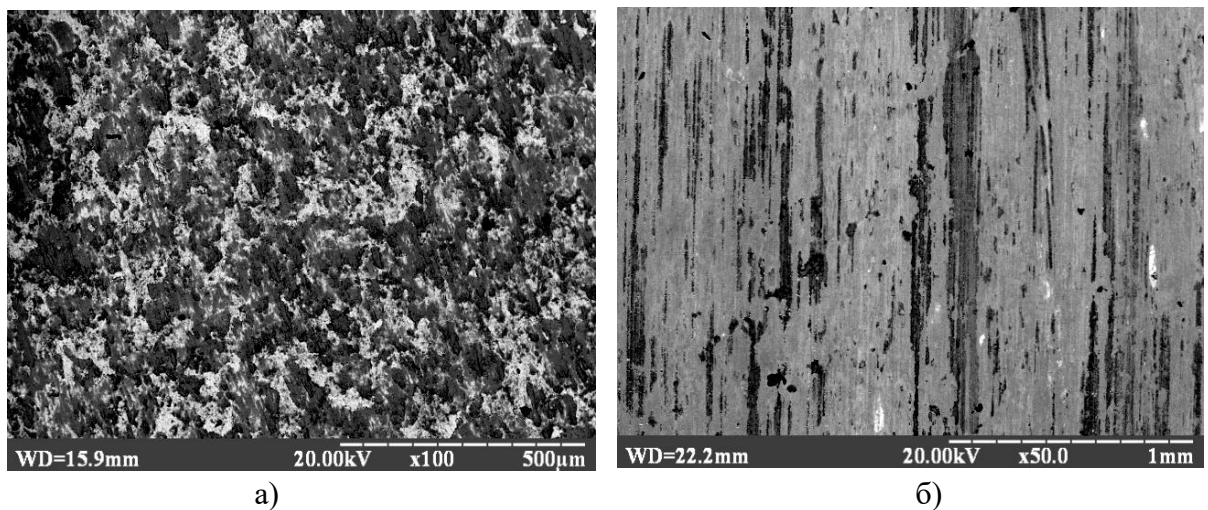


Рисунок 3.19. Поверхні тертя зразка з матеріалу на основі відходів сплаву $\text{AK12MMgH} + 10\%\text{MoS}_2$ (а) та контртіла зі сталі 45 (б), швидкість 2,0 м/с; навантаження 4,0 МПа

Сполучені поверхні ковзання пари тертя (рис. 3.19) відрізняються суцільністю, гладкістю, без ділянок сколів та глибинних виривів. Така топографія поверхонь не має зон тужавлень, заїдань та схоплень, що забезпечує стабільну і тривалу роботу антифрикційної контактної пари, що підтверджується даними табл. 3.3.

3.5. Вибір умов роботи нових композиційних деталей зі шліфувальних відходів алюмінієвих сплавів на основі аналізу стану поверхонь тертя

Проведення досліджень методами растрової мікроскопії дозволило виявити ряд важливих особливостей, що можуть дати додаткову інформацію про стан поверхні нових зносостійких композитних деталей на основі шліфувальних відходів сплаву AK12MMgH , що призначені для роботи в

умовах змащення рідким мастилом (напр., направляючі, скоби тощо у пост друкерській техніці), після проведення триботехнічних випробувань при навантаженні 5,0–8,0 МПа та швидкості ковзання 1,0–2,0 м/с.

Такий підхід дозволяє визначити раціональні режими роботи нових композитів, коли вони проявляють найвищі функціональні властивості.

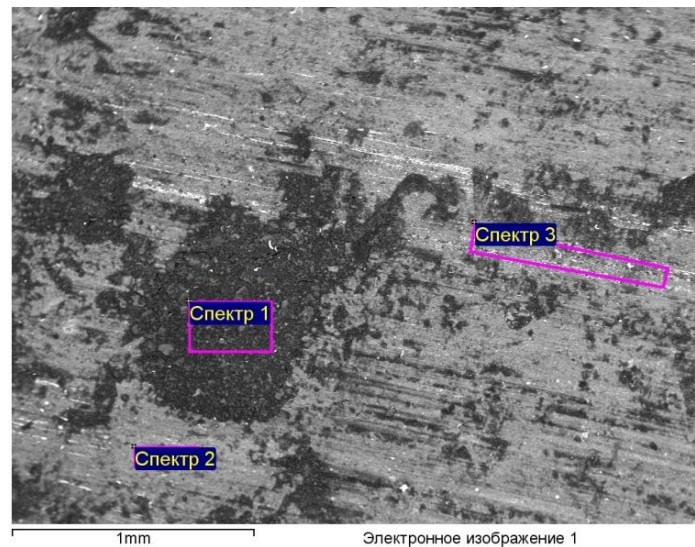


Рисунок 3.20. Поверхня композитної деталі на основі шліф-відходів сплаву АК12ММгН, трибовипробування при $P=5,0\text{--}6,0$ МПа, $V= 2,0$ м/с, режим реєстрації відбитих електронів

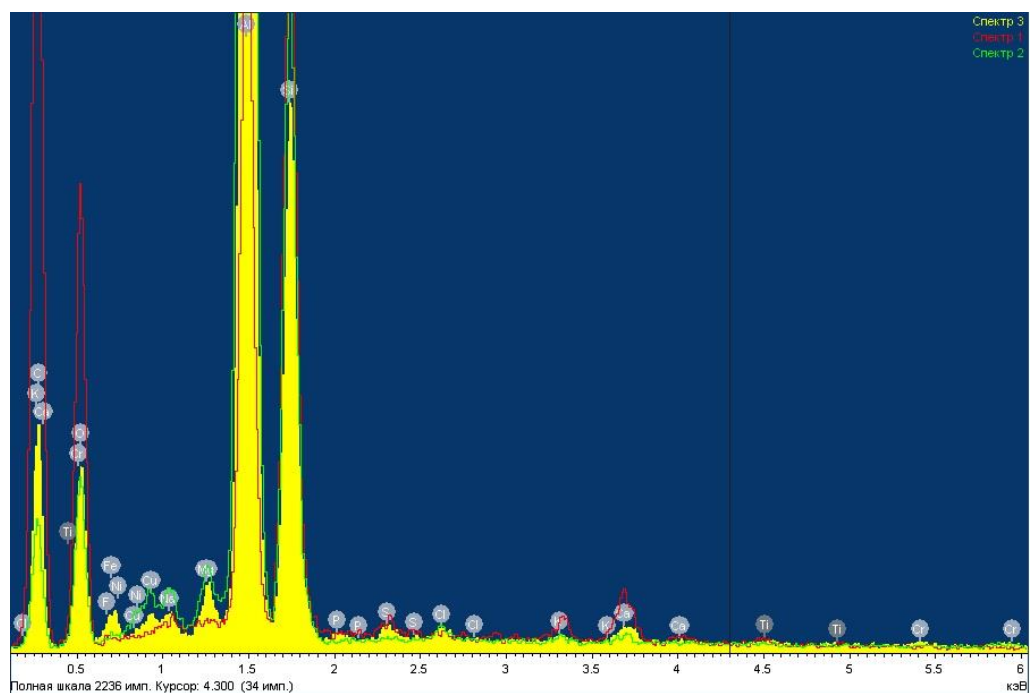


Рисунок 3.21. Спектри обраних ділянок поверхні тертя деталі на основі шліф-відходів сплаву АК12ММгН, трибовипробування при $P=5,0\text{--}6,0$ МПа, $V= 2,0$ м/с

Дослідження проводились в Центрі кристалофізичних досліджень ІНМ В. М. Бакуля НАН України за допомогою електронного мікроскопу EVO 50XVP (Німеччина, Carl Zeiss) та мікроскопу-мікроаналізатору "CamScan-4DV". При дослідженнях було одержано хімічний склад спектрів з обраних областей поверхні тертя композиту на основі шліфувальних відходів сплаву АК12ММгН після випробувань при навантаженнях 5,0–6,0 МПа та швидкості 1,0–2,0 м/с, що показано на рис. 3.20, відповідні спектри на рис. 3.21 та табл. 3.4–3.6.

Таблиця 3.4. Хімічний склад поверхні в зоні «Спектр 1»

Елемент	Умовн. концентр.	Інтенсивність, поправка	Масовий %	Масовий % Сигма	Атомний %
C K	159.28	3.6243	54.26	0.83	65.53
O K	10.90	0.4765	28.24	0.67	25.61
Al K	5.21	0.9174	7.01	0.16	3.77
Si K	5.23	0.7511	8.60	0.20	4.44
S K	0.12	0.8906	0.16	0.04	0.07
K K	0.27	1.0164	0.33	0.05	0.12
Ca K	0.66	0.9601	0.85	0.06	0.31
Ti K	0.10	0.7950	0.16	0.05	0.05
Fe K	0.25	0.7888	0.38	0.07	0.10
Підсумок			100.00		

Масило, вірогідно, перебуває в порах матеріалу і в процесі експлуатації під дією навантажень здатне видавлюватись на поверхню матеріалу, забезпечуючи постійне змащення поверхонь тертя, при цьому покращуючи експлуатаційні характеристики контактної пари.

Присутність таких елементів як хлор, кальцій, кисень, сірка свідчить про наявність залишків мастила, оскільки до складу мастила входять перелічені елементи (спектр 1 – темні ділянки поверхні рис. 3.20).

На світлих ділянках поверхні (рис. 3.20 спектри 2, 3) зафіксовано елементи, що входять до складу сплаву АК12ММгН та контртіла зі сталі 45.

Це свідчить про утворення плівок тертя, до складу яких входять хімічні елементи досліджуваного зразку, контртіла та залишки мастила.

Наявність таких зон (табл. 3.5, 3.6) забезпечує високі антифрикційні властивості, що в свою чергу позитивно впливає на процеси припрацьовуваності у вузлах тертя (табл. 3.2).

Таблиця 3.5. Хімічний склад поверхні в зоні «Спектр 2»

Елемент	Умовн. концентр.	Інтенсивність, поправка	Масовий %	Масовий % Сигма	Атомний %
C K	36.96	1.3964	26.51	1.35	42.81
O K	7.19	0.5755	12.53	0.39	15.18
Na K	0.90	1.1633	0.78	0.08	0.65
Mg K	0.66	0.9908	0.67	0.06	0.53
Al K	41.22	1.0323	40.02	0.77	28.76
Si K	8.31	0.5422	15.35	0.34	10.60
Cl K	0.21	0.6711	0.32	0.05	0.18
K K	0.17	0.9604	0.17	0.04	0.09
Ca K	0.19	0.9368	0.20	0.04	0.10
Fe K	0.36	0.8391	0.43	0.08	0.15
Ni K	1.03	0.8411	1.23	0.12	0.41
Cu K	1.43	0.7995	1.79	0.15	0.55
Підсумок			100.00		

Таблиця 3.6. Хімічний склад поверхні і в зоні «Спектр 3»

Елемент	Умов. концентр.	Інтенсивність, поправка	Масовий %	Масовий % Сигма	Атомний %
C K	68.99	1.8627	36.97	1.09	54.96
O K	8.20	0.5494	14.90	0.47	16.63
F K	0.00	0.3283	0.00	0.00	0.00
Na K	0.44	0.9486	0.46	0.08	0.36
Mg K	0.61	0.8494	0.72	0.06	0.53
Al K	23.67	0.9236	25.58	0.48	16.93
Si K	6.85	0.6015	11.37	0.25	7.23
P K	0.19	0.9682	0.20	0.05	0.12
S K	0.23	0.7875	0.29	0.04	0.16
Cl K	0.21	0.7127	0.29	0.05	0.14
K K	0.17	0.9911	0.17	0.04	0.08
Ca K	0.42	0.9577	0.44	0.05	0.20
Cr K	0.16	0.8409	0.18	0.06	0.06
Fe K	4.56	0.8325	5.46	0.18	1.75
Ni K	0.89	0.8266	1.08	0.12	0.33
Cu K	1.48	0.7863	1.87	0.15	0.53
Підсумок			100.00		

Після проведення випробувань при навантаженні 7,0–8,0 МПа, спостерігається інша картина розподілу структурних складових і хімічних елементів, що видно з рис. 3.22 і табл. 3.7–3.11.

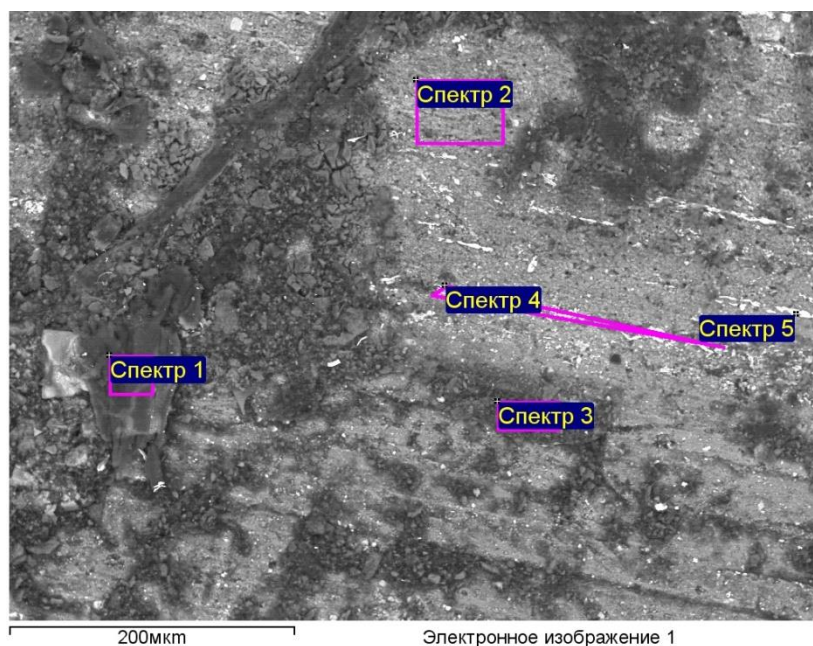


Рисунок. 3.22. Зображення поверхні зразка після випробувань при $P=7,0\text{--}8,0$ МПа, $V=2,0$ м/с, режим реєстрації відбитих електронів

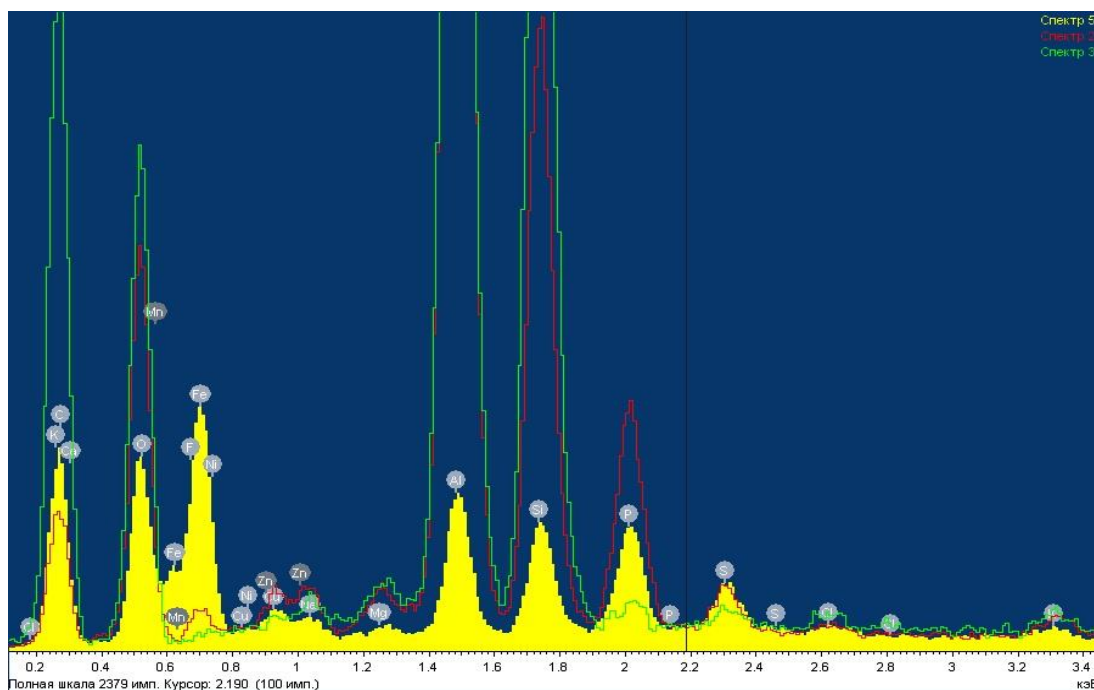


Рисунок 3.23. Спектри поверхні тертя деталі з композиту на основі шліфувальних відходів сплаву АК12ММgН після випробувань при $P=7,0\text{--}8,0$ МПа, $V=2,0$ м/с

Таблиця 3.7. Хімічний склад поверхні в зоні «Спектр 1»

Елемент	Умов. концентр.	Інтенсивність, поправка	Масовий %	Масовий % Сигма	Атомний %
C K	128.28	6.0340	48.36	0.92	56.49
O K	12.54	0.6028	47.29	0.89	41.47
Na K	0.17	0.7630	0.51	0.11	0.31
Al K	0.35	0.8228	0.96	0.08	0.50
Si K	0.35	0.7601	1.05	0.09	0.53
S K	0.28	0.9599	0.67	0.07	0.29
Cl K	0.12	0.8120	0.33	0.07	0.13
K K	0.19	1.0365	0.43	0.07	0.15
Ca K	0.13	0.9717	0.30	0.07	0.10
Fe K	0.03	0.7845	0.10	0.09	0.03
Підсумок			100.00		

Таблиця 3.8. Хімічний склад поверхні в зоні «Спектр 2»

Елемент	Умов. концентр.	Інтенсивність, поправка	Масовий %	Масовий % Сигма	Атомний %
C K	27.91	1.5707	23.24	1.51	37.42
O K	11.76	0.6501	23.69	0.63	28.63
Na K	0.47	0.9221	0.67	0.11	0.56
Mg K	0.30	0.8221	0.47	0.07	0.37
Al K	17.65	0.9087	25.42	0.55	18.22
Si K	5.36	0.6005	11.68	0.30	8.04
P K	3.65	0.9670	4.94	0.17	3.08
S K	0.48	0.7562	0.83	0.07	0.50
Cl K	0.12	0.6900	0.22	0.06	0.12
K K	0.30	0.9776	0.41	0.06	0.20
Ca K	0.38	0.9490	0.53	0.06	0.25
Mn K	0.17	0.8206	0.27	0.09	0.10
Fe K	2.45	0.8411	3.81	0.17	1.32
Ni K	0.46	0.8413	0.71	0.12	0.23
Cu K	1.38	0.7970	2.26	0.19	0.69
Zn K	0.52	0.7951	0.86	0.18	0.25
Підсумок			100.00		

Таблиця 3.9. Хімічний склад поверхні в зоні «Спектр 3»

Елемент	Умов. концентр.	Інтенсивність, поправка	Масовий %	Масовий % Сигма	Атомний %
C K	75.83	2.3364	46.13	0.87	60.28
O K	8.25	0.5082	23.07	0.57	22.64
Na K	0.20	0.9812	0.29	0.08	0.20
Mg K	0.16	0.8773	0.26	0.06	0.17
Al K	10.34	0.9522	15.45	0.29	8.99
Si K	5.94	0.6877	12.29	0.26	6.87
P K	0.25	1.0427	0.34	0.06	0.17
S K	0.09	0.8263	0.16	0.05	0.08
Cl K	0.12	0.7341	0.24	0.05	0.11
K K	0.18	0.9923	0.25	0.05	0.10
Fe K	0.24	0.8063	0.43	0.09	0.12
Ni K	0.24	0.8079	0.43	0.11	0.11
Cu K	0.36	0.7664	0.66	0.14	0.16
Підсумок			100.00		

Таблиця 3.10. Хімічний склад поверхні в зоні «Спектр 4»

Елемент	Умов. концентр.	Інтенсивність, поправка	Масовий %	Масовий % Сигма	Атомний %
C K	46.54	1.8864	31.42	1.24	49.52
O K	8.73	0.6164	18.04	0.51	21.35
F K	0.00	0.3313	0.00	0.00	0.00
Na K	0.46	0.8130	0.72	0.10	0.59
Mg K	0.17	0.7502	0.29	0.06	0.23
Al K	12.79	0.8517	19.13	0.39	13.42
Si K	5.11	0.6235	10.43	0.25	7.03
P K	2.52	1.0084	3.18	0.13	1.94
S K	0.41	0.7937	0.65	0.06	0.39
Cl K	0.12	0.7175	0.21	0.05	0.11
K K	0.25	1.0026	0.32	0.06	0.15
Ca K	0.29	0.9705	0.39	0.06	0.18
Fe K	8.49	0.8410	12.85	0.33	4.36
Ni K	0.46	0.8297	0.70	0.12	0.23
Cu K	1.04	0.7911	1.67	0.17	0.50
Підсумок			100.00		

Таблиця 3.11. Хімічний склад поверхні в зоні «Спектр 5»

Елемент	Умов. концентр.	Інтенсивність, поправка	Масовий %	Масовий % Сигма	Атомний %
C K	55.76	2.6315	27.53	1.12	51.03
O K	9.24	0.7899	15.21	0.44	21.17
F K	0.00	0.4116	0.00	0.00	0.00
Na K	0.37	0.5279	0.90	0.17	0.87
Mg K	0.12	0.5232	0.29	0.09	0.27
Al K	1.94	0.6464	3.91	0.13	3.23
Si K	1.50	0.6259	3.12	0.12	2.48
P K	2.76	1.1091	3.23	0.12	2.32
S K	0.73	0.8637	1.11	0.08	0.77
Cl K	0.16	0.7722	0.26	0.06	0.17
K K	0.26	1.0735	0.31	0.06	0.18
Ca K	0.30	1.0419	0.37	0.06	0.21
Fe K	27.72	0.8818	40.86	0.71	16.29
Ni K	0.48	0.8364	0.75	0.14	0.29
Cu K	1.31	0.8041	2.12	0.19	0.74
Підсумок			100.00		

Як видно з рис. 3.22 і табл. 3.7–3.11 ряд зон поверхонь тертя пересичені не тільки киснем, але і залізом. Це пов'язано з високими навантаженнями на пару тертя, що призводять до «намазування» компонентів контртіла на поверхню матеріалу.

Це спричинює підвищення коефіцієнту тертя та інтенсивності зношування матеріалу. Крім цього на поверхнях тертя спостерігається велика кількість елементів, які входять до складу мастила.

Вказане корелює із значеннями триботехнічних характеристик при $P=7,0$ МПа (табл. 3.2).

Таким чином можна стверджувати, що діапазон навантажень, в яких деталь працює ефективно складає 3-5,5 МПа, а підвищення навантаження до 7,0 МПа призводить до суттєвого збільшення коефіцієнту тертя та інтенсивності зношування як деталі, так і контртіла, що підтверджено результатами трибовипробувань. Також ці результати підтверджуються результатами мікрорентгеноспектрального аналізу поверхонь тертя, що свідчить про достовірність отриманих даних.

Проведене дослідження дозволяє встановити оптимальні режими експлуатації деталі з утилізованих шліфувальних відходів сплаву АК12ММГН, які становлять: швидкість ковзання 1 м/с, навантаження на пару тертя 3-6 МПа на повітрі.

3.4 Ефективність технології виготовлення композиційних антифрикційних деталей на основі відходів алюмінієвих сплавів

Для підтвердження ефективності розробленої технології виготовлення нових зносостійких композитних деталей на основі регенерованих порошків-відходів алюмінієвих сплавів було виконано Фур'є аналіз періодичності структури за допомогою фотозображень досліджуваних зразків за допомогою програмних пакетів аналізу зображень (рис. 3.24, 3.25).

Нижче представлено результати досліджень на прикладі зразків з відходів силуміну АК12ММГН+7%MoS₂.

Напруження впорядкованості структури, як відомо [201–209], завжди можна охарактеризувати функціями зсуву, повороту і зрушення періодичності, тобто відповідно функціями $f(x, y, z)$, $f(\alpha, \beta, \gamma)$ і $p(x, y, z)$.

Відомо, що аналіз Фур'є дозволяє ідентифікувати окремі компоненти системи, які можна представити або апроксимувати через суму простіших тригонометричних функцій, рядів Фур'є [201–209]:

$$f(x) = a_0/2 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \times \cos nx + b_n \times \sin nx) \quad (3.1).$$

$f(x)$ - це функція (у нашому випадку це композит АК12ММГН +7%MoS₂), яка розкладається на періодичні функції, що багаторазово повторюються. Коефіцієнти a_0 , a і b є коефіцієнтами Фур'є, які відповідають за амплітуду, тобто за її внесок у розклад функції $f(x)$.

Рівняння (3.1) показує нескінченну суму синусів і косинусів, взятих з різними коефіцієнтами. Синуси і косинуси мають вигляд $\cos x$, $\cos 2x$, $\cos 3x$... $\sin x$, $\sin 2x$, $\sin 3x$... і т.д., тобто мають різну частоту і залежать від кута відбиття при скануванні поверхні композита.

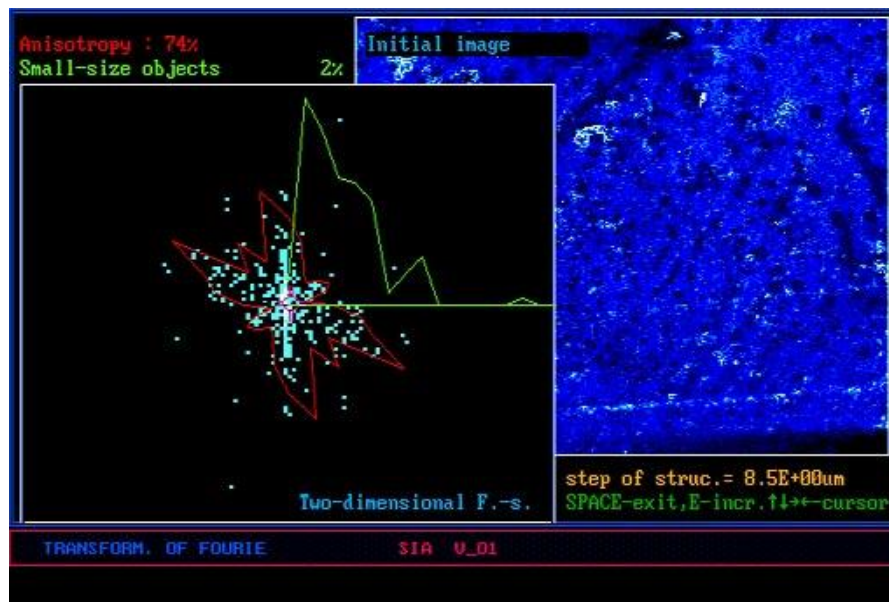
Ці характеристики, які ілюструють ступінь організації структури матеріалу після виготовлення деталі, проявляються у відбитому від елементів структури (від окремих частинок сплаву АК12ММгН та твердого мастила MoS_2) спектрі і реєструються та якісно оцінюються при скануванні вузького електронного променя вздовж аналізованої поверхні зразка. Оскільки різні ділянки структури відрізняються за їх просторовою орієнтацією, вони по-різному відбивають скануючий промінь, а відтак це спричинює зміну відбитого сигналу.

У нашому дослідженні аналіз Фур'є використовувався для визначення характеру розподілу, як складників алюмінієвої металевої матриці, так і твердого мастила MoS_2 в структурі композиту після технологічних операцій виготовлення та тонкої обробки.

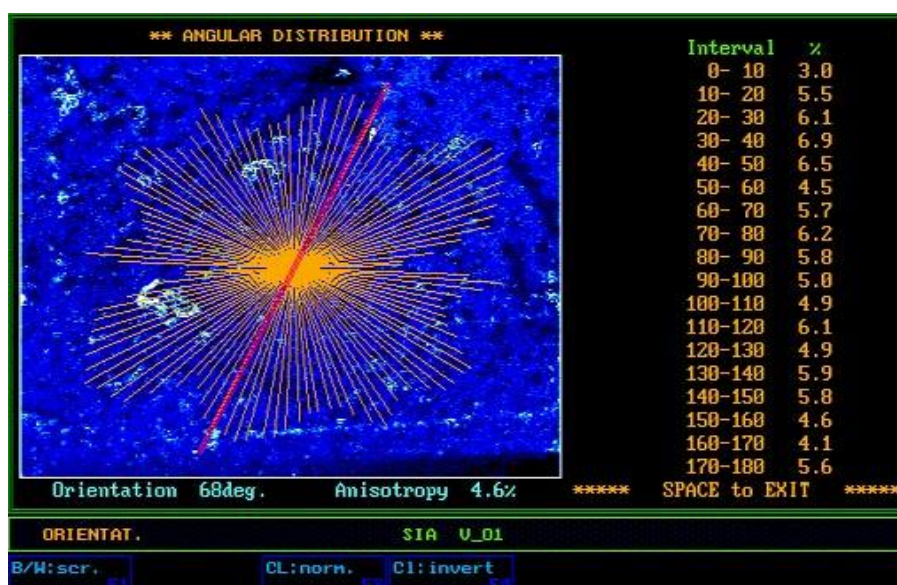
Перший коефіцієнт Фур'є був 8.5E (8,5 мкм) при дослідженні структури у режимі SE - у вторинних електронах, і коефіцієнт Фур'є –1.0E (1.0 мкм) при дослідженні структури у режимі BE – у відбитих електронах; ці коефіцієнти Фур'є показують крок, з яким виконувався процес сканування.

Дослідження виконувались за методикою, що викладена у розділі 2 монографії. Використовувалися два режими фотографування: перший – у вторинних електронах від рельєфу поверхні (режим SE, непружне розсіювання) і другий режим BE – у фазовому контрасті, на глибині 50 нм, у відбитих електронах (пружне розсіювання).

Результати аналізу при прямому та зворотному скануванні представлені на рис. 3.24, 3.25. Скануючий промінь проходив у прямому та зворотному напрямках, тобто двічі по зразку.



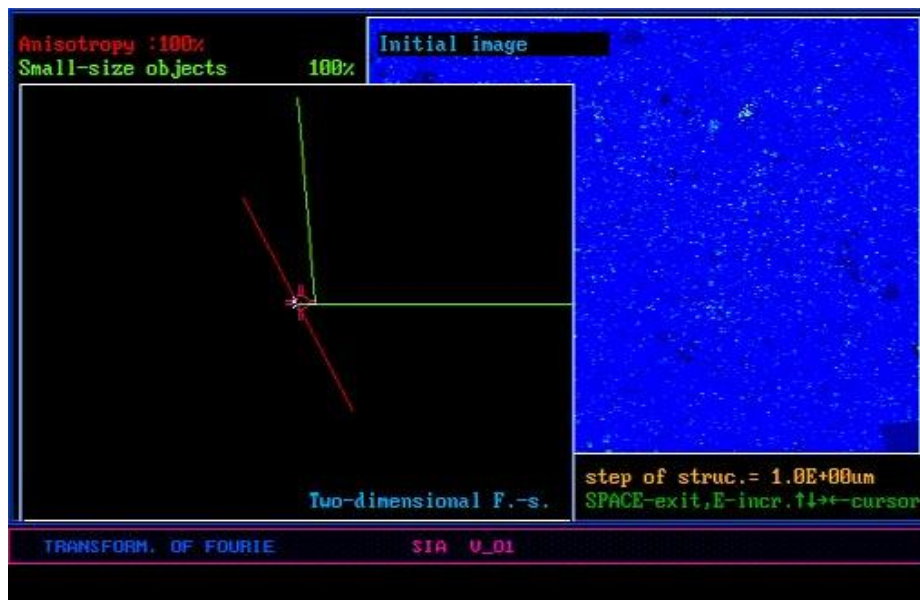
а



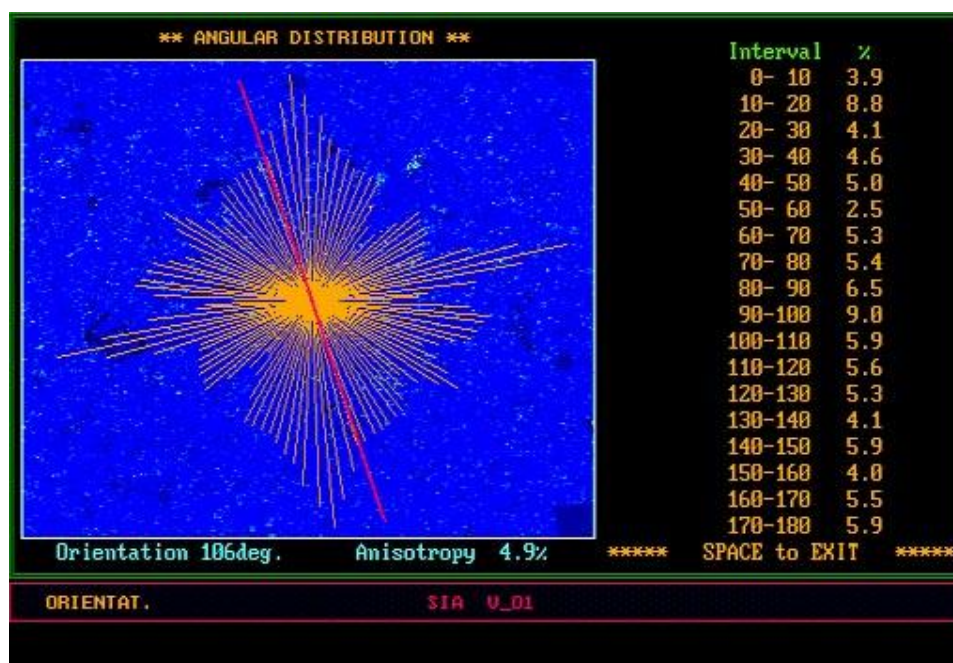
б

Рисунок 3.24. Фур'є-спектроскопія структури зразків композиту АК12ММгН+7,0%MoS₂ (режим SE у вторинних електронах): а – структурна (фізична) анізотропія (пряме сканування); б – орієнтація частинок композиту (зворотне сканування).

Відсоток включень у композиті було показано у відповідних діапазонах кутового сканування на цих фотографіях (жовті стовпці на рис. 3.24 і 3.25). Світло-зелені точки на зображеннях (рис. 3.24а, 3.25а) показують кількість дрібних частинок, розподілених на досліджуваних ділянках (рис. 3.24 – 2%, рис. 3.25 – 100%).



a



б

Рисунок 3.25. Фур'є-спектроскопія структури композиту $AK12MMgH+7,0\%MoS_2$ у фазовому контрасті (режим ВЕ у відбитих електронах, глибина від поверхні до 50 нм): а – структурна (фізична) анізотропія (пряме сканування); б – орієнтація частинок композиту (зворотне сканування)

Розглянуті місця обведені червоною лінією (Рис. 3.24а, 3.25а).

З рис. 3.24б, 3.25б видно, що хорди елементів зображення розташовані майже симетрично відносно головного вектора орієнтації. Ці результати можна пов'язати з орієнтацією напруг та анізотропії поверхні матеріалу після гарячого пресування та тонкої фінішної обробки.

Усі хорди жовтого кольору на рис. 3.24б, 3.25б відповідають синусам і косинусам рівняння Фур'є (3.1). Вони були розраховані за допомогою програмного забезпечення SIA 1.00.

Кількісно було оцінено структурний рівень анізотропії, тобто кількість і розподіл частинок композиту (рис. 3.24б, 3.25б), а також орієнтацію структурних елементів композиту (геометрична анізотропія) – рис. 3.24б, 3.25б вздовж основної поверхні, робочі напруги, аналізуючи фрактограми поверхні зразка, які спостерігаються у відбитих електронах (глибина ~ 50 нм) і у вторинних електронах (це був рельєф поверхні).

Складність структурного стану, тобто кількість коефіцієнтів Фур'є у рівнянні (3.1), розрахована програмою SIA 1.00 на основі отриманих при скануванні довжин хорд і кутів.

Ступінь структурної анізотропії за основними робочими напруженнями оцінювали на складності фрактограм, що є результатом технології гарячого пресування і тонкої механічної обробки поверхонь.

Зелені лінії показують середній розподіл найменших частинок вздовж осей x і y , тому що двовимірний спектр Фур'є використовувався при підрахунку числа попадань випадкової величини в певних кутових діапазонах.

Крім того, було отримано кількісну оцінку ступеня структурної впорядкованості композиту.

Кут між віссю інерції (жовті хорди) та абсцисою кожного структурного елемента на зображенні визначався прямим скануванням електронного променя вздовж поверхні зразка (режими BE та SE) для розрахунку синусів та косинусів, як показано на рис. 3.24б, 3.25б.

Для кожного з обраних діапазонів кутів на зображенні (від 0° до 180° з інтервалом 10°) отримано розраховану гістограму довжин хорд від структурних елементів зображення (частинок металевої матриці та частинок MoS_2) під час зворотного сканування також у двох режимах SE та BE (рис. 3.24б, 3.25б).

Статистичний аналіз структурних елементів на зображеннях було отримано шляхом розрахунку в програмі SIA 1.00 двовимірного спектру Фур'є шляхом підрахунку кількості попадань випадкової величини в заданих кутових діапазонах (довжини осей інерції для структурних елементів у композиті). Потім були узагальнені отримані результати.

Таким чином основний вектор орієнтації елементів структури (жирна червона лінія) отримано в обраному напрямку сканування відносно осі абсцис розрахунком у програмі SIA 1.00 [201, 205].

В результаті аналізу структурного стану і топографічних особливостей вихідної поверхні матеріалу на основі відходів сплаву АК12ММгН+ MoS₂, що проводили за двовірним спектром, було визначено кількість (у %) найдрібніших елементів структури та кількість (у %) блоків структурних складових для кожного кутового діапазону (рис. 3.24б, 3.25б).

Таким шляхом було оцінено анізотропію структури композиту в цілому. Результати розподілу структурних елементів в антифрикційному композиті на основі алюмінієвого відходів сплаву АК12ММгН з твердим мастильним матеріалом MoS₂ наведено в табл. 3.12.

Таблиця 3.12. Розподіл структурних елементів в матеріалі на основі сплаву АК12ММгН+7,0% MoS₂

Режим аналізу	Фур'є-аналіз		Орієнтація	
	A _{стр.} , %	Дрібні об'єкти, %	Кут нахилу, град.	A _{сер.} , %
SE – рельєф поверхні (у вторинних електронах)	74	2	68	4,6
BE – у фазовому контрасті (глибина 50 нм)	100	100	106	4,9

Результати табл. 3.12 свідчать, що оброблена поверхня однорідна і гладка, де важко виявити окремі дрібні частинки композиту. Такий рельєф поверхні сформувався після тонкої механічної обробки і наступних трибологічних випробувань. А вже починаючи з глибини 50 нм, фіксується наявність 100% дрібних частинок композиту.

Це показує коректність вихідних технологічних операцій з підготовки порошків-відходів і вихідної шихти загалом, коли були одержані однорідні вихідні суміші з дрібних порошків без конгломератів.

Після виготовлення композит є сильно деформованим і ущільненим (пористість $\approx 1,7-2,0\%$), про що свідчить 100 %-ва структурна анізотропія вже з глибини ~ 50 нм (реальна фізична анізотропія, $A_{\text{стр.}}$, табл. 3.12, рис. 3.24, 3.25).

Структурна анізотропія безпосередньо з поверхні зразка складає 74 %, що, вірогідно, пов'язано з її зменшенням завдяки утворенню гладкої поверхні зразка після механічної обробки і наступних трибологічних випробувань. Про це також свідчить зміна кута нахилу головного вектору орієнтації структурних елементів композиту.

При цьому незалежно від режиму аналізу (SE або BE) середня геометрична (орієнтаційна, $A_{\text{сеп.}}$) анізотропія виявилась досить низькою – 4,6–4,9 %. Це свідчить про достатньо високу однорідність одержаної структури матеріалу. Наявність малої неоднорідності (анізотропії) підтверджується проведеними дослідженнями триботехнічних властивостей (табл. 3.3). Зношування матеріалу відбувається рівномірно по всій поверхні тертя.

Розподіл залишкових частинок абразиву (до 2,0 мас. %) у структурі металевої матриці матеріалу на основі відходів сплаву АК12ММгН відрізняється рівномірністю, що сприяє реалізації принципу Шарпі (рівномірний розподіл твердих включень у м'якій матриці). Це, у свою чергу, мінімізує знос і стабілізує роботу пари тертя.

Одночасно з аналізом анізотропії структури матеріалу в роботі проводився якісний аналіз її текстури за фоновими ознаками: яскравість, розмір складових, форма, просторова орієнтація.

Як відомо [201, 204], текстуру можна описати декількома ознаками: дрібнозерниста, грубозерниста, гладка, гранульована, безладна, лінійчаста тощо.

Текстура композиту на основі відходів силуміну АК12ММгН+7,0%MoS₂ сформувалась під впливом зовнішніх технологічних факторів – температурних і навантажуючих параметрів при виготовленні та тонкій механічній обробці поверхонь і (окрім ознак біографічного походження при металургійному переплаві). Тобто після виготовлення композиційного матеріалу за розробленими технологічними режимами одержується дрібнозерниста структура, про що свідчать рис. 3.24, 3.25 і табл. 3.12, зі 100 % кількістю дрібних об'єктів. Така структура забезпечує високий рівень комплексу властивостей матеріалу (табл. 3.3).

Аналогічні явища спостерігались при дослідженні зразків з композитів на основі шліфувальних відходів сплавів АМ4,5Кд та АД35.

Таким чином, виконаний комплексний Фур'є-аналіз періодичності структури надав можливість підтвердити ефективність розробленої технології виготовлення композиційних антифрикційних матеріалів на основі шліфувальних відходів алюмінієвих сплавів, яка здатна забезпечити високий і стабільний рівень їх властивостей. Це у свою чергу стабілізує роботу контактних пар постдрукерського обладнання, зокрема, ножових друкерських машин, фальцапаратів, машин для вклеювання віконць в упаковку, тощо, та підвищує їх зносостійкість і збільшує довговічність означеного постдрукерського устаткування у цілому.

Висновки до розділу 3

1. Виконано аналіз структури нових антифрикційних композитів на основі регенованих шліфувальних відходів інструментальних сталей і алюмінієвих сплавів, що сформувалась в результаті застосування розроблених технологічних режимів виготовлення.

2. Виявлено, що композити на основі відновлених шліфувальних відходів інструментальних сталей 2Х6В8М2К7, Р6М5 та 11РЗАМ3Ф2 мають складну гетерофазну структуру, що складається з металевої матриці ферито-перлітного, перлітно-карбідного і перлітно-карбідно-карбонітридного типу

залежно від вмісту легувальних елементів, та рівномірно розподілених у ній частинок твердого мастила CaF_2 .

3. Показано, що утворена у процесі синтезу гетерофазна структура досліджуваних антифрикційних композитів на основі відходів інструментальних сталей надала їм високого рівня фізико-механічних і триботехнічних властивостей, що істотно переважають властивості литої латуні Л63, деталями з аналогічного складу закордонної латуні нині оснащені вузли тертя офсетних, друкарських та формних циліндрів ряду друкарських високошвидкісних машин типу PLAMAG Rondoset RO 170, SITMA C80 750i, STAR BINDER 1509, WOHLBERG 1A438, HEIDELBERG Speedmaster SM 102 FP+L, KBA RAPIDA-105 та ряд ін.

4. Одержані результати свідчать, що нові антифрикційні композити на основі промислових шліфувальних відходів легованих інструментальних сталей можуть бути рекомендовані для промислового застосування у вузлах друкарських машин широкого діапазону умов експлуатації.

5. Визначено, що в результаті технологічних операцій виготовлення утворилась гетерофазна структура композитів на основі відновлених шліфувальних відходів алюмінієвих сплавів АК12ММгН, АМ4,5Кд та АД35, металева матриця яких складається з алюмінієвого α -твердого розчину, зміцненого інтерметалідами легувальних елементів (у випадку силуміну АК12ММгН з рівномірно розподіленою евтектикою Al-Si) та рівномірно розташованим в металевій матриці твердим мастилом MoS_2 у випадках синтезу композитів для роботи в умовах самозмащення.

6. Показано, що одержана гетерофазна структура нових композитів на основі регенованих шліфувальних відходів алюмінієвих сплавів надала їм високого рівня функціональних властивостей, які переважають такі для литих алюмінієвих сплавів тих самих марок, що пов'язано з відмінностями структуроутворення через різницю у технологіях виготовлення.

7. Аналіз структури і комплексу властивостей композитів, синтезованих зі шліфувальних відходів алюмінієвих сплавів АК12ММгН, АМ4,5Кд та

АД35, показав їх перспективність для застосування у контактних з'єднаннях постдрукарського устаткування типу фальцювальних-склеювальних машин «BOBST Mistral 110 A2», машин для вклеювання віконць в упаковку типу «Heiber & Schroeder wr 800 d», ножових різальних машин WOHLBERG Trim-tec 560, WOHLBERG Trim-tec 607, у фальцапаратах HEIDELBERG IF-50 ST та ін. як ефективної альтернативи деталям з литих алюмінієвих сплавів закордонних аналогів.

8. Дослідження показали ефективність застосування регенованих промислових шліфувальних відходів легованих сталей і алюмінієвих сплавів як основи для одержання антифрикційних композитів для різного діапазону умов експлуатації, коли їх структурою і властивостями можна керувати технологічними заходами, обираючи хімічний склад тих чи інших шліфувальних відходів і застосовуючи раціональні технологічні параметри їх синтезу.

РОЗДІЛ 4. ТОНКЕ БОРАЗОНОВЕ ШЛІФУВАННЯ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ АНТИФРИКЦІЙНИХ КОМПОЗИТНИХ ДЕТАЛЕЙ ЗІ ШЛІФУВАЛЬНИХ ВІДХОДІВ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ СТАЛЕЙ

4.1. Шорсткість поверхонь нових високошвидкісних антифрикційних композитів для друкарських машин при бразонному шліфуванні

Для суттєвого збільшення термінів експлуатації антифрикційних деталей, насамперед, втулок підшипників ковзання різних технологічних систем, були синтезовані та рекомендовані у виробництво нові самозмащувальні втулки підшипників ковзання з нових композиційних матеріалів, синтезованих з регенованих шліфувальних відходів низки легованих сталей з домішками твердого мастила CaF_2 , дослідження комплексу властивостей яких наведено у розділі 3 монографії ч.2, табл. 3.1.

В останні роки на промислових підприємствах України набули поширення шліфувальні інструменти з бразону [1, 3, 31, 32, 35–37, 76, 82, 85,

86], які і донині ефективно застосовуються у машинобудуванні і забезпечують отримання високих параметрів якості деталей оброблення.

На жаль, процеси тонкого боразонового шліфування нових високолегованих композиційних деталей тертя, виготовлених на основі вторинної сировини, зокрема, на основі регенерованих шліфувальних відходів сталей (розділ 2, табл. 2.1), залишаються не дослідженими.

В науково-технічній літературі є багато публікацій із застосування інструментів з надтвердих синтетичних матеріалів для обробки деталей різних галузей виробництва [76, 82, 85, 86].

Вченим та промисловцями провідних машинобудівних підприємств доведено, що застосування боразонового шліфування (перш за все, завдяки особливостям інструменту) дозволяє отримати найкращі показники якості оброблюваних поверхонь.

Втім відсутність технологічних рекомендацій з боразонового шліфування високолегованих та важкооброблюваних композитних деталей 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.

Вище зазначені аргументи спонукали авторів монографії ч. 2 всебічно дослідити процеси тонкого боразонового шліфування втулок підшипників ковзання з нових композиційних матеріалів на основі шліфувальних відходів інструментальних сталей, і на цій основі створити типові технологічні процеси для ефективно тонкої обробки таких деталей для оснащення високообертового друкарського устаткування.

Тому до переліку завдань входило дослідження параметрів шорсткості поверхонь при тонкому боразоновому шліфуванні нових композитних втулок підшипників на основі шліфувальних відходів сталей, хімічний склад яких наведено у розділі 2, табл. 2.1. монографії ч.2, з домішками твердого мастила CaF_2 та встановлення впливу зернистості шліфувального круга, типу зв'язки

інструменту і основних режимів різання на якісні показники поверхонь оброблення досліджуваних зразків деталей.

Експериментальні дослідження з означеного науково-технічного завдання виконувались згідно з методикою, наведеною у роботах [31, 32, 35–37, 76, 82].

Результати досліджень на прикладі тонкої обробки поверхонь композитів на основі відходів сталей Р6М5, 2Х6В8М2К7, 11РЗАМЗФ2 наведені у табл. 4.1 для встановлення загальних закономірностей для обробки аналогічних за хімічним складом композитів.

Аналіз даних табл. 4.1 показує, що параметр шорсткості R_a змінюється зі зміною режимних факторів оброблення – глибини шліфування, поперечної та поздовжньої подач.

Таблиця 4.1. Параметр шорсткості R_a при тонкому плоскому шліфуванні підшипникового композитного сплаву Р6М5+6%CaF₂

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	0,205	0,275	0,315
	5	0,257	0,284	0,337
	10	0,273	0,321	0,391
0,2	2	0,305	0,348	0,405
	5	0,337	0,373	0,485
	10	0,350	0,403	0,517
0,5	2	0,380	0,426	0,579
	5	0,407	0,480	0,629
	10	0,415	0,500	0,672
1,0	2	0,438	0,527	0,721
	5	0,473	0,545	0,773
	10	0,525	0,607	0,838

Примітки: Верстат – FF-350 «Abawerk» (ФРН), абразив – боразон (Bo), зернистістю 14 мкм (M14) на гумово-бакелітній зв'язці GB1, швидкість кругу – 22 м/с, обробка – без охолодження.

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.

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:

$$R_a = 0,253S_{\text{п}} + 5,21t + 0,0053 V_b - 0,0437 \quad (4.1)$$

Аналіз формули (4.1) 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 $S_{\text{п}} = 0,01\text{--}0,02$ мм/подв.хід;
- Глибина шліфування $t = 0,002\text{--}0,100$ мм;
- Швидкість виробу $V_b = 2,0\text{--}4,0$ м/хв.

II-а група:

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

Після деяких перетворень рівняння (4.1) може бути трансформоване і набуде вигляду:

I-а група:

$$R_a = 0,2551S_{\text{п}} + 5,21t + 0,0049 V_b - 0,0038 \quad (4.2)$$

II-а група:

$$R_a = 0,2551S_{\text{п}} + 5,21t + 0,0049 V_b - 0,0533 \quad (4.3)$$

Розраховані за формулами (4.2) та (4.3) 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 боразонового інструменту, можна орієнтовно визначити яким буде параметр R_a та оцінити (з точки зору вимог, що висуваються до якості робочих

поверхонь композитних підшипників) прийнятність вибраних режимів шліфування.

Слід зазначити, що отримані висновки підтверджуються при тонкому боразоновому шліфуванні кругами різної зернистості – М50, М28, М14 та М7. Відповідні експериментальні дані наведені у табл. 4.2.

Аналіз даних табл. 4.2 дозволяє зробити суттєві практичні висновки: найменшу шорсткість поверхні у досліджуваному діапазоні зернистості інструменту (7–100 мкм) забезпечують боразові круги з зернистістю 7 мкм. Ці результати можуть бути пояснені загальними положеннями теорії шліфування.

Таблиця 4.2. Вплив зернистості інструменту на параметр шорсткості поверхні R_a при тонкому плоскому боразоновому шліфуванні заготовок композитних підшипників на основі відходів інструментальних сталей

Характеристика боразового (ЛО) інструменту	Матеріал зразків		
	Р6М5+6%CaF ₂	2Х6В8М2К7+6%CaF ₂	11Р3АМ3Ф2+6%CaF ₂
	R_a , мкм		
Bo10 GB1	0,907	0,924	0,941
Bo5 GB1	0,869	0,897	0,900
BoM28 GB1	0,261	0,270	0,277
BoM20 GB1	0,219	0,235	0,286
BoM14 GB1	0,205	0,221	0,225
BoM10 GB1	0,195	0,210	0,217
BoM7 GB1	0,163	0,179	0,183
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

Видно, що із зростанням зернистості інструменту шорсткість поверхонь збільшується, що обумовлено збільшенням перерізу a_z зрізу шару матеріалу, і навпаки – параметр шорсткості R_a зменшується зі зменшенням зернистості.

Покращення шорсткості також пояснюється і тим, що зерна боразового інструменту мають достатньо гостру форму (менший кут загострення при вершині зерна) та менший (у порівнянні з електрокорундовими та монокорундовими зернами) радіус округлення одиничного зерна, що видно з табл. 4.3.

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

$$R_a = 0,0052A - 0,0069 \quad (4.4)$$

Таким чином, знаючи зернистість боразонового 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.

Таблиця 4.3. Середні значення геометрії кута ріжучих зерен у різних абразивних матеріалах

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
Боразон	Bo10/8	2,21	57,0
	Bo6/5	1,13	52,0
	BoM14/10	0,8-0,82	50,0
Карбід кремнію зелений	63C10	7,5	95,1
	63CM28	2,3	92,1
	63CM14	2,0	90,6
Електрокорунд білий	23A10	9,5	98,3
	23AM28	2,7	94,7
	23AM14	2,4	92,5

Суттєвим питанням є і те, як впливає склад зв'язки боразонового круга на параметр шорсткості поверхні R_a , результати дослідження якого наведені у табл. 4.4.

Аналізуючи дані табл. 4.4, необхідно зазначити, що найкращі значення параметрів шорсткості R_a поверхонь оброблення деталей з нових композитів на основі інструментальних сталей забезпечують боразонові круги на бакелітно-гумовій зв'язці GB1.

Це може бути пояснено її більш еластичною здатністю і, таким чином, при шліфуванні (під час врізання зерна, що ріже, 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 боразонового шліфування.

Таблиця 4.4. Вплив матеріалу зв'язки боразонового круга на параметр шорсткості R_a зразків з композиту 11P3AM3Ф2+6%CaF₂ при плоскому шліфуванні

Характеристика абразивного інструменту	Матеріал зв'язки круга	Параметр шорсткості R_a , мкм
Bo5GB1	Гумово-бакелітна GB1	0,269
Bo5B1	Бакелітна B1	0,311
Bo5K1	Керамічна K1	0,407
Bo5M1	Металева M1	0,415
BoM28B1	Бакелітна B1	0,278
BoM28GB1	Гумово-бакелітна GB1	0,261
BoM28K1	Керамічна K1	0,298
BoM14B1	Бакелітна B1	0,217
BoM14GB1	Гумово-бакелітна GB1	0,205
BoM14K1	Керамічна K1	0,300
BoM10GB1	Гумово-бакелітна GB1	0,195
BoM7GB1	Гумово-бакелітна GB1	0,163

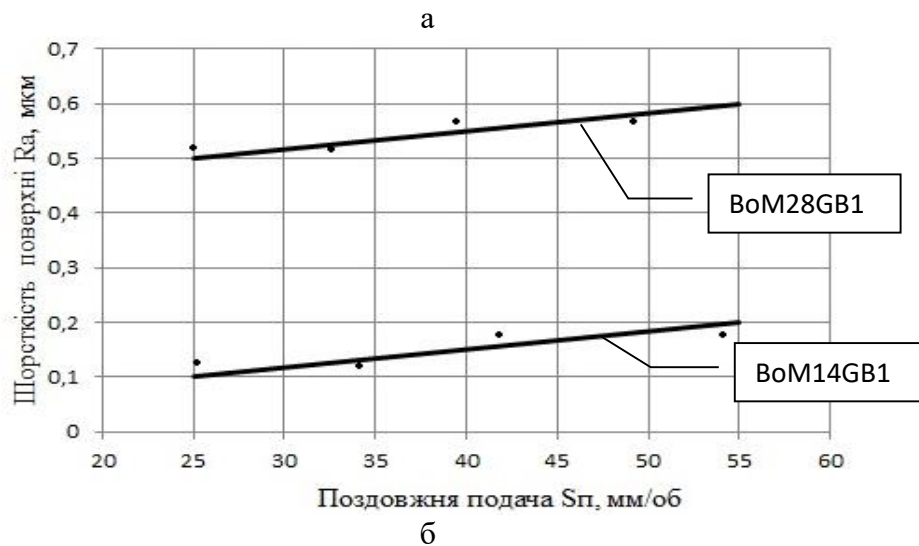
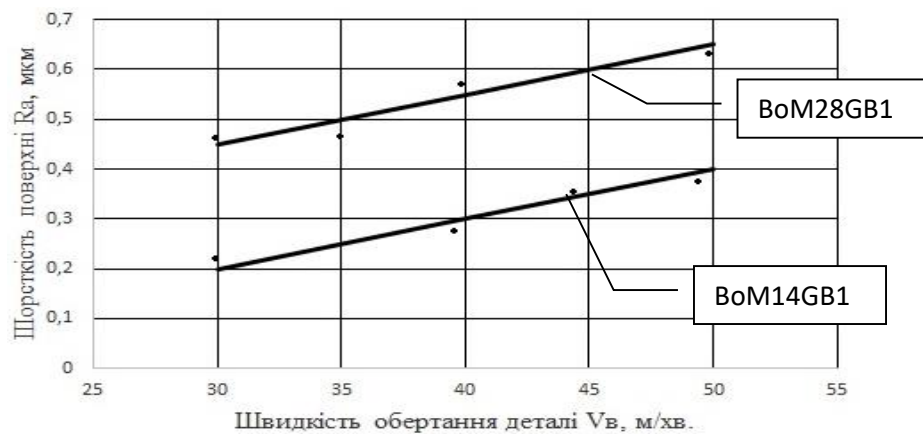
Примітки: Верстат – FF-350 «Abawerk» (ФРН); режими різання: швидкість круга – 22 м/с; поздовжня подача (швидкість виробу) – 2 м/хв; поперечна подача – 0,1 мм/подв.хід; глибина різання – 0,002 мм; шліфування – без охолодження.

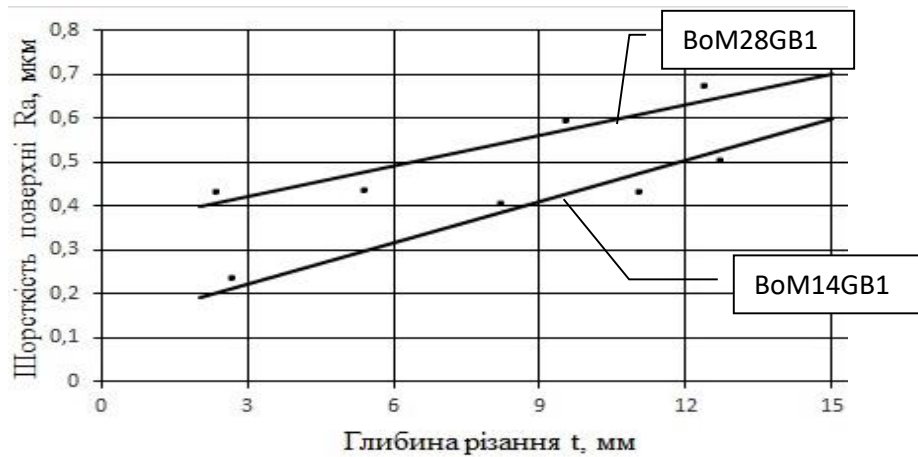
Слід зауважити, що ці висновки зроблені на підставі аналізу фактичних даних, отриманих під час експериментального дослідження із застосуванням широкої гами зв'язок (бакелітна, керамічна, металева, бакелітно-гумова) та зернистостей боразонового круга (100, 28, 14, 10 та 7 мкм).

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 боразонового шліфування композитних

підшипникових матеріалів на основі металевих шліфувальних відходів виконувалось з урахуванням вищенаведених результатів.

Зокрема, для дослідів використовувались боразонаві інструменти з боразону Во зернистістю 14–28 мкм, які сформовані у шліфувальні круги гумово-бакелітною зв’язкою (GB1). Зазначимо, що зовнішнє тонке боразоне кругле шліфування виконувалось на прецизійному верстаті AS–250 «Werkzajt» (ФРН), а для внутрішнього шліфування застосовувався прецизійний внутрішньо шліфувальний верстат надвисокої точності SS – 125 «Studder» (Швейцарія). Основні результати досліджень наведені на рис. 4.1, 4.2.





В

Рисунок 4.1. Залежність параметрів шорсткості поверхні R_a заготовки з композиту Р6М5+6%СаF₂ від режимів тонкого боразенового шліфування V_b , S_n , t при зовнішньому круглому шліфуванні (швидкість боразенового 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.; $S_n = 5$ м/об.

Аналіз експериментів (рис. 4.1) показує, що на шорсткість поверхонь деталей з нових композитних матеріалів при тонкому зовнішньому круглому боразеновому шліфуванні (як і при плоскому боразеновому шліфуванні) суттєво впливають режими різання: швидкість виробу V_b , позадвжняя подача S_n та глибина різання t , а також розмір зерна та матеріал зв'язки боразенового інструменту.

Аналогічно з плоским боразеновим шліфуванням найкращу якість оброблених зовнішніх поверхонь композитних циліндричних деталей (за параметром шорсткості R_a) тонким боразеновим круглим зовнішнім шліфуванням забезпечує застосування інструментів на основі боразону (Bo) на гумово-бакелітній зв'язці (GB1), зернистістю 14–28 мкм (M14–M28) та застосування тонких режимів шліфування ($V_b \rightarrow \min$; $S_n \rightarrow \min$; $t \rightarrow \min$).

Схожі результати отримані при тонкому круглому внутрішньому боразеновому шліфуванні робочих поверхонь тертя підшипників ковзання з нових композитних сплавів на основі відходів інструментальних сталей (рис. 4.2).

Аналіз рис. 4.2 показує, що при застосуванні для прецизійного внутрішнього боразенового шліфування деталей з нових композиційних сплавів на основі відходів інструментальних сталей з використанням для

оброблення боразонових кругів на основі боразону Во зернистістю 14–28 мкм на гумово-бакелітній зв'язці, на параметр шорсткості поверхні оброблення R_a найбільше впливають глибина різання t , поздовжня подача S_n та швидкість обертання деталі V_B .

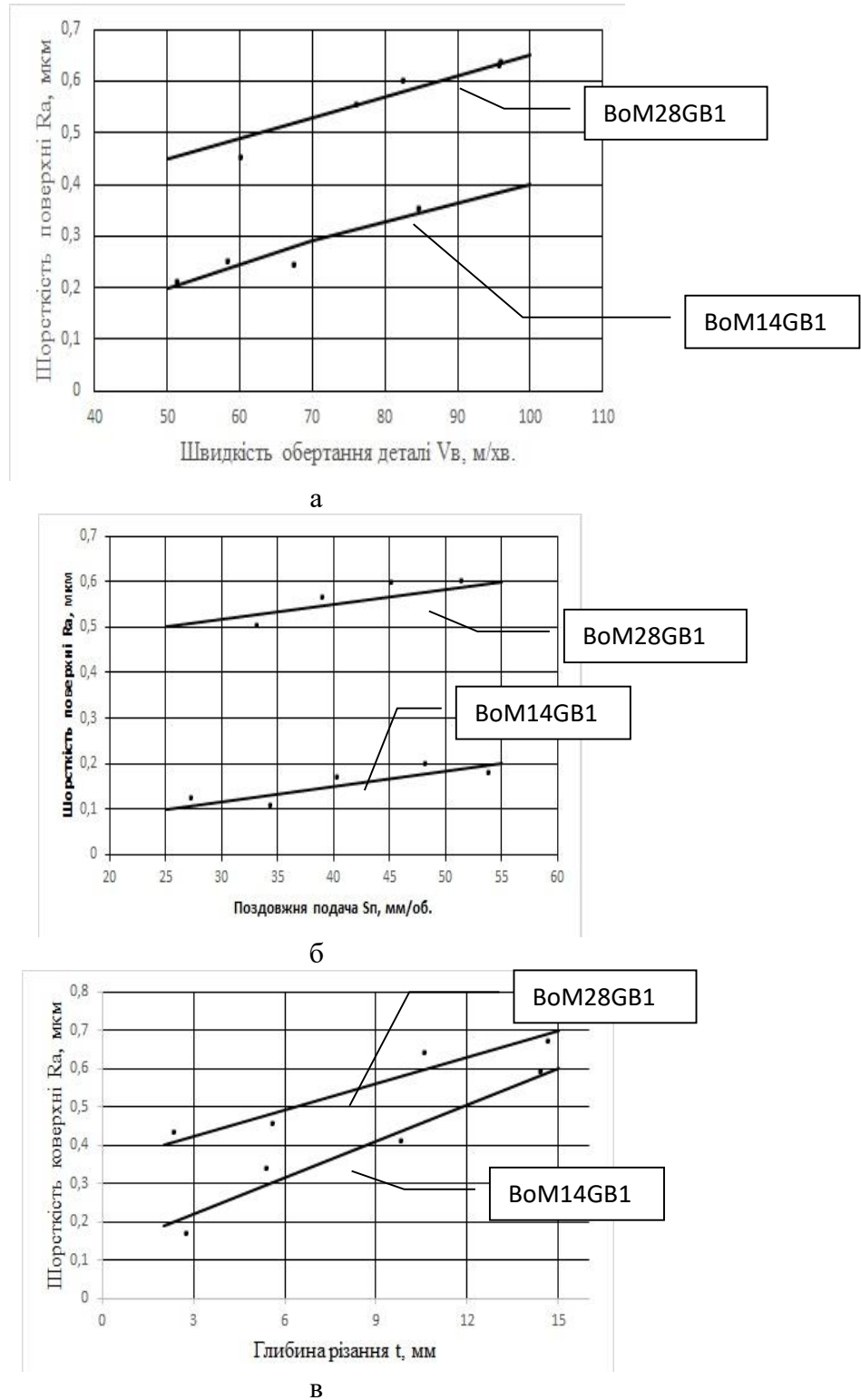


Рисунок 4.2. Залежність параметрів шорсткості поверхні R_a заготовки з композиту 2Х6В8М2К7+6%СаF₂ від режимів тонкого боразонового шліфування V_B , S_n , t при тонкому круглому внутрішньому шліфуванні (швидкість боразонового круга – $V_{кр.} = 40$ м/с): а) $S_n = 30$ мм/об.; $t = 2$ мкм; б) $V_B = 50$ м/хв.; $t = 2$ мкм; в) $V_B = 50$ м/хв.; $S_n = 30$ мм/об.

Найкращі результати за параметром якості R_a (тобто отримання мінімальної шорсткості поверхні) забезпечують тонкі режими бразонового шліфування, а саме, мінімальні можливі (з точки зору технічних можливостей верстата) режими різання – глибина шліфування, поздовжня подача та швидкість обертання деталі.

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

Висновки до розділу 4

1. Вперше досліджено процеси тонкого бразонового оброблення нових композиційних матеріалів, синтезованих на основі утилізованих та регенерованих шліфувальних відходів інструментальних сталей, що відкриває можливості одержання високоякісних деталей тертя з нових композитів для широкої номенклатури вузлів тертя, працюючих у різних умовах навантаження високошвидкісних друкарських машин.
2. Показано, що основні закономірності тонкого прецизійного бразонового шліфування нових антифрикційних композитів співпадають при плоскому, круглому зовнішньому та внутрішньому шліфуванні.
3. Доведено, що на параметр якості поверхні оброблення R_a суттєво впливають зернистість, матеріал зв'язки бразонового круга та режими тонкого бразонового шліфування.
4. Найкращі показники параметру R_a , які задовольняють високі вимоги до поверхонь тертя деталей поліграфічних машин, забезпечують шліфувальні круги з бразону В0 зернистістю 14–28 мкм на гумово-бакелітній зв'язці та тонкі режими різання, а саме:
 - для **плоского бразонового 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 бразонового 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 бразонового шліфування: швидкість круга – 40 м/с, швидкість виробу – 50 м/хв., поздовжня подача – 30 мм/об., глибина різання – 2 мкм.

РОЗДІЛ 5. ТОНКЕ АЛМАЗНЕ ШЛІФУВАННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ КОМПОЗИТНИХ ДЕТАЛЕЙ ТЕРТЯ ЗІ ШЛІФУВАЛЬНИХ ВІДХОДІВ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ПОЛІГРАФІЧНОЇ ТЕХНІКИ

Як відзначалось у розділах 2–4 монографії ч. 2, вимоги до якості поверхонь деталей тертя, які працюють в умовах інтенсивного зношування, постійно зростають, що викликано безперервним підвищенням важливих експлуатаційних параметрів поліграфічної техніки і, в першу чергу, зростанням термінів служби деталей контактної взаємодії і механізмів у цілому машин.

Останнім часом для суттєвого збільшення термінів експлуатації швидкісних підшипників ковзання поліграфічних машин були синтезовані та рекомендовані для виробництва нові самозмащувальні підшипники ковзання з композиційних матеріалів, що були вперше створені на основі регенерованих шліфувальних відходів інструментальних легованих сталей з домішками твердого мастила CaF_2 (розділ 2, табл. 2.2), і які здатні успішно функціювати при швидкостях обертання >500 об./хв. і питомих тисках до 5,0 МПа у контактних парах багатьох швидкісних друкарських машин [1, 3, 31, 32, 35–37, 76, 82, 125, 127].

При виготовленні деталей для вузлів тертя ряду високообертового поліграфічного обладнання технологія механічної обробки побудована таким чином, що на фінішних операціях технологічного процесу використовують

абразивне шліфування та надтонке магніто-абразивне (МАО) оброблення [1, 3, 31, 32, 35–37, 76, 82].

З точки зору оптимізації параметрів шорсткості поверхонь оброблення достатньо детально було досліджено процеси тонкого абразивного шліфування та МАО [1, 3, 31, 32, 35–37, 76, 82, 87, 89, 91–96, 109, 110, 112–125] та створені відповідні технологічні рекомендації.

На жаль, процеси тонкого алмазного шліфування нових високолегованих композиційних деталей тертя, виготовлених на основі вторинної сировини, зокрема, на основі регенерованих шліфувальних відходів сталей залишились дослідженими не повною мірою, що не дозволяє призначати оптимальні технологічні режими обробки задля забезпечення стабільно високих параметрів якості робочих поверхонь таких деталей, оскільки від цього безпосередньо залежить формування їх функціональних властивостей і, відповідно, експлуатаційна поведінка у високошвидкісному вузлі друкарської машини.

В науково-технічній літературі є багато публікацій із застосування алмазно-абразивної обробки деталей для різних галузей виробництва [1, 3, 31, 32, 35–37, 76, 82]. Разом з тим 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 деталей 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.

Вищевказні аргументи стали мотивацією для проведення авторами монографії ч. 2 комплексу досліджень процесів тонкого алмазного шліфування антифрикційних композитів для втулок підшипників ковзання з

нових композиційних матеріалів на основі шліфувальних відходів інструментальних сталей та на цій основі створити типові технологічні процеси для галузі поліграфічного машинобудування.

5.1. Вплив параметрів тонкого алмазного шліфування на якість поверхонь композиційних антифрикційних деталей поліграфічних машин

5.1.1. Вплив складу алмазного інструменту та режимів різання на шорсткість поверхонь антифрикційних композитних деталей

У представленому розділі монографії ч. 2 наведені результати дослідження формування параметрів шорсткості поверхонь при тонкому алмазному шліфуванні заготовок втулок з нових самозмащувальних антифрикційних композитів на основі шліфувальних відходів інструментальних сталей, складі яких наведено у розділі 2, табл. 2.1, що піддавались тонкій обробці.

Нижче представлені результати, що виконані при алмазному обробленні нових антифрикційних композитів на основі сталей Р6М5, 2Х6В8М2К7, 11РЗАМЗФ2 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 виконувались згідно з методикою, наведеною у роботах [1, 3, 31, 32, 35–37, 76, 82] та у розділі 2 монографії. Отримані результати наведені у табл. 5.1.

Аналіз даних табл. 5.1 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_b , t)

та при змінній третій величині (наприклад, $S_{\text{поп.}}$), показала, що досліджені сукупності суттєво різні.

Таблиця 5.1. Параметр шорсткості R_a при тонкому плоскому шліфуванні композиту на основі відходів сталі Р6М5+6% CaF_2

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 круга – 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 : $R_a = f(t)$, $S_{\text{поп.}} = \text{const}$, $V_v = \text{const}$.

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 $R_a - t$; $R_a - S_{\text{п}}$; $R_a - V_{\text{в}}$; $S_{\text{поп.}} - V_{\text{в}}$; $S_{\text{поп.}} - t$; $t - V_{\text{в}}$.

Виконані розрахунки показують, що між факторами R_a , $S_{\text{поп.}}$, $V_{\text{в}}$, t існує щільний лінійний зв'язок. Формальний математичний аналіз показує, що між факторами $S_{\text{поп.}} - t$; $t - V_{\text{в}}$ та $S_{\text{поп.}} - V_{\text{в}}$ 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 $V_{\text{в}}$.

Рівняння множинної кореляції для досліджуваних факторів має вигляд:

$$R_a = 0,252S_{\text{п}} + 5,2t + 0,0049 V_{\text{в}} - 0,0430 \quad (5.1)$$

Аналіз формули (5.1) показує, що на параметр шорсткості R_a чинять найбільший вплив глибина шліфування t та поперечна подача $S_{\text{п}}$, а найменший – швидкість виробу $V_{\text{в}}$.

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

I-а група:

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

II-а група:

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

Після деяких перетворень рівняння (5.1) може бути трансформоване і набуде вигляду:

I-а група:

$$R_a = 0,2523S_{\Pi} + 5,2t + 0,0049 V_b - 0,0031 \quad (5.2)$$

II-а група:

$$R_a = 0,2523S_{\Pi} + 5,2t + 0,0049 V_b - 0,0530 \quad (5.3)$$

Розраховані за формулами (5.2) та (5.3) 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 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. 5.2.

Таблиця 5.2. 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		
	Р6М5+6%CaF ₂	2Х6В8М2К7+6%CaF ₂	11РЗАМ3Ф2+6%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.

Аналіз даних табл. 5.2 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.

Дійсно, збільшення шорсткості поверхонь зі зростанням зернистості обумовлюється збільшенням перерізу a_z зрізу шару матеріалу.

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. 5.3).

Таблиця 5.3. 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	AC10/8	2,2	57,4
	AC6/5	1,1	52,2
	ACM14/10	0,7–0,8	49,5
Карбід кремнію зелений	63C10	7,5	95,1
	63CM28	2,3	92,1
	63CM14	2,0	90,6
Електрокорунд білий	23A10	9,5	98,3
	23AM28	2,7	94,7
	23AM14	2,4	92,5

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

$$R_a = 0,0051A - 0,0068 \quad (5.4)$$

Таким чином, знаючи зернистість алмазного шліфувального круга A можна розрахувати параметр шорсткості R_a за виразом (5.4) 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.

Важливим питанням, що розглядалось авторами монографії, було встановлення впливу складу зв'язки алмазного круга на параметр шорсткості поверхні R_a , результати дослідження якого наведені у табл. 5.4.

Таблиця 5.4. Вплив матеріалу зв'язки алмазного круга на параметр шорсткості обробленої поверхні R_a зразків з композитів на основі відходів сталі 11P3AM3Ф2+6%CaF₂ при плоскому шліфуванні

Характеристика алмазного 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. 5.4, необхідно зазначити, що найкращі значення параметрів шорсткості R_a поверхонь оброблення заготовок деталей з нових композитів на основі відходів інструментальних сталей забезпечують алмазні круги на бакелітно-гумовій зв'язці Бр1.

Вказане може бути пояснено її більш еластичною здатністю і, таким чином, при шліфуванні (під час врізання абразивного зерна у матеріал) 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).

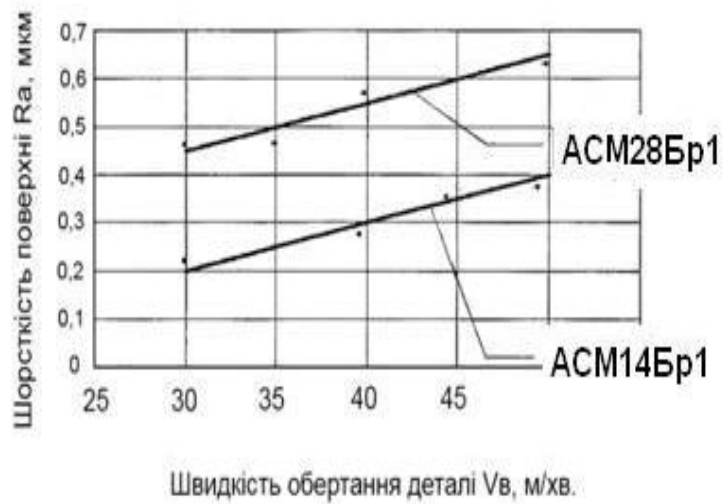
Приймаючи до уваги те, що фізичні явища у процесі різання металів принципово подібні для плоского, зовнішнього круглого та внутрішнього шліфування, експериментальне дослідження процесів тонкого зовнішнього круглого і внутрішнього алмазного шліфування композитних підшипникових заготовок на основі відходів 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).

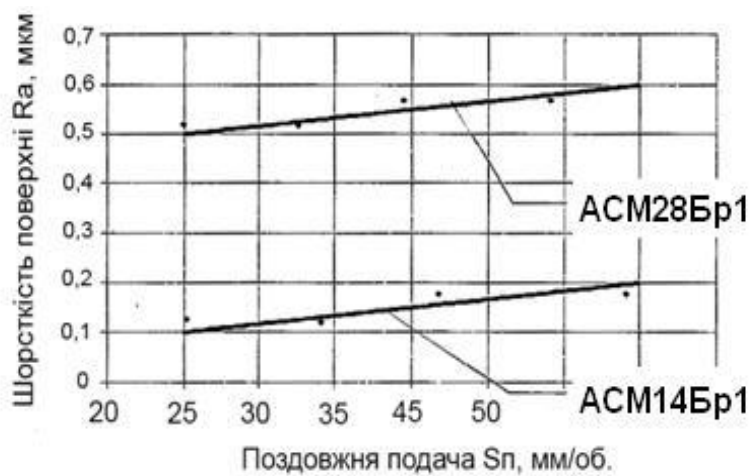
Зазначимо, що зовнішнє тонке алмазне кругле шліфування виконувалось на прецизійному верстаті AS–250 «Werkzajt» (ФРН), а для внутрішнього шліфування застосовувався прецизійний внутрішньошліфувальний верстат надвисокої точності SS – 125 «Studder» (Швейцарія).

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

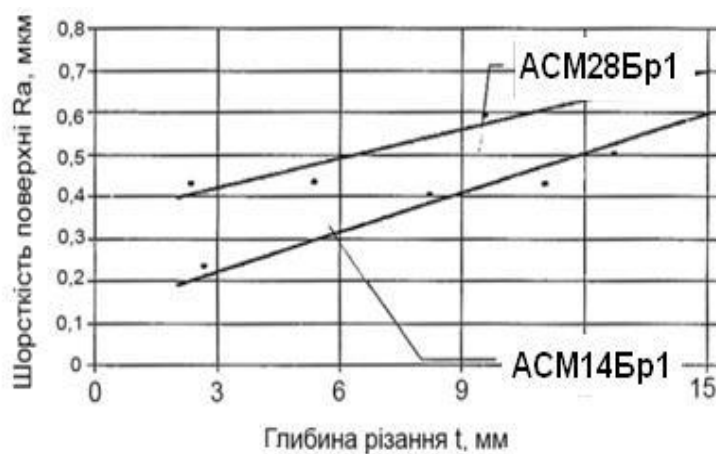
Аналогічно з плоским алмазним шліфуванням найкращу якість оброблених зовнішніх поверхонь композитних циліндричних заготовок (за параметром шорсткості R_a) тонким алмазним круглим зовнішнім шліфуванням забезпечує застосування інструментів на основі алмазу синтетичного (АС) на бакелітно-гумовій зв'язці (Бр1), зернистістю 14–28 мкм (M14–M28) та застосування тонких режимів шліфування ($V_v \rightarrow \min$; $S_n \rightarrow \min$; $t \rightarrow \min$) (рис. 5.1).



а

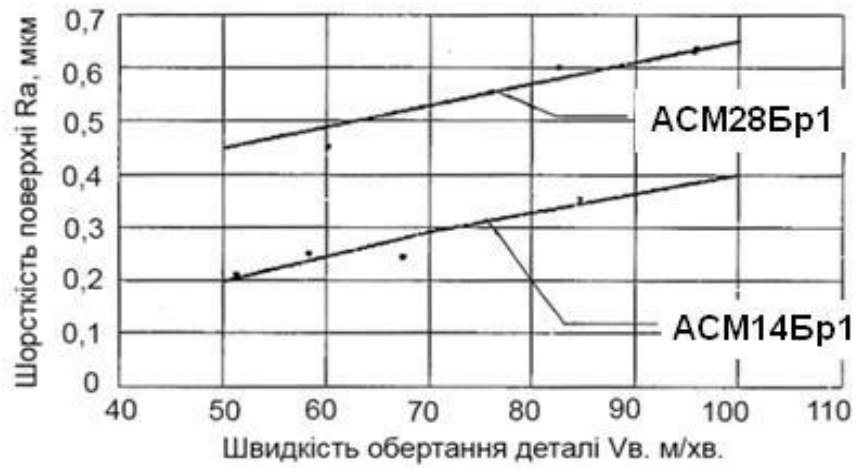


б

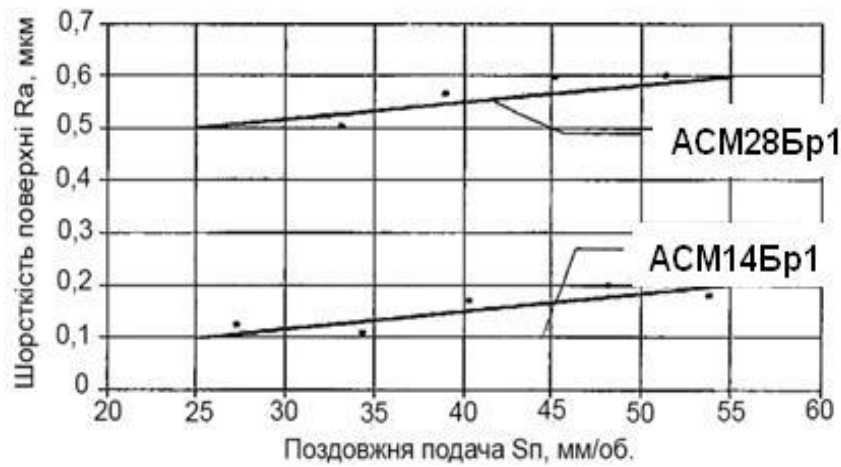


в

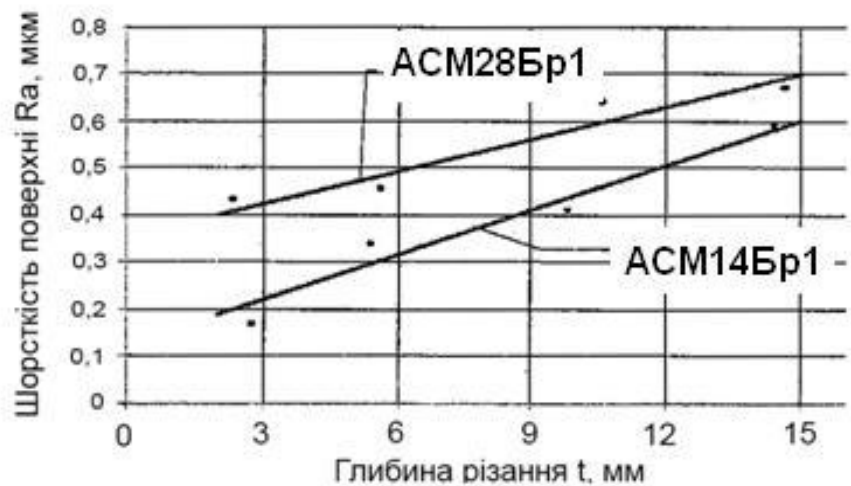
Рисунок 5.1. Залежність параметрів шорсткості поверхні R_a від режимів тонкого алмазного шліфування V_b , S_p , t при зовнішньому круглому шліфуванні (швидкість алмазного круга – $V_{кр} = 30$ м/с): а) $S = 5$ мм/об.; $t = 2$ мкм; б) $V_b = 30$ м/хв.; $t = 2$ мкм; в) $V_b = 30$ м/хв.; $S_p = 5$ м/об. Матеріал обробки – композит P6M5 +6%CaF₂



а



б



в

Рисунок 5.2. 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. Матеріал обробки – композит Р6М5 +6%CaF₂

Основні результати досліджень наведені на рис. 5.1, 5.2 при алмазному шліфуванні заготовки з композиту P6M5 +6%CaF₂.

Результати досліджень, що отримані при тонкому круглому внутрішньому алмазному шліфуванні робочих поверхонь композитних заготовок підшипників ковзання з нових антифрикційних композитів на основі відходів інструментальних сталей (рис. 5.2), є схожими до результатів із зовнішнього алмазного шліфування (рис. 5.1).

Аналіз рис. 5.2 показує, що при застосуванні для прецизійного внутрішнього алмазного шліфування заготовок деталей з нових композитів 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_{π} та швидкість обертання деталі V_b .

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, круглому 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:

- 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.

5.1.2. Силowe поле при тонкому алмазному шліфуванні поверхонь тертя заготовок композитних підшипників ковзання поліграфічної техніки

Вимоги до антифрикційних деталей тертя, які працюють в умовах інтенсивного зношування у вузлах високообертової поліграфічної техніки, 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 матеріалу у зоні зрізання стружки поодиноким абразивним зерном).

Означені параметри 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 антифрикційних деталей, які працюють у жорстких умовах експлуатації, лише нещодавно були створені і рекомендовані для застосовування [1, 3, 25, 31, 32, 39–60, 218, 219].

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.

Тому дослідження параметрів силового поля (складових сил різання) при тонкому алмазному шліфуванні нових композиційних матеріалів на основі цінної вторинної сировини – шліфувальних відходів сталей є востребуваним завданням, що має як наукове, так і практичне значення, чому автори монографії приділили велику увагу.

Узагальнені для всіх досліджених композитів (розділ 2, табл. 2.1) результати представлено нижче для алмазного шліфування композитів на основі сталей Р6М5, 2Х6В8М2К7 та 11РЗАМ3Ф2.

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 Р6М5, 2Х6В8М2К7 та 11РЗАМ3Ф2 з домішками твердого мастила CaF_2 , та встановлено вплив зернистості шліфувального круга, типу зв'язки круга і режимів різання на параметри силового поля.

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 [1, 3, 31, 32, 35–37, 76, 82].

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 [31, 32, 35–37, 76, 82, 85, 86].

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 [35–37, 74–82, 85, 86].

У зв'язку з тим, що алмазні зерна шліфувального круга перебувають 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'_m) може бути розрахована за формулою:

$$m = F'_m = L_K \cdot B / L_\phi^2 \quad (5.5)$$

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 [1, 3, 76, 82]. Формула (5.5) є достатньо простою для розрахунку числа різальних зерен m на площі контакту круга з заготовкою (виробом).

З урахуванням цього були виконані всебічні дослідження. Значення питомих (віднесених до 10 мм ширини круга) тангенціальної та нормальної складових зусиль різання наведені у табл. 5.5 – 5.7.

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_n 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 композиту на основі відходів сталі Р6М5) та 1,13–1,33 (для композиту на

основі відходів сталі 2Х6В8М2К7), 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 іншою абразивною обробкою. Крім того, зі збільшенням у складі композитів кількості 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 .

Вірогідно, 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 карбіду кремнію зеленого.

Зазначені закономірності зберігаються для алмазних кругів на різних зв'язках (еластична бакелітно-гумова Бр1 чи жорстка металева М1). Це свідчить про об'єктивну єдність отриманих залежностей і, більше того, повністю співпадає з загальними положеннями теорії шліфування [74–82].

Таблиця 5.5. Питомі сили різання при плоскому алмазному шліфуванні композиту Р6М5+6%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 5.6. Питомі сили різання при плоскому алмазному шліфуванні композиту 11РЗАМЗФ2+6%CaF₂

Глибина шліфування по лімбу верстату $t_{\text{л}}$, 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 5.7 Питомі сили різання при плоскому алмазному шліфуванні сплаву 2Х6В8М2К7+6%CaF₂

Глибина шліфування по лімбу верстату $t_{\text{л}}$, 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. 5.5–5.8). 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 (5.5).

З урахуванням цього з експериментальних даних (табл. 5.8, 5.9) 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.

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

Таблиця 5.8. Розрахункове навантаження на окреме різальне зерно круга при алмазному шліфуванні зразків з композиційного сплаву P6M5+6%CaF₂

Глибина шліфування по лімбу верстату $t_{\text{л}}$, мм	Довжина дуги контакту $L_{\text{к}}$, мм	Характеристика круга					
		АСМ14Бр1 100%			АСМ14М1 100%		
		m	$P_{\text{з3}}$, Н	$P_{\text{уз}}$, Н	M	$P_{\text{з3}}$, Н	$P_{\text{уз}}$, 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; поздовжня подача – 0,1 мм/подв. хід; В – 10 мм; охолодження – 3% розчин содової емульсії.

Таблиця 5.9. Розрахункове навантаження на окреме різальне зерно круга при алмазному шліфуванні зразків з композиту 11РЗАМЗФ2+6%CaF₂

Глибина шліфування по лімбу верстату $t_{\text{л}}$, мм	Довжина дуги контакту $L_{\text{к}}$, мм	Характеристика круга					
		400×32×16 мм			200×32×16 мм		
		АС25Бр1 100%			АСМ14Бр1 100%		
		m	$P_{\text{з3}}$, Н	$P_{\text{уз}}$, Н	m	$P_{\text{з3}}$, Н	$P_{\text{уз}}$, 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; поздовжня подача – 0,1 мм/подв. хід; В – 10 мм; охолодження – 3% розчин содової емульсії.

При шліфуванні дрібнозернистими кругами значення $P_{\text{з3}}$ та $P_{\text{уз}}$ приблизно у 100–150 разів менші, ніж при шліфуванні крупнозернистими кругами (табл. 5.9). 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 при використанні дрібнозернистих абразивних інструментів.

Узагальнюючи отримані авторами монографії дані, можна 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) забезпечує 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) забезпечується використанням 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.

5.1.3. Миттєві контактні температури при тонкому алмазному шліфуванні заготовок 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 тертя високошвидкісної друкарської техніки функціонують швидкостейобертання > 500 об./хв., коли на контактних поверхнях температура може підвищуватись до 400°C , тисках $>5,0$ МПа, за умов дії агресивного середовища – повітря.

Для таких потреб авторами монографії були розроблені спеціальні матеріали, які вперше синтезовані на базі відновлених шліфувальних відходів інструментального виробництва [1, 2, 25, 39–60, 218, 219].

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 [1, 3, 82, 96, 110, 114, 115, 142, 167].

На жаль, досліджень температурних факторів тонкого алмазного шліфування досі не існує. Це є причиною того, що відсутня реальна можливість оптимізувати технологічні процеси тонкого алмазного шліфування поверхонь тертя деталей з нових композиційних сплавів.

Адже відомо [1, 3, 31, 32, 76, 82], 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 вищенаведеного авторами монографії були виконані серії всебічних досліджень температурного поля у зоні тонкого алмазного шліфування заготовок з 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 завданнями досліджень було:

- Визначити закономірності утворення контактних температур при тонкому алмазному шліфуванні нових композитів, синтезованих на основі утилізованих та регенерованих шліфувальних відходів інструментальних сталей, зокрема, на прикладі використання композитів з шліф-відходів сталей Р6М5, 2Х6В8М2К7 та 11РЗАМЗФ2 з домішками твердого мастила CaF_2 .
- Встановити, які параметри структури алмазного шліфувального круга (марка алмазу, зернистість, тип зв'язки інструменту) суттєво впливають на температурне поле при тонкому алмазному шліфуванні нових композитів.
- Сформулювати рекомендації з вибору типу алмазного шліфувального круга та його структури для оброблення поверхонь деталей тертя, виготовлених з нових високолегованих та важкооброблюваних композиційних сплавів.
- 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 [1, 3, 35–37, 76, 82, 92].

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 композитів, хімічний склад яких представлено у розділі 2 монографії ч.2.

Нижче наведено результати досліджень по алмазному шліфуванню композитів $\text{P6M5}+6\%\text{CaF}_2$, $2\text{X6B8M2K7}+6\%\text{CaF}_2$ та $11\text{P3AM3F2}+6\%\text{CaF}_2$.

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 карбіда кремнію зеленого (63С), електрокорунду білого (23А) та монокорунду (М) [76, 82, 85, 86], для всіх дослідів використовувались лише шліфувальні круги з синтетичного алмазу (АС). У табл. 5.10–5.12 наведені результати дослідження температурного поля (миттєвих контактних температур) при алмазному шліфуванні різних за властивостями композиційних сплавів.

Таблиця 5.10. Миттєві контактні температури (Т, °С) при шліфуванні зразків композиту Р6М5+6%CaF₂

Глибина шліфування по лімбу верстата t _л , мм	Характеристика шліфувального круга		
	АСМ14Бр1 100%	АСМ14М1 100%	АС5Бр1 100%
	Т, °С		
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_к – 25 м/с; швидкість виробу V_в – 2 м/хв.; охолодження – 3% розчин содової емульсії.

Таблиця 5.11. Миттєві контактні температури (Т, °С) при шліфуванні зразків з матеріалу 2Х6В8М2К7+6%CaF₂

Глибина шліфування по лімбу верстата t _л , мм	Характеристика шліфувального круга		
	АСМ14Бр1 100%	АСМ14М1 100%	АС5Бр1 100%
	Т, °С		
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_к – 25 м/с; швидкість виробу V_в – 2 м/хв.; охолодження – 3% розчин содової емульсії.

Таблиця 5.12. Миттєві контактні температури (T , °C) при шліфуванні зразків з матеріалу 11P3AM3Ф2+6%CaF₂

Глибина шліфування по лімбі верстата $t_{\text{л}}$, мм	Характеристика шліфувального круга		
	АСМ14Бр1 100%	АСМ14М1 100%	АС5Бр1 100%
	T , °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_k – 25 м/с; швидкість виробу V_v – 2 м/хв.; охолодження – 3% розчин содової емульсії.

Аналіз табл. 5.10–5.12 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 до 0,005 мм обумовлює виникнення в зоні оброблення мінімальних температур. 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 визначення впливу зернистості алмазного круга на миттєві контактні температури у зоні різання. Результати цього дослідження наведені у табл. 5.13.

Таблиця 5.13. Вплив розміру зерна А при тонкому плоскому шліфуванні зразків з нових композитів на основі відходів інструментальних сталей на миттєві контактні температури (Т, °С)

Розмір зерна А алмазного інструменту, мкм	Матеріал зразків		
	P6M5+6%CaF ₂	2X6B8M2K7 +6%CaF ₂	11P3AM3Φ2+6%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. 5.13 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 заготовок з нових композитів (розділ 2, табл. 2.1), синтезованих на основі утилізованих та регенованих шліфувальних відходів інструментальних сталей, 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 круга $V_{кр} = 25$ м/с, швидкість виробу $V_v = 2$ м/хв., глибина різання $t = 2 \div 5$ мкм, охолодження – 3 % розчин содової емульсії.

5.1.4. Параметри наклепу поверхневого шару втулок композитних підшипників ковзання при тонкому алмазному шліфуванні

Відомості про технологічні засади виготовлення та прецизійної механічної обробки нових композитних підшипників детально наведені у роботах [1, 3, 35–37, 76, 82, 133–136, 162, 172, 181, 183, 187–191]. Цими дослідженнями було доведено, що на строки служби антифрикційних деталей 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. У зв'язку з цим авторами монографії 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 нових композитів з відходів.

Завданнями таких досліджень було встановлення науково-обґрунтованих режимів тонкого алмазного шліфування робочих поверхонь антифрикційних композитних втулок підшипників ковзання з нових композиційних сплавів, синтезованих на основі утилізованих та регенерованих шліфувальних відходів інструментальних сталей (розділ 2, табл. 2.1). Ці режими різання мають забезпечити відповідні параметри якості шліфованих поверхонь та сприяти формуванню необхідного рівня експлуатаційних властивостей вузлів тертя високообертового друкарського обладнання.

Вивчення фізичних властивостей поверхневого шару відбувалось згідно методик, наведених у роботах [1, 3, 35–37, 76, 82].

У нижче наведених результатах, як приклад, представлено дані з експериментів, що виконані на зразках з нових композитних матеріалів Р6М5+6%CaF₂, 2Х6В8М2К7+6%CaF₂ та 11РЗАМ3Ф2+6%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 [1, 3, 35–37, 76, 82, 133–136, 162, 172, 181, 183, 187–191].

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 спричинюють 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 роботах [1, 3, 35–37] 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 оброблюваної поверхні від сил різання.

Отже, технологічні дослідження впливу режимів різання при тонкому алмазному шліфуванні на фізичні властивості поверхневого шару заготовок з нових композитів є надзвичайно важливими, 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 антифрикційних композитних деталей та значно підвищить строк служби вузла та високошвидкісної друкарської машини у цілому.

Результати експериментальних досліджень параметрів зміцнення поверхневого шару при тонкому алмазному шліфуванні зразків з нових підшипникових матеріалів наведені у табл. 5.14 – 5.18.

З табл. 5.14–5.18 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.

Таблиця 5.14. Залежність наклепу від матеріалу зв'язки круга при алмазному шліфуванні зразків із сплаву P6M5+6%CaF₂

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
АС5М14Бр1 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: 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 5.15. Залежність наклепу від матеріалу алмазного зерна при шліфуванні зразків зі сплаву Р6М5+6%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 5.16. Залежність наклепу від матеріалу зерен при алмазному шліфуванні зразків зі сплаву Р6М5+6%СаF₂ дрібнозернистими кругами

Абразивний інструмент	Параметри наклепу			Охолодження при обробці
	$\Delta a/a \cdot 10^{-4}$	Hз, МПа	K	
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. Hд – мікротвердість деталі за Вікерсом; 3. K – ступінь наклепу (H_d/H_z); 4. Показники наклепу зразків без обробки: $\Delta a/a \cdot 10^{-4}=0$, $H_z = 3600$ МПа; 5. Шліфувальні круги з алмазу синтетичного (АС) та алмазу природного (А) на бакелітно-гумовій (Бр1) зв'язках зі 100%-ю концентрацією алмазу. Для порівняння – круг 63С10Гл з карбіду кремнія зеленого (63С) на гліфталевій 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.

Це є характерним для всіх досліджуваних складів (розділ 2, табл. 2.1) антифрикційних самозмащувальних композитів, 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 різання 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 бакелітно-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 [1, 3, 35–37, 76, 82].

Таблиця 5.17. Залежність ступеню наклепу К від зернистості при алмазному шліфуванні зразків з досліджуваних композитів на основі відходів інструментальних сталей

Абразивний інструмент	Зернистість, мм	Матеріал		
		P6M5+6%CaF ₂	2X6B8M2K7+6%CaF ₂	11P3AM3Φ2+6%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, круги з синтетичних алмазів (АС) на еластичній бакелітно-гумовій зв'язці (Бр1)

Таблиця 5.18. Параметри наклепу на різних рівнях наклепаної зони при алмазному шліфуванні зразків з композитного матеріалу 85X6НФТ+6%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 охолодженням А10Бр1 100%	21-22	1,19	20,5-21,5	1,18	20-21	1,17	19-20	1,13
З охолодженням 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 охолодженням 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 охолодженням АМ28Бр1 100%	16-17	1,06	15,5-16,5	1,05	15-16	1,04	12-14	1,01
З охолодженням АСМ20Бр1 100%	15-16,5	1,05	14,5-15,5	1,04	14-16	1,03	13-13,5	1,01
З охолодженням АСМ14Бр1 100%	12-14	1,03	11,5-13,5	1,02	11-13	1,01	10,-12,5	1,01

Примітки: 1. $\Delta a/a$ - спотворення II-го роду; 2. К - ступінь наклепу (H_d/H_3); H_d - мікротвердість деталі за Вікерсом; H_3 - мікротвердість зразка за Вікерсом 3. Показники наклепу зразка: $\Delta a/a \cdot 10^{-4}=0$, $H_3 = 3600$ МПа; 4. Шліфувальні круги: алмазний (АС) та алмаз природний (А) на бакелітно-гумовій (Бр1) зв'язці зі 100%-ю концентрацією алмазу; 5. 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.

При тонкому алмазному шліфуванні заготовок 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. 5.15), хоча така ж залежність існує і для випадку шліфування дрібнозернистими кругами (табл. 5.16).

Підсумовуючи 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 зразків нових антифрикційних композитних матеріалів на основі відновлених промислових шліфувальних відходів сталей.

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 поодинокі ріжуче зерно, що знаходиться у шарі оброблення і зрізає тонку стружку з перерізом a_z [1, 3, 35–37].

Аналіз даних табл. 5.17–5.18 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 процес 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 мікрооб'єм матеріалу, у зв'язку з чим зростає ступінь пластичної деформації.

Необхідно зазначити, що отримані висновки про закономірності утворення наклепу підтверджуються різними фізичними методами вимірювання (рентгеноструктурний та металографічний аналізи, мікродюрOMETрія).

Це свідчить про наявність внутрішнього зв'язку між різними параметрами наклепу та підтверджує достовірність результатів досліджень.

Завдання отримання кореляційних моделей зв'язку між різними досліджуваними параметрами не ставилось. Проте, слід звернути увагу на те, що у більшості випадків параметри наклепу менші при шліфуванні з охолодженням змащувально-охолоджуючою рідиною, ніж при різанні без охолодження. Це пояснюється більшим впливом миттєвих контактних температур при зрізанні стружки.

Втім питання застосування охолоджуючої рідини при тонкому шліфуванні нових композиційних сплавів [76, 82, 145] доцільно вирішувати у комплексному поєднанні з призначенням режимів різання, які мають забезпечити мінімальну шорсткість поверхні оброблення нових високошвидкісних композитних втулок, зокрема, для підшипників ковзання, що є важливим показником якості і суттєво впливає на параметри зношування при їх роботі, а, відтак, і довговічності відповідних вузлів багатьох ротаційних поліграфічних машин.

Аналіз табл. 5.18 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 заготовок з 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 антифрикційних композитних деталей для високообертових вузлів тертя друкарських машин і механізмів. Це дозволяє оптимізувати режими різання, створювати реальні технологічні процеси для виробництва.

Висновки до розділу 5

Отже, узагальнюючи комплекс наведених даних, авторами монографії отримані наступні важливі для інженерної практики висновки:

1. Вперше досліджено процеси тонкого алмазного шліфування заготовок з принципово нових композитів, синтезованих на основі утилізованих та регенерованих шліфувальних відходів складнолегованих інструментальних сталей, що відкриває можливості одержання високоякісних деталей з принципово нових антифрикційних композитів для високообертових поліграфічних машин.
2. Показано, що основні закономірності тонкого прецизійного алмазного шліфування нових композиційних матеріалів співпадають при плоскому, круглому зовнішньому та внутрішньому шліфуванні.
3. Встановлено, що на параметр якості поверхні оброблення R_a суттєво впливають зернистість, матеріал зв'язки алмазного круга та режими тонкого алмазного шліфування.
4. Показано, що на параметри наклепу поверхневого шару суттєво впливають матеріал зерна алмазу (природний чи синтетичний), зернистість

шліфувального круга та тип зв'язки алмазного інструменту, а також такий технологічний фактор, як застосування для оброблення змащувально-охолоджуючої рідини.

5. 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 забезпечуються інструментами з природного (А) та синтетичного (АС) алмазу зернистістю 14–20 мкм на бакелітно-гумовій зв'язці (Бр1) при 100%-ій концентрації алмазу.

6. Для забезпечення необхідних умов якості поверхневого шару (параметри наклепу, шорсткість поверхні оброблення) тонке алмазне шліфування заготовок 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.

7. Сформульовані вимоги до якості поверхонь антифрикційних деталей вузлів високооберткових друкарських машин, забезпечення яких гарантує отримання високих параметрів надійності, зносостійкості, довговічності та ремонтоздатності.

РОЗДІЛ 6. ФІНІШНА МЕХАНІЧНА ОБРОБКА ЗНОСОСТІЙКИХ КОМПОЗИТНИХ ДЕТАЛЕЙ НА ОСНОВІ ШЛІФУВАЛЬНИХ ВІДХОДІВ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ДЛЯ ПОСТДРУКАРСЬКОГО ОБЛАДНАННЯ

Відомо [31 32, 36, 76, 82], 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.

У зв'язку з тим, що нові композиційні матеріали на основі відновлених шліфувальних відходів алюмінієвих сплавів (розділ 2, табл. 2.2) були

рекомендовані до використання у постдрукарській техніці відносно нещодавно, розгалужених та всебічних досліджень процесів їх тонкого абразивного оброблення до цього часу вельми замало.

Зроблено лише перші кроки у цьому напрямку, зокрема, є окремі публікації, присвячені дослідженню впливу складу інструменту та режимів різання на параметри шорсткості поверхонь при тонкому абразивному шліфуванні [31, 32] антифрикційних композитів, що синтезовані на основі регенованих шліфувальних відходів чорних і кольорових сплавів, зокрема, на основі відходів низки промислових алюмінієвих сплавів, таких як АК12М2МгН, АМ4,5Кд, АД35 та АК12ММгН + (9–12)% MoS_2 (розділ 2 монографії ч.2, табл. 2.2).

Виходячи із загальних положень теорії абразивного оброблення матеріалів [36, 75, 76, 82, 83, 85, 86] та враховуючи специфічні властивості композиційних матеріалів на основі алюмінію [64–69], доцільною є обробка високоточних плоских поверхонь деталей тертя з композитів з відходів алюмінієвої сировини із застосуванням технології прецизійної машинної доводки плоских поверхонь, а також тонкого ельборового шліфування для циліндричних деталей.

Таке оброблення гарантує отримання високих вимог до поверхонь тертя композитних деталей, які є засадничими для забезпечення високих параметрів надійності пар тертя (зносостійкості, довговічності, ремонтоздатності та коефіцієнта готовності).

Наприклад, для прецизійних деталей - направляючих поліграфічних паперорізальних машин, ці вимоги складають – параметр шорсткості поверхні оброблення R_a повинен перебувати у межах 0,020 мкм – 0,040 мкм, неплосинність 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 сьогодні повністю відсутні відомості про дослідження технологічних процесів тонкого ельборового шліфування та прецизійної машинної доводки деталей з композитів на основі алюмінію.

Це пояснюється тим, що ці композитні матеріали лише нещодавно були розроблені і апробовані [64–69]. Тому всебічних технологічних досліджень по забезпеченню якості поверхонь деталей та оптимізації режимів оброблення не проводилось.

Є лише перші спроби з дослідження параметрів шорсткості поверхонь деталей з алюмінієвих композиційних матеріалів при тонкому абразивному ельборовому шліфуванні плоских поверхонь, поверхонь отворів та зовнішніх циліндричних поверхонь деталей обертання та розробці оптимальних режимів різання, вибору структури і складу шліфувальних інструментів [31, 32, 65–67].

В науково-технічній літературі є багато публікацій по машинній доводці плоских прецизійних поверхонь деталей з важкооброблюваних матеріалів для систем різного призначення [31, 32, 36, 75, 76, 82, 119]. 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 антифрикційних композитів на основі шліфвідходів алюмінієвих сплавів 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 тонкого ельборового шліфування та прецизійної машинної доводки плоских поверхонь деталей тертя з нових зносостійких композиційних матеріалів на основі промислових шліфувальних відходів алюмінієвих сплавів є актуальним питанням, що має як наукове, так і практичне значення для технологів-виробничників.

Цьому присвячені результати досліджень авторів монографії ч. 2, що буде викладено нижче.

6.1. Тонке ельборове шліфування зносостійких деталей з композитів на основі алюмінію

Експериментальні дослідження виконувались згідно з методикою, наведеною у розділі 2 монографії. Їх результати наведені у табл. 6.1.

Аналіз даних табл. 6.1 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_b , 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.

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

Таблиця 6.1. Параметр шорсткості R_a при тонкому плоскому шліфуванні композитної деталі з шліфувальних відходів сплаву АК12ММГН

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	0,280	0,350	0,390
	5	0,330	0,360	0,410
	10	0,345	0,405	0,460
0,2	2	0,380	0,420	0,470
	5	0,410	0,450	0,560
	10	0,425	0,480	0,595
0,5	2	0,500	0,510	0,620
	5	0,560	0,580	0,690
	10	0,630	0,640	0,720
1,0	2	0,690	0,720	0,790
	5	0,750	0,795	0,845
	10	0,810	0,855	0,910

Примітки: Верстат – FF-350 “Abawerk” (ФРН), абразив – ельбор ЛОМ14Бр1 100% на бакелітно-гумовій зв’язці БР1, швидкість круга – 2 м/с, обробка без охолодження.

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 $S_{\text{поп}} - t$, $t - V_B$, $S_{\text{поп}} - V_B$ 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 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 виробу V_B .

Рівняння множинної кореляції для досліджуваних факторів має вигляд:

$$R_a = 0,264S_{\text{поп}} + 5,3t + 0,0059V_B - 0,0447 \quad (6.1)$$

Аналіз формули (6.1) показує, що на параметр шорсткості R_a чинять найбільший вплив глибина шліфування t та поперечна подача S_{π} , 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 $V_b = 2,0 - 4,0$ 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 $V_b = 5,0 - 15,0$ м/хв.

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

I – а група:

$$R_a = 0,2655S_{\pi} + 5,3t + 0,0059V_b - 0,0071 \quad (6.2)$$

II – а група:

$$R_a = 0,2552S_{\pi} + 5,3t + 0,0059V_b - 0,0566 \quad (6.3)$$

Розраховані за формулами (6.2) і (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_b 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 ельборовому шліфуванні кружками різної зернистості M50, M28, M14, M7. Відповідні експериментальні дані наведені у табл. 6.2 [64–69, 85, 86].

Таблиця 6.2. Вплив зернистості інструменту на параметр шорсткості поверхні R_a при тонкому плоскому ельборовому шліфувальні деталей з композиту АК12ММГН [31, 32]

Характеристика ельборового інструменту	R_a , мкм
ЛО10Бр1 100%	0,937
ЛО5Бр1 100%	0,903
ЛОМ28Бр1 100%	0,275
ЛОМ20 Бр1 100%	0,231
ЛОМ14 Бр1 100%	0,217
ЛОМ10 Бр1 100%	0,205
ЛОМ7 Бр1 100%	0,185
63СМ14Гл	0,673
63СМ7Гл	0,367

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.

Аналіз даних табл. 6.2 дозволяє зробити суттєві практичні висновки: найменшу шорсткість поверхні у досліджуваному діапазоні зернистості інструменту (7–100 мкм) забезпечують ельборові круги з зернистістю 7 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 також пояснюється і тим, що зерна ельбору мають достатньо гостру форму (мінімальний кут загострення при вершині зерна) та найменший (у порівнянні з електрокорундовими та моно корундовими зернами) радіус округлення одиничного зерна (табл. 6.3) [31, 32, 76].

Таким чином, знаючи зернистість ельборового 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 виборі шліфувального інструменту під час проектування технологічних процесів.

Суттєвим питанням є і те, як впливає склад зв'язки ельборового круга на параметр шорсткості поверхні R_a , результати дослідження якого наведені у табл. 6.4 [31, 32, 64–69].

Таблиця 6.3. Середні значення геометрії кута ріжучих зерен у різних абразивних матеріалів [31, 32, 76]

Абразивний матеріал	Зернистість, мкм	Геометрія вершини зерна	
		Радіус заокруглення ρ , мкм	Кут при вершині, град
Алмази синтетичні	АС10/8	2,2	57,4
	АС6/5	1,1	52,2
	АСМ14/10	0,7 – 0,8	49,5
Ельбор звичайної міцності (ЛО)	ЛО10/8	2,25	58
	ЛО6/5	1,15	53
	ЛОМ14/10	0,8 – 0,85	50,1
Ельбор підвищеної міцності (ЛП)	ЛП10/8	2,22	58,4
	ЛП6/5	1,17	53,7
	ЛПМ14	0,81 – 0,86	51,2
	ЛПМ10	0,80 – 0,83	50,0
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 ельборового інструменту, що має вигляд:

$$R_a = 0,0056S_n - 0,0073 \quad (6.4)$$

Таблиця 6.4. Вплив матеріалу зв'язки ельборового круга на параметр шорсткості обробленої поверхні R_a зразків з композитів на основі алюмінію АК12ММгН при плоскому шліфуванні [31, 32, 64–69]

Характеристика абразивного інструменту	Матеріал зв'язки круга	Параметр шорсткості R_a , мкм
ЛО5Б1 100 %	Бакелітна Б1	0,967
ЛО5Бр 100 %	Бакелітно-гумова Б1	0,903
ЛО5К1 100 %	Керамічна К1	1,345
ЛО5М1 100 %	Металева М1	1,320
ЛОМ28Б1 100 %	Бакелітна Б1	0,306
ЛОМ28Бр1 100 %	Бакелітно-гумова Б1	0,275
ЛОМ28К1 100 %	Керамічна К1	0,591
ЛОМ14Б1 100 %	Бакелітна	0,236
ЛОМ14Бр1 100 %	Бакелітно-гумова Бр1	0,217
ЛОМ14К1 100 %	Керамічна	0,247
ЛОМ10Бр1 100 %	Бакелітно-гумова Бр1	0,205
ЛОМ7Бр1 100 %	Бакелітно-гумова Бр1	0,185

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

Попередньо доцільно зауважити, що ельбори марки ЛО більш ефективні (з точки зору забезпечення параметру шорсткості R_a та продуктивності шліфування) при обробці пластичних матеріалів (алюміній, мідь, латунь), хоча ельбори типу ЛП (підвищеної міцності), маючи більшу гостроту зерен (табл. 6.3), кращі при шліфуванні твердих та крихких матеріалів [31, 32, 76, 85, 86]. Тому у всіх подальших експериментах по дослідженню процесів тонкого ельборового шліфування композитів на основі алюмінію застосовувались інструменти на базі ельбору звичайної міцності ЛО.

Зазначимо, що основні експерименти проводились на зразках композитів типу АК12ММгН і дещо обмежена кількість дослідів виконувалась на зразках композитів інших марок, для встановлення загальних закономірностей.

Аналізуючи дані табл. 6.4, необхідно зазначити, що найкращі значення параметрів шорсткості R_a поверхонь оброблення деталей з нових композитних сплавів на основі алюмінію забезпечують ельборові 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 ельборового 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 ельборового 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 ельборового шліфування деталей тертя з композитних

матеріалів на основі алюмінію виконувалось з урахуванням вищенаведених результатів. Зокрема, для дослідів використовувались ельборові інструменти з ельбору ЛО зернистістю 14 – 28 мкм, які сформовані у шліфувальні круги бакелітно-гумовою зв'язкою (Бр1).

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

Основні результати досліджень наведені на рис. 6.1, 6.2.

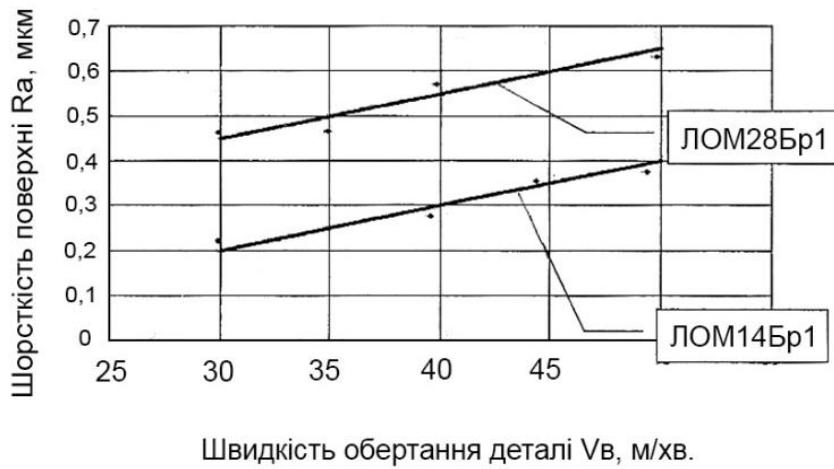
Аналіз експериментів (рис. 6.1) показує, що на шорсткість поверхонь деталей з нових композитних матеріалів на основі алюмінію при тонкому зовнішньому круглому ельборовому шліфуванні (як і при плоскому ельборовому шліфуванні) суттєво впливають режими різання: швидкість виробу V_b , поздовжня подача S_n та глибина різання t , а також розмір зерна абразиву, та склад зв'язки ельборового інструменту.

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

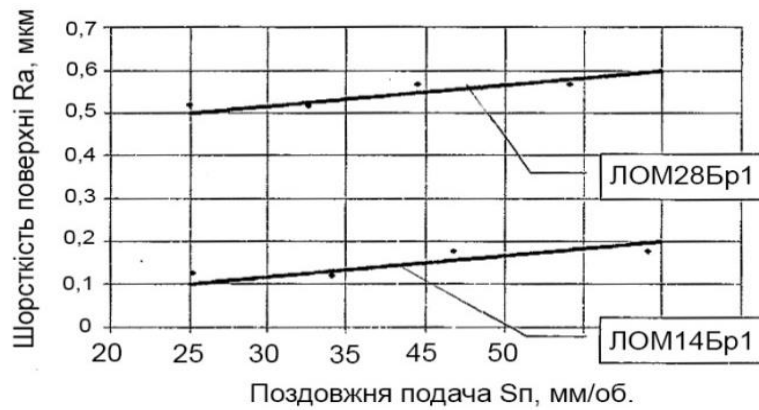
Схожі результати отримані при тонкому круглому внутрішньому ельборовому шліфуванні робочих поверхонь деталей тертя з нових композитів на основі шліф-відходів алюмінієвого сплаву з додаванням твердого мастила MoS_2 , що здатний працювати в режимі самозмащення - АК12ММгН + (9–12)% MoS_2 (рис. 6.2) [31, 32, 119].

Аналіз рис. 6.2 показує, що при застосуванні для прецизійного внутрішнього ельборового шліфування деталей з нових композиційних матеріалів на основі шліф-відходів алюмінієвих сплавів з використанням для оброблення ельборових кругів на основі ельбору ЛО зернистістю 14–28 мкм

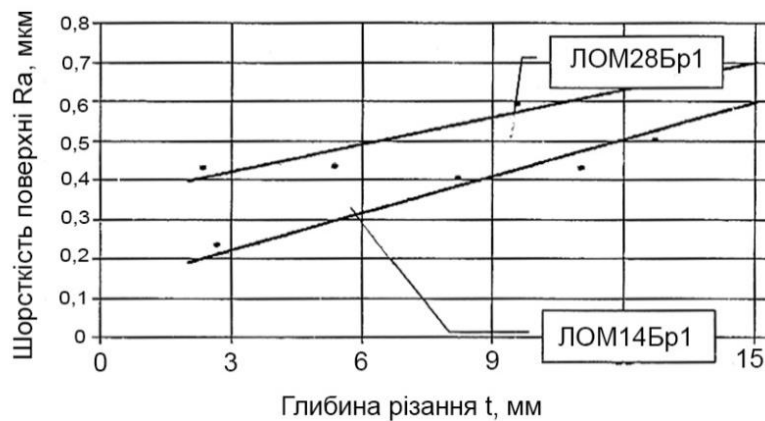
на бакелітно-гумовій зв'язці, на параметр шорсткості поверхні оброблення R_a найбільше впливають глибина різання t , поздовжня подача S_n та швидкість обертання деталі V_b .



а)



б)

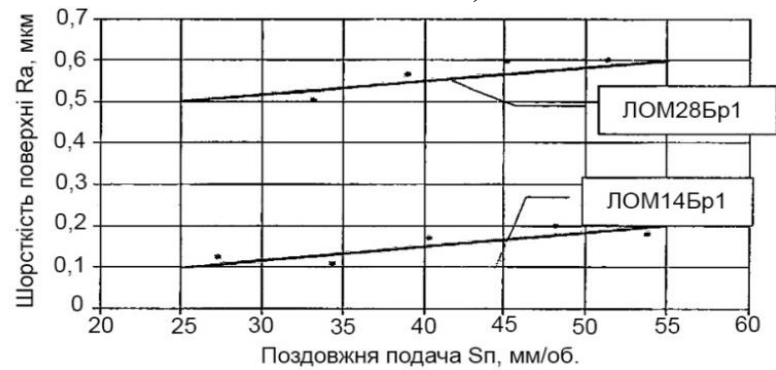


в)

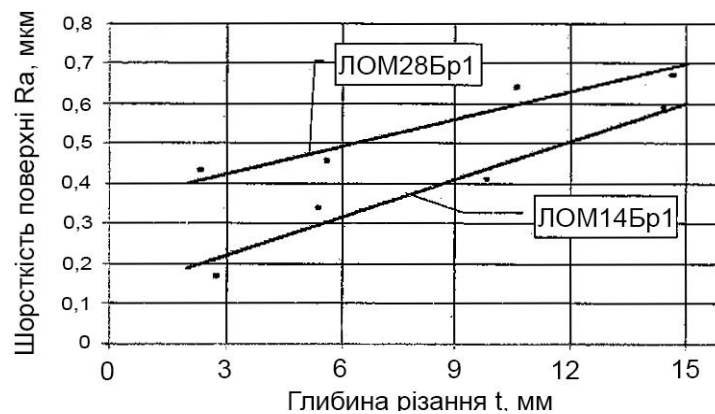
Рисунок 6.1. Залежність параметрів шорсткості поверхні R_a деталей з композиту АК12ММГН від режимів тонкого ельборового шліфування V_b , S_n , t при зовнішньому круглому шліфуванні (швидкість круга – $V_{кр} = 30$ м/с): а) $S = 5$ мм/об.; $t = 2$ мкм; б) $V_b = 30$ м/хв.; $t = 2$ мкм; в) $V_b = 30$ м/хв.; $S_n = 5$ м/об. [31, 32, 119]



а)



б)



в)

Рисунок 6.2. Залежність параметрів шорсткості поверхні R_a деталей з композиту АК12ММгН + (9–12)% MoS₂ від режимів тонкого ельборового шліфування V_b , S_p , t при тонкому круглому внутрішньому шліфуванні (швидкість ельборового 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. [31, 32, 119].

Найкращі результати за параметром якості R_a (тобто отримання мінімальної шорсткості поверхні) забезпечують тонкі режими ельборового шліфування, а саме, мінімально можливі (з точки зору технічних можливостей верстата) режими різання – глибина шліфування, поздовжня подача та швидкість обертання деталі [31, 32, 119].

6.2. Прецизійна машинна доводка плоских поверхонь деталей тертя з композитів на основі відходів алюмінію

Для отримання найкращої шорсткості поверхонь деталей тертя друкарської техніки доцільним є застосування спеціальних технологічних методів їх надтонкого абразивного оброблення. Серед них набули широкого розповсюдження прецизійна доводка плоских поверхонь на дисках-притирах, суперфінішування, хонінгування та магнітно-абразивне оброблення (МАО) ферокерамічними абразивними мікропорошками у магнітному полі.

Для елементів конструкції новітнього обладнання поліграфічної галузі, особливо постдрукарської техніки, що працює у помірних режимах навантаження, були рекомендовані до застосування нові 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 в останні роки були створені оригінальні високозносостійкі композити на основі алюмінієвих сплавів АК12М2МгН, АМ4,5Кд, АД35 та АК12ММгН + (9–12)% MoS_2 [64–69]. Вони пройшли перевірку в умовах дії агресивного оточуючого середовища (кисень повітря, виробничий пил з абразивною властивістю, температурні навантаження при експлуатації у межах 110 – 170 °С, питомі навантаження до 7 МПа, швидкості ковзання до 4,0 м/с) і були рекомендовані для виготовлення деталей тертя (скоби, направляючі, плоскі вкладні «пальців» захоплювачів автооператорів, підтримувачі конвеєрних систем) у ножових різальних машинах поліграфії типу WHOLENBERGTrim-tec 560, у висікальному обладнанні паперу та картону DROSSERT ST-6, BOBSMISTRAL 110 A2 тощо.

Основні властивості нових зносостійких композитів на основі відходів алюмінію наведені у розділі 3 монографії ч.2.

Відомо [31, 32, 36, 76], 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.

Виходячи із загальних положень теорії абразивного оброблення матеріалів [31, 32, 75, 76, 82, 83] та враховуючи специфічні властивості композиційних матеріалів на основі алюмінію [64–69], безумовно доцільним є обробка високоточних плоских поверхонь деталей тертя з композитів на основі відходів алюмінієвої сировини за схемою – «тонке плоске ельборове 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, ремонтоздатності 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, неплщинність 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 антифрикційних композитів на основі шліф-відходів алюмінієвих сплавів.

Це пояснюється тим, що ці згадані композитні матеріали лише нещодавно були рекомендовані для промисловості [229–231]. Тому всебічних технологічних досліджень по забезпеченню якості поверхонь деталей та оптимізації режимів оброблення не проводилось.

В науково-технічній літературі є багато публікацій по машинній доводці плоских прецизійних поверхонь деталей з важкооброблюваних матеріалів для систем різного призначення [31, 32, 36, 75, 76]. 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 алюмінію 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 шліф-відходів сплавів алюмінію є актуальним питанням, що має безсумнівне як наукове, так і, що не менш важливо, практичне значення для технологів-виробничників.

Метою даного підрозділу монографії було дослідження параметрів якості поверхонь при прецизійній машинній доводці деталей тертя з нових композиційних матеріалів на основі регенованих шліф-відходів промислових алюмінієвих сплавів АК12М2МгН, АМ4,5Кд, АД35 та композиту з твердим мастилом АК12ММгН+(9–12)%MoS₂, та встановлення впливу матеріалу абразивного мікропорошку та його зернистості, а також основних режимів різання на якісні показники поверхонь оброблення досліджуваних деталей тертя (точність, шорсткість, параметри наклепу).

Експериментальні дослідження з означеної науково-технічної задачі виконувались згідно з методикою викладеною у роботах [31, 32, 229–231].

Слід зауважити, що для прецизійної механічної обробки плоских поверхонь деталей використовувались верстати С-15, які широко

розповсюдженні при виготовленні точних деталей для різних галузей промисловості.

Вибір цих верстатів обумовлювався їх розгалуженими кінематичними можливостями, які здатні забезпечити надскладну траєкторію взаємного переміщення вздовж поверхні доводочного інструменту абразивних зерен та деталей оброблення, в результаті чого досягається мінімальна шорсткість поверхні оброблення і найбільш можлива геометрична точність (мінімальне відхилення від площинності). Схема доводки може бути пояснена за допомогою рис. 6.3.

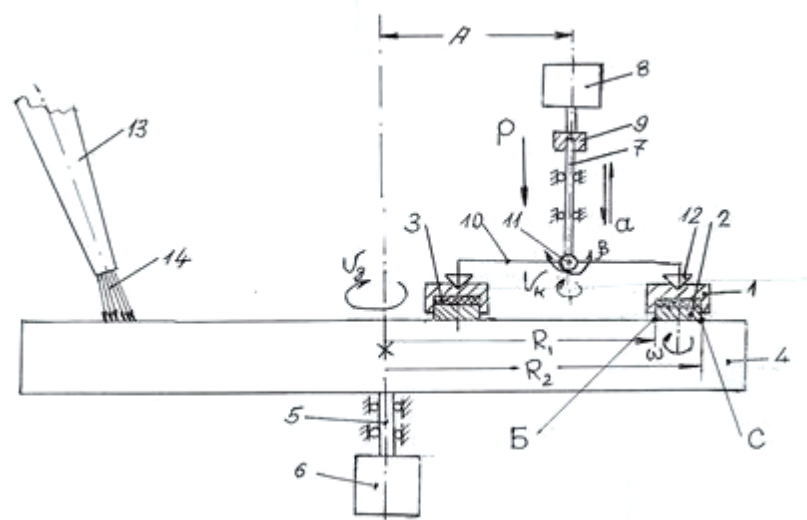


Рисунок 6.3. Схема прецизійної машинної доводки плоских поверхонь деталей з композитів на основі відходів алюмінієвих сплавів

Опис рис. 6.3: 1 – пристрій для встановлення деталей на доводочному верстаті; 2 – деталь оброблення; 3 – еластична прокладка пристрою; 4 – диск для доводки; 5 – шпиндель обертання доводочного диску; 6 – редуктор та електропривід для обертання диску; 7 – шпиндель обертання колісного водила; 8 – редуктор та електропривід водила; 9 – вага для створення притискування деталей оброблення до поверхні диску; 10 – водило колісно-шарнірного типу; 11 – шарнір; 12 – центр для фіксації пристрою з деталлю при доводці; 13 – сопло; 14 – суміш мастильно-охолоджуючої рідини та абразивного мікропорошку.

A – ексцентриситет між шпинделями обертання доводочного диска і шарнірно-колісного водила; P – питомий тиск оброблення; R_1 – радіус точки Б деталі оброблення; R_2 – зовнішній радіус точки С деталі; V_d – швидкість обертання диска; V_k – швидкість обертання водила; ω – швидкість обертання деталі навколо центру фіксації в пристрої; α – поздовжні коливання шпинделя водила при обробці; β – швидкість плинних коливань куліси-водила.

Прецизійна машинна доводка відбувається наступним чином.

Доводочний диск 4 з чавуну, міді чи олова (в залежності від характеристик матеріалу деталі оброблення) жорстко кріплять на вертикально розташованому шпинделі 5, який за допомогою редуктора та електропривода 6 може обертатись у горизонтальній площині. Диск 4 обертається разом зі шпинделем 5 навколо своєї вісі зі швидкістю V_d . Паралельно осі шпинделя диска 4 у конструкції верстату передбачено розташування осі шпинделя 7 кулісного водила 10, що з'єднується зі шпинделем 7 за допомогою шарніру 11. На кінцях куліси-водила 10 закріплюють конусні центри 12 для фіксації пристроїв 1.

У пристроях 1 встановлюють деталі 2, плоска поверхня яких повинна бути оброблена з відповідною точністю та параметрами якості (параметр R_a , ступінь наклепу K , глибина залягання наклепу h , рівень та знак залишкових напружень поверхневого шару). Для цього деталі встановлюють у гнізда пристрою 1 таким чином, щоб поверхня оброблення міцно притискалась до робочої поверхні доводочного диска 4. Силу притискання регулюють за допомогою мірних вагів 9, які забезпечують притискання деталей до поверхні доводочного диска з необхідним питомим тиском P . Для компенсації похибок у розмірах висоти оброблення деталей між деталлю 2 та пристроєм 1 у лунки для фіксації деталей закладають еластичні прокладки 3 (наприклад, з поролону). Шпиндель 7 куліси-водила розташовано паралельно вісі шпинделя 5 диска 4 зі зміщенням на величину ексцентриситету A і з допомогою редуктора та електроприводу 8 обертається навколо своєї осі зі швидкістю V_k . При цьому відбуваються плинні коливання шпинделю разом з кулісою-

водилом 10 та пристроями 1 з деталями 2 вздовж осі шпинделя 7 зі швидкістю α . За допомогою цих коливань компенсуються деякі похибки поверхні доводочного диску 4. До речі, компенсації цих похибок під час обробки сприяє також коливання куліси-води́ла 10 навколо шарніру 11 зі швидкістю β . Крім того, в процесі машинної доводки швидкість обертання деталі 2 у точці С (внаслідок розташування її на зовнішньому радіусі диску R_2 диску 4) значно більша ніж у точці Б на меншому радіусі R_1 . Як результат, деталь 2 (під дією тертя при зрізанні з її поверхні стружок абразивними зернами, що безперервно через сопло 13 у складі суміші мастильно-охолоджуючої рідини з абразивними порошками 14) набуває обертання навколо центру 12 з певною швидкістю ω .

Таким чином, при одночасному включенні електроприводів 6, 8 диск 4 для доводки починає обертання із швидкістю V_d , а кулісне водило 10 шарнірного типу набуває обертів навколо осі шпинделя 7 зі швидкістю V_k . Внаслідок різниці обертових швидкостей на радіусах R_1 та R_2 починають обертатися навколо центрів 12 куліси-води́ла деталі 2, плоска поверхня яких повинна бути прецизійно оброблена.

Завдяки мірним вагам 9 деталі 2 міцно притискаються до ріжучої поверхні диску 4 з заданим питомим тиском P . Похибки форми диску 4 компенсуються завдяки шарніру 11 куліси 10 та еластичних прокладок 3.

Комбінація обертання диску 4 зі швидкістю V_d , води́ла-куліси 10 зі швидкістю V_k та деталей навколо центрів 12 зі швидкістю ω забезпечує отримання надскладної траєкторії дряпання абразивним зерном плоскої поверхні деталі і (у сполученні з параметрами абразивних зерен – матеріал зерна, зернистість) дозволяє отримати необхідні параметри точності, шорсткості та якості (фізичні властивості поверхневого шару) поверхонь оброблення.

У табл. 6.3 наведені експериментальні дані по дослідженню параметрів шорсткості R_a різних за складом антифрикційних композитів на основі відходів алюмінієвих сплавів при прецизійній доводці не шаржованим у диск-притир абразивним матеріалом.

Уважно проаналізувавши отримані результати, необхідно зробити деякі важливі для подальших досліджень висновки.

По-перше, в усьому достатньо широкому полі експериментів проглядається тенденція до покращення параметра шорсткості R_a при використанні у якості абразиву мікропорошків електрокорунду хромчастого (33A).

Це є характерним для усієї гами досліджених композитів на основі алюмінію, різних зернистостей мікропорошків у досить широкому їх діапазоні від 1 мкм до 7 мкм та принципово різних матеріалів притирів (чавун, мідь). Пояснення цьому явищу може бути надане з урахуванням фізичних властивостей безпосередньо електрокорунду хром частого: саме він схильний до подрібнення у процесі прецизійної машинної доводки і, таким чином, фактично у процесі різання металу на поверхні оброблення деталі утворюються більш дрібнозернисті частки абразиву, що зрізає тонкий шар стружки [229–231]. Це покращує умови оброблення (змінюються параметри перерізу стружки, теплові і силові характеристики поля на вершині ріжучої кромки абразивного зерна) і, відповідно, відбувається зменшення шорсткості поверхні оброблення.

По-друге, відзначається деяке (~9–10%) покращення параметру шорсткості R_a із застосуванням для доводки мідних дисків-притирів. Але продуктивність доводки при використанні чавунних дисків у 3 – 5 разів більша, що надає їм безумовну перевагу у порівнянні з мідними притирами, незважаючи на більш прийнятні показники по параметру R_a .

По-третє, прослідковується тенденція до покращення параметру шорсткості R_a поверхні оброблення при доводці з використанням у якості мастильно-охолоджуючої рідини суміші зі складом – гас (65%) + олеїнова кислота (35%).

Слід також зазначити, що найкращі результати прецизійної машинної доводки по параметру R_a отримані при обробці алюмінієвого композиту АК12ММгН + (9–12)%MoS₂. Найбільш ймовірним поясненням цього може

бути наявність у складі сплаву твердого мастила MoS_2 , а також більш високими фізико-механічними властивостями композиту.

Таблиця 6.5. Залежність параметрів шорсткості поверхні R_a при прецизійній машинній доводці

Матеріал притиру	Характеристика абразиву	Склад МОР	Матеріал зразків		
			AK12M2MГН	AM4,5КД	AK12MMГН + (9- 12)% MoS_2
Чавун	23AM7	Гас (65%) + олеїнова кислота 35%	0,091	0,079	0,071
	23AM5		0,080	0,071	0,060
	23AM3		0,072	0,063	0,051
	23AM3	Гас (50%) + олеїнова кислота (50)%	0,075	0,065	0,057
	23AM3	Гас (90%) + олеїнова кислота (10)%	0,077	0,067	0,061
	33AM3	Гас (65 %) + олеїнова кислота (35)%	0,037	0,033	0,026
	33AM1		0,031	0,029	0,022
	33AM1	Гас (50 %) + олеїнова кислота (50 %)	0,033	0,031	0,024
	37AM5	Гас (65 %) + олеїнова кислота (35%)	0,045	0,041	0,032
	37AM3		0,041	0,037	0,029
	37AM1		0,036	0,031	0,024
	43AM5		0,051	0,048	0,037
	43AM3		0,048	0,043	0,035
	43AM1		0,042	0,037	0,028
	23AM5		0,065	0,061	0,051
	33AM3		0,033	0,030	0,024
Мідь	33AM1		0,027	0,025	0,020
	43AM1		0,035	0,032	0,026

Примітка: швидкість різання $V = 7$ м/хв. питомий тиск $P = 0,05$ МПа.

Враховуючи вище означене, для подальших експериментальних досліджень використовувались чавунні притири, абразивні мікропорошки електрокорунду хром частого (33А) та мастильно-охолоджуюча рідина зі

складом гас (65%) + олеїнова кислота (35%), а більшість дослідів виконувались зі сплавом АК12ММгН + (9–12)%MoS₂.

Важливим для виробничої практики є результати дослідження впливу на параметр шорсткості R_a питомого тиску (табл. 6.6).

Таблиця 6.6. Вплив питомого тиску Р на параметр шорсткості R_a при прецизійній доводці деталей з композиційного матеріалу АК12ММгН + (9–12)% MoS₂.

Питомий тиск Р, МПа	Параметр шорсткості R _a , мкм	Середнє квадратичне відхилення τ _г
0,05	0,037	0,010
0,07	0,041	0,012
0,08	0,048	0,014
0,10	0,051	0,016
0,12	0,055	0,018
0,12	0,062	0,020

Примітка: 1 – притир – чавун; 2 – абразивний мікропорошок: електрокорунд хром частий (33А) зернистістю 3 мкм.

Аналіз даних табл. 6.6. показує, що найкращі параметри шорсткості R_a можливо отримати при питомих тисках 0,05 – 0,07 МПа, застосовуючи для оброблення чавунні диски-притири.

Безумовно цікавим є питання, як впливає на кінцеві результати машинної доводки параметри шорсткості поверхні R_a, що були отримані на попередніх операціях шліфування перед машинною доводкою. Деякі основні результати наведені у табл. 6.7.

Таблиця 6.7. Вплив попереднього оброблення на параметр шорсткості R_a при машинній доводці АК12ММгН + (9 –12)% MoS₂

Попереднє шліфування	Параметр шорсткості R _a , мкм	
	Після шліфування	Після доводки
Ельбор ЛОМ14Бр1	0,217	0,026
Ельбор ЛОМ7Бр1	0,185	0,021
Карбід кремнію зелений 63СМ14Гл	0,673	0,045
Карбід кремнію зелений 63СМ7Гл	0,367	0,037

Примітка: 1. Доводочний диск – чавун. 2. Режим доводки – швидкість різання V = 7 м/хв., питомий тиск Р = 0,05 МПа. 3. Абразивний мікропорошок – 33А зернистістю 3 мкм.

Аналіз даних табл. 6.7 дозволяє дійти до висновку, що чим більш якісною є поверхня перед прецизійною машинною доводкою, тим меншою буде

шорсткість поверхні (по параметрам R_a) після доводки. Тому, проектуючи технологічні процеси оброблення плоских поверхонь деталей з композиційних матеріалів на основі шліф-відходів алюмінію, слід передбачати таку послідовність технологічних операцій – попередньо здійснювати тонке шліфування (наприклад, ельборовими дрібнозернистими шліфувальними кругами типу ЛОМ14Бр1 100%), яке забезпечує мінімальні значення параметру шорсткості R_a , а потім, на заключній стадії комплексного технологічного процесу, здійснювати прецизійну машинну доводку (табл. 6.8), яка дозволяє досягати рівня параметрів R_a , що гарантують виконання технічних вимог до поверхонь деталей і забезпечить отримання необхідних показників зносостійкості та довговічності вузлів і машинних комплексів у цілому.

В табл. 6.8 наведені результати експериментального дослідження параметрів точності поверхонь оброблення при прецизійній машинній доводці деталей зі зносостійких алюмінієвих композитів.

Таблиця 6.8. Відхилення від неплоскостності плоских поверхонь деталей з композиційних матеріалів на основі алюмінію при машинній доводці, мкм

Матеріал притиру	Абразивний мікропорошок	Матеріал зразків		
		АМ4,5Кд	АК8МЗч	АК12ММгН + (9–12)% MoS ₂
Чавун	33АМ7	1,0 – 1,2	0,95 – 1,0	0,9 – 1,0
	33АМ5	0,8 – 1,0	0,75 – 0,9	0,7 – 0,8
	33АМ3	0,75 – 0,9	0,65 – 0,75	0,6 – 0,7
	33АМ1	0,65 – 0,8	0,55 – 0,65	0,5 – 0,6
Чавун	43АМ5	1,15 – 1,25	1,2 – 1,3	1,1 – 1,2
	43АМ3	1,05 – 1,15	1,1 – 1,2	1,0 – 1,1
	43АМ1	0,95 – 1,0	1,0 – 1,1	0,9 – 1,0
Чавун	23АМ5	1,40 – 1,45	1,35 – 1,45	1,3 – 1,4
	23АМ3	1,30 – 1,35	1,26 – 1,32	1,2 – 1,3
Мідь	33АМ5	0,80 – 0,90	0,70 – 0,8	0,6 – 0,7
	33АМ3	0,75 – 0,80	0,70 – 0,75	0,5 – 0,6
	33АМ1	0,70 – 0,75	0,65 – 0,70	0,5 – 0,6

Примітка: 1 – мастильно-охолоджуюча рідина (МОР) – гас (65%) + олеїнова кислота (35%); 2 – Режим доводки: швидкість різання $V = 7$ м/хв., питомий тиск $P = 0,05$ МПа.

Аналіз даних табл. 6.8 дозволяє дійти висновку, що у всьому діапазоні виконаних експериментів найкращі показники точності оброблення N плоских

поверхонь деталей з нових зносостійких композиційних матеріалів (незалежно від марки оброблюваного сплаву) забезпечує машинна доводка на чавунних притирах з застосуванням абразивних мікропорошків електрокорунду хромчастого (33А) зернистістю 1 – 3 мкм при використанні МОР зі складом – гас (65%) + олеїнова кислота (35%) та наступними режимами різання: швидкість різання – $V = 7$ м/хв., питомий тиск – $P = 0,05$ МПа.

Як вже відзначалось, одним із найважливіших параметрів якості поверхні оброблення, що суттєво впливає на зносостійкість пар тертя, є наклеп тонкого поверхневого шару та глибина його проникнення у тіло деталі при машинній доводці їх плоских поверхонь. Ці фактори відіграють важливу роль (з точки зору фізики процесів тертя і зношування деталей) у перерозподілі рівня залишкових напружень і формуванні ювенільного контакту поверхонь пар тертя при зношуванні деталей при експлуатації машин і механізмів.

Тому дослідження процесів утворення наклепу при машинній доводці нових марок зносостійких композитів на основі алюмінію, як впливають технологічні фактори процесу прецизійної доводки (матеріал диску, характеристика абразивного мікропорошку, режими різання та склад мастильно-охолоджуючої рідини) на параметри наклепу та специфічні особливості технологічного процесу прецизійної доводки є безумовно важливим як з наукової, так і з практичної точки зору. У табл. 6.9, 6.10 наведені основні результати експериментального дослідження означених питань.

Таблиця 6.9. Ступінь наклепу K на різних глибинах наклепної зони при прецизійній машинній доводці деталей з композиту на основі сплаву АК12ММgН + (9–12)% MoS_2

Спосіб доводки	Ступінь наклепу K на глибині, мкм			
	Поверхня	5,0	3,0	1,0
Чавунний притир, абразивний мікропорошок 33АМЗ	1,21	1,12	1,07	1,01
Чавунний притир, абразивний мікропорошок 33АМ1	1,12	1,07	1,05	1,01
Чавунний притир, абразивний мікропорошок 43АМ1	1,36	1,22	1,15	1,07
Мідний притир, абразивний мікропорошок 33АМЗ	1,15	1,10	1,05	1,01

Примітка: 1. Режим оброблення: швидкість різання – $V = 7$ м/хв., питомий тиск – $P = 0,05$ МПа.
2. Мастильно-охолоджуюча рідина – суміш зі складом – гас (65%) + олеїнова кислота (35%).

Аналіз табл. 6.9, 6.10 показує, що з точки зору формування мінімальних параметрів наклепу, а саме, мінімальних значень ступеню К та глибини його проникнення у тіло поверхні деталі, при прецизійній доводці, найкращі результати забезпечує обробка на чавунних притирах абразивними зернами електрокорунду хром частого (33А) зернистістю 1 – 3 мкм. Наприклад, у порівнянні з зернами монокорунду 43А, який має досить гостру геометрію ріжучої вершини, показники наклепу на 10 – 20% більші ніж у абразивних мікропорошків 33А. Це може бути пояснене лише більшою крихкістю зерен електрокорунду хромчастого, що викликає подрібнення зерен при доводці, утворення більш дрібнозернистих фракцій, відповідного перерозподілу складових сил різання при доводці та закономірного зменшення (внаслідок цього) параметрів наклепу.

Таблиця 6.10. Вплив режимів різання прецизійної машинної доводки на наклеп поверхонь деталей зі зносостійких композитів на основі шліф-відходів алюмінієвих сплавів

Притир	Режими різання		Абразивний мікропорошок	Ступінь наклепу К	
	Швидкість V, м/хв.	Питомий тиск Р, МПа		АМ4,5Кд	АК12ММгН + (9–12%) MoS ₂
Чавун	5	0,05	33АМ5	1,25	1,22
	5	0,07		1,27	1,25
	5	0,10		1,32	1,30
	7	0,05		1,27	1,23
	7	0,10		1,37	1,35
	10	0,05		1,31	1,29
	10	0,010		1,32	1,34
	7	0,05	33АМ3	1,23	1,21
	7	0,07		1,20	1,19
	7	0,10		1,26	1,30
	7	0,05	33АМ1	1,14	1,12
	7	0,10		1,18	1,16
	7	0,05	43АМ3	1,36	1,35
	7	0,07		1,39	1,37
	7	0,10		1,44	1,40
Мідь	5	0,05	33АМ3	1,15	1,13
	5	0,07		1,17	1,15
	7	0,05	43АМ3	1,33	1,31
	7	0,07		1,36	1,34

Примітка: 1. Мастильно-охолоджуюча рідина – суміш зі складом – гас (65%) + олеїнова кислота (35%).

Отриманий висновок, підтверджується і при доводці на мідних притирах, хоча має місце деяке покращення параметрів наклепу ($\sim$ на 3 – 5%) у порівнянні з чавунними притирами. Найвірогідніше, пояснення цьому може бути дано у порівнянні фізико-механічних властивостей чавунних та мідних притирів. Мідні притири – більш м'які і тому абразивні зерна демпфують у тіло притиру під дією сил різання. Це зменшує фактичну глибину різання при доводці, суттєво знижує складові сил різання, обумовлюючи зменшення при різанні пластичних деформацій у зоні різання шару металу та безпосередньо перерізу стружки. Як наслідок, відбувається зменшення наклепу та глибини його проникнення у поверхневий шар.

Але з урахуванням більш низької розмірної стійкості мідних притирів у порівнянні з чавунними для практичного використання у подальшому слід рекомендувати тільки притири з чавуну.

Зазначимо, що на параметри наклепу впливають режими доводки.

Для всіх видів притирів, матеріалу зерна абразиву та його зернистості найкращі показники забезпечує обробка з такими режимами доводки: швидкість різання – $V = 7$ м/хв., питомий тиск – $P = 0,05$ МПа.

Зміни параметрів наклепу при збільшені чи зменшені швидкості різання та питомих тисків при прецизійній доводці деталей з нових зносостійких композиційних сплавів на основі алюмінію [131, 133] пояснюється їх чутливістю до змін миттєвих контактних температур та співвідношень у силовому полі при зрізанні у процесі доводки надтонких стружок з мінімальними значеннями їх перерізів.

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

Вперше в науковій практиці досліджено технологічні процеси прецизійної машинної доводки плоских поверхонь деталей тертя з нових зносостійких композитних матеріалів, синтезованих на основі утилізованих та регенерованих шліфувальних відходів виробництва деталей з алюмінію, що

відкриває можливості одержання високоякісних деталей тертя з нових композитів для машинних комплексів.

Показано, що основні закономірності прецизійної машинної доводки деталі зі зносостійких алюмінієвих композитів співпадають з базовими положеннями теорії абразивного оброблення, що є вагомим додатковим вкладом в науку про технологію машинобудування.

Найкращі показники параметрів шорсткості R_a , точності геометричної форми поверхонь оброблення, значень ступеня наклепу та глибини його проникнення у поверхневі шари матеріалу композитних деталей на основі відходів алюмінієвих сплавів забезпечує прецизійна машинна доводка плоских поверхонь з застосуванням чавунних дисків-притирів, використанням дрібнозернистих (1–3 мкм) абразивних мікропорошків електрокорунду хром частого (33А) з вмістом у його складі до 2% оксиду хрому Cr_2O_3 та наступними режимами обробки: швидкість різання – $V=7$ м/хв., питомий тиск – $P=0,05–0,07$ МПа, мастильно-охолоджуюча рідина – суміш зі складом – гас (65%) + олеїнова кислота (35%).

Подальші дослідження технологічних процесів прецизійної машинної доводки зносостійких алюмінієвих композитів доцільно спрямувати на всебічне дослідження величини та знаку залишкових напружень у поверхневих шарах деталей, що підлягають обробленню та встановленню їх впливу на параметри зносостійкості та довговічності деталей, машин і механізмів численних машинних комплексів.

6.3. Залишкові напруження при прецизійній машинній доводці поверхневих шарів деталей зі зносостійких алюмінієвих композитів

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.

На основі розгалужених науково-дослідних робіт з регенерації та повторного використання у виробничому циклі цих сировинних ресурсів в останні роки були створені оригінальні високозносостійкі композиційні матеріали на основі алюмінію АК12М2МгН, АМ4,5Кд, АД35 та АК12ММгН+(9–12)%MoS₂ [64–69]. Вони пройшли апробацію в умовах дії агресивного оточуючого середовища (кисень, повітря, виробничий пил, температурні навантаження при експлуатації у межах 100–170°C, питомі навантаження – до 7,0 МПа) і були рекомендовані для виготовлення деталей, таких як, скоби, затли, направляючі, плоскі вкладні “пальців” захоплювачів автооператорів, у ножових різальних машинах поліграфії типу Wolenberg Trim-tec 560, у висікальному обладнанні паперу та картону типів Drossertst - 6, Bobsmistral – 110 А2, фальцапаратах типу Heidelberg IF-50 ST, та типу «Stahl FK-47 А», машинах для вклеювання віконць в упаковку типу WFD-600, автоматичні високошвидкісні лінії з виробництва коробок з віконцем JMD-T1020C/JMD-T1200C, напівавтоматичних кашировальних машинах типу NB 1100 В/1300В, каширувально-склеювальних ліній для склеювання картону-лайнера та мікрогофрокартону Heidelberg та Bobst та ін., які широко представлені на поліграфічних підприємствах України.

Основні властивості нових зносостійких композиційних матеріалів на основі шламових відходів алюмінієвих сплавів наведені у розділі 3 монографії ч.2.

Виходячи із загальних положень теорії абразивного оброблення матеріалів [31, 32, 36, 76] та враховуючи специфічні властивості композитів на основі алюмінію [64, 70, 71, 73, 119], безумовно доцільною є обробка плоских високоточних поверхонь деталей тертя з алюмінієвих композиційних сплавів, синтезованих з відходів вторинної алюмінієвої сировини, за технологічною схемою – «тонке плоске ельборове шліфування – прецизійна механічна доводка». Така схема оброблення гарантує отримання необхідних вимог до поверхонь тертя композитних деталей, які є засадничими для забезпечення високих параметрів надійності пар тертя (зносостійкості, довговічності,

ремонтоздатності та коефіцієнта готовності). Наприклад, для прецизійних опор конвеєрно-накопичувальних систем поліграфічних комплексів, ці вимоги становлять такі значення: параметр шорсткості поверхні R_a повинен бути не вище 0,020 – 0,040 мкм, не площинність поверхонь оброблення на базі 60×60 мм – у межах 0,05 – 0,08 мкм, ступінь наклепу K – не більше 1,4 – 1,5, а глибина наклепу h повинна мати мінімальні значення при деформації металу поверхневого шару деталі і не перевищувати значень 2 – 5 мкм.

Згідно фундаментальним дослідженням з теорії тертя і зношування деталей пар тертя [5, 8, 9], для підвищення показників зносостійкості бажаним є створення методами тонкого оброблення у поверхневих шарах деталей залишкових напружень стиску.

На сьогодні, на жаль, у літературних джерелах майже відсутня інформація щодо технологічних процесів фінішної обробки деталей з нових марок композиційних матеріалів на основі алюмінію. Є окремі напрацювання у цьому напрямку - створені технологічні рекомендації по тонкому абразивному ельборовому шліфуванню та прецизійній доводці [70, 71, 73, 119]. Проте детального вивчення утворення залишкових напружень поверхневих шарів деталей при їх обробленні до цього часу немає, хоча, як вже зазначалось, вони відіграють (поряд з параметрами шорсткості та наклепу) важливу роль для отримання необхідних показників зносостійкості. Це не дозволяє оптимізувати технологічні процеси фінішної доводки поверхонь деталей з нових композитів на основі алюмінію, веде до створення на підприємствах поліграфічного машинобудування різних технологічних схем обробки, далеко не завжди достатньо обґрунтованих і часто – досить протирічних.

Тому дослідження питань утворення залишкових напружень у поверхневих шарах деталей з нових зносостійких алюмінієвих композитів, створення відповідних технологічних регламентів і рекомендацій для виробництва щодо прецизійної машинної доводки їх поверхонь є безумовно

актуальним і має не тільки наукове, а і, що не менш важливо, практичне значення.

Таким чином, було виконано експериментальне дослідження залишкових напружень у поверхневому шарі оброблення при прецизійній машинній доводці поверхонь деталей тертя постдрукерських машин, що виготовлені з нових композиційних матеріалів на основі шламових відходів алюмінієвих сплавів АК12М2МгН, АК12ММгН, АД35, АК12ММгН+(9–12)%MoS₂ та встановлення впливу основних технологічних факторів прецизійної абразивної машинної доводки на залишкові напруження, їх знак та глибину проникнення у поверхневий шар оброблення деталі.

Дослідження залишкових напружень виконувалось згідно з методикою, наведеною у роботах [31, 32], при цьому постійно брались до уваги результати теоретичного дослідження формування залишкових напружень, які були виконані авторами монографії ч. 2 і опубліковані у роботах [192–195].

Згідно сучасного уявлення щодо формування залишкових напружень у поверхневому шарі деталей при механічній обробці взаємодіє два протилежних фактори – силовий і тепловий вплив інструменту на виріб.

Пластична деформація від нормальних сил різання веде до зміцнення поверхневого шару і появі стискуючих напружень, а високі температури у зоні різання викликають локальні термопластичні деформації і, відповідно, появу залишкових напружень розтягу.

Залишкові напруження, що виникають при прецизійній машинній доводці деталей, суттєво впливають на глибину їх залягання, а отже, на параметри інтенсивності зношування поверхні.

Розрахунок рівня залишкових напружень виконувався згідно методики, наведеної у роботах [192–195].

Зазначимо, що враховуючи дані попередньо наведених досліджень з вивчення якості поверхонь з застосуванням різних методів машинної доводки, а саме, що найкращі результати по виконанню технічних вимог до поверхонь оброблення деталей з високотносостійких алюмінієвих композитів

забезпечуються застосуванням притиральних дисків з чавуну, абразивних мікропорошків зернистістю 1–3 мкм з електрокорунду хромчастого (33А) з вмістом у його складі до 2% оксиду хрому Cr_2O_3 та мастильно-охолоджуючої рідини зі складом гас (~ 65%) + олеїнова кислота (~35%). Більшість експериментів, що наведені у даній частині монографії, виконана з урахуванням наведених рекомендацій на зразках з композиційних матеріалів $\text{AK12MMgH}+(9-12\%)\text{MoS}_2$.

Для порівняння були використані інші типи притирів та матеріалів абразивних мікропорошків.

На рис. 6.4 представлено розподіл залишкових напружень за глибиною поверхневого шару.

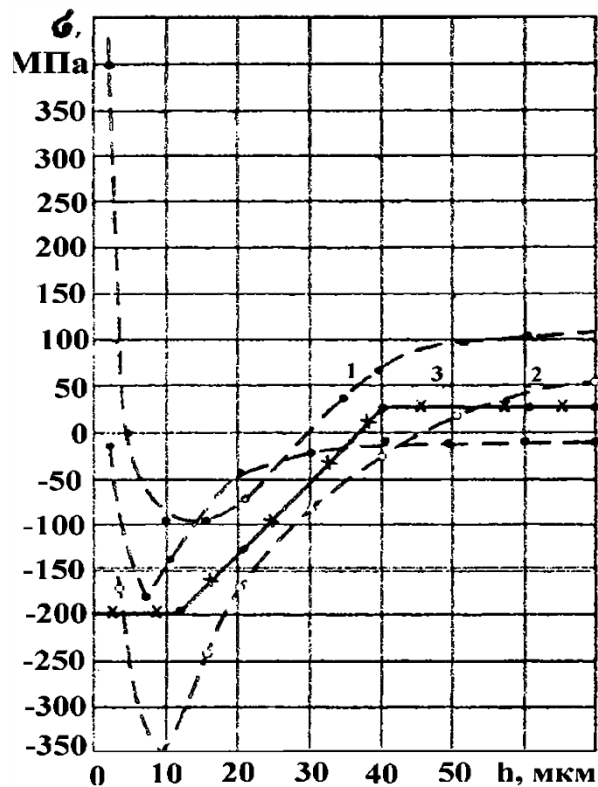


Рисунок 6.4. Розподіл залишкових напружень за глибиною поверхневого шару при прецизійній механічній доводці деталей з алюмінієвих композитів типу $\text{AK12MMgH}+(9-12\%)\text{MoS}_2$ при різних методах доводки: 1 – доводка мікропорошками монокорунду (43А) зернистістю 3 мкм; 2 – доводка мікропорошками електрокорунду хромчастого (33А) зернистістю 5 мкм; 3 – доводка мікропорошками електрокорунду хромчастого (33А) зернистістю 3 мкм

Аналіз наведених на рис. 6.4 експериментальних даних показує, що при прецизійній машинній доводці (у всьому діапазоні досліджень) утворюються

залишкові напруження стиску, які мають глибину проникнення у поверхневий шар деталі оброблення до 10 – 15 мкм. Напруження стиску сприяють збільшенню параметрів зносостійкості [192–195] і тому, отримані результати дозволяють дійти висновків, що для суттєвого збільшення термінів довговічності деталей та машин в цілому є доцільним застосовувати для фінішних операцій оброблення поверхонь машинну доводку на чавунних дисках абразивними дрібнозернистими (~3 мкм) порошками електрокорунду хромчастого (33А) з використанням мастильно-охолоджуючої рідини зі складом – гас (~65%) + олеїнова кислота (~35%). Це дозволяє отримати (окрім бажаних попередньо розрахованих залишкових напружень стиску) необхідні значення параметрів шорсткості R_a , глибини, ступеню наклепу та геометричної точності поверхонь оброблення.

Також доцільно зазначити, що глибина залягання максимальних значень напружень стиску і їх величина, отримані шляхом розрахунків [192–195], добре узгоджується з експериментальними даними, що свідчить про достовірність отриманих даних.

Для технологічної практики реального виробництва важливими є дослідження впливу режимів різання машинної доводки на залишкові напруження поверхневих шарів деталей з новітніх марок зносостійких алюмінієвих композитів.

Основні результати таких досліджень наведені у табл. 6.11.

Таблиця 6.11. Залежність залишкових напружень поверхневих шарів деталей від режимів різання при прецизійній машинній доводці [192–195]

Спосіб машинної доводки	Режими різання		Залишкові напруження	
	Швидкість різання V_p , м/хв	Питомий тиск P , МПа	На поверхні деталі σ , МПа	Глибина залягання h , мкм
Притир-чавун Абразив-електрокорунд хромчастий 33А Зернистість – 3 мкм	5	0,05	200	8

Примітка: 1. Мастильно-охолоджуюча рідина - гас (~ 65%) + олеїнова кислота (~35%) + олеїнова кислота (~35%); 2. Матеріал оброблюваної деталі – алюмінієвий композит АК12ММgH+(9 – 12)%MoS₂

Як вже відзначалось, таке зростання залишкових напружень стиску та глибини їх залягання у поверхневий шар сприяє збільшенню зносостійкості поверхні і здавалося б, що це є безумовно позитивним явищем. Проте, якщо враховувати, що при цьому суттєво зростає шорсткість поверхні (відповідно, значно погіршуються умови тертя і різко знижуються параметри довговічності), слід підходити до призначення режимів різання уважно, оптимізуючи їх вибір з метою досягнення найкращих результатів за параметрами якості поверхонь оброблення, продуктивності процесу різання та забезпеченню вимог зносостійкості деталей. Для новітніх зносостійких композитних матеріалів на основі шліф-відходів алюмінієвих сплавів [64–69] доцільно виконувати прецизійну доводку за такими режимами оброблення: швидкість різання $V_p = 5 - 7$ м/хв., питомий тиск $P = 0,05 - 0,07$ МПа.

Слід зазначити, що ці висновки підтверджуються і при застосуванні для доводки більш твердих скляних притирів. Найвірогідніше пояснити їх можливо тим, що використання у якості притирів, наприклад «Пірекс», яке відрізняється високою твердістю, обумовлює зростання сил різання і, як наслідок, веде до відповідного збільшення залишкових напружень та глибини їх залягання.

Використання для прецизійної машинної доводки притирів з чавуну, яким притаманна наявність на поверхні вкраплень глобулярної форми вуглецю, дозволяє ріжучим абразивним зернам (внаслідок дії складових сил різання) дещо зануритись у глобулярну частку вуглецю. Це у першому наближенні схоже на мікродемпфування ріжучих зерен у матеріал притиру і веде до деякого зменшення ефективного перерізу стружки, що зрізається з поверхні оброблення. Отже, умови для різання в процесі машинної доводки суттєво покращуються, що позитивно впливає на отримання необхідних параметрів якості оброблюваних поверхонь деталей зі зносостійких композиційних матеріалів на основі алюмінію.

Таким чином, найкращим матеріалом притирів, що застосовують для прецизійної машинної доводки, є глобулярний чавун. Це цілком співпадає з

базовими положеннями теорії абразивного оброблення і, зокрема, теорії процесів надтонкої абразивної доводки [31, 32, 36, 76, 82].

Отже, вперше досліджено залишкові напруження поверхневих шарів оброблюваних деталей при прецизійній машинній доводці нових зносостійких композитних матеріалів на основі алюмінію. Доведено, що на рівень та глибину залишкових напружень суттєво впливають режими різання (швидкість V_p , питомий тиск P) та матеріал притиру. Найкращі результати параметрів якості оброблюваних поверхонь (з точки зору утворення залишкових напружень стиску) забезпечує застосування у якості ріжучих абразивів дрібнозернистих (зернистістю 1 – 3 мкм) мікропорошків з електрокорунду хромчастого 33А зі умістом в його складі до 2% оксиду хрому Cr_2O_3 , доводочних притирів з чавуну та виконання технологічного процесу прецизійної машинної доводки з такими режимами різання: швидкість різання $V_p = 5 - 7$ м/хв., питомий тиск – $P = 0,05 - 0,07$ МПа, мастильно-охолоджуюча рідина зі складом - гас (~ 65%) + олеїнова кислота (~35%).

Висновки до розділу 6

1. Показано, що найкращі показники параметрів шорсткості R_a , точності геометричної форми поверхонь оброблення, значень ступеня наклепу та глибини його проникнення у поверхневі шари оброблюваних композитних деталей на основі регенерованих шліф-відходів алюмінієвих сплавів забезпечує обробка за технологічною схемою «тонке ельборове шліфування – прецизійна машинна доводка».

2. Вперше показано, що основні закономірності тонкого прецизійного ельборового шліфування нових композитів на основі регенерованих відходів алюмінієвих 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 ельборового круга та режими тонкого ельборового шліфування. Показано, що найкращі показники параметру R_a , які

задовольняють високі вимоги до поверхонь антифрикційних деталей постдрукарських машин, забезпечують шліфувальні круги з ельбору ЛО зернистістю 14 – 28 мкм на бакелітно-гумовій зв'язці та тонкі режими різання, а саме:

- для плоского ельборового 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 ельборового 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 ельборового шліфування: швидкість круга – 40 м/с, швидкість виробу – 50 м/хв., поздовжня подача – 30 мм/об., глибина різання – 2 мкм.

4. Дослідження показали, що прецизійна машинна доводка плоских поверхонь має виконуватись із застосуванням чавунних дисків-притирів з використанням дрібнозернистих (1–3 мкм) абразивних мікропорошків електрокорунду хром частого (33А) з вмістом у його складі до 2% оксиду хрому Cr_2O_3 та наступними режимами обробки: швидкість різання – $V = 7$ м/хв., питомий тиск – $P = 0,05 - 0,07$ МПа, мастильно-охолоджуюча рідина – суміш зі складом – гас (65%) + олеїнова кислота (35%).

Така обробка забезпечує одержання високих параметрів якості робочих поверхонь антифрикційних композитних деталей постдрукарського обладнання, що є визначальною передумовою їх високої зносостійкості і довговічності.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Авторами монографії ч. 2 було виконано комплекс розгалужених теоретико-експериментальних досліджень, що дозволяє сформулювати ряд важливих наукових та практичних узагальнень, висновків та зробити рекомендації для виробників:

1. Показано, що в сучасному машинобудуванні існують великі сировинні резерви, які практично не використовуються при виготовленні деталей різного призначення. Це – металеві шліфувальні відходи чорних і кольорових сплавів містять у своєму складі цінні легувальні елементи Cr, Mo, W, Si, Ni, V, Al, Co, Ti, Nb, Cu, Mg, Mn та ін.

Присутність у шліфувальних відходах перелічених легувальних елементів, які в різних кількостях і комбінаціях містяться у вторинній сировині, зробила їх привабливими для подальшого використання з метою одержання з них якісних високолегованих композитів антифрикційного призначення та деталей з них.

2. Визначено, що питання створення нових антифрикційних композитів з дешевої і цінної сировини, якою є шліфувальні відходи чорних і кольорових металів і сплавів, та виготовлення ефективних деталей з них, що матимуть високі експлуатаційні властивості у широкому діапазоні умов роботи контактних з'єднань друкарського і постдрукарського обладнання, є вельми актуальним і потребує виконання глибоких досліджень.

3. Обґрунтовано важливість фінішної обробки робочих поверхонь тертьових деталей друкарських і постдрукарських машин, як передумову підвищення зносостійкості деталей і довговічності поліграфічного обладнання у цілому.

4. Показано, що при використанні самозмащувальних деталей для вузлів тертя відпадає необхідність в системі подач мастила, що зменшує металоємність устаткування, спрощує його конструкцію, дозволяє експлуатувати нову техніку в особливо важких умовах, де неможливе додаткове змащування.

5. Розглянувши фактори, що впливають на надійність та довговічність друкарських і постдрукарських машин показано, що довговічність пар тертя залежить не тільки від об'ємних властивостей деталі, але й від якості механічного оброблення робочих поверхонь, що дозволяє зменшити час припрацювання та знизити ризик виникнення таких дефектів як задири, схоплювання, попадання паперового пилю та агресивних речовин між поверхнями тертя у процесі роботи друкарської техніки.

6. Обґрунтовано об'єкти досліджень – нові антифрикційні композити на основі промислових шліфувальних відходів високолегованих інструментальних сталей та легованих алюмінієвих сплавів, які містять у своєму складі домішки твердих мастил CaF_2 та MoS_2 відповідно, що призначені для оснащення вузлів тертя високообертового друкарського обладнання та контактних з'єднань постдрукарських машин, як альтернатива застосованим нині традиційним литим сплавам.

7. Розроблено ефективні методи регенерації вихідних шліфувальних відходів інструментальних сталей та алюмінієвих сплавів, як цінної вихідної сировини для синтезу новітніх антифрикційних композитів.

8. Обґрунтовано вибір твердих змащувальних речовин – CaF_2 та MoS_2 для композитів на основі відходів сталей і алюмінієвих сплавів відповідно, як ефективних твердих мастил для важких і помірних умов роботи, та обрано принципові технології порошкової металургії, відпрацьовано технологічні параметри виготовлення нових композитних деталей, обґрунтовано і визначено раціональні параметри їх консолідації, які здатні забезпечити високий рівень властивостей.

9. Визначено комплексну методику дослідження властивостей нових антифрикційних композитів на основі шліфувальних відходів інструментальних сталей та алюмінієвих сплавів, яка об'єднує низку сучасних методів: металографічний, рентгеноструктурний, електронномікроскопічний аналізи, визначення фізико-механічних характеристик, триботехнічні випробування, профілометричний, мікродюрOMETричний аналізи та метод

Фур'є-спектроскопії. Означений методологічний підхід здатний забезпечити достовірну та всебічну інформацію.

10. Сформовано комплексне методологічне забезпечення тонкої алмазної та абразивної обробки поверхонь нових композитів, що включає:

- вибір високоточного верстатного обладнання для прецизійної фінішної обробки поверхонь деталей з нових марок антифрикційних композитів на основі шліф-відходів сталей і алюмінієвих сплавів для отримання найвищих параметрів якості робочих поверхонь при різних методах тонкої фінішної обробки відповідно до природи оброблюваних матеріалів композитних деталей;

- вибір низки раціональних типів сучасних алмазних і абразивних інструментів, які доцільно застосовувати для вивчення технологічних процесів тонкої обробки нових типів композитів та дослідження закономірностей впливу різноманітних факторів (режими різання, взаємодія силового та температурного полів та ін.) на параметри якості поверхонь обробки деталей тертя, їх зносостійкості та довговічності;

- раціональне застосування мастильно-охолоджуючих рідин для абразивного та алмазного шліфування.

11. Показано, що утворена у процесі синтезу гетерофазна структура досліджуваних антифрикційних композитів на основі відходів інструментальних сталей надала їм високого рівня фізико-механічних і триботехнічних властивостей, що істотно переважають властивості литої латуні Л63, деталями з аналогічного складу закордонної латуні нині оснащені вузли тертя офсетних, друкарських та формних циліндрів ряду друкарських високошвидкісних машин типу PLAMAG Rondoset RO 170, SITMA C80 750i, STAR BINDER 1509, WOHLBERG 1A438, HEIDELBERG Speedmaster SM 102 FP+L, KBA RAPIDA-105 та ряд ін.

12. Аналіз структури і комплексу властивостей композитів, синтезованих зі шліфувальних відходів алюмінієвих сплавів АК12ММгН, АМ4,5Кд та АД35, показав їх перспективність для застосування у контактних з'єднаннях

постдрукерського устаткування типу фальцювально-склеювальних машин «BOBST Mistral 110 A2», машин для вклеювання віконць в упаковку типу «Heiber & Schroeder wr 800 d», ножових різальних машин WOHLBERG Trim-tec 560, WOHLBERG Trim-tec 607, у фальцапаратах HEIDELBERG IF-50 ST та ін. як ефективної альтернативи деталям з литих алюмінієвих сплавів закордонних аналогів.

13. Дослідження показали ефективність застосування регенованих промислових шліфувальних відходів легованих сталей і алюмінієвих сплавів як основи для одержання антифрикційних композитів для різного діапазону умов експлуатації, коли їх структурою і властивостями можна керувати технологічними заходами, обираючи хімічний склад тих чи інших шліфувальних відходів і застосовуючи раціональні технологічні параметри їх синтезу.

14. Вперше досліджено процеси тонкого бразонового оброблення нових композиційних матеріалів, синтезованих на основі утилізованих та регенованих шліфувальних відходів інструментальних сталей, що відкриває можливості одержання високоякісних деталей тертя з нових композитів для широкої номенклатури вузлів тертя, працюючих у різних умовах навантаження високошвидкісних друкарських машин.

15. Доведено, що на параметри якості оброблюваних поверхонь композитів на основі відновлених шліфувальних відходів інструментальних сталей R_a суттєво впливають зернистість, матеріал зв'язки бразонового круга та режими бразонового шліфування, а саме, найкращі показники параметру R_a з погляду відповідності високим вимогам до якості поверхонь тертя деталей поліграфічних машин забезпечують шліфувальні круги з бразону В0 зернистістю 14–28 мкм на гумово-бакелітній зв'язці та тонкі режими різання.

16. Вперше досліджено процеси тонкого алмазного шліфування заготовок з принципово нових композитів, синтезованих на основі утилізованих та регенованих шліфувальних відходів складнолегованих інструментальних сталей, що відкриває можливості одержання високоякісних

деталей з принципово нових антифрикційних композитів для високообертових поліграфічних машин.

17. Для забезпечення необхідних умов якості поверхневого шару (параметри наклепу, шорсткість поверхні оброблення) тонке алмазне шліфування заготовок антифрикційних деталей з нових композитів на основі шліфувальних відходів високолегованих інструментальних сталей 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.

18. Показано, що найкращі показники параметрів шорсткості R_a , точності геометричної форми поверхонь оброблення, значень ступеня наклепу та глибини його проникнення у поверхневі шари оброблюваних композитних деталей на основі регенерованих шліф-відходів алюмінієвих сплавів забезпечує обробка за технологічною схемою «тонке ельборове шліфування – прецизійна машинна доводка».

19. Визначено, що при застосуванні для прецизійного ельборового шліфування поверхонь деталей з нових композитів на основі шліф-відходів алюмінієвих сплавів з використанням ельборових кругів на основі ельбору ЛО зернистістю 14–28 мкм на бакелітно-гумовій зв'язці, на параметр шорсткості поверхні оброблення R_a найбільше впливають глибина різання t , поздовжня подача $S_{\text{п}}$ та швидкість обертання деталі $V_{\text{в}}$. Найкращі результати за параметром якості R_a забезпечують тонкі режими ельборового шліфування, а саме, мінімально можливі режими різання – глибина шліфування, поздовжня подача та швидкість обертання деталі.

20. Вперше показано, що найкращі показники параметрів шорсткості R_a , точності геометричної форми оброблюваних поверхонь, величини ступеня наклепу, глибини його проникнення у поверхневі шари композитних деталей на основі відходів алюмінієвих сплавів та величини залишкових напружень поверхневих шарів забезпечує прецизійна машинна доводка плоских поверхонь з застосуванням чавунних дисків-притирів, використанням

дрібнозернистих (1–3 мкм) абразивних мікропорошків електрокорунду хром частого (33А) з вмістом у його складі до 2% оксиду хрому Cr_2O_3 та наступними режимами обробки: швидкість різання – $V=7$ м/хв., питомий тиск – $P = 0,05–0,07$ МПа, мастильно-охолоджуюча рідина – суміш зі складом – гас (65%) + олеїнова кислота (35%).

Така обробка забезпечує одержання високих параметрів якості робочих поверхонь антифрикційних композитних деталей на основі шліф-відходів алюмінієвих сплавів для постдрукарського обладнання, що є визначальною передумовою їх високої зносостійкості і довговічності.

21. Нові антифрикційні композити, що синтезовані на основі регенованих промислових шліфувальних відходів легованих інструментальних сталей і алюмінієвих сплавів та механічно оброблені за розробленими технологіями, можуть бути рекомендовані для ефективного застосування у вузлах офсетних, друкарських і формних циліндрів друкарських машин та у контактних з'єднаннях постдрукарського обладнання широкого діапазону умов експлуатації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Киричок П. О., Роїк Т. А., Гавриш А. П., Шевчук А. В., Віцюк Ю. Ю. Новітні композиційні матеріали деталей тертя поліграфічних машин: Монографія. – К.: НТУУ КПІ, 2015. – 428 с. ISBN 978-066-622-692-4.

2. Роїк Т. А., Киричок П. О., Гавриш А. П. Композиційні підшипникові матеріали для підвищених умов експлуатації: Монографія. – К.: НТУУ „КПІ”, 2007. – 404 с.

3. Роїк Т. А., Гавриш А. П., Гавриш О. А. Сучасні системи технологій заготівельного виробництва в машинобудуванні: Монографія. – К.: ЕКМО, 2010. – 212 с.

4. Федорченко И. М. Композиционные спеченные антифрикционные материалы/ И. М. Федорченко, Л. И. Пугина. – К.: Наукова думка, 1980. – 404 с.

5. Кравец И. А. Репаративная регенерация трибосистем/И. А. Кравец. – Тернополь: Изд-во ТДТУ, 2003. – 300 с.
6. Ковальченко М. С. Теоретические основы горячей обработки пористых материалов давлением / М. С. Ковальченко. – К.: Наукова думка, 1980. – 238 с.
7. Костецкий Б. И. Кинетика образования вторичных структур при изнашивании/Б. И. Костецкий, Б. М. Барбалат //Теория смазочного действия и новые материалы. – М.: Наука, 1965. - С. 158-161.
8. Костецкий Б. И. Износостойкость и антифрикционность деталей машин/Б. И. Костецкий, И. Г. Носовский. - К.: Техніка, 1965. – 206 с.
9. Крагельский И. В. Трение и износ/И. В. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1968. – 478 с.
10. Носовский И. Г. Влияние газовой среды на износ металлов / И. Г. Носовский. - К.: Техніка, 1968. – 180 с.
11. Марковский Е. А. Изменение химического состава поверхностных слоев, деформированных трением/Е. А. Марковский, Б. А. Кириевский // Проблемы трения и изнашивания. – 1974. - № 6. – С. 105 - 112.
12. Роик Т. А., Глушкова Д. Б., Белый В.А., Костина Л. Л. Прогрессивные методы упрочнения и восстановления деталей цилиндро-поршневой группы: Монография.- Харьков: ХНАДУ, 2014.-216 с.
13. Роик Т. А., Глушкова Д. Б., Рыжков Ю. В., Костина Л. Л. Технологические подходы к повышению параметров качества гидромолота: Монография.- Харьков: ХНАДУ, 2015.-260 с.
14. Аскеров М. Г., Роик Т. А., Гавриш А. П. Металлополимерные триботехнические материалы: Монография.- К.:НТУУ «КПИ», 2015.-148 с.
15. Tribology. Handbook, Second Edition, Editor M. J. Neale, 1996 Elsevier Ltd, ISBN 978-0-7506-1198-5, <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-1198-5.X5000-0>.
16. Jamroziak K., Roik T. Contribution Self-Lubrication Mechanism of New Antifriction Copper-Based Composites in the Vehicles' Heavy-Loaded Friction

Units/9th International Conference on Fracture Fatigue and Wear FFW-2021, Ghent University, Belgium, 2–3 August 2021//Proceedings of the 9th International Conference on Fracture, Fatigue and Wear. FFW 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer, Singapore. - pp. 273-275. - <https://link.springer.com/content/pdf/bfm:978-981-16-8810-2/1>

17. Roik T. A., Gavrish O. A., Vitsiuk Iu. Iu. The phase composition and structure of the antifriction copper-based composite and their influence on tribological properties //Powder Metallurgy and Metal Ceramics (2021), Springer Science + Business Media, LLC, Springer Nature 2021, New York: Volume 60(3), 2021, pp. 191-197. Published: 23 September 2021. Online First: your article is published 2021-09-24, DOI <https://doi.org/10.1007/s11106-021-00227-z>

18. Krzysztof Jamroziak, Tetiana Roik, Oleg Gavrish, Iuliia Vitsiuk, Grzegorz Lesiuk, Jose A.F.O. Correia, Abílio De Jesus. Improved manufacturing performance of a new antifriction composite parts based on copper// Elsevier, Engineering Failure Analysis, Volume 91, September 2018, Pages 225–233, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.04.034> .

19. Kaczmar J., Granat K., Kurzawa A., Naplocha K., Grodzk, E. Manufacturing, physical and tribological properties of Cu-ETP based MMC strengthened with Al₂O₃ particles. Technológy 2013, 2, pp. 35–39.

20. Konopka K. Effect of CaF₂ surface layers on the friction behavior of copper-based composite / K. Konopka, T. A. Roik, A. P. Gavrish, et al. // Powder Metal. Met. Ceram. – 2012. – Vol. 51, No. 5–6. – pp. 363–367.

21. Kostornov A. G. Tribotechnical material science. Monograph, Lugansk, Nouly, Ukraine, 2012, 696 p. <https://www.nas.gov.ua/EN/Book/Pages/default.aspx?BookID=0000006788>

22. Roik T., Vitsiuk Iu. The Properties of new composite antifriction parts for printing equipment's friction units// Технологія і техніка друкарства. – №2 (56). –2017. – С. 16–23. DOI: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.2\(56\).2017.84485](https://doi.org/10.20535/2077-7264.2(56).2017.84485)

23. Roik T., Vitsiuk Iu. The effectiveness of manufacturing technology of antifriction composite parts based on nickel// Selected engineering problems,

Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Gliwice, Poland, 2016.—№7. —pp. —49–56.

24. Roik, T. A., Gavrysh, O. A., Vitsiuk, I. I. Khmiliarchuk O. I., New Copper-Based Composites for Heavy-Loaded Friction//Powder Metallurgy and Metal Ceramics: Springer, New York: Volume 56, Issue 9–10, (2018), pp.516–522, <https://doi.org/10.1007/s11106-018-9924-x>, DOI 10.1007 / s11106-018-9924-x.

25. Роїк Т. А., Омїк Т. М. Аналіз властивостей легованих композитів для деталей тертя друкарських машин// Технологія і техніка друкарства, №3(57), 2017.- С. 20-30. DOI: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.3\(57\).2017.121528](https://doi.org/10.20535/2077-7264.3(57).2017.121528)

26. Jamroziak K., Roik T. (2019) Structure and Properties of the New Antifriction Composite Materials for High-Temperature Friction Units// In: Abdel Wahab M. (eds) Proceedings of the 7th International Conference on Fracture Fatigue and Wear. FFW-2018.Book ID: 459769_1_En., Chapter No: 57, Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore, 2019, pp. 628–637. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0411-8_57.

27. 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. —P. —81–90.

28. 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 LLC: Volume 54, Nos. 1–2, May, 2015, pp. 119–127, <https://doi.org/10.1007/s11106-015-9688-5>.

29. Роик Т.А., Гавриш А.П., Киричок П.А., Вицюк Ю.Ю. Влияние вторичных структур на функциональные свойства спеченных высокоскоростных подшипников полиграфических машин//Порошковая металлургия. —№1/2, 2015. — С. 146–158.

30. Roik T., Gavrish A., Kyrychok P., Vitsuk Yu., Askerov M. Physical Mechanical And Tribotechnical Properties Of New Composite Bearings For Printing

Equipment//Journal of Science of the Gen. Tadeusz Kościuszko Military Academy of Land Forces, Wroclaw, Poland.-№2(172), 2014.-P.P. 141-149.

31. Гавриш А. П., Киричок П. О., 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.<https://ela.kpi.ua/handle/123456789/42300>

32. Гавриш А. П., Роїк Т. А., Гавриш О. А., Киричок П. О., Віцюк Ю. Ю., Олійник В. Г. Шліфування і доводка зносостійких антифрикційних композитних деталей друкарських машин: Монографія.-ч. 3.- К.: Видавничий дім „АртЕк”, 2021.–202с., ISBN 978-617-7814-80-0.<https://ela.kpi.ua/handle/123456789/41909>

33. Scientific foundations of solving engineering tasks and problems: collective monograph /Demchyna B., Vozniuk L., Surmai M., Hladyshev D., Babyak V.– etc. –International Science Group. – Boston: PrimediaeLaunch, USA,2021. 758 p., Chapter “Mechanical Engineering And Mechanical Engineering”. Roik T., Gavrysh O., Gavrysh Ju. Surfaces’ roughness of composite bearings based on grinding waste for printing machines units at fine cubonite grinding, International Science Group. – Boston : Primediae Launch, USA, 2021 p.p. 565–576, Library of Congress Cataloging-in-Publication Data ISBN - 978-1-63848-664-0, DOI 10.46299/ISG.2021.MONO.TECH.II.URL: <https://isg-konf.com>. <https://isg-konf.com/uk/scientific-foundations-of-solving-engineering-tasks-and-problems-technical-sciences-ua/>

34. Findings of modern engineering research and developments: Scientific monograph. Riga, Latvia: «Baltija Publishing», 2022. 554 p./T. A. Roik, O. A. Gavrysh, Iu. Iu. Vitsiuk. Modeling of the composite parts’ surface microrelief for printing equipment after magnetic abrasive processing. Edition: Riga, Latvia: «Baltija Publishing», Published: May 9, 2022, pp. 413–436. <http://baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/book/217>, <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-207-4-15>

35. Гавриш А. П. Фінішна алмазно-абразивна обробка магнітних матеріалів: Монографія /А. П. Гавриш, П. П. Мельничук: Житомир: Житомир. держ. технол. ун-т., 2004. – 551 с. ISBN 966-683-069-8, http://www.ukrbook.net/litopys/Knigki/2005/Lk_9_05.pdf

36. Гавриш О. А., Віщук Ю. Ю., Роїк Т. А., Гавриш А. П., Войтко С. В. Новітні технології виробництва стандартизованих виробів: Монографія. -К.: НТУУ „КПІ”.-2012.-204 с.

37. 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.

38. Powder Metallurgy: The Materials International Society, Editor: Prasan K. Samal and Joseph W. Newkirk, ASM Handbook, Vol. 7, New York, USA, ISBN: 978-1-62708-089-3, 907 (2015). https://www.asminternational.org/search/-/journal_content/56/10192/23412238/PUBLICATION.

39. Jamroziak K., Roik T. New Antifriction Composite Materials Based On Tool Steel Grinding Waste//WIT Transaction on Engineering Sciences, Edited By: S. Hernández, University of A Coruña, Spain; J. De Hosson, University of Groningen, Netherlands; D.O. Northwood, University of Windsor, Canada; R. Vilar, Lisbon University, Portugal, 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 (on-line), pp. 151-159. DOI: [10.2495/MC190151](https://doi.org/10.2495/MC190151), <https://www.witpress.com/books/978-1-78466-331-5>, <https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-engineering-sciences/124/37197>.

40. Роїк Т. А., Гавриш О. А., Віщук Ю. Ю. Особливості формування триботехнічних властивостей композиційних матеріалів на основі

шліфувальних відходів конструкційної сталі ШХ15СГ// Порошковая металлургия.- №7/8.- 2019.- С. 88-97.<http://www.materials.kiev.ua/article/2861>.

41. Roik T., Gavrysh O., Vitsiuk Iu. 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, DOI10.1007/s11106-019-00093w, First Online: 05 December 2019. <http://link.springer.com/article/10.1007/s11106-019-00093-w>.

42. 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. DOI: 0.36910/6775.24153966.2019.68.12, https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/naukovi_notatky/article/view/254/238

43. 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. DOI:10.20535/kpi-sn.2020.1.189200, <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/40363>

44. Роїк Т. А., Віцюк Ю. Ю., Хмілярчук О. І. Особливості структуроутворення і властивості композиційних антифрикційних матеріалів для поліграфічних машин на основі утилізованих відходів// Наукові Вісті КПП ім. Ігоря Сікорського.— № 5, 2018.— С. 50–57, <http://bulletin.kpi.ua/article/view/146165>, DOI: <https://doi.org/10.20535/1810-0546.2018.5.146165>

45. Патент України № 30377 МПК (2006), С22С33/02 Порошковий антифрикційний матеріал на основі швидкорізальної сталі/ Т.А.Роїк, А.П.Гавриш, В.В.Холявко, Б.П. Зора, опубл. 25.02.08, Бюл.№ 4.

46. Патент України № 41532 МПК (2009), С22С33/02. Підшипниковий композиційний матеріал/ Т.А. Роїк, А.П. Гавриш, О.А. Гавриш, Ю.Ю. Віцюк, В.В. Холявко, О.О. Мельник, О.С. Луфепенко, опубл. 25.05.2009, Бюл. № 10.

47. Патент України № 60522, МПК (2011.01) C22C33/02. Підшипниковий композиційний матеріал на основі інструментальної сталі / Роїк Т. А, Гавриш А. П., Киричок П.О., Гавриш О.А., Віцюк Ю.Ю., Мельник О. О. опубл. 25.06.2011, Бюл. № 12.

48. Патент України №102299, МПК C22C33/02 (2006.01), C22C38/22(2006.01), C22C38/24 (2006.01), C22C38/38 (2006.01). Антифрикційний композиційний матеріал на основі інструментальної сталі / Роїк Т. А, Гавриш А. П., Гавриш О.А., Киричок П.О., Віцюк Ю.Ю., Мельник О. О., Подрезов Ю.М., Замулко С.О., Зора Б.П.—заявка а201113514 від 16.11.2011.—опубл. 25.06.2013, Бюл. №12.

49. Патент України № 128694, МПК (2018.01) C22C33/02 Антифрикційний композиційний матеріал на основі інструментальної легованої сталі / Т. А. Роїк, Ю. Ю. Віцюк, О. А. Гавриш. – заявка u201713010 від 28.12.2017. –опубл. 10.10.2018, Бюл. №19.

50. Tetiana Roik, Ahmad Rashedi, Taslima Khanam, Abhay Chaubey, Gurusami Balaganesan, Sadaqat Ali. Structure and properties of new antifriction composites based on tool steel grinding waste//Journal «Sustainability» MDPI Open Access Publishing, 2021, Volume 13, Issue 16, No 8823, pp. 1-10, published 6th August 2021, Basel, Switzerland, ISSN 2071-1050,<https://doi.org/10.3390/su13168823>, <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/16/8823/pdf>

51. Tetiana Roik; Oleg Gavrysh; Ahmad Rashedi; Taslima Khanam; Ali Raza; Byongug Jeong. New Antifriction Composites Based on Tool Steel Grinding Waste for Units of Printing Machines' Offset Cylinders//MDPI Journal "Sustainability", Section "Sustainable Materials", Special Issue "Materials for Sustainability", Vol. 14, Issue 5, 27.02.2022, pp.1-11, Website online, Sustainability 2022, 14, 2799, DOI:10.3390/su14052799, <https://doi.org/10.3390/su14052799>, https://susy.mdpi.com/user/manuscripts/review_info/7f7f50a30d5ba6343ff4b07d8cae5382,

52. Роїк Т. А., Гавриш О. А., Віцюк Ю. Ю. Структурні особливості та властивості антифрикційних композитів на основі відходів сталі Р6АМ5 для деталей поліграфічного обладнання// Порошкова металургія.- 2022.- № 5/6.- С. 26-37. <http://www.materials.kiev.ua/edition/1>, ISSN 1068-1302. <http://www.wkap.nl/journalhome.htm/1068-1302> .

53. Roik T. A., Gavrysh O. A., Vitsiuk Iu. Iu. Structural Features and Properties of Antifriction Composites Produced from R6AM5 Steel Waste for Printing Equipment Parts// Powder Metallurgy and Metal Ceramics, (2022), Springer Science + Business Media, LLC, Springer Nature 2022. New York: Volume 61, Nos. 5-6, pp. 278-286. DOI 10.1007/s11106-022-00315-8, <https://link.springer.com/article/10.1007/s11106-022-00315-8> https://trebuchet.public.springernature.app/get_content/cd9f8616-c76a-4593-b89b-eb875b8a1d4a

54. Патент України № 151985 МПК C22C 33/02 (2006.01) C22C 38/22 (2006.01) C22C 38/24 (2006.01) C22C 38/04 (2006.01) Спосіб отримання антифрикційного композиту на основі шліфувальних відходів швидкорізальної сталі/Т. А. Роїк, О. А. Гавриш, Ю. Ю.Віцюк— Заявка № u202106574 від 22.11.2021 – опубл. 12.10.2022, Бюл.№41.

55. Роїк Т.А., Холявко В.В., Луференко О.С. Вплив легувальних елементів на формування структури і властивостей композиційних підшипникових матеріалів на основі відходів сталі 11РЗМЗФ2// Наукові Вісті НТУУ «КПІ» – частина 1.- Технологічні фактори одержання матеріалів і їх вплив на структуру.- №3.- 2009.-С. 47-52.

56. Роїк Т.А., Холявко В.В., Луференко О.С. Вплив легувальних елементів на формування структури і властивостей композиційних підшипникових матеріалів на основі відходів сталі 11РЗМЗФ2// Наукові Вісті НТУУ «КПІ» – частина 2.- Фазовий склад, структура і властивості матеріалів.-№4.- 2009.-С. 72-78.

57. Роїк Т.А., Віцюк Ю.Ю., Гавриш А.П., Мельник О.О., Зора Б.П., Дорфман І.Є. Комп'ютерне моделювання вибору оптимальних режимів

пресування підшипникових матеріалів на основі відходів інструментальних сталей для поліграфічних машин// Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». – Луцьк, 2011.- Вип. 32.-С. 344-349.

58. Гавриш А. П., Роїк Т. А., Киричок П. О., Віцюк Ю. Ю., Хмільчук О. І., Мельник О.О. Вибір режимів експлуатації підшипникових матеріалів з відходів швидкорізальних сталей на основі аналізу плівок тертя // Наукові Вісті НТУУ «КПІ». - №2.- 2011.- С. 100-107.

59. Роїк Т. А., Гавриш А.П., Киричок П.О., Віцюк Ю.Ю., Мельник О.О., Холявко В.В. Принципи одержання композиційних зносостійких матеріалів на основі відходів інструментального виробництва/Международ. сб. науч. трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения». – Донецк: ДонНТУ, 2012. – Вып. 1,2 (43) . – С. 261-265.

60. Гавриш А.П., Роїк Т.А., Віцюк Ю.Ю., Мельник О.О., Холявко В.В. Формування властивостей композитних підшипників на основі відходів легованої сталі для друкарських машин/Международ. Сб. науч.трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения». – Донецк: ДонНТУ, 2012. – Вып.1,2 (44). – С. 51-57.

61. Vinoth M., Aswathy M. S. Environmental effects of using copper mine tailings in various geotechnical applications. Waste and Resource Management, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Volume 175, Issue 3, 2022. pp. 84–96, Published online: February 2, 2022, <https://doi.org/10.1680/jwarm.21.00021>

62. Recycling Today (RT). Media Group Magazines and E-Newsletters, 2022, GIE Media, Inc., Ohio, USA, <https://www.recyclingtoday.com/page/about/>

63. Advanced Recycling Conference. Conference Journal, 14–15 November 2022, Cologne, Germany (hybrid event), <https://advanced-recycling.eu/>, https://advanced-recycling.eu/wp-content/uploads/2022/11/11_ARC-Journal-2022.pdf].

64. Roik, T, Gavrish O. Oliynik, V. Vitsiuk, I. Analysis of the properties of antifriction composites based on aluminum alloy's grinding waste//Eastern-

European Journal of Enterprise Technologies, Volume 4, Issue 12(94), 2018, Pages 16-22. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.140984>

65. Roik T., Gavrish A., Kyrychok P., Vitsuk Yu., Dorfman I. Operating properties of composite antifriction materials on the base of aluminium alloys wastes for printing equipment//Challenges of modern technologies.- Warsaw University of Technology, Warsaw, Poland. -Vol. 4 (№3), 2013.- P. 23-27.

66. Roik T. A., Vitsiuk Iu. Iu., Khmiliarchuk O. I., Oliynyk V. G. Applying aluminium alloys grinding waste for manufacturing effective composite antifriction parts of printing equipment/Наукові нотатки, Луцьк: ЛНТУ. –Вип. № 59, 2017. – С. 227–231.

https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/naukovi_notatky/issue/view/44/50

67. Roik T., Vitsiuk Iu. Using of composite materials for friction parts of printing equipment// Металознавство та обробка металів. - № 1.- 2017.- С. 33-38.

68. Патент України № 34407, МПК (2006), C22C21/02. Композиційний підшипниковий матеріал на основі алюмінію/Т. А. Роїк, А. П. Гавриш, О. А. Гавриш, В. В. Холявко, О. М. Прохоренко опубл.11.08.08, Бюл.№15.

69. Патент України №128695, МПК (2018.01) C22C21/02 Композиційний зносостійкий матеріал на основі алюмінію/Т. А. Роїк, Ю. Ю. Віщук. – заявка u201713011 від 28.12.2017. –опубл. 10.10.2018, Бюл. №19.

70. Роик Т. А., Гавриш О. А., Вищук Ю. Ю. Закономерности формирования функциональных свойств композиционных антифрикционных материалов на основе шлифовальных отходов силумина//Порошковая металлургия, № 9/10, 2018.- С. 37–46. <http://www.materials.kiev.ua/article/2651>

71. 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 + BusinessMedia, 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>.

72. Роїк Т.А., Гавриш А.П., Віцюк Ю.Ю. Періодичність структури та властивості антифрикційних композиційних матеріалів на основі відходів силуміну АК12ММгН// Металознавство та обробка металів. - №1.- 2010.- С.24-27.
73. Роїк Т.А., Дорфман І.Є. Розробка технологічних режимів виготовлення підшипникових антифрикційних деталей для поліграфічної техніки/Международ. сб.науч.трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения». – Донецк: ДонНТУ, 2012. Вып.1,2 (44). – С. 219-225.
74. Богуслаев В. О. Основы технологии машинобдудования: навч. посіб./ В. О. Богуслаев, В. І. Ципак, В. К. Яценко. – Запоріжжя : Мотор Січ, 2003. – 335 с.
75. Основы теории ризання матеріалів/ Мазур М. П. та ін.; за ред. М. П. Мазура. 3-е вид. перероб. і доп. Львів: Новий Світ, 2000, 2020. 471 с. ISBN 978-966-418-105-8. URL: <http://ns2000.com.ua/wp-content/uploads/2019/11/Osnovy-teorii-rizan.mater.pdf.ii>
76. Гавриш А. П. Алмазно-абразивна обробка магнітних матеріалів : монографія/ А. П. Гавриш, П. П. Мельничук. – Житомир : ЖДТУ, 2003. – 652 с.
77. Балакшин Б. С. Теория и практика технологии машиностроения / Б. С. Балакшин. – М. Машиностроение, 1982. – Т. 1. – 240 с.
78. Колесов И. М. Основы технологии машиностроения: Учебник / И. М. Колесов. – 2 –е изд., испр. – М.: Высшая школа, 1999. – 559 с.
79. Маталин А. А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин / А. А. Маталин. – К.: Техніка, 1985. – 496 с.
80. Рыжов Э. В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин / Э. В. Рыжов. – К.: Наукова думка, 1984. – 340 с.
81. Якубов Ф. Я. Структурно-энергетические аспекты упрочнения и повышения стойкости режущего инструмента / Ф. Я Якубов. – Симферополь: Крымиздат, 2005. – 300 с.
82. Гавриш А. П. Шлифование и доводка /А. П. Гавриш. – Л.: Машиностроение, 1985. – 118 с.

83. Схиртладзе А. Г. Технологическое оборудование машиностроительных производств / А. Г. Схиртладзе, В. Ю. Новиков, Ю. И. Тулаев. – М.: МГТУ «Станкин», 1997. – Ч. 1. – 311 с.

84. Схиртладзе А. Г. Станочное оборудование машиностроительного производства / А. Г. Схиртладзе, В. Ю. Новиков, А. И. Тананин. – Ижевск: Изд. УдГТУ, 1994. – 300 с.

85. Новиков М. В. Абразивні матеріали //Енциклопедія Сучасної України: електрон. версія [веб-сайт]/гол. ред.: І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк та ін.; ІНМ НАН України, НТШ. Київ: Інститут енциклопед. досл. НАН України, 2006. URL: http://esu.com.ua/search_articles.php?id=42203.

86. Инструменты из сверхтвердых материалов/ под. ред. Н. В. Новикова и С. А. Клименко. — Изд. 2-е, перераб. и доп.—М.: Машиностроение, 2014. 608с. ISBN 978-5-94275-703-8. URL: <https://docplayer.ru/40252931-Instrumenty-iz-sverhtverdyh-materialov.html>.

87. Гавриш О. А., Гавриш А. П., Роїк Т. А., Віцюк Ю. Ю. Аналіз температурного поля при тонкому кубонітовому шліфуванні деталей з високолегованих композитів для жорстких умов експлуатації//Вісник Житомирського Державного технологічного університету.-№4 (67), 2013.- С.12-16.

88. Гавриш А. П., Роїк Т. А., Киричок П. О., Мельник О. О., Віцюк Ю. Ю. Вплив фізико-механічних властивостей абразивних матеріалів на процес шліфування високолегованих композитів для поліграфічних машин/Технологія і техніка друкарства.-№3 (49).-2015.-С. 80-91. DOI: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.3\(49\).2015.54886](https://doi.org/10.20535/2077-7264.3(49).2015.54886)

89. 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.

90. 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 КП», №5(109).- 2016.- С. 54-61.
<https://kpi.ua/nv-abstract-16-5>

91. 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 «КП».-№1.-2016.-С. 77-83.

92. Роїк Т. А., Киричок П. О., Хлус О. С., Гавриш А. П. Температурне поле підшипників ковзання поліграфічних машин з високозносостійких композитів на основі інструментальних сталей і нікелю за умов тонкого абразивного шліфування поверхонь тертя //Технологія і техніка друкарства.- №2(52).- 2016.- С. 51-68. DOI: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.2\(52\).2016.77638](https://doi.org/10.20535/2077-7264.2(52).2016.77638)

93. Роїк Т. А., Гавриш О. А., Віцюк Ю. Ю., Бровкин А. О. Підвищення якості робочих поверхонь самозмащувальних композитних деталей друкарської техніки тонким ельборовим шліфуванням//Технологія і техніка друкарства. – К. : ВПІ КПІ ім. Ігоря Сікорського.- №4 (74).- 2021.- С. 63-78.
<http://ttdruk.vpi.kpi.ua/article/view/253914/258520>

94. Роїк Т. А., Гавриш О. А., Віцюк Ю. Ю., Бровкин А. О. Параметри наклепу поверхонь антифрикційних композитних деталей тертя друкарських машин при фінішному кубонітовому шліфуванні//Технологія і техніка друкарства. – К.: НН ВПІ КПІ ім. Ігоря Сікорського.- №2 (76).- 2022.- С. 22-36.
<http://ttdruk.vpi.kpi.ua/article/view/267425/265122>

95. Роїк Т. А., Бровкин А. О., Шостачук О. П. Вплив режимів тонкого ельборового шліфування на шорсткість поверхонь самозмащувальних композитних деталей для друкарської техніки//Технологія і техніка друкарства. – К. : ВПІ КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2021. – № 1(71). – С. 51-61. DOI: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.1\(71\).2021.238995](https://doi.org/10.20535/2077-7264.1(71).2021.238995)

96. Гавриш А. П., Мельник О. О., Роїк Т. А., Аскеров М. Г., Гавриш О. А. Нові технології фінішного оброблення композиційних підшипників ковзання для жорстких умов експлуатації: Монографія. - К.: НТУУ „КПІ”, 2012.- 196 с.

https://scholar.google.com.ua/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=RhLFfMwAAAAJ&citation_for_view=RhLFfMwAAAAJ:u5HHmVD_uO8C

97. Зозуля В.Д. Смазки для спеченных самосмазывающихся подшипников. – К.: Наукова думка, 1976. – 191 с.

98. Powder Metallurgy: The Materials International Society, Editor: Edited by Katsuyoshi Kondoh Published by InTech Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia, First published February, 2012, 132 p. ISBN 978-953-51-0071-3. http://www.issp.ac.ru/ebooks/books/open/Powder_Metallurgy.pdf.

99. Colin H. Simmons, Neil Phelps, Dennis E. Maguire. Manual of Engineering Drawing (Fourth Edition). Chapter 35–Bearings and Applied Technology. 2012. Elsevier Ltd., pp. 315–330. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096652-6.00035-8>.

100. Self-Lubricating Composites. Monograph. Springer Nature (2018). Editors: Menezes, Pradeep L., Rohatgi, Pradeep K., Omrani, Emad (Eds.). Zhang, Yinyin (et al.), 2018, 288 p. Chapter. “Tribology of Self-Lubricating Metal Matrix Composites”, pp. 33–73. 2018. ISBN 978-3-662-56528-5. <https://www.springer.com/gp/book/9783662565278>.

101. Jianxin, D.; Tongkun, C. Self-lubricant mechanisms via the in situ formed tribofilm of sintered ceramics with CaF₂ additions when sliding against hardened steel. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2007, 25, 189–197.

102. Material and powder properties. Höganäs Handbook for Sintered Components. Höganäs AB laboratory. December 2013, 0674HOG Sweden, 113 p. www.hoganas.com/pmc.

103. Попович В. В. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство: підручник для студ. вищ. навч. закл. /В. В. Попович, В. В. Попович. –Львів: Світ, 2006. – 624 с. – ISBN 966-603-452-2.

104. Roik T. Self-lubricating mechanism of new copper-based composite//5th International Conference on Materials Science & Nanotechnology, online, Oct 06 - 08, 2022, London, UK (Hybrid Event), Innovinc International, <https://materials-science.org/> <https://materials-science.org/administrative/includes/uploads/documents/1664173051.pdf>

105. T. A. Roik, Shevchuk Yu. F. Development of predictable secondary structures in materials for high-temperature bearings//Powder Metallurgy and Metal Ceramics, Springer Science+Business Media, Inc., November 2006, Volume 45, Issue 11, pp. 531-539, <https://doi.org/10.1007/s11106-006-0116-8>.

106. Теорія електромагнітного поля: навч. посіб./під ред. І. Болеста. – Львів: ЛНУ ім. І. Франка, 2013. – 478 с.

107. Смирнягин А. П. Промышленные цветные металлы и сплавы/А. П. Смирнягин. – М: Металлургия, 1974. –246 с.

108. Білоцький О. В. Високотемпературна рентгенографія фазових перетворень у металевих матеріалах/О. В. Білоцький. – НТУУ «КПІ», 2012. – 222 с.

109. Roik T., Brovkyn A., Dubolazov A. Analysis of the parts' roughness parameters of high-speed printing equipment by optical profilometry.-Proceeding SPIE 12126, Fifteenth International Conference on Correlation Optics, Vol. 12126, 1212617 (Chernivtsi, 21 December 2021); doi: 10.1117/12.2615584;<https://doi.org/10.1117/12.2615584>

110. Гавриш А.П., Роїк Т.А., Мельник О.О., Віцюк Ю.Ю. Залежність якості поверхонь високотемпературних підшипників ковзання на основі нікелю від методів магнітно-абразивної обробки // Сучасні технології в машинобудуванні: Зб. Наук. праць. - Вип.2.- Харків: НТУ «ХПІ»,2008,- С.123-134.

111. Гавриш А.П., Роїк Т.А., Віцюк Ю.Ю., Мельник О.О., Холявко В.В. Структура поверхневих шарів та антифрикційність високотемпературних підшипникових матеріалів на основі нікелю в залежності від умов експлуатації-// Междунар. сб.науч.трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения». – Донецк: ДонНТУ, 2009. – Вып.38 . – С.45-50.

112. Гавриш А.П. , Роїк Т.А. , Киричок П.О. , Віцюк Ю.Ю. , Хмілярчук О.І. , Мельник О.О., Холявко В.В. Особливості технології виготовлення та фінішної прецизійної обробки підшипникових матеріалів на основі відходів швидкорізальних сталей/ Наукові Вісті НТУУ «КПІ». - №1.- 2011.- С. 97-108.

113. Гавриш А.П., Роїк Т.А., Мельник О.О., Віцюк Ю.Ю. Підвищення якості та експлуатаційних властивостей підшипників ковзання/Науковий Вісник Національного гірничого університету. Тематичний випуск. - Дніпропетровськ: Державний ВНЗ «НГУ», 2011.- С. 101-106.

114. Гавриш А.П., Роїк Т.А., Мельник О.О., Віцюк Ю.Ю. Якість робочих поверхонь композитних підшипників при магнітно-абразивному обробленні// Вісник Національного університету „Львівська політехніка. - Львів: Вид-во Львівської політехніки. - №713, 2011.– С. 149-154.<https://vlp.com.ua/node/8146>

115. Гавриш А.П., Роїк Т.А., Мельник О.О., Віцюк Ю.Ю. Вплив технології фінішного магнітно-абразивного оброблення композитних підшипників з високолегованих матеріалів на якість їх робочих поверхонь // Технологічні комплекси. – Вид-во Луцького національного технічного університету. - №2 (4), 2011.- С.99-106.

116. Гавриш А.П., Шевчук А.В., Роїк Т.А., Ковальов В.А., Віцюк Ю.Ю., Вплив абразивного інструменту на шорсткість поверхонь композитних підшипників поліграфічної техніки при тонкому шліфуванні// Технологія і техніка друкарства. - №3 (37).-2012.- С. 119-127.

117. Гавриш А.П., Киричок П.О., Роїк Т.А., Віцюк Ю.Ю. Аналіз параметрів якості поверхонь підшипників ковзання з композиційних сплавів для друкарських машин при абразивному шліфуванні//Наукові Вісті НТУУ «КПІ».- 2013.-№1.-С. 63-67.http://nbuv.gov.ua/UJRN/NVKPI_2013_1_11

118. Гавриш А.П., Роїк Т.А., Киричок П.О., Віцюк Ю.Ю. Вплив мастильно-охолоджуючих рідин на якість поверхонь деталей тертя друкарських машин з композиційних сплавів при тонкому абразивному шліфуванні// Наукові нотатки.-2013.-Вип.42.-С. 67-74.

119. Гавриш А.П., Шевчук А.В., Роїк Т.А., Ковальов В.А.,Віцюк Ю.Ю. Вплив абразивного інструменту на шорсткість поверхонь композитних підшипників поліграфічної техніки при тонкому шліфуванні// Технологія і техніка друкарства. - №3.-2012.- С.119-127.

120. Гавриш А.П., Киричок П.О., Роїк Т.А., Віцюк Ю.Ю. Вплив технологічних факторів хонінгування на параметри шорсткості і точності поверхонь композитних підшипників ковзання поліграфічних машин//Международ. сб. науч. трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения». – Донецк: ДонНТУ, 2013. – Вып. 1,2 (46). – С. 56-64.

121. Гавриш А.П., Киричок П.О., Роїк Т.А., Віцюк Ю.Ю. Аналіз параметрів якості поверхонь підшипників ковзання з композиційних сплавів для друкарських машин при абразивному шліфуванні//Наукові Вісті НТУУ «КПІ».- 2013.-№1.-С. 63-67.http://nbuv.gov.ua/UJRN/NVKPI_2013_1_11

122. Гавриш А.П., Роїк Т.А., Киричок П.О., Віцюк Ю.Ю. Вплив мастильно-охолоджуючих рідин на якість поверхонь деталей тертя друкарських машин з композиційних сплавів при тонкому абразивному шліфуванні// Наукові нотатки.-2013.-Вип.42.-С. 67-74.

123. Гавриш А.П., Шевчук А.В., Роїк Т.А., Ковальов В.А., Віцюк Ю.Ю. Вплив абразивного інструменту на шорсткість поверхонь композитних підшипників поліграфічної техніки при тонкому шліфуванні// Технологія і техніка друкарства. - №3.-2012.- С.119-127.

124. Гавриш А.П., Киричок П.О., Роїк Т.А., Віцюк Ю.Ю. Вплив технологічних факторів хонінгування на параметри шорсткості і точності поверхонь композитних підшипників ковзання поліграфічних машин//Международ. сб. науч. трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения». – Донецк: ДонНТУ, 2013. – Вып. 1,2 (46). – С. 56-64.

125. Гавриш А., Роїк Т., Віцюк Ю.Ю. Вплив режимів абразивного суперфінішування на якість поверхонь обертання композитних деталей тертя поліграфічних машин//Машинознавство. -№7-8.- 2013.-С.32-38.

126. Гавриш А.П., Киричок П.О., Роїк Т.А., Віцюк Ю.Ю. Вплив технологічних факторів алмазного хонінгування на параметри шорсткості і точності поверхонь композитних підшипників ковзання поліграфічних машин//Наукові Вісті НТУУ «КПІ».-№5.-2014.-С. 70-75.

127. Гавриш А.П., Роїк Т.А., Киричок П.О., Віцюк Ю.Ю., Олійник В.Г. Дослідження параметрів якості поверхонь швидкісних підшипників ковзання з композитних матеріалів для поліграфічних машин при алмазному шліфуванні//Наукові Вісті НТУУ «КПІ».-№6.-2014.-С. – 88-93.

128. Гавриш А.П., Роїк Т. А., Мельник О.О., Віцюк Ю.Ю. Вплив алмазного суперфінішування на якість поверхонь деталей зі зносостійких композитів на основі алюмінію// Наукові Вісті НТУУ «КПІ».-№1.-2015.-С. – 58-65.

129. Гавриш А. П., Роїк Т. А., Лотоцька О. І., Віцюк Ю. Ю. Мікрогеометрія поверхні та стан поверхневого шару зносостійких деталей тертя з високолегованих композитів за умови абразивного суперфінішування// Наукові Вісті НТУУ «КПІ».-№ 5, 2015.- С. 81-88.

130. 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 деталей поліграфічних машин//Наукові Вісті НТУУ «КПІ».-№2.-2016.-С.77-87.

131. 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.
<https://kpi.ua/nv-abstract-16-5>

132. Роїк Т. А., Киричок П. О., Гавриш А. П., Хлус О. С. Поліпшення якості поверхонь отворів зносостійких композитних підшипників ковзання поліграфічних машин врахуванням динамічних коливань системи «верстат-пристрій-інструмент-деталь» за умов тонкого абразивного шліфування//Технологія і техніка друкарства.- №1 (51).-2016.- С. 85-104.

133. Роїк Т.А. Параметри наклепу при шліфуванні поверхонь підшипників ковзання з антифрикційних порошкових матеріалів // Сучасні

технології у машинобудуванні: зб. наук. статей. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2006. – Т. 2. – С. 423-429.

134. Гавриш А.П., Роїк Т.А., Гавриш О.А. Вплив оздоблювально-зміцнюючої термомеханічної обробки на параметри наклепу поверхневих шарів деталей // Международ. Сб.науч. трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения».- Донецк: ДонНТУ, 2007.- Вып.34.- С.53-58.

135. Гавриш А., Роїк Т., Киричок П., Віцюк Ю., Олійник В. Аналіз параметрів наклепу поверхонь деталей тертя високошвидкісних машин при тонкому кубонітовому шліфуванні//Вісник Тернопільського технічного університету. - №1 (73), 2014. – С.118-127. <https://visnyk.tntu.edu.ua/?art=246>

136. 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. <https://kpi.ua/nv-abstract-16-5>

137. Патент України № 40050 МПК(2006), G11B5/127 Спосіб надтонкої абразивної обробки циліндричних поверхонь деталей з нікелевих сплавів/ А. П. Гавриш, Т. А. Роїк, О. О. Мельник, Ю. Ю.Віцюк, О. А. Гавриш.- опубл. 25.03.2009, Бюл. № 6.

138. Патент України № 39728, МПК(2006), G11B5/127 Спосіб прецизійної абразивної обробки плоских поверхонь деталей з нікелевих сплавів/А. П. Гавриш, Т. А. Роїк, О. О. Мельник, Ю. Ю.Віцюк, О. А. Гавриш.- опубл. 10.03.2009, Бюл. № 5.

139. Патент України № 39731, МПК(2006), G11B5/127 Спосіб фінішної абразивної обробки зовнішніх профільних поверхонь деталей з нікелевих сплавів/А. П. Гавриш, Т. А. Роїк, О. О. Мельник, Ю. Ю.Віцюк, О. А. Гавриш.- опубл. 10.03.2009, Бюл. № 5.

140. Патент України № 48385, МПК(2009), G11B5/127 Спосіб фінішної магнітно-абразивної обробки поверхонь отворів підшипників ковзання з

високолегованих композитів/А. П. Гавриш, Т. А. Роїк, О. О. Мельник, Ю. Ю. Віцюк, О. А. Гавриш. - опубл. 10.03.2010, Бюл. № 5.

141. Патент України № 60525, МПК G11B5/127 (2011.01). Спосіб фінішної обробки поверхонь циліндричних отворів підшипників ковзання з високолегованих композитів/А. П. Гавриш, Т. А. Роїк, П. О. Киричок, О. А. Гавриш, О. О. Мельник, Ю. Ю. Віцюк, Д. В.Острик, А. С. Макаров. - опубл. 25.06.2011, Бюл. № 12.

142. Патент України № 60523, МПК G11B5/127 (2011.01). Спосіб фінішної магнітно-абразивної обробки поверхонь циліндричних отворів деталей з високолегованих сплавів на основі нікелю/А. П. Гавриш, Т. А. Роїк, П. О. Киричок, О. А. Гавриш, О. О. Мельник, Ю. Ю. Віцюк, Д. В.Острик, А. С. Макаров.-опубл. 25.06.2011, Бюл. № 12.

143. Патент України № 77356, МПК (2013.01) G11B5/127 Спосіб фінішної прецизійної оздоблювальної обробки отворів деталей обертання з високолегованих композитів/ А. П. Гавриш, Т. А. Роїк, О. О. Мельник, Ю. Ю. Віцюк, О. А. Гавриш. – опубл. 11.02.2013, Бюл. № 3.

144. Патент України № 81849, МПК (2013.01) G11B5/127 Спосіб тонкої абразивної обробки циліндричних отворів деталей обертання з високолегованих композитів/А. П. Гавриш, Т. А. Роїк, П. О. Киричок, О. О. Мельник, Ю. Ю. Віцюк, О. А. Гавриш. –опубл.10.07.2013, Бюл. № 13.

145. Патент України №81816, МПК (2013.01) G11B5/127 Мастильно – охолоджуюча рідина для абразивної обробки підшипників ковзання з високолегованих композиційних сплавів/А. П. Гавриш, Т. А. Роїк, П. О. Киричок, Ю. Ю. Віцюк, О. А. Гавриш. - опубл. 10.07.2013, Бюл. № 13.

146. 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.

147. 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.

148. 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.

149. 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.

150. Патент України №87073, МПК (2014.01) G11B 5/127 Спосіб абразивного хонінгування отворів підшипників ковзання зі складнолегованих композитних сплавів/А. П. Гавриш, Т. А. Роїк, П. О. Киричок, Ю. Ю. Віцюк, О. А. Гавриш. - заявка u201307483. - опубл. 27.01.2014, Бюл.№2.

151. Патент України №87128, МПК (2014.01) B24B 1/00, B24B 5/20 Спосіб надтонкої абразивної обробки суперфінішуванням зовнішніх циліндричних поверхонь деталей обертання поліграфічної техніки з високолегованих композитних сплавів на основі заліза/А. П. Гавриш, Т. А. Роїк, П. О. Киричок, Ю. Ю. Віцюк, О. А. Гавриш.— опубл. 27.01.2014, Бюл.№2.

152. Патент України № 91220, МПК (2014.01)B24B1/00, B24B55/00 Спосіб прецизійного оброблення поверхонь отворів деталей тертя з композитних сплавів на основі алюмінію/А. П. Гавриш, Т. А. Роїк, П. О. Киричок, Ю. Ю. Віцюк, О. А. Гавриш, І. Є. Дорфман.- Заявка u2014 00775. - опубл. 25.06.2014, Бюл.№12.

153. 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.

154. 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.

155. Патент України № 97575, МПК (2015.01)B24B1/00, B24B55/00 Спосіб тонкого алмазного оброблення прецизійних плоских поверхонь деталей друкарських машин зі зносостійких композиційних сплавів на основі алюмінію/ А. П. Гавриш, Т. А. Роїк, П. О. Киричок, О. О. Мельник, В. Б. Фіранський, Ю. Ю. Віцюк. - опубл. 25.03.2015, Бюл. №6.

156. Патент України № 98918, МПК (2015.01)B24B1/00, B24B55/00 Спосіб прецизійної алмазної обробки отворів підшипників ковзання зі зносостійких композитів на основі алюмінію для поліграфічних машин / А.П. Гавриш, Т. А. Роїк, П. О. Киричок, О. О. Мельник, В. Б. Фіранський, Ю. Ю. Віцюк. - опубл. 12.05.2015, Бюл. №9.

157. Патент України № 102007 МПК (2015.01) B24B1/00, B24B 55/00 Спосіб полірування кубонітовою стрічкою поверхонь деталей зі зносостійких композитів на основі високолегованих інструментальних сталей для поліграфічної техніки/А. П. Гавриш, Т. А. Роїк, О. С. Хлус, П. О.Киричок, О. А. Гавриш.- опубл. 12.10.2015, Бюл. № 19.

158. Патент України МПК №104313 (2016.01) B24B 11/00, B24B 55/00. Спосіб лазерного вимірювання глибини наклепу поверхонь тертя деталей з високозносостійких композитів на основі нікелю та інструментальних сталей /А. П. Гавриш, Т. А. Роїк, О. С. Хлус, О. А. Гавриш, Ю. Ю. Віцюк— опубл. 25.01.2016, Бюл. №2.

159. Патент України № 104869, МПК (2016.01)B24B1/00, B24B55/100 Спосіб хонінгування отворів деталей тертя з високолегованих композитних матеріалів на основі нікелю /А. П. Гавриш, Т. А. Роїк, Р. А. Хохлова, О. А. Гавриш.—опубл. 25.02.2016, Бюл. №4.

160. Патент України № 104870, МПК (2016.01)B24B1/00, B24B55/100
Спосіб алмазного хонінгування отворів деталей тертя з високолегованих композитних матеріалів на основі нікелю з використанням ультразвуку/ А. П. Гавриш, Т. А. Роїк, Р. А. Хохлова, П. О. Киричок. –опубл. 25.02.2016, Бюл. №4.

161. Патент України №104945, МПК (2016.01)B24B1/00, B24B55/100
Спосіб прецизійної алмазної обробки отворів підшипників ковзання зі зносостійких композитів на основі нікелю для поліграфічних машин / А. П. Гавриш, Т. А. Роїк, П. О. Киричок, С. М. Зигуля, О. А. Гавриш. –опубл. 25.02.2016, Бюл. №4.

162. Гавриш А.П., Роїк Т.А., Гавриш О.А. Якість поверхонь деталей при термомеханічній оздоблювальній обробці // Сб. трудов 7-й ежегодной междунар. Промышленной конф. «Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях», Карпаты, п. Славское., 12-16 февраля 2007 г. – С. 53-58.

163. Гавриш А. П., Роїк Т. А., Гавриш О. А. Забезпечення якості поверхонь термомеханічною очисно-зміцнюючою обробкою деталей // Сб. трудов 7-й Междунар. науч.-техн. семинара «Современные проблемы подготовки производства, заготовительного производства, обработки, сборки и ремонта в промышленности и на транспорте», г. Свалява, Карпаты, 20-22 февраля 2007 г. – С. 44-53.

164. Гавриш О. А., Роїк Т. А., Киричок П. О, Гавриш А. П. Вплив режимних факторів поверхневої термомеханічної оздоблювальної обробки на якість поверхонь деталей // Материалы 8-го Междунар.науч.-техн. Семинара «Современные проблемы подготовки производства, заготовительного производства, обработки, сборки и ремонта в промышленности и на транспорте», февраль 2008 г., п. Свалява- С.47-56.

165. Гавриш А. П., Роїк Т. А., Віщюк Ю. Ю., Мельник О. О., Холявко В. В. Працездатність високотемпературних матеріалів на основі нікелю// Материалы 8-й ежегодн.междунар. Промышленной конф. «Эффективность

реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях», 9-13 февраля 2009 г., п. Славское.- С.78-80.

166. Віцюк Ю. Ю., Мельник О. О., Гавриш А. П., Роїк Т. А. Вплив режимів експлуатації на працездатність високотемпературних підшипників на основі нікелю// Тези допов. Загальноуніверситетської науково-технічної конф. Молодих вчених та студентів, присвяченої дню Науки, м. Київ, ММІ НТУУ «КПІ», квітень 2009 р.- С.-5-6.

167. Мельник О. О., Віцюк Ю. Ю., Гавриш А. П., Роїк Т. А. Сили різання при магніто-абразивній обробці// Тези допов. Загально університетської науково-технічної конф. Молодих вчених та студентів, присвяченої дню Науки, м. Київ, ММІ НТУУ «КПІ», квітень 2009 р.- С.-30-31.

168. Гавриш А. П., Роїк Т. А., Віцюк Ю. Ю., Мельник О. О. Эффективные подшипниковые материалы на основе отходов швидкорізальних сталей// Материалы 30-й Юбилейной Международной конференции «Композиционные материалы в промышленности. – г. Ялта.- 7-11 июня 2010 г., Киев.-2010.- С. 234-236.

169. Мельник О. О., Віцюк Ю. Ю., Гавриш А. П., Роїк Т. А. Підвищення якості та експлуатаційних властивостей підшипників ковзання // Зб. праць Міжнародної науково-практичної конференції «Трансфер технологій: від ідеї до прибутку».- 27-29 квітня 2011, м. Дніпропетровськ.- С. 40-41.

170. Гавриш А. П., Роїк Т. А., Віцюк Ю. Ю., Мельник О. О. Забезпечення довговічності високооберткових вузлів тертя друкарських машин//Материалы 31-й Международной конференции «Композиционные материалы в промышленности. – г. Ялта.- 6-10 июня 2011 г., Киев.-2011.- С.146-148.

171. Гавриш А. П., Гавриш О. А., Роїк Т. А. Забезпечення параметрів зносостійкості деталей тертя поліграфічного обладнання надтонким абразивним обробленням// Тези доповідей VII Міжнародної науково-технічної конференції «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент. – 5-8 жовтня 2011 р., Житомир. –С. 77.

172. Гавриш А. П., Роїк Т. А., Мельник О. О., Віцюк Ю. Ю. Якість робочих поверхонь композитних підшипників при магнітно-абразивному обробленні/ Тези доповідей Всеукраїнської науково-технічної конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні». - 23-27 січня 2012 р., Львів. - С. 17- 22.

173. Гавриш А. П., Мельник О. О., Роїк Т. А., Тодорашко А. В. Вибір методу оброблення підшипників підвищеної зносостійкості // Матеріали 12-й Междунар. Промышленной конф. «Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях», 13-17 февраля 2012 г., п. Плавья.- С.74-76.

174. Гавриш А. П., Роїк Т. А., Віцюк Ю. Ю., Мельник О. О., Холявко В. В., Дорфман І.Є. Особливості формування показників якості нових композитних деталей тертя поліграфічних машин//Тезисы 12-ой Международной научно-технической конференции «Инженерия поверхности и реновация изделий», 4-8 июня 2012, г. Ялта.- С.68-70.

175. Киричок П.О., Роїк Т.А., Гавриш А.П., Віцюк Ю.Ю. Нові підшипникові матеріали підвищеної зносостійкості на основі відходів легованих сталей/12-я Международная научно-практическая конференция «Качество, стандартизация, контроль: теория и практика (КСК-12)», 1-5 октября 2012 г., АР Крым, г. Ялта, Киев: АТМ Украина. –С. 95-97.

176. Гавриш А. П., Киричок П. О., Роїк Т. А., Віцюк Ю. Ю., Хмілярчук О. І. Підвищення зносостійкості деталей тертя поліграфічного обладнання//Тези доповідей XVI наукової конференції Тернопільського національного технічного університету ім. І. Пулюя.- Т.2.-Матеріалознавство та машинобудування.-5-6 грудня 2012 р.-Тернопіль.- С. 9.

177. Roik T., Gavrish A., Vitsuk Y. Friction behavior of new composite bearing materials for special use at heavy operating conditions//VI International Technical – Scientific Symposium EKSPLOLOG, Wroclaw, Poland, 05-07.11.2014.- P. 27.

178. Гавриш А. П., Роик Т. А., Вицюк Ю. Ю., Зигуля С. Н. Повышение качества шлифования поверхностей износостойких деталей трения из

легированных титаном и вольфрамом композитов путем усовершенствования абразивных кругов.- Матеріали XXIII міжнародного науково-технічного семінару «Високі технології: тенденції розвитку» 7-12 вересня 2015, м. Одеса.- С. 48-51.

179. Хлус О.С., Роїк Т.А. Сучасні уявлення про фактори зносостійкості підшипникових матеріалів високошвидкісних офсетних друкарських машин/Тези доповідей XXI Міжнародної науково-практичної конференції з проблем видавничо-поліграфічної галузі. - 17 листопада 2015 р., м. Київ. - С. 141-143.

180. Роїк Т.А., Віцюк Ю. Ю. Вплив режимів різання на шорсткість поверхонь при шліфуванні зносостійких композитів//Тези доповідей VI Міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», 26 - 29 квітня 2016 р., м. Чернігів. - С.35-36.

181. Роїк Т. А., Віцюк Ю. Ю., Олійник В.Г. Параметри якості поверхонь композитних підшипників ковзання для друкарських машин при алмазному шліфуванні//Материалы 17-го Международного научно-технического семинара «Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте», 20-24 февраля 2017 г., г. Свалява. –Киев: АТМ Украина, 2017. – С. 259–263.

182. Роїк Т. А., Віцюк Ю. Ю., Олійник В. Г., Хлус О. С. Високошвидкісне шліфування композитних деталей тертя друкарських машин//Тези доповідей VII Міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», 24 – 27 квітня 2017 р., м. Чернігів. – Т. 1.–С. 36-37.

183. Роїк Т. А., Віцюк Ю. Ю., Олійник В. Г. Вплив режимів різання на фізичні властивості робочих поверхонь композитних підшипників при алмазному шліфуванні//Материалы 17-ой Международной научно-практической конференции с действующими семинарами «Качество,

стандартизація, контроль: теорія і практика» (КСК-17), 4 – 8 вересня 2017 г., г. Одеса.- Київ: АТМ України.- 2017.- С. 147-151.

184. Роїк Т. А., Віцюк Ю. Ю., Олійник В. Г. Вплив режимів різання на фізичні властивості робочих поверхонь композитних підшипників при алмазному шліфуванні // Матеріали 17-й Міжнародної науково-практичної конференції 04 – 08 вересня 2017 г. Одеса. – С. 147 – 151.

185. Roik T., Vitsiuk Iu. Quality of surfaces wear resistance details of the printing machines// XI Міжнародна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Перспективні технології на основі новітніх фізико-матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного конструювання матеріалів», м. Київ, 19–20 квітня 2018 р. – С. 17-18.

186. Роїк Т. А., Віцюк Ю. Ю. Аналіз функціональних параметрів матеріалів на основі регенованих 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.
<https://drive.google.com/file/d/1V41ISKFfs24hOq1Cyvf4YC7oyCnBTTia/view>

187. Роїк Т. А., Бровкін А. О. Якість поверхонь деталей тертя зі зносостійких композитів для друкарських машин при ельборовому шліфуванні// 21^а Міжнародна науково-практична конференція «Якість, стандартизація, контроль: теорія і практика», 06–10 вересня 2021 г., Одеса.-<https://atmu.net.ua/conf.php?sd=3&page=1>

188. Roik T., Brovkyn A. Analysis of the parts' roughness parameters of high-speed printing equipment by optical profilometry// The 15th International Conference on Correlation Optics, “Correlation Optics’2021”.- Physical, Technical and Computer Sciences Institute of Yuriy Fedcovich Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine, On-Line, 13-16 September, 2021. <http://icco.chnu.edu.ua/>

189. Роїк Т. А., Віцюк Ю. Ю. Підвищення експлуатаційних властивостей вузлів тертя ротаційних друкарських машин// Scientific Collection “INTERCONF”, № 86, November 2021, Proceedings of the 1st International

Scientific and Practical Conference «Scientific Paradigm In The Context of Technologies and Society Development»/Scientific Publishing Center "InterConf", 18-19.11.2021, Geneva, Switzerland. - pp. 558-563.
<https://www.interconf.top/archive.html>.

190. Роїк Т.А., Гавриш О.А., Бровкин А.О. Параметри якості поверхонь композитних самозмашувальних деталей тертя для друкарських машин при абразивному шліфуванні// Міжнародна науково-технічна конференція «Матеріалознавство та технології», 22 -23 вересня 2022, м. Харків, ХНАДУ, С. 45-54. <https://mf.khadi.kharkov.ua/de/nachrichten/artikel/article/22-23-veresnja-2022-roku-na-kafedri-tekhnologiji-metaliv-ta-materialoznavstva-im-om-petrichenka-vidbu/> .

191. Роїк Т. А., Віцюк Ю. Ю., Бровкин А. О. Технологічне забезпечення якості композитних деталей тертя друкарського обладнання//22 Міжнародна науково-практична конференція «Якість, стандартизація, контроль: Теорія та практика», ЯСК-22, 11–12 жовтня 2022 р.- ІНМ ім. В. Н. Бакуля НАН України.- С. 48-51. <https://atmu.net.ua/conf.php?sd=3&page=1>

192. Гавриш А.П., Киричок П.О., Роїк Т.А., Віцюк Ю.Ю., Шевчук А.В. Формування залишкових напружень поверхневих шарів тертя композитних підшипників поліграфічних машин при тонкому абразивному шліфуванні// Технологія і техніка друкарства. - №1.-2013.- С.64-75.

193. Гавриш А.П., Киричок П.О., Роїк Т.А., Віцюк Ю.Ю., Шевчук А.В. Експериментальне дослідження залишкових напружень поверхневих шарів при тонкому абразивному шліфуванні композитних підшипників ковзання поліграфічних машин/// Технологія і техніка друкарства. - №2.-2013.- С. 58-64.

194. Гавриш А.П., Віцюк Ю.Ю.,Роїк Т.А., Киричок П.О. Динамічне зміцнення поверхонь композитних деталей тертя друкарських машин тонким шліфуванням// Технологія і техніка друкарства. - №4 -2013.- С.61-72.

195. Гавриш А. П., Киричок П. О., Роїк Т. А., Віцюк Ю. Ю. Залишкові напруження при прецизійній машинній доводці поверхневих шарів деталей зі зносостійких алюмінієвих композитів для поліграфічної техніки//Международ.

сб. науч. трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения». – Донецк: ДонНТУ. – Вып. 3(49), 2014– С. 49-55.

196. Гавриш А. П., Роїк Т. А., Лотоцька О. І., Віцюк Ю. Ю. Мікрогеометрія поверхні та стан поверхневого шару зносостійких деталей тертя з високолегованих композитів за умови абразивного суперфінішування// Наукові Вісті НТУУ «КПІ».-№ 5, 2015.- С. 81-88.

197. Гавриш А. П., Роїк Т. А., Лотоцька О. І., Віцюк Ю. Ю. Формування залишкових напружень при шліфуванні композиційних матеріалів для поліграфічної техніки// Процеси механічної обробки в машинобудуванні: Зб. наук. праць. – Житомир: ЖДТУ, Вип.1 (72), 2015. –С. 10-20.

198. Гавриш А.П., Роїк Т.А., Киричок П.О., Мельник О.О., Віцюк Ю.Ю. Оздоблювальне хонінгування ельборовими брусками прецизійних отворів деталей тертя зі зносостійких високолегованих сплавів на основі алюмінію для друкарських машин// Технологія і техніка друкарства. -№ 4 (46).-2014.-С. -35-51.

199. Гавриш А. П., Роїк Т. А., Дорфман І.Є., Олійник В. Г. Вплив механізму процесу хонінгування деталей зі зносостійких композитів на якість поверхневого шару /Вісник КНУДТ.-№6 (80).-2014.-С.67-80.

200. Гавриш А.П., Киричок П.О., Роїк Т.А., Віцюк Ю.Ю. Вплив технологічних факторів хонінгування на параметри шорсткості і точності поверхонь композитних підшипників ковзання поліграфічних машин//Междунар. сб. науч. трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения». – Донецк: ДонНТУ, 2013. – Вып. 1,2 (46). – С. 56-64.

201. Jamroziak K., Roik T., Gavrish O., Vitsiuk Iu., Lesiuk G., Correia Jose A.F.O., De Jesus Abílio. Improved manufacturing performance of a new antifriction composite parts based on copper// Elsevier, Engineering Failure Analysis, Volume 91, September 2018, pp. 225–233, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.04.034>.

202. Bell R. J. Introductory Fourier Transform Spectroscopy. Publisher: Academic Press, November 12, 2012, 400 p. ISBN-10: 0124314090, ISBN-13: 978-

<https://www.amazon.com/Introductory-Fourier-Transform-Spectroscopy-Robert/dp/0124314090> , <https://www.elsevier.com/books/introductory-fourier-transform-spectroscopy/bell/978-0-12-085150-8>

203. Cohen Ju. Introduction to Fourier Transform Spectroscopy. U.S. Department of Commerce National Bureau of Standards, Gaithersburg, MD 20899, March 1986, 106 p. <https://www.govinfo.gov/content/pkg/GOVPUB-C13-b09ab4872dc98367d7643d422ef6047a/pdf/GOVPUB-C13-b09ab4872dc98367d7643d422ef6047a.pdf>

204. Oliker V. Yu., Gridasova T. Ya., Elisyeyeva O. M., Syrovatka V. L. Research of influence of the magnetic field on structure of NiAl-Re materials by means of Fourier-spectroscopy //Scientific News, National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute” №4(60), 2008, pp. 108-114. <https://kpi.ua/files/NV-text-08-4.pdf>

205. Butzer P. L., Nessel R. J. Fourier analysis and approximation: Monograph, Academic Press Inc., New York – London, Vol. 1, 2011, 555 p. ISBN 10: 0121485013/ISBN 13: 9780121485016, E-Book, <https://vdoc.pub/documents/fourier-analysis-and-approximation-385ggmjrl4fg>

206. Gonzalez-Velasco Enrique A., Connections in mathematical analysis: the Case of Fourier Series// American Mathematical Monthly, Volume 99, Issue 5, 1992, pp. 427–441. <https://www.math.ucdavis.edu/~saito/courses/121/gonzalez.pdf>

207. Thibos L. N., Wheeler W., Horner D. Power vectors: an application of Fourier analysis refractive error// Optometry and Vision Science, Volume 74, № 6, 1997, pp. 367–375. DOI: [10.1097/00006324-199706000-00019](https://doi.org/10.1097/00006324-199706000-00019) <https://www.semanticscholar.org/paper/Power-Vectors%3A-An-Application-of-Fourier-Analysis-Thibos-Wheeler/27bd9629ce965a3234365f515c7e1fde99fc41fe>

208. Kamen, E. W.; Heck, B. S. Fundamentals of Signals and Systems Using the Web and Matlab, 3th ed., Prentiss-Hall. , 2000, 648 p. ISBN 0-13-017293-6.

<https://ebin.pub/fundamentals-of-signals-and-systems-using-the-web-and-matlab-pearson-new-international-edition-3rd-ed-1292025980-9781292025988.html>

209. Howell, Kenneth B. Principles of Fourier Analysis. CRC Press. December 2016, 820 p., ISBN 9-781-4987-3409-7. <https://www.routledge.com/Principles-of-Fourier-Analysis/Howell/p/book/9781498734097>

210. Højerslev C. (2001). Tool Steels. Publication date: 2001 Document Version Publisher's pdf, also known as Version of record Link back to DTU Orbit Citation (APA): Højerslev, C. (2001). Ris. National Laboratory. Forskningscenter Risoe, Denmark. Risoe-R No. 1244(EN). http://orbit.dtu.dk/files/7728903/ris_r_1244.pdf.

211. Ghali S., Eissa M., Mishreky M. Some Features of the Influence of Titanium and Nitrogen Addition to NiCrMoV Steel.//Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, Vol.6 No.2, March 20, 2018. DOI: [10.4236/jmmce.2018.62015](https://doi.org/10.4236/jmmce.2018.62015) <https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=83140>.

212. Danninger H., Rouzbahani F., Ponemayr H. Powder Metallurgy Carbon Free Tool Steels Fe-Co-Mo With Varying Co And Mo Contents. //Materials Science. 2013. <https://www.semanticscholar.org/paper/POWDER-METALLURGY-CARBON-FREE-TOOL-STEELS-Fe-Co-Mo-Danninger-Rouzbahani/d5af4cc5a9aa6ee7b12f7bf6ccc6fd4e4f56b719>.

213. Nurbanasari M., Tsakirooulos P., Palmiere E. Microstructural Evolution of a Heat-Treated H23 Tool Steel. //Int. J. Miner. Metall. Mater., 22 (2015), No. 3, pp. 272–284. <https://doi.org/10.1007/s12613-015-1071-5>.

214. Verhoeven John (2007). Steel Metallurgy for the Non-Metallurgist. ASM International. 159 p. ISBN 978-0-87170-858-8. Retrieved 9 November 2014. https://www.asminternational.org/bestsellers/-/journal_content/56/10192/05214G/PUBLICATION

215. Boccalini M., Goldenstein H. Solidification of high speed steels. International Materials Reviews. Volume 46, Issue 2, 2001. pp. 92–115. [doi:10.1179/095066001101528411](https://doi.org/10.1179/095066001101528411).

216. Bayer A. M., Becherer B. A., Vasco T. High Speed Tool Steels. ASM Handbook, Volume 16: Machining, ASM Handbook Committee, 1989, 59 p. ASM. www.asminternational.org

217. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. М.: Металлургия, 1983. – 527 с. <https://www.twirpx.com/file/327660/>

218. Патент України № 25627, МПК (2006)С22С33/02. Підшипниковий композиційний матеріал на основі сталі/ Роїк Т.А., Гавриш А.П., Холявко В.В., Зора Б.П., опубл. 10.08.07, Бюл. № 12.

219. Патент України № 60520, МПК (2011.01) С22С33/02. Антифрикційний композиційний матеріал на основі сталі /Роїк Т. А, Гавриш А. П., Киричок П.О., Гавриш О.А., Віцюк Ю.Ю., Мельник О. О. -опубл. 25.06.2011, Бюл. № 12.

220. Інтерметаліди та матеріали на їхній основі / С. О. Фірстов // Енциклопедія Сучасної України [Електронний ресурс] / Редкол.: І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк [та ін.]; НАН України, НТШ. – К. : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2011. – Режим доступу : <https://esu.com.ua/article-12407>

221. 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.<http://www.materials.kiev.ua/article/3085>

224. Copper, Brass, Bronze Design. Handbook. Architectural Application/ Copper Development Association. *Canadian Copper & Brass Development Association*. 2006, 54 p. https://www.copper.org/publications/pub_list/pdf/A4039-ArchitecturalApplications.pdf

225. Роик Т.А., Шевчук Ю.Ф. Создание прогнозируемых вторичных структур в материалах для высокотемпературных подшипников //Порошковая металлургия. – 2006. – №11/12. – С. 29–39.

226. Роїк Т. А. Вплив технологічних параметрів виготовлення підшипників ковзання на механізм трибосинтезу антифрикційних плівок/ Т.А.

Роїк, Ю.Ю. Віцюк, А.П. Гавриш та ін.// Международ. Сб. Науч. Трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения». – Донецк: ДонНТУ, 2011. – вып. 41 . – С. 276-281.

227. Войтович Р. Ф. Окисление тугоплавких соединений /Р. Ф. Войтович, Э. А. Пугач. – М.: Металлургия, 1978. – 108 с.

227. Милованов В. П. Синергетика и самоорганизация. Экономика. Биофизика. – М.: КомКнига, 2005. – 168 с.

228. Uniform global attractors for non-autonomous dissipative dynamical systems [Архівовано 30 жовтня 2020 у Wayback Machine]/ Michael Zgurovsky, Mark Gluzman, Nataliia Gorban, Pavlo Kasyanov, Liliia Paliichuk, Olha Khomenko//Discrete and Continuous Dynamical Systems. Series B. – 2017. – Vol. 22, Iss. 5. – pp. 2053–2065. – DOI: 10.3934/dcdsb.2017120.

229. Гавриш А.П., Роїк Т.А., Дорфман І.Є., Віцюк Ю.Ю. Прецизійна машинна доводка плоских поверхонь деталей тертя з композитів на основі алюмінію для технологічних комплексів //Вісник КНУДТ–№4 (78).–2014.–С. 195–211.

https://www.knutd.edu.ua/files/Visnyk/%C2%B3%F1%ED%E8%EA_4_2014.pdf

230. Гавриш А. П., Роїк Т. А., Киричок П. О., Віцюк Ю. Ю. Вплив технологічних факторів оброблення на продуктивність прецизійної машинної доводки поверхонь тертя деталей зі зносостійких композитів для поліграфічних машин//Технологія і техніка друкарства. – №3(45).–2014.– С. – 52–67. <http://ttdruk.vpi.kpi.ua/article/view/36478>

231. Гавриш А. П., Роїк Т. А., Киричок П. О., Зигуля С. М., Олійник В. Г. Якість поверхонь зносостійких композитних деталей тертя поліграфічних машин при прецизійній доводці// Вісник ТНТУ.–Тернопіль.–№4 (76), 2014.– С.–126–134. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/123456789/5736?locale=gl>