

УДК 621.002.3:621.89

DOI: 10.15587/1729-4061.2018.140984

Аналіз властивостей антифрикційних композитів на основі шліфувальних відходів алюмінієвого сплаву

Т. А. Роїк

Доктор технічних наук, професор*

E-mail: roik2011@gmail.com

О. А. Гавриш

Доктор технічних наук, професор

Кафедра міжнародної економіки**

E-mail: fmm@kpi.ua

В. Г. Олійник

Кандидат технічних наук, доцент*

Ю. Ю. Віцюк

Кандидат технічних наук, доцент

Кафедра репрографії**

E-mail: iuvitsiuk@gmail.com

*Кафедра технології поліграфічного виробництва**

**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

Розроблено антифрикційні композити на основі регенованих шліфувальних відходів алюмінієвого сплаву АМ4,5Кд з додаванням твердої змащувальної речовини MoS_2 , що призначені для роботи у контактних парах постдрукарських машин, таких як фальцювальні-клейові машини та машини для клеювання в пакування.

Аналіз структури нового композиту показав, що легуючі елементи металевої основи утворюють зміцнюючі фази, що рівномірно розподілені в матриці без сегрегаційних скупчень, що сприяє підвищенню конструкційної міцності. Дисульфід молибдену забезпечує ефект самозмащення контактної пари у процесі експлуатації, що обумовлює зниження коефіцієнту тертя і інтенсивності зношування порівняно з композитним матеріалом без твердого мастила. Структурні дослідження засвідчили рівномірність розподілу твердого мастила в усьому об'ємі композиту, що забезпечує підвищення триботехнічних характеристик завдяки формуванню захисних антизадирних плівок тертя при роботі деталі складної геометричної форми в умовах самозмащення.

Аналіз функціональних властивостей дозволяє рекомендувати антифрикційний композит на основі промислових шліфувальних відходів алюмінієвого сплаву АМ4,5Кд з домішками твердого мастила – дисульфиду молибдену MoS_2 для деталей контактних з'єднань складної геометричної

форми, що працюють при підвищених дискретних швидкостях ковзання і навантаженнях без змащування рідким мастилом в атмосфері повітря.

Триботехнічні випробування продемонстрували, що новий композитний зносостійкий матеріал, одержаний за розробленою технологією виготовлення, дозволяє форсувати гранично-допустимі режими навантаження і робочі швидкості ковзання при стабільно високих антифрикційних властивостях нових композитних тертьових деталей постдрукерських машин

Ключові слова: шліфувальні відходи, алюмінієвий сплав, тверде мастило, структурні дослідження, антифрикційні властивості, постдрукерські машини

1. Вступ

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

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

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

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

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

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

недосконалістю існуючих технологій виготовлення, наслідком чого є збільшення браку друкарської продукції.

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

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

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

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

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

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

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

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

технологічних складнощів у виготовленні порошкових матеріалів та високої ціни вихідної сировини (порошків) і обладнання для її виготовлення. Одним з напрямків вирішенням вказаних складнощів на сьогодні є застосуванням вторинних процесів переробки алюмінію, про що свідчать технологічно та економічно обґрунтовані дослідження робіт [10–12]. Цей підхід відповідає політиці Європейського Союзу щодо навколишнього середовища у царині поводження з відходами.

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

Проте на сьогодні повністю відсутні ґрунтовні дослідження поєднання методів порошкової металургії з ресурсозберігаючою технологією використання промислових шліфувальних відходів.

Проте на сьогоднішній день відсутні дослідження регенерації вторинної сировини та введення додаткових композицій внаслідок відсутності досконалих технологій порошкової металургії [11, 12].

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

3. Мета і завдання дослідження

Метою роботи було розробити технологічні режими виготовлення та дослідити їх вплив на формування структури і функціональних властивостей нових композитів.

Для вирішення поставленої мети в роботі було сформульовано ряд завдань:

- розробити технологію регенерації промислових шліфувальних відходів та встановити вплив нових технологічних режимів на формування структури та властивостей матеріалів;

- обґрунтувати використання твердої змашувальної речовини та виконати експерименти з одержання антифрикційних композитів системи $AM4,5Kd - MoS_2$, застосовуючи нові технологічні режими консолідації;

- провести експериментальні дослідження з визначення триботехнічних властивостей нових матеріалів на основі відходів алюмінієвих сплавів у режимі самозмащування;

- на основі отриманих результатів дослідження структури та властивостей розробити рекомендації з застосування нових матеріалів на основі промислових

шліфувальних відходів алюмінієвого сплаву АМ4,5Кд у вузлах тертя поліграфічного устаткування.

4. Матеріали та методи дослідження композиційних антифрикційних матеріалів

4. 1. Досліджувані матеріали та обладнання, що використовувались в експериментах

Основою антифрикційних композитних матеріалів було обрано промислові шліфувальні відходи алюмінієвого сплаву АМ4,5Кд. Основний відсотковий вміст компонентів наведено у табл. 1. Хімічний склад сплаву АМ4,5Кд відповідає сплаву AlCu4MgSi згідно міжнародному стандарту ISO 209-1:2002.

Таблиця 1

Хімічний склад сплаву АМ4,5Кд (ДСТУ 2839-94)

Відсотковий вміст компонентів, мас. %						
Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Sn	Cr
0.3–0.8	4.5–5.1	0.35–0.80	0.03–0.05	0.06–0.1	0.01–0.02	0.1–0.3
Відсотковий вміст компонентів, мас. %						
Ni	Na	Fe	Ti	Cd	Zr	Al
0.1–0.2	0.05–0.1	0.1–0.15	0.15–0.35	0.07–0.25	0.10–0.15	решта

Сплав АМ4,5Кд містить у своєму складі велику кількість цінних легуючих елементів (табл. 1). Окрім високолегованого α -твердого розчину на основі алюмінію вони формують ряд зміцнюючих фаз у подвійних і потрійних системах Al–Cu, Al–Mn, Al–Ni, Al–Ti, Al–Cu–Mn та самостійні включення Cd і Zr. Такий фазовий склад матричної основи здатний забезпечити високий рівень фізико-механічних властивостей композиту і обумовити його конструкційну міцність. Це є важливим фактором для роботи деталі в середньо навантажених умовах тертя та підставою для обирання сплаву АМ4,5Кд як основи антифрикційного композиту.

У середньо важких умовах роботи пари тертя, коли присутній вплив підвищених швидкостей ковзання і, як наслідок, виникнення підвищених температур на робочих поверхнях, жодне рідке мастило стає непрацездатним. Для цієї мети використовують домішки, що виконують роль твердого або сухого мастила.

Введення до складу композиційних спечених матеріалів має наступні переваги:

- забезпечення появи заданих властивостей у процесі виготовлення та систематичне відтворення у процесі експлуатації;
- безперервне відновлення спрацьованого розділювального шару, що обумовлює стабільність та тривалість роботи вузла тертя;
- спрощення обслуговування підшипникового вузла тощо.

Механізм змащувальної дії речовини, що виконує роль мастила, залежить від умов роботи пари тертя. У тих випадках, коли температурний факт несуттєвий, змащувальна здатність речовини визначається, в основному, її структурними властивостями. Перехід від легких до середніх режимів тертя змінює механізм змащувальної дії, котрий, як відомо [3, 7], супроводжується активізацією частинок твердого мастила внаслідок руйнування зв'язків всередині кристалічної ґратки матеріалу частинок. Руйнування частинок твердого мастила впливає на механізм тертя, і найбільш важливими факторами, що визначають механізм змащувальної дії твердих мастил, у цьому випадку будуть, як структурні властивості (тип, форма і розмір кристалічної ґратки твердих речовин), так і адгезійна здатність [7–10].

Нарешті, перехід до важких режимів тертя супроводжується інтенсивною деформацією шарів порошкоподібних мастил та третього шару металу, а також підвищенням температури. Як результат цього, збільшується швидкість хімічних реакцій і дифузійних процесів у матеріалі деталі і контртіла. Утворюються хімічно модифіковані тонкі поверхневі шари, що забезпечують змащувальну дію при важких режимах.

Склад шарів визначається складом матеріалу третьої пари, мастила та середовища, у якому відбувається тертя [14–16].

Вибір твердого мастила дисульфиду молібдену MoS_2 і його кількості обумовлений рядом причин: по-перше, це відома твердозмащувальна речовина [17, 18], яка є хімічно і термічно стабільною до $600\text{ }^\circ\text{C}$, 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 [7]. По-третє, кількість MoS_2 , що додавалась до вихідної шихти, становила 9,0–12,0 мас. %. Авторами [7, 16, 18] 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. Вказані обставини стали підґрунтям для формування гіпотези щодо можливості одержання складної структурної будови нового композита на основі сплаву АМ4,5Кд у присутності MoS_2 . Така структура нового композиту здатна буде забезпечити високий рівень комплексу властивостей деталі у середньо навантажених вузлах тертя, особливо в умовах роботи в режимі самозмащення.

Наступним кроком досліджень була розробка технології та відпрацювання нових режимів виготовлення у наступній послідовності.

На першому етапі компактування і консолідації вихідні шліфувальні відходи сплаву АМ4,5Кд піддавались регенерації за розробленими технологічними режимами [11, 17]. Перш за все проводилось очищення шліфувальних відходів від абразивної крихти методом електродинамічної сепарації. Після електродинамічного очищення залишкова кількість абразиву становила 3 %.

Наступним кроком у процесі регенерації шліфувальних відходів була операція висушування порошків від залишкової вологи. Далі металеві порошки змішували з неметалевими порошками твердого мастила – дисульфиду молібдену MoS_2 у кількості 9,0–12,0 мас. %, та пресували при тисках 450–500 МПа за кімнатної температури.

Надалі сформовані пресовки були піддані технологічній операції гарячого пресування при тисках 280–300 МПа і температурі нагрівання 400 °С для мінімізації пористості [7]. Використання технологічної операції гарячого пресування забезпечує повноту дифузійної гомогенізації композиту. Це зводить до мінімуму пористість, і, як наслідок, підвищує структурну міцність антифрикційного матеріалу на основі порошків-відходів сплаву АМ4,5Кд. Після виготовлення за відпрацьованими технологічними режимами відносна щільність композитів складала 0,98–0,99.

Структуру антифрикційних композитів вивчали з використанням металографічного і растрового електронного мікроскопів, дисульфід молібдену в матриці ідентифікували за допомогою скануючої електронної мікроскопії (СЕМ) і аналізували з використанням методу енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії (EDX) [19, 20].

Окрім цього, зображення СЕМ застосовували для кількісного опису MoS_2 у антифрикційному композиті. Вміст MoS_2 було оцінено з використанням мікрометричного програмного забезпечення [20, 21].

Фізико-механічні випробування виконувались за стандартними методиками, наведеними у публікаціях [22].

Триботехнічні випробування проводили на випробувальній машині тертя ВМТ-1 на повітрі при швидкості ковзання 1,0–3,0 м/с, навантаженнях на пару тертя 2,0–4,0 МПа в парі з контртілом зі сталі 45 (HRC 45–48) без змащування рідким мастилом (в умовах самозмащування) згідно методики авторів [21]. Контртіло зі сталі 45 мало параметр шорсткості поверхні $Ra=0,94\text{--}1,32$ мкм після фінішної механічної обробки ельборовими шліфувальними кругами.

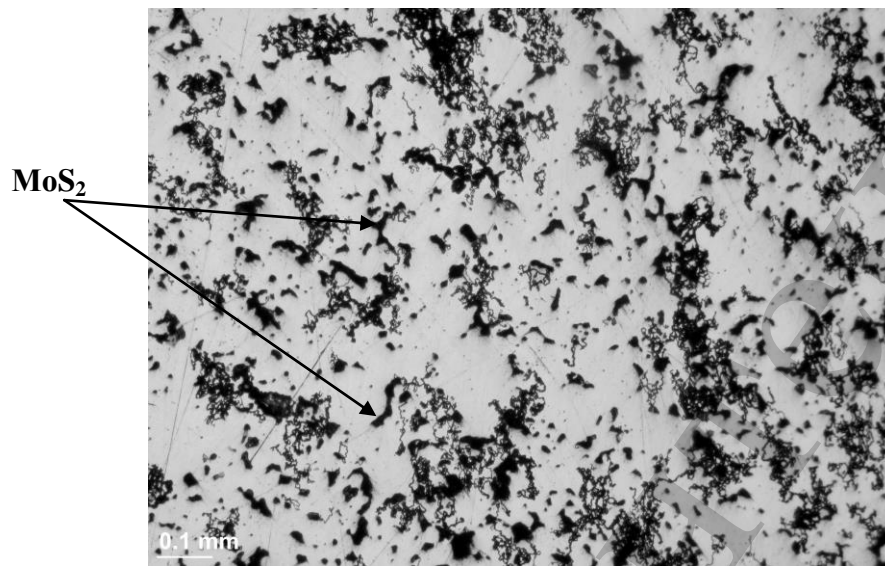
Діапазон параметрів трибологічних досліджень обирався виходячи з умов експлуатації натурних тертьових з'єднань постдрукерських машин.

5. Результати досліджень експлуатаційних властивостей композитів на основі шліфувальних відходів алюмінієвого сплаву

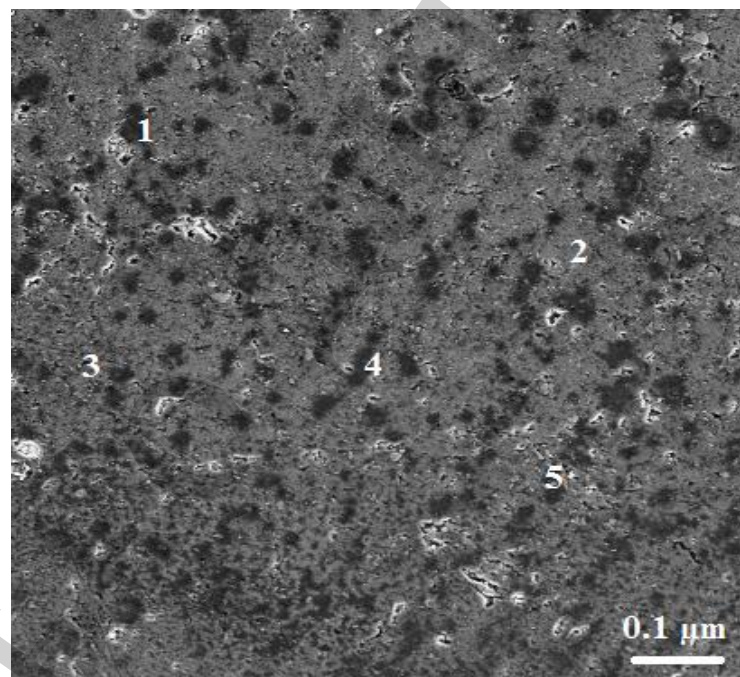
Розроблені технологічні заходи з виготовлення заготовок з регенованих шліфувальних відходів сплаву АМ4,5Кд полягають у поєднанні ресурсозберігаючої технології з методами порошкової металургії. В результаті отримано складну гетерогенну структуру нового матеріалу на основі шліфувальних відходів з домішками твердого мастила MoS_2 (рис. 1).

Дослідження показали, що твердозмащувальна речовина MoS_2 не утворює сегрегацій у об'ємі зразка і рівномірно розташована у структурі досліджуваного композиту (рис. 1), що вказує на правильність застосованих технологічних операцій виготовлення.

Структура дослідженого композиту являє собою алюмінієву основу у вигляді легованого α -твердого розчину, в якій рівномірно розташовані частинки твердозмашувального компоненту – дисульфіду молібдену (рис. 1).



a



б

Рис. 1. Структура композиту AM4,5Кд+10 % MoS₂: *a* – представлено розподіл MoS₂, вказано стрілками, шліф не травлений; *б* – зображення інтерметалідів (1 – CuAl₂, 2 – MnAl₆, 3 – NiAl₃, 4 – TiAl₃, 5 – Al₂CuMn), шліф травлений (NaOH). Зображення отримано на металографічному мікроскопі

Дисульфід молібдену MoS₂ 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 [3, 7].

Розподіл MoS_2 в металевій матриці досліджуваного матеріалу наведено на рис. 1, а.

Вказані феноменологічні особливості розподілу і дисперсності твердого мастила MoS_2 (рис. 1, а) 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 [21].

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 [22, 23].

Розподіл зміцнюючих фаз в структурі дослідженого матеріалу, що виявлені за допомогою рентгенівського мікродифрактометра JDX-MARI (Японія), наведено на рис. 1, б.

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 [24]. 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. Він уповільнює рух вакансій до границь зерен, сприяє утворенню петлевих дислокацій та підсилює зв'язок між виділеннями зміцнюючих фаз і металевою матрицею твердого розчину [7, 16, 18].

Відомо [7, 2], що хімічний елемент цирконій 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. Вказане є позитивним фактором для збереження конструкційної міцності композиту у моменти не передбачуваного збільшення експлуатаційних навантажень.

Крім того, наявність олова у металевій матриці матеріалу, який вводиться до складу сплаву АМ4,5Кд у процесі ливарного виробництва, сприяє збільшенню пластичності композиту [1, 9]. 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 розподілюватись вздовж границь зерен у об'ємі металу [9, 16]. Це є особливо важливим при експлуатації деталі складної напівкруглої форми за середньо навантажених режимах роботи в умовах дискретного прикладання зовнішніх навантажень.

Утворена структура досліджуваного композиту забезпечила формування комплексу фізико-механічних і триботехнічних властивостей, що наведено у табл. 2, 3.

Аналіз даних табл. 2, 3 показує, що композит на основі шліфувальних відходів сплаву АМ4,5Кд з твердим мастилом MoS_2 за механічними характеристиками практично не поступається литому сплаву [1–3, 7]. У той же час розроблений матеріал за антифрикційними властивостями значно перевищує литий аналог при терті без рідкого мастила.

Така поведінка досліджуваного матеріалу криється в суттєвих відмінностях структуроутворення композитного та базового литого сплаву АМ4,5Кд, які виникають внаслідок різних принципів синтезу матеріалів.

Суттєвим недоліком литого сплаву є ліквідаційні і сегрегаційні явища сплаву АМ4,5Кд, які притаманні сплавам, одержаним за традиційної технологією ливарного виробництва.

Таблиця 2

Фізико-механічні властивості досліджуваних антифрикційних композитів і литого сплаву

№ з/п	Матеріал, мас. %	Межа міцності на розтяг, МПа	Твердість, НВ, МПа	Ударна в'язкість, кДж/м ²
1	Композитний матеріал АМ4,5Кд + (9,0–12,0) MoS_2	179–184	570–590	0,22–0,28
2	Литий сплав АМ4,5Кд [14]	187	630	0,30–0,40

Таблиця 3

Триботехнічні характеристики досліджуваних композитів

Склад матеріалу, мас. %	Гранично-допустиме навантаження, МПа	Коефіцієнт тертя (f) та інтенсивність зношування (I), мкм/км, при навантаженнях МПа				Гранично-допустима швидкість ковзання, м/с
		2,5		4,0		
		f	I	f	I	
АМ4,5Кд+(9–12) MoS_2	4,0	0,11–0,12	22,38–22,42	0,14–0,16	23,66–23,69	3,0
АМ4,5Кд [11, 13]	2,5	0,27–0,31	39,82	0,39–0,42	69,18	1,0

Ряд легуючих елементів, насамперед таких як кадмій і цирконій, що не розчиняються в алюмінієвій матриці у твердому стані, присутні у вигляді самостійних утворень – кристалів. Це обумовлює формування

грубогетерогенної структури литого сплаву з сегрегаційними скупченнями, що викликає підвищений знос контактної пари.

Схожі явища спостерігаються і у нерівномірності розподілу інших зміцнюючих фаз, інтерметалідів.

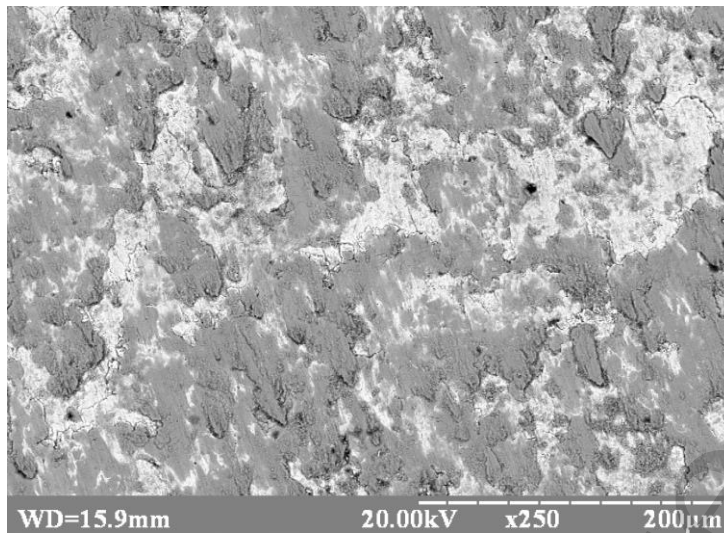
Ліквацийні і сегрегаційні явища повністю відсутні у композиційному матеріалі на основі відходів сплаву АМ4,5Кд. В ньому структурні утворення самостійних фаз Cd і Zr, тверді сполуки інтерметалідів знаходяться у мікрочастинках вихідної сировини (відходах) і таким чином вже первісно рівномірно розташовані в структурі матеріалу, не створюючи сегрегацій. Вказані явища чинять свій вплив на інтегральну складову щодо підвищення антифрикційних властивостей матеріалу.

Встановлено [13–15, 17], що розташована на регенованих порошках сплаву АМ4,5Кд багатокомпонентна плівка оксидів, яка складається з Al_2O_3 та оксидів легуючих елементів, захищає зносостійкий матеріал від окислювання при роботі на повітрі. М'яка металева основа порошків відходів сплаву АМ4,5Кд сприяє швидкому припрацюванню композиційного зносостійкого матеріалу при його експлуатації. Представлені у табл. 3 дані показують, що присутність дисульфиду молібдену MoS_2 у дослідженому композиті, одержаному зі шліфувальних відходів алюмінієвого сплаву АМ4,5Кд, є визначальним фактором. Це забезпечує істотне зниження параметрів тертя і зносу в умовах середньо навантажених режимів експлуатації порівняно з матеріалом аналогічного складу, але без твердого мастила. Такий матеріал задовільно працює лише за умови змащування рідким мастилом.

Окремо слід підкреслити, що за наявності MoS_2 на обох контактуючих поверхнях утворюється самозмащувальна багатофазна антифрикційна плівка тертя, яка є носієм високих триботехнічних властивостей саме за таких умов роботи. Ймовірно складається з твердого мастила, окремих елементів і утворених ними фаз обох деталей пари тертя [21, 22].

У процесі роботи матеріалу під дією зовнішніх навантажуючих факторів MoS_2 рівномірно намащується на робочі контактні поверхні, створюючи суцільний та рівномірний змащувальний шар, який зношується та одночасно відновлюється при експлуатації деталі. Причому саме за даних умов експлуатації темп зношування антифрикційної плівки співпадає з темпом відновлення змащувального шару на контактних поверхнях.

Після триботехнічних випробувань одержано зображення контактних поверхонь пари тертя - композиту з відходів сплаву АМ4,5Кд + MoS_2 та контртіла зі сталі 45, що представлено на рис. 2.



a



б

Рис. 2. Поверхні пари тертя:
a – композит AM4,5Кд+MoS₂; *б* – контртіло зі сталі 45

Утворений завдяки присутності MoS₂ антизадирний шар являє собою змащувальну антифрикційну плівку, яка мінімізує коефіцієнт тертя та інтенсивність зношування матеріалу у зазначених умовах експлуатації.

Контактні поверхні ковзання пари тертя, як видно з рис. 2, відрізняються високою якістю, про що свідчить відсутність областей руйнувань, схоплень тощо на обох тертьових поверхнях. Такий рельєф доріжок тертя на поверхнях є передумовою надійної і стабільної роботи контактної пари вузла постдрукарської машини.

6. Обговорення результатів дослідження впливу структури на триботехнічні характеристики деталей тертя

Проведені дослідження довели, що розроблена технологія регенерації промислових шліфувальних відходів у поєднанні з наступними операціями виготовлення дозволяє одержати принципово новий матеріал з високим рівнем

властивостей. Утворена структура композиту AM4,5Кд – MoS₂ являє собою складну гетерофазну систему, яка є поєднанням металевої матриці на основі алюмінію, зміцненої легувальними елементами, з рівномірно розподіленими включеннями твердого мастила (рис. 1).

Така структура матеріалу забезпечила високий комплекс механічних і триботехнічних характеристик, що сприяє підвищенню зносостійкості вузлів тертя постдрукарського обладнання, а отже і якості поліграфічної продукції у цілому.

Проте на сьогоднішній день існують труднощі у одержанні шліфувальних відходів на основі алюмінію на підприємствах України внаслідок відсутності додаткового обладнання. Також для застосування розробленої технології необхідно знати марку алюмінієвого сплаву, саме від неї залежить вибір твердої змазки. Це не завжди можливо на серійному виробництві. Проте дослідження авторів [24] показали, що змішування близьких марок сплавів не знижує експлуатаційних властивостей деталей тертя.

Подальші дослідження будуть спрямовані на ґрунтовний аналіз складу антифрикційних плівок нових матеріалів на основі промислових шліфувальних відходів алюмінієвого сплаву AM4,5Кд з домішками твердого мастила.

Одержані високі результати експлуатаційних властивостей (табл. 2, 3) дозволяють розробити рекомендації ефективного використання досліджених композитів для виготовлення антифрикційних деталей фальцювально-склеювальних машин та машин для клеювання елементів в упаковку.

7. Висновки

1. Дослідження довели, що розроблена технологія регенерації промислових шліфувальних відходів з наступним виготовленням матеріалу забезпечила формування гетерогенної структури нового зносостійкого композиту на основі сплаву AM4,5Кд з додаванням твердого мастила дисульфиду молібдену.

2. Показано, що наявність MoS₂ забезпечує припрацювання зносостійкого матеріалу на основі шліфувальних відходів сплаву AM4,5Кд. Вказане дає можливість застосовувати композит у більш широкому діапазоні навантажуючих факторів (навантаженнях до 4 МПа та швидкостях ковзання до 3 м/с) для вузлів різного типу постдрукарської техніки, і зберігати стабільно високі антифрикційні характеристики (коефіцієнт тертя 0,14–0,16 та інтенсивність зношування 23,66–23,69 мкм/км).

3. Ефективність результатів досліджень полягає у можливості використання шліфувальних відходів алюмінієвих сплавів широкої номенклатури марок, наприклад, АК12М2, АМг5Мц, АК12ММгН, для виготовлення якісних композиційних деталей, які працюють на тертя та знос у режимі самозмащування. Це позбавляє необхідності застосування змащувальних мастил та спрощує конструкцію вузлів завдяки усуненню складних мастилоподавальних систем.

4. Аналіз функціональних властивостей дозволяє рекомендувати антифрикційний композит на основі промислових шліфувальних відходів алюмінієвого сплаву AM4,5Кд з домішками твердого мастила – дисульфиду

молібдену MoS₂ для деталей контактних з'єднань складної геометричної форми. Умовами роботи таких деталей є підвищені дискретні швидкості ковзання, навантаження і тертя без змащування рідким мастилом на повітрі. В таких режимах працюють контактні пари ряду постдрукерських машин, таких як фальцювальні-склеювальні машини, машини для вклеювання елементів в упаковку та ін., де можуть застосовуватись розроблені композити.

Література

1. Gordon N. J. Essentials of Polygraph and Polygraph Testing. CRC Press, 2016. 304 p. doi: <https://doi.org/10.1201/9781315438641>
2. Novitni kompozytsiini materialy detalei tertia polihrafichnykh mashyn / Kyrychok P. O., Roik T. A., Havrysh A. P., Shevchuk A. V., Vitsiuk Yu. Yu. Kyiv: NTUU KPI, 2015. 428 p.
3. Sviridenok A. I., Myshkin N. K., Kovaleva I. N. Latest developments in tribology in the journal Friction and Wear // Journal of Friction and Wear. 2015. Vol. 36, Issue 6. P. 449–453. doi: <https://doi.org/10.3103/s106836661506015x>
4. Material properties of graphene/aluminum metal matrix composites fabricated by friction stir processing / Jeon C.-H., Jeong Y.-H., Seo J.-J., Tien H. N., Hong S.-T., Yum Y.-J. et. al. // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2014. Vol. 15, Issue 6. P. 1235–1239. doi: <https://doi.org/10.1007/s12541-014-0462-2>
5. Fabrication of a new Al-Al₂O₃-CNTs composite using friction stir processing (FSP) / Du Z., Tan M. J., Guo J. F., Bi G., Wei J. // Materials Science and Engineering: A. 2016. Vol. 667. P. 125–131. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.04.094>
6. Manufacturing of high strength aluminium composites reinforced with nano tungsten particles for electrical application and investigation on in-situ reaction during processing / Dixit S., Kashyap S., Kailas S. V., Chattopadhyay K. // Journal of Alloys and Compounds. 2018. Vol. 767. P. 1072–1082. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.07.110>
7. Kostornov A. G., Fushchich O. I. Sintered antifriction materials // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 2007. Vol. 46, Issue 9-10. P. 503–512. doi: <https://doi.org/10.1007/s11106-007-0078-5>
8. Bocian M., Jamroziak K., Kulisiewicz M. An identification of nonlinear dissipative properties of constructional materials at dynamical impact loads conditions // Meccanica. 2014. Vol. 49, Issue 8. P. 1955–1965. doi: <https://doi.org/10.1007/s11012-014-9931-z>
9. Shevchuk Y. F., Roik T. A., Varchenko V. T. Antifriction composite materials for friction joints of centrifugal equipment // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 2007. Vol. 46, Issue 7-8. P. 404–407. doi: <https://doi.org/10.1007/s11106-007-0063-z>
10. Pickens J. W. Assuring the Benefits of Aluminum Recycling: Engineering Economical Environmental Solutions to the Issues of Black Dross & Saltcake // Recycling of Metals and Engineered Materials. 2013. P. 1195–1207. doi: <https://doi.org/10.1002/9781118788073.ch105>

11. Process Control in Aluminum Foam Production Using Real-Time X-ray Radioscopy / Stanzick H., Wichmann M., Weise J., Helfen L., Baumbach T., Banhart J. // *Advanced Engineering Materials*. 2002. Vol. 4, Issue 10. P. 814–823. doi: [https://doi.org/10.1002/1527-2648\(20021014\)4:10<814::aid-adem814>3.0.co;2-5](https://doi.org/10.1002/1527-2648(20021014)4:10<814::aid-adem814>3.0.co;2-5)
12. Banhart J. Aluminium foams for lighter vehicles // *International Journal of Vehicle Design*. 2005. Vol. 37, Issue 2/3. P. 114. doi: <https://doi.org/10.1504/ijvd.2005.006640>
13. Muchová L., Eder P. End-of-waste Criteria for Aluminium and Aluminium Alloy Scrap // *Technical Proposals*. 2010. 69 p.
14. Kompozytsyniy pidshyynykovyi material na osnovi aliuminiu: Pat. No. 34407 UA. MPK (2006) C22C 21/02 / Roik T. A., Havrish A. P., Kholiavko V. V., Havrysh O. A., Prokhorenko O. M. No. u200803173; declared: 12.03.2008; published: 11.08.2008, Bul. No. 15.
15. Improved manufacturing performance of a new antifriction composite parts based on copper / Jamroziak K., Roik T., Gavrish O., Vitsiuk I., Lesiuk G., Correia J. A. F. O., De Jesus A. // *Engineering Failure Analysis*. 2018. Vol. 91. P. 225–233. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.04.034>
16. Effect of CaF₂ surface layers on the friction behavior of copper-based composite / Konopka K., Roik T. A., Gavrish A. P., Vitsuk Y. Y., Mazan T. // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2012. Vol. 51, Issue 5-6. P. 363–367. doi: <https://doi.org/10.1007/s11106-012-9441-2>
17. Effect of Secondary Structures on the Functional Properties of High-Speed Sintered Bearings for Printing Machines / Roik T. A., Gavrish A. P., Kirichok P. A., Vitsyuk Y. Y. // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2015. Vol. 54, Issue 1-2. P. 119–127. doi: <https://doi.org/10.1007/s11106-015-9688-5>
18. New Copper-Based Composites for Heavy-Loaded Friction Units / Roik T. A., Gavrysh O. A., Vitsiuk I. I., Khmiliarchuk O. I. // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2018. Vol. 56, Issue 9-10. P. 516–522. doi: <https://doi.org/10.1007/s11106-018-9924-x>
19. Wejrzanowski T. Computer program Micrometer // *Material Science*. 2005. Issue 23. P. 28–34.
20. Huliaev A. P. *Metallovedenye*. Moscow: Metallurhyia, 1986. 544 p.
21. Structure and mechanical properties of mechanically alloyed Al/Al-Cu-Fe composites / Kaloshkin S. D., Tcherdyntsev V. V., Laptev A. I., Stepashkin A. A., Afonina E. A., Pomadchik A. L., Bugakov V. I. // *Journal of Materials Science*. 2004. Vol. 39, Issue 16/17. P. 5399–5402. doi: <https://doi.org/10.1023/b:jmsc.0000039253.28721.3f>
22. Tribological Studies of Al-based Composite / Venkata Siva S. B., Sreenivasa Rao G., Sahoo K. L. // *Developed from a Waste Material*. 3-rd International Conference on Mechanical, Automotive and Materials Engineering (ICMAME'2013). Singapore, 2013. 10 p.
23. Zhang J. Z. Research of Composite Material Properties Based on Waste Glass and Scrap Aluminum // *Advanced Materials Research*. 2012. Vol. 468-471. P. 2868–2871. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.468-471.2868>

24. A novel powder metallurgy-based method for the recycling of aluminum adapted to a small island developing state in the Pacific / Kumar S., Mathieux F., Onwubolu G., Chandra V. // International Journal of Environmentally Conscious Design & Manufacturing. 2007. Vol. 13, Issue 3 (4). P. 1–22.

Только для чтения