



УДК 621.3.035.183

DOI: 10.37128/2520-6168-2022-1-10

## ПЕРСПЕКТИВИ СТВОРЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ДЕТАЛЕЙ З ПІДВИЩЕНИМИ ТРИБОЛОГІЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ГАЗОДИНАМІЧНОГО НАПИЛЕННЯ

Матвійчук Віктор Андрійович, д.т.н., професор  
Гайдамак Олег Леонідович, к.т.н, доцент  
Карпійчук Михайло Федорович, аспірант  
Вінницький Національний Аграрний Університет

Viktor Matviychuk, Doctor of Technical Sciences, Full Professor  
Oleg Gaidamak, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
Mykhailo Karpiichuk, postgraduate student

В статті наведено результати аналізу антифрикційних матеріалів на основі олова і свинцю, міді, алюмінію, пластмас. Показані переваги і недоліки того чи іншого антифрикційного матеріалу, а також можливість їх нанесення на поверхні деталей методом холодного газодинамічного напилення. Розглянуто використання рідких і твердих антифрикційних матеріалів в якості мастил. Значна увага приділена матеріалам з такою ж кристалічною структурою, як у графіта, тепер відомих як двовимірні (2D) матеріали. Серед цих 2D-матеріалів найбільш вивченими матеріалами є  $\text{MoS}_2$  і з'єднання на основі вуглецю, включаючи графіт і графен. Розглянута схема взаємодії поверхонь ковзання, що включає знос, молекулярну деформацію, склеювання, тепловий ефект і навколишнє середовище. Аналіз антифрикційних матеріалів показав, що їх нанесення на поверхню деталей можна здійснювати з використанням процесу холодного газодинамічного напилення. В статті приведена схема і вид установки для холодного газодинамічного напилення антифрикційних поверхневих шарів. Для проведення досліджень було використано мідно-графітовий порошок з розміром частинок 10,7 – 80,8 мкм. За допомогою додатку «Масоцентрувальні характеристики» програмного забезпечення «Компас-3D» було визначено масу фігури напилення як суцільного матеріалу для мідно-графітних покриттів, густиною  $\rho_1 = 0,0086454 \text{ г/мм}^3$ , та пористість фігури напилення. В ході дослідження було встановлено, що порівняно з матеріалом підкладки АА7075, коефіцієнт тертя ковзання був знижений на 47% - 62% для мідно-графітного поверхневого шару. Для отримання композиційних покриттів використовувалася механічна суміш порошку алюмінію А30-01 і міді С01-00. Знайдено залежності коефіцієнтів напилення міді і алюмінію від масового вмісту алюмінію в суміші, що напиляється, при вихідній концентрації алюмінію менше 66%. Коефіцієнт напилення міді виявляється вище коефіцієнта напилення алюмінію. Обидва монотонно збільшуються зі зростанням концентрації алюмінію, поки вона не досягне величини 61%. При високих концентраціях алюмінію (більше 66%) коефіцієнти напилення міді, алюмінію і їх суміші збігаються.

**Ключові слова:** антифрикційні матеріали, холодне газодинамічне напилення, поверхневий шар, агресивне середовище, обладнання.

**Ф. 5. Табл. 5. Рис. 12. Літ. 14.**

### 1. Вступ

Однією із суттєвих перешкод на шляху інтенсифікації різноманітних виробничих процесів є відносно невисока стійкість вузлів машин та обладнання і, насамперед, пар тертя, особливо тих, що працюють в агресивних середовищах. Такі обставини можуть викликати простої обладнання, втрати матеріальних та енергетичних ресурсів. Одним з ефективних шляхів вирішення вказаної проблеми є нанесення на поверхні пар тертя стійких в агресивних середовищах функціональних антифрикційних поверхневих шарів.

Антифрикційність – це здатність матеріалу забезпечувати низький коефіцієнт ковзання, незначні втрати на тертя і малу швидкість зношування сполучених деталей. Крім того, кожен матеріал у конкретних умовах роботи має бути, наприклад, стійким проти окиснювання за підвищених температур, мати високий опір корозії під час роботи в агресивних середовищах тощо. Ці матеріали мають працювати в широкому діапазоні швидкостей ковзання (від 0,001 до 100 м/с і більше),



навантажень (від 1 кПа до 25 МПа і більше), температур до 100°C і більше, мати низький коефіцієнт тертя та високу зносостійкість.

Антифрикційність забезпечується такими властивостями матеріалу: 1) високою теплопровідністю; 2) ефективним змащенням мастильним матеріалом; 3) здатністю створювати на поверхні захисні плівки; 4) задовільною припрацьовуваністю, яка ґрунтується на здатності матеріалу в процесі тертя легко пластично деформуватись і збільшувати площу фактичного контакту, що сприяє зниженню локального тиску і температури на поверхні тертя.

Наведені відомості свідчать про неможливість створення універсального антифрикційного матеріалу, здатного працювати у вузлах тертя різного призначення. Тож постає потреба у розробленні різноманітних матеріалів тертя для конкретних заданих умов роботи.

Статистика свідчить, що близько 20% світового виробництва енергії використовується на подолання тертя [1]. Вивчення тертя вимагає кореляції між теоретичною концепцією, експериментальними і чисельними дослідженнями, які часто залишаються без уваги. Економічні наслідки втрат на тертя послужили стимулом для того, щоб в кінцевому підсумку з'єднати три важливих міждисциплінарних області досліджень, а саме тертя, змащення і знос під загальним терміном [2]. Тому саме для зв'язку відзначених трьох важливих міждисциплінарних областей досліджень у 1960 році був введений термін трибологія.

---

## 2. Аналіз останніх досліджень та публікацій

---

Проведемо аналіз антифрикційних матеріалів пар тертя, які можуть бути нанесені на поверхню методом холодного газодинамічного напилення.

Антифрикційні матеріали на основі олова і свинцю – бабіти. Бабіти мають низькі значення твердості (НВ 12...32) і температури плавлення (240...320°C), відмінну припрацьовуваність. За антифрикційними властивостями вони перевершують усі інші сплави, але значно поступаються їм щодо опірності втомі. У зв'язку з цим бабіти застосовують лише для тонкого (менше 1 мм) покриття робочої поверхні опори ковзання. Найпоширенішими бабітами на олов'яній основі є Б93, Б88, Б83, Б83С. Усі вони мають гетерогенну структуру у вигляді механічної суміші твердого розчину на основі олова (м'яка основа) і твердого розчину на основі інтерметалідної сполуки  $SnSb$  (тверді вкраплення). Висока зносостійкість цих сплавів зумовлена значною міцністю вторинних структур, що утворюються на поверхні сплаву. Бабіти можуть бути нанесені на поверхню деталей холодним газодинамічним напиленням.

Антифрикційні матеріали на основі міді. Як антифрикційні матеріали широко застосовують сплави на основі міді, відомі переважно як бронзи. Бронзи бувають олов'яністі, алюмінієві тощо. Слід зазначити, що бронзу застосовують також як компонент порошкових антифрикційних матеріалів або тонкостінних пористих покриттів. Найбільшого поширення набули матеріали на сталевій підкладці з напеченим бронзовим шаром, пориста бронза, просочена мастилом, а також бронзографітові матеріали. Оптимальні властивості має бронза, що містить 9...11% олова. Пористі бронзи застосовують переважно для виготовлення підшипників ковзання, що працюють у легких умовах, наприклад для приладів, робота яких характеризується малими швидкостями ковзання (менше 1,5 м/с) і невеликими навантаженнями (приблизно 0,5...1 МПа). Такі підшипники не потребують додаткового змащення протягом 3000...5000 год, мають низький і стабільний коефіцієнт тертя (0,01...0,04), низький рівень шуму і надійно працюють у діапазоні температур від -60 до +120°C. В умовах додаткового змащування граничне навантаження для пористої бронзи досягає 8 МПа (якщо  $V=1$  м/с). Високі антифрикційні характеристики притаманні матеріалам із порошків, що містять мідь, здобутих методом порошкової металургії. До них належать бронзографіти, складно леговані бронзи, міднографіти.

У зв'язку з тим, що графіт не взаємодіє ні з міддю, ні з оловом, його застосовують як домішку, котра відіграє роль твердого мастила, яке вводять від 1 до 25% залежно від умов роботи матеріалів. Графіт, наявний у бронзі, у процесі тертя поступово утворює графітову плівку на поверхні контр тіла. Плівка постійно відновлюється у разі механічних пошкоджень в окремих ділянках поверхні тертя. До цих матеріалів належать БрОГр10-3, БрОГр9-3, БрОГр8-4. Властивості спечених бронз і бронзографітів можуть бути значно поліпшені легуванням такими елементами, як титан, нікель, свинець, цинк, кобальт, залізо, алюміній та інші, що мають пористість до 12%. Їх границя міцності досягає 3,5 МПа.

Міднографітові матеріали застосовують переважно для виготовлення нерухомих контактних, радіальних ущільнень і щіток. Їх склад визначають згідно з необхідними властивостями. У цих



матеріалах мідь забезпечує провідність, а графіт підвищує зносостійкість і контактний опір. Вміст графіту коливається від кількох відсотків до 75%. Для поліпшення властивостей щіткових матеріалів додають олово, свинець, цинк. Олово і цинк зміцнюють матеріал, а свинець поліпшує припрацьовуваність і виконує роль мастила. Опір зношуванню спечених міднографітових матеріалів в умовах роботи щіток набагато вищий, порівняно зі звичайними щітковими матеріалами.

Проведені нами дослідження показали, що антифрикційні матеріали на основі міді достатньо добре наносяться на поверхні деталей методом холодного газодинамічного напилення.

Антифрикційні матеріали на основі алюмінію. Використання алюмінієвих сплавів як антифрикційного матеріалу з кожним роком збільшується. Ці сплави мають достатню втомну міцність, корозійну стійкість у мастилах, порівняно високу задиркостійкість і високі антифрикційні властивості. Сплави на основі алюмінію застосовують як у біметалевому, так і монометалевому виконанні. Зростає інтерес до антифрикційних сплавів на основі алюмінію, виготовлених методами порошкової металургії, завдяки їх істотним перевагам, таким, як мала питома маса, невисока вартість і велика корозійна стійкість. Ці сплави добре підлягають нанесенню на поверхні деталей методом холодного газодинамічного напилення.

Антифрикційні матеріали на основі пластмас. Як антифрикційні матеріали набули поширення пластмаси, синтезовані на основі однотипних і модифікованих смол і їхніх композицій з різними наповнювачами, стабілізаторами, пом'якшувачами, прискорювачами й іншими домішками. Як наповнювачі для антифрикційних пластмас застосовують матеріали органічного походження (деревне борошно і кришиво, дерев'яний шпон, бавовняні тканини та ін.), наповнювачі неорганічного походження (графіт, тальк, дисульфід молібдену, азбест, скляні нитки, каолін та ін.). До антифрикційних матеріалів на основі пластмас, що застосовуються у вузлах тертя, варто віднести поліетилен низького і високого тиску, фторопласт, полістирол, вініпласт, капролон, капрон технічний, поліформальдегід, плексиглас та ін. Основними перевагами антифрикційних матеріалів на основі пластмас, порівняно з металевими, є зносостійкість, високе відношення міцності до питомої маси, здатність до гасіння вібрацій, високий опір схоплюванню з матеріалом вала, технологічність процесів виготовлення й обробки, низька вартість. Недоліки – низька теплопровідність, гігроскопічність, високий коефіцієнт лінійного розширення, низька механічна міцність. Працездатність і несучу здатність полімерів можна значно підвищити за допомогою наповнювачів і армування.

У сучасних вузлах тертя знаходять застосування три типи металополімерних матеріалів: зміцнених сталевую підкладкою; поруватих спечених виробів, просочених фторопластом; наповнених фторопластом, не армованих каркасом. Вхідні складові компоненти мають бути доступні й технологічні. Визначальний вплив на антифрикційність матеріалів на основі полімерів має тип сполучного, яким можуть бути як термопластичні (поліолефіни, поліаміди, полікарбонат, фторопласт та ін.), так і терморезистивні полімери (фенолформальдегідні, епоксидні та інші смоли).

Перспективним є використання як основи поліаміду – фенілону. Його працездатність зберігається до 260°C. Матеріали на основі фенілону застосовуються у вузлах тертя з питомими навантаженнями до 50 МПа. Для зниження коефіцієнта тертя до значень 0,07...0,10 до цих матеріалів додають тверді мастила (*MoS<sub>2</sub>*, *ВІЧ*, графіт).

Одним із найпоширеніших і застосовуваних матеріалів у вузлах тертя є неполярний полімер – фторопласт. Це фторопохідний етилен, у якому атоми водню частково або цілком заміщені фтором. Промисловість випускає такі марки фторопластів: 4, 4Д, 40, 42, 3, 3М, 30, 32Л, 2, 10 тощо. Як сполучний переважно використовують фторопласт-4 (політетрафторетилен). Для підвищення зносостійкості і механічної міцності в композиції на основі фторопласту вводять йодиди металів, бронзи, хлористий натрій, скловолокно.

Проведені нами дослідження показали, що антифрикційні пластмаси досить добре наносяться на деталі газодинамічним напиленням. А такий їх недолік, як низька теплопровідність і втрата при нагріванні механічних характеристик, може бути усунена шляхом їх нанесення у вузькі щілини. В результаті поверхневий шар деталі є чередуванням вузьких щілин з антифрикційною пластмасою і тонких ребер із базового матеріалу.

---

### 3. Мета та завдання дослідження

---

Метою дослідження є аналіз антифрикційних матеріалів та створення з них антифрикційних шарів на поверхнях тертя методом холодного газодинамічного напилення.



#### 4. Виклад основного матеріалу

Рідкі антифрикційні матеріали широко використовуються у більшості промислових галузей, наприклад, в автомобілебудуванні та агропромисловому комплексі. Вони складаються з базового полімеру із доданими присадками. Присадки забезпечують змащення, а полімерна основа забезпечує дисперсію і стабільність присадок. Присадки дуже чутливі до робочих умов, таких як навантаження, швидкість і температура; також суттєвими чинниками є в'язкість і конструкція мастильної системи. Конструкція системи змащення повинна забезпечувати адекватний перепад тиску для притоку рідких полімерів до необхідних частин у залежності від в'язкості. Вузький діапазон ефективного робочого спектра і складність проектування забезпечення перепаду тиску для потоку мастильного матеріалу ускладнює використання рідких мастильних матеріалів в екстремальних робочих умовах, коли температура і тиск істотно змінюється або є гази і випромінювання, які можуть вступати в реакцію з мастильним матеріалом, що погіршує його мастильні властивості [3].

Тверді антифрикційні матеріали були розроблені в першу чергу для установок, де рідкі антифрикційні матеріали неадекватні, наприклад, в літаках і космічних апаратах, які характеризуються екстремальними оточуючими умовами, такими як коливання температури протягом дня, інтенсивність сонячного випромінювання, атмосферний тиск і вплив газів [4]. У цих умовах рідкі мастильні матеріали неадекватні як з точки зору стабільної присадки, так і з точки зору конструктивних обмежень.

Графіт – один з перших елементів, які використовувалися в якості твердого мастильного матеріалу або добавки до рідких мастильних матеріалів, що в подальшому призвело до дослідження матеріалів з такою ж кристалічною структурою, як графіт, тепер відомих як двовимірні (2D) матеріали. Ці матеріали в основному використовуються в твердих змащеннях і покращенні поверхонь металів і сплавів, оскільки вони забезпечують легке ковзання між поверхнями атомів і, отже, низьке тертя.  $\text{MoS}_2$ , h-BN і борна кислота – одні з успішних твердих мастильних матеріалів, які потрапляють в цю категорію.[5-6]. Шарувата структура 2D-матеріалів відповідає за змащувальні властивості матеріалів, в яких кожен шар ковалентно пов'язаний один з одним за допомогою  $sp^2$ - або  $sp^3$ -гібридації, що призводить до більш міцних зв'язків. Це міцне між шарове з'єднання призводить до того, що 2D-матеріали стають міцнішими, жорсткішими і твердішими [7]. Деякі 2D-матеріали, такі як графен  $\text{WS}_2$ , мають дуже низький коефіцієнт тертя, але піддаються сильному зносу [8]. Навпаки, оксиди перехідних металів, h-BN і нітрокарбони мають чудову зносостійкість, але більш високий коефіцієнт тертя. Така суперечлива поведінка 2D-матеріалів пов'язана з природою внутрішнього шарового зв'язку між кожним атомним шаром. У 2D-матеріалів з дуже низьким коефіцієнтом тертя шари притягуються один до одного слабкими силами Ван-дер-Ваальса, що забезпечує легке ковзання між шарами і зменшує тертя. З іншого боку, двовимірні оксиди металів зазвичай мають гексагональну вюрцитну або тетрагональну структуру, в якій між шарові атоми пов'язані один з одним ковалентними зв'язками, що викликають високе внутрішньо-шарове тертя, але зменшують знос, оскільки обмежують розрив між шарами. Зі збільшенням міцності між шарового зв'язку коефіцієнт тертя також збільшується, але зменшується знос 2D-матеріалів.

Серед цих 2D-матеріалів найбільш вивченими матеріалами є  $\text{MoS}_2$  і з'єднання на основі вуглецю, включаючи графіт і графен.  $\text{MoS}_2$  – найбільш успішний твердий мастильний матеріал для аерокосмічної техніки в сухих умовах, в той час як графіт і деякі інші змащувальні матеріали на вуглецевій основі вимагають вологого середовища для забезпечення добрих антифрикційних властивостей.

На рис. 1 приведене схематичне зображення різноманітних твердих антифрикційних матеріалів.

Тертя на макрорівні кількісно оцінюється за допомогою коефіцієнта тертя і швидкості зносу. Для ефективного керування втратами на тертя важливо розуміти що лежить в основі атомістичних механізмів втрат на тертя. Тертя виникає в результаті тепла, яке виділяється через різні фізичні, механічні і хімічні взаємодії, що відбуваються на межі поділу поверхонь ковзання. Однак складність взаємодій і відсутність єдиної теоретичної моделі унеможливають кількісну оцінку відносного вкладу кожної з цих взаємодій (рис.2).

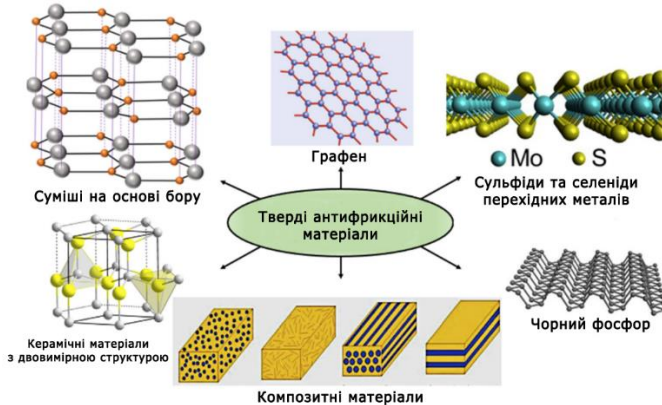
Розглянемо взаємодії поверхонь ковзання, що приведені на рис. 2.

Знос. На макрорівні знос викликається пластичною деформацією і руйнуванням твердоплівкових матеріалів, що призводить до фізичного пошкодження. Знос робить поверхню більш шорсткою і призводить до збільшення тертя. Для твердоплівкового мастила бажано, щоб плівка





зазнавала пластичної деформації, а не крихкого руйнування. Пластичні матеріали піддаються пластичній деформації за рахунок руху дислокацій, і мають можливість керувати деформацією, задавши розмір зерен і їх орієнтацію. З іншого боку, крихкому руйнуванню сприяє зародження і поширення тріщин, що призводить до більш високої швидкості зносу.



**Рис. 1. Схематичне зображення різноманітних твердих антифрикційних матеріалів**



**Рис. 2. Схема взаємодій поверхонь ковзання**

Молекулярна деформація. Коли молекули на границях поверхонь ковзання стикаються одна з одною, відбувається злипання поверхневих атомів тонкої плівки з вістрям контртіла. 2D-матеріали відомі своєю низькою шорсткістю в поперечному напрямку. Вони можуть легко деформуватися або розшаровуватися у залежності від сили зчеплення поверхневого шару. Ця бічна деформація 2D-шарів через адгезію відома як атомна гофра. Гофрування атомів призводить до деформації молекул і виділення тепла. Негативне контактне навантаження означає адгезію між атомами через молекулярну деформацію. Для розриву цієї контактної взаємодії потрібна енергія, яка виділяється у вигляді теплоти тертя. Наявність дислокацій і включень може також збільшити енергію гофрування, оскільки енергія втрачається у вигляді тепла для подолання або переміщення цих дефектів. Чим вище число рухів дислокації, тим більше тепла виділяється через молекулярну деформацію.

Тепловий ефект. При певній температурі молекули й атоми отримують достатньо енергії, щоб переміщатися по межі контакту. Швидкість цих рухів може збільшуватися або зменшуватися в залежності від навколишньої температури або тепла, що виділяється через фрикційні взаємодії. Швидкість цих коливань також залежить від потенціалу взаємодії між атомами і молекулами. Коли потенціал взаємодії високий, загальний вплив термічної активації на тепловиділення зменшується. В цьому випадку для створення таких ефектів потрібно більше тепла. Це пов'язано із термічним кільцевим механізмом атомів, який полегшує ковзання. Тепловий ефект тепловиділення залежить від швидкості ковзання і поперечної чистоти поверхні ковзання.

Склеювання. Це одна з найбільш важливих проблем, пов'язаних зі збільшенням тертя через хімічну взаємодію на контактах нерівностей. Склеювання може відбуватися між поверхнями, що труться або в присутності реагентів навколишнього середовища. Утворення і розрив цих зв'язків під час відносного руху між поверхнями, що труться, призводить до збільшення або зменшення тертя у залежності від характеру енергії зв'язку.

Процес зносу в основному включає розрив металевих зв'язків з високою енергією дисоціації зв'язку і, таким чином, виділяє тепло, оскільки ці реакції є екзотермічними. Крім того, поверхневе окислення і корозія в результаті впливу реагентів навколишнього середовища також є екзотермічною і призводить до виділення тепла. Чим вище енергія дисоціації зв'язку, тим більше виділяється тепла. Зміна їх енергії виділяється в атмосферу у вигляді тепла. Енергія зв'язку різних типів атомних зв'язків представлена в таблиці 1.

Навколишнє середовище. Твердоплівкові антифрикційні матеріали сильно залежать від навколишнього середовища. Хімічні та фізичні взаємодії між плівкою і навколишнім середовищем мають суттєвий вплив на трибологічні характеристики.

Графіт здавна відомий своїми антифрикційними властивостями, пов'язаними з його видатними якостями твердого антифрикційного матеріалу у вологому середовищі. Це відбувається через ослаблення між шарових сил Ван-дер-Ваальса або обірваних зв'язків внаслідок насичення іонами  $H^+$  і  $OH^-$  через вологість. Тому графіт використовується у якості добавки до різних твердих



антифрикційних матеріалів для поліпшення їх трибологічних характеристик переважно у вологому середовищі.

З моменту відкриття графітових сумішей, вони були визнані багатообіцяючим матеріалом, який може зробити революцію, зокрема в електротехнічній промисловості. На трибологічну поведінку графітових сумішей також впливає їх структура, реакційна здатність різних функціональних груп, хімічна спорідненість до видів навколишнього середовища і товщина поверхневих шарів. Тертя ковзання по поверхні графітових сумішей залежить від товщини або кількості атомних шарів. Зі збільшенням кількості шарів сила тертя зменшується і не залежить від нормальної сили, швидкості ковзання та матеріалу підкладки.

Таблиця 1

*Енергія зв'язку та температури плавлення різних типів склеювань.*

Тип склеювання	Матеріал	Енергія зв'язку (ккал/моль)	Температура плавлення (°C)
Іонний	NaCl	153	801
	MgO	239	1000
	Si	108	1410
Ковалентний	C	170	3550
	Hg	16	-39
	Al	77	660
Металічний	Fe	97	1538
	W	203	3410
Ван Дер Ваальса	Ar	1,8	-189
	Cl <sub>2</sub>	7,4	-101

Аналіз антифрикційних матеріалів показав, що їх нанесення на поверхню деталей можна здійснювати з використанням процесу холодного газодинамічного напилення.

Схема установки для холодного газодинамічного напилення антифрикційних поверхневих шарів представлена на рис. 3 [9].

Відповідно до схеми (рис. 3), стиснене повітря подається через патрубок 5, проходить через отвори 4 з розжареною ніхромовою спіраллю, контактуючи з якою повітря нагрівається до заданої температури і потрапляє в прискорювач повітря, де швидкість стисненого повітря регулюється конусом регулятора 11. В результаті прискорення стисненого повітря на зрізі конусної частини регулятора 11 тиск повітря падає менше атмосферного, виникає ефект ежекції, завдяки якому в канал регулятора 11 всмоктується напилювальний металевий порошок і потрапляє в струмінь нагрітого стисненого повітря. Рухаючись в нагрітому стисненому повітрі в отворі сопла 12 металевий порошок нагрівається і далі переноситься на підкладку.

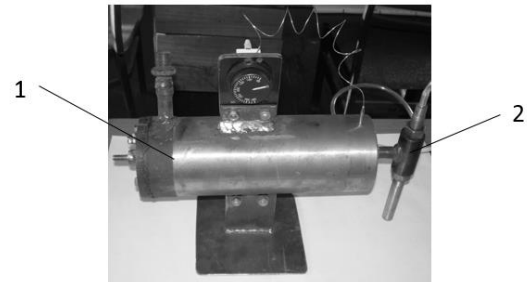
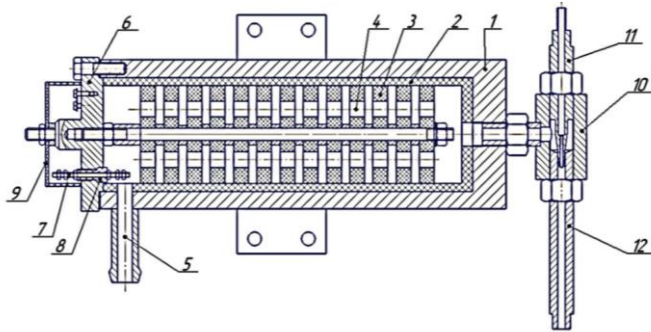
Регулюючи величину електричного струму і, відповідно, температуру розжарення ніхромової спіралі та швидкість протікання стисненого повітря, з'являється можливість впливати на параметри нагріву металевих порошкових частинок і встановити оптимальні режими нанесення функціонального покриття. Використання стисненого повітря в якості теплоносія створює безпечні умови праці.

На основі схеми створена установка, показана на рисунку 4, яка здатна підтримувати стабільні, регульовані умови напилення порошкових матеріалів.

Для проведення досліджень було використано порошкову мідь С01-00 та порошковий графіт з розміром частинок 10,7 – 80,8 мкм. Вміст порошкового графіту становив 5% від загальної маси порошкової мідно-графітової суміші.

Установка для холодного газодинамічного напилення працює таким чином. За рахунок ефекту ежекції напилюваний мідно-графітовий порошок подається у повітряний потік. Нагрітий та розігнаний у повітряному потоці порошок досягає поверхні підкладки і формує суцільний шар покриття.

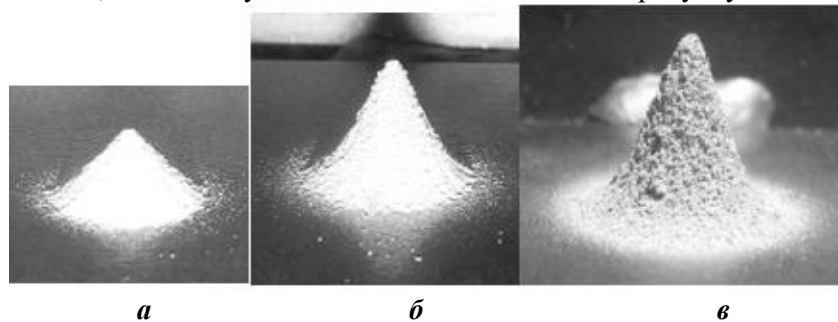
Кількість порошку для однієї операції складала 0,47 г. Дистанція напилення – 10 мм. У якості підкладки було використано алюмінієві пластини АА7075-Т651 товщиною 4 мм. Перед дослідженнями поверхня пластин додатково не оброблялась.



**Рис. 3. Газодинамічний напилювальний пристрій:**  
1 – корпус; 2 – термоізолятор; 3 – керамічні диски;  
4 – отвори; 5 – патрубок; 6 – кришка;  
7 – електроконтакти; 8 – електроізолятори;  
9 – захисна кришка; 10 – прискорювач стисненого повітря; 11 – конусний регулятор швидкості стисненого повітря; 12 – сопло

**Рис. 4. Установка для холодного газодинамічного напилення (ХГДН) поверхневих шарів:** 1 – нагрівач повітря, 2 – сопло.

Дослідження проводили на трьох різних температурних режимах стисненого повітря. Вимірювання температури здійснювали за допомогою термопари, вбудованої в сопло. Регулювання та підтримування температури забезпечували за допомогою плавного регулятора струму. Тиск повітря підтримувався на значенні 0,5 МПа. Результати напилення показані на рисунку 5.



**Рис. 5. Фігури напилення:** а – зразок № 1, б – зразок № 2, в – зразок № 3.

Підкладка була зважена до і після напилення. Всі дані були занесені до таблиці 2, де,  $T$ , – температура напилювання,  $M_1$  та  $M_2$  – маса підкладки до та після напилювання.  $M_n$  – маса фігури напилення,  $K$  – коефіцієнт використання порошку, який визначається як відношення маси фігури напилення до початкової маси порції порошку та помноженої на 100%.

**Таблиця 2**

**Вплив режимів напилення на коефіцієнт використання порошку**

№ зразка	$T, C^{\circ}$	$M_1, \text{г}$	$M_2, \text{г}$	$M_n, \text{г}$	$K, \%$
I	350	10,41	10,45	0,04	8,5
II	400	10,55	10,67	0,12	25,5
III	450	10,79	10,99	0,2	42,5

За допомогою додатку «Масоцентрувальні характеристики» програмного забезпечення «Компас-3D» було визначено масу фігури напилення як суцільного композиційного матеріалу з мідно-графітової суміші. В програмі «Компас-3D» спроектували 3D моделі отриманих фігур напилення у відповідності до їх реальних розмірів (рис. 6).

Для визначення маси фігур напилення необхідно знати густину мідно-графітової суміші. Цю густину визначали з урахуванням того, що в одному метрі кубічному міститься 95% міді густиною  $8990 \text{ кг/м}^3$ , що становить  $8540,4 \text{ кг}$  та 5% графіту густиною  $2100 \text{ кг/м}^3$ , що становить  $105 \text{ кг}$ , таким чином  $1 \text{ м}^3$  міднографітової суміші буде важити  $8540,4 + 105 = 8645,4 \text{ кг}$ , а густина такої суміші становить  $\rho_1 = 0,0086454 \text{ г/мм}^3$ .

Густину покриття  $\rho_2$  визначали як відношення маси зваженої фігури напилення до її розрахункового об'єму, отриманому з 3D моделі за допомогою додатку «Масоцентрувальні характеристики» програмного забезпечення «Компас-3D».

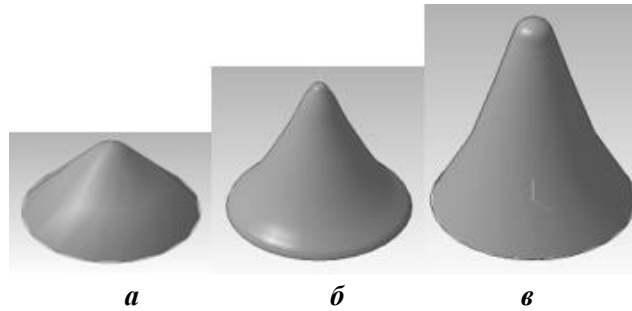


Рис. 6. 3D моделі фігур напilenня, а – зразок №1, б – зразок №2, в – зразок №3

Пористість отриманих фігур напilenня  $J$  визначали за формулою:

$$J = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1} \cdot 100\% \quad (1)$$

Таким чином було визначено частку повітря в об'ємі фігури напilenня.

Результати визначення пористості фігур напilenня представлено в табл. 3.

Таблиця 3

**Визначення пористості фігур напilenня**

№ зразка	Розрахункова маса фігури напilenня для мідно-графітового порошку, г	Розрахунковий об'єм, мм <sup>3</sup>	Зважена маса фігури напilenня, г	Густина фігури напilenня $\rho_2$ , г/мм <sup>3</sup>	Пористість фігури напilenня $J$ , %
I	0,24724	36,206894	0,04	0,006829	21
II	0,34965	84,275364	0,12	0,00415	52
III	0,5914	162,907247	0,2	0,00363	58

В ході дослідження було встановлено, що порівняно з матеріалом підкладки АА7075, коефіцієнт тертя по сталі якого складає 0,5, коефіцієнт тертя для мідно-графітного поверхневого шару по тій же сталі для зразка №1 був знижений на 47% для зразка №2 на 57%, для зразка №3 на 62%. Таке покращення трибологічних характеристик дозволяє утворювати мікроплівки з твердих порошкових матеріалів з додаванням графіту методом холодного газодинамічного напilenня на зношених поверхнях деталей сільськогосподарських машин та машин іншого призначення. Враховуючи те, що ці покриття мають суттєву пористість, це відкриває додаткові можливості у покращенні антифрикційних властивостей функціонального пористого покриття шляхом просочення пор різними мастильними матеріалами.

Одним з напрямків створення поверхневих шарів деталей з підвищеними трибологічними характеристиками із застосуванням газодинамічного напilenня є створення композиційних покриттів [10...13]. Для того, щоб заздалегідь передбачити можливий склад композиційного покриття необхідно знати закономірності створення таких покриттів та взаємовплив одного типу порошку на інший в процесі створення покриття. Знання таких закономірностей дозволяють вибрати склад вихідного порошку, необхідний для отримання заданого вмісту компонентів в покритті.

Для отримання композиційних мідно-алюмінієвих покриттів на сталевій підкладці використовувалася механічна суміш порошку міді С01-00 і алюмінію А30-01. На рис. 7 показані фотографії цих порошоків. Для проведення дослідження були вибрані такі режими роботи пристрою ХГДН: тиск повітря  $P_0 = 0,6$  МПа, тиск ежекції  $P_e = 0,095$  МПа, температура нагріву стисненого повітря на вході в сопло  $T_0 = 300 \pm 10$  °С, дистанція напilenня 20 мм.



Рис. 7. Фотографії порошоків, що напilenються: а) порошок алюмінію А 30-01, б) порошок міді С01-00





Розмір порошкових частинок є одним з найважливіших параметрів, що визначають можливість його застосування в ХГДН. Від розміру цих частинок значною мірою залежить якість та властивості одержуваних покриттів.

Середні значення розмірів частинок  $d_{cp}$  і стандартне відхилення  $S_d$ , обчислені за мікрофотографіями, що показані на рис. 8, представлені в табл. 4. Максимальну частку за обсягом (масою) займають частинки розміром 20-52 мкм для алюмінію і 42 - 78 мкм для міді.

Таблиця 4.

Параметри порошків

Порошок	$d_{cp}$ , МКМ	$S_d$ , МКМ
A 30-01	30,3	15,8
C 01-00	46,4	26,6

Для створення композиційних покриттів готували суміші порошків міді та алюмінію у пропорціях показаних у табл. 5. Загальна маса порції суміші для одного напилення складала 0,5 грама.

Коефіцієнти напилення окремо алюмінію і міді в напиленому покритті обчислювалися за вимірним коефіцієнтом напилення суміші і результатами по елементного аналізу зразків на електронному мікроскопі.

Таблиця 5.

Параметри суміші порошків

Порошок	Номер суміші										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
C 01-00	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	–
A 30-01	–	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1

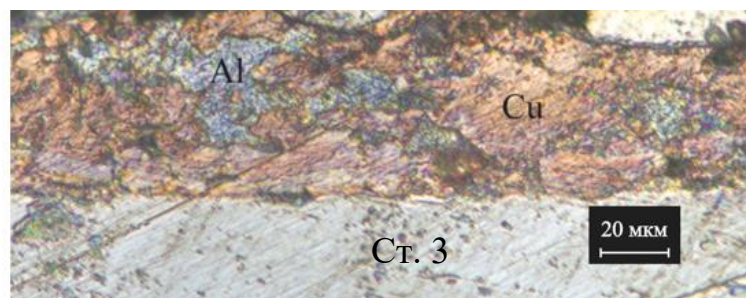


Рис. 8. Мікрофотографія шліфа підкладки з композиційним покриттям мідь – алюміній.

Мікрофотографії, отримані на електронному мікроскопі, обробляли за допомогою програми PhotoM 1,21 та визначали площу вмісту кожного з компонентів, тобто міді і алюмінію. Фотографія обробленого мікрошліфу показана на рис. 9.

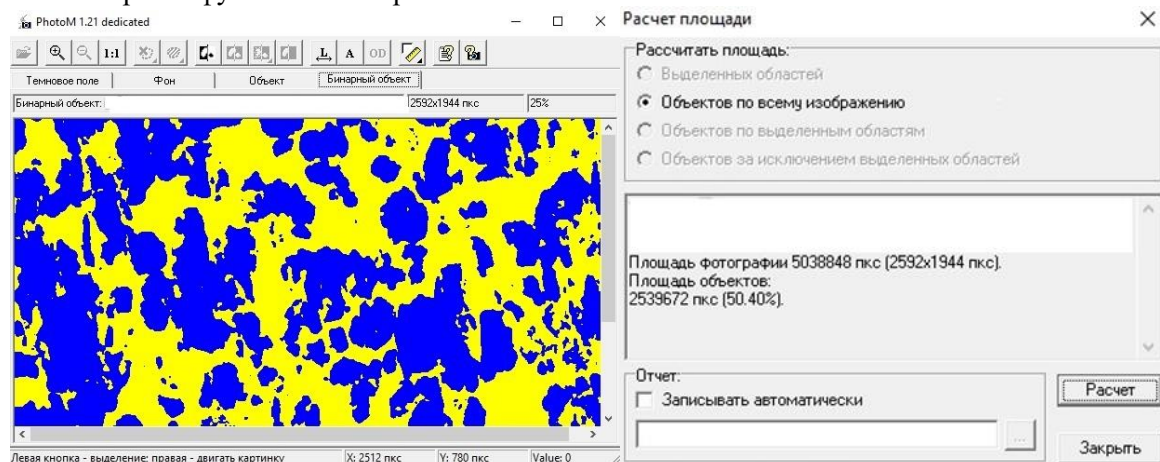


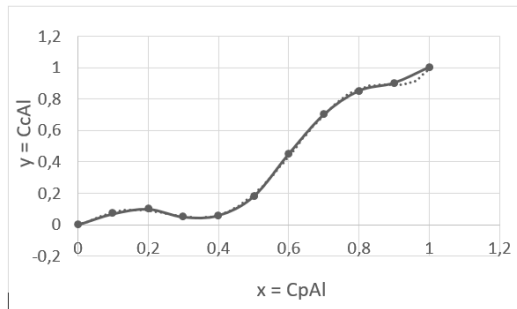
Рис. 9. Результати обробки мікрофотографії шліфа з композиційним мідно-алюмінієвим покриттям за допомогою програми PhotoM 1,21, та розрахунок вмісту алюмінію і міді.



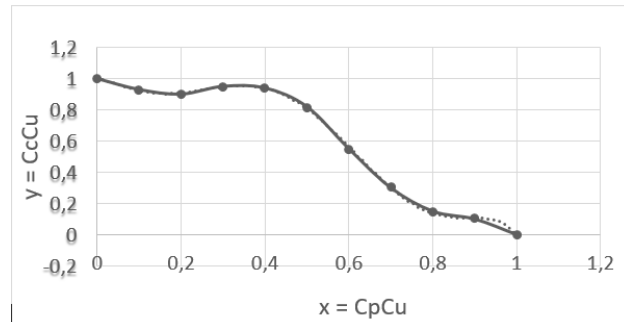
На рис. 10 та 11, представлені результати розрахунків по масовому вмісту алюмінію та міді в покритті (позначено як  $C_{cAl}$  та  $C_{cCu}$  відповідно) в залежності від їх масового вмісту у вихідному порошку (позначено як  $C_{pAl}$  та  $C_{pCu}$  відповідно). Отримано графіки зміни вмісту алюмінію і міді які можуть бути апроксимовані поліномом (2) для алюмінію та поліномом (3) для міді. На графіках апроксимації показані пунктирними лініями.

$$y = 79,003x^6 - 214,09x^5 + 199,99x^4 - 71,815x^3 + 7,338x^2 + 0,5835x - 0,001 \quad (2)$$

де  $x$  це  $C_{pAl}$ , а  $y$  це  $C_{cAl}$ .



**Рис. 10.** Абсолютне значення вмісту алюмінію в покритті  $C_{cAl}$  в залежності від його вмісту у вихідному порошку  $C_{pAl}$



**Рис. 11.** Абсолютне значення вмісту міді в покритті  $C_{cCu}$  в залежності від його вмісту у вихідному порошку  $C_{pCu}$

$$y = -79,003x^6 + 214,09x^5 - 199,99x^4 + 71,815x^3 - 7,338x^2 - 0,5835x + 1,0014. \quad (3)$$

де  $x$  це  $C_{pCu}$ , а  $y$  це  $C_{cCu}$ .

Проаналізовано закономірності зміни коефіцієнтів наплення. На рис. 12 показано зміну коефіцієнтів наплення суміші міді і алюмінію 1, тільки алюмінію 2 і тільки міді 3 від абсолютного масового вмісту алюмінію у вихідній порошковій суміші. Коефіцієнти наплення пораховані за змістом алюмінію та міді в покритті за формулами (4):

$$k_{dAl} = \frac{C_{cAl}}{C_{pAl}} k_{dmix}, \quad k_{dCu} = \frac{C_{cCu}}{C_{pCu}} k_{dmix}, \quad (4)$$

де  $k_{dmix}$  – коефіцієнт наплення суміші порошкового алюмінію і міді;  $k_{dAl}$  – коефіцієнт наплення порошкового алюмінію;  $k_{dCu}$  – коефіцієнт наплення порошкової міді.

Отримані результати для коефіцієнта наплення порошкової суміші міді та алюмінію досить добре апроксимуються параболою 4 (рис. 12). Штриховою лінією 5 показана апроксимація коефіцієнта наплення порошкової міді, та 6 - коефіцієнта наплення порошкового алюмінію. Добре видно, що при вихідній концентрації алюмінію, що менше 66 %, коефіцієнт наплення порошкової міді виявляється вище коефіцієнта наплення порошкового алюмінію. Обидва коефіцієнти поступово збільшуються зі збільшенням концентрації алюмінію, поки вона не досягне значення 61 %. При концентраціях алюмінію більше 66 % коефіцієнти наплення міді і алюмінію наближуються один до одного та збігаються і з коефіцієнтом наплення суміші.

Якщо припустити що порошки не впливають один на одного в процесі створення покриття, то їх коефіцієнти наплення мали б залишатись однаковими незалежно від того, в якій пропорції змішані напилувальні порошкові матеріали. Це дозволило б обчислити коефіцієнт наплення порошкової суміші на підставі тільки двох вимірювань: коефіцієнта наплення тільки міді при відсутності алюмінію  $k_{dCu0}$ , та коефіцієнта наплення алюмінію при відсутності міді  $k_{dAl0}$ . Далі по формулі (5) можна знайти коефіцієнт наплення суміші при заданому вихідному вмісті алюмінію.

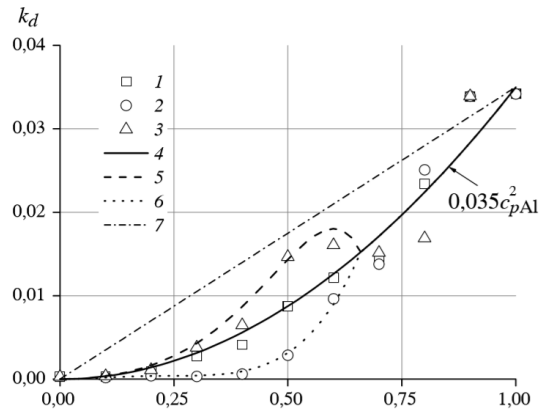
$$k_{dmix} = Ck_{dAl0} + (1 - C)k_{dCu0}. \quad (5)$$

Обчислені за формулою (5) величини показані на рис. 12 штрих-пунктирною лінією 7. Таким чином видно, що припущення про те, що компоненти не впливають один на одного, є необґрунтованим, оскільки спостерігаються істотні відмінності між розрахунком по лінійній теорії з експериментальними результатами.

Отримані дані за залишковим вмістом компонентів в покритті дозволяють вибрати склад вихідного порошку, необхідний для отримання заданого вмісту компонентів в покритті. Наприклад, максимально залишковий вміст міді (~ 95 %) може бути отриманий при додаванні в вихідний порошок 30-40 % алюмінію. При такій вихідній концентрації алюмінію коефіцієнт наплення міді складе 0,033%, що помітно вище, ніж коефіцієнт наплення чистої міді (0,01%). Якщо, наприклад, потрібно



отримати залишковий вміст міді 50 %, то необхідно додати в вихідний порошок 61 % Алюмінію. У цьому випадку коефіцієнт напilenня міді помітно зросте і буде вже 15% і т. д.



**Рис. 12.** Залежності коефіцієнтів напilenня суміші: 1 – алюмінію, 2 – міді, 3 – від концентрації алюмінію у вихідній суміші; 4 – параболічна апроксимація коефіцієнта напilenня суміші; 5 – апроксимація коефіцієнта напilenня міді; 6 – апроксимація коефіцієнта напilenня алюмінію; 7 – коефіцієнт напilenня суміші по лінійній теорії (коли компоненти не впливають один на одного)

З даного дослідження можна зробити висновок, що в процесі напilenня компоненти суміші впливають один на одного. Імовірно механізм взаємодії компонентів полягає у тому, що вони з різною ймовірністю закріплюються на поверхні, яка складається з різних матеріалів (тобто ймовірність закріплення мідних частинок на поверхні з алюмінієвих частинок вище, ніж вірогідність закріплення мідних частинок на поверхні зі сталі або самих мідних частинок).

## 5. Висновки

Аналіз антифрикційних матеріалів показав, що їх нанесення на поверхню деталей можна здійснювати з використанням процесу холодного газодинамічного напilenня. Приведена схема і вид установки для холодного газодинамічного напilenня антифрикційних поверхневих шарів. Для проведення досліджень було використано мідно-графітовий порошок з розміром частинок 10,7 – 80,8 мкм. Показана можливість створення пористих мідно-графітових покриттів та композиційних мідно-алюмінієвих покриттів із підвищеними антифрикційними характеристиками.

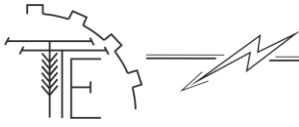
Отримано зразки з композитними покриттями із сумішею порошоків алюмінію і міді для різної вихідної концентрації алюмінію (від 0 до 100% з кроком 10%). При інших рівних умовах (тиск повітря 0,6 МПа, температура нагріву повітря 300 °С).

Виміряно коефіцієнти напilenня порошкової мідно-алюмінієвої суміші і залишковий вміст міді та алюмінію в отриманих покриттях. Встановлено закономірності вмісту компонентів в покритті які дозволяють вибрати склад вихідного порошку, необхідний для отримання заданого вмісту компонентів в покритті.

Отримані результати підтверджують можливість створення різноманітних антифрикційних покриттів на парах тертя з використанням холодного газодинамічного напilenня, що може бути рекомендовано для підвищення трибологічних характеристик вузлів машин і механізмів.

## Список використаних джерел

1. Holmberg K., Erdemir A. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. *Friction*, 2017. 5, 263–284.
2. Tichy J. A., Meyer D.M. Review of solid mechanics in tribology. *Int. J. Solids Struct.* 2000. 37, 391–400.
3. Bermúdez M. D., Jiménez A. E., Sanes J., Carrión F. J. Ionic liquids as advanced lubricant fluids. *Molecules*. 2009. 14, 2888–2908.
4. Spalvins T. A review of recent advances in solid film lubrication. *J. Vac. Sci. Technol. A*. 1987. 5, 212–219.
5. Shah F. U., Glavatskih S., Antzutkin O. N. Boron in tribology: From borates to ionic liquids. *Tribol. Lett.* 2013. 51, 281–301.



6. Scharf T. W., Prasad S. V. Solid lubricants: A review. *J. Mat. Sci.* 2013. 48, 511–531.
7. Mannix A. J., Kiraly B., Hersam M. C., Guisinger N. P. Synthesis and chemistry of elemental 2D materials. *Nat. Rev. Chem.* 2017. 1.2, 1–14.
8. Winer W. O. Molybdenum disulfide as a lubricant: A review of the fundamental knowledge. *Wear.* 1967. 10, 422–452.
9. Пристрій для газодинамічного нанесення покриттів з радіальною подачею порошкового матеріалу: пат. 110552 Україна: МПК C23C 24/00. № а 201405543; заявл. 23.05.14; опубл. 12.01.16, Бюл. №1.
10. Гайдамак О. Л., Савуляк В. І. Експериментальне дослідження процесу холодного газодинамічного нанесення покриття та методика розрахунку його режимів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту.* 2018. № 4(14). С. 88–94.
11. Гайдамак О. Л. Холодне газодинамічне нанесення покриття, обладнання та технологія. *Матеріали XLVIII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 13-15 березня 2019 р.*
12. Гайдамак О. Л., Савуляк В. І., Дослідження функціональних покриттів, отриманих газодинамічним напиленням, та перспективи їх застосування у комп'ютерній техніці. *Наукові праці ВНТУ.* 2017. № 2, 2017.
13. Гайдамак О. Л., Матвійчук В. А. Створення композиційних електропровідних покриттів газодинамічним напиленням. *Вібрації в техніці та технологіях.* 2021. № 1 (100). С. 126–136.
14. Матвійчук В. А., Гайдамак О. Л., Колісник М. А. Підвищення службових характеристик поверхневого шару деталей шляхом застосування поверхневого пластичного деформування і газодинамічного напилення. *Вібрації в техніці та технологіях.* 2020. № 2 (97). С. 90–100.

#### References

- [1] Holmberg, K., Erdemir, A. (2017). Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. *Friction.* 5, 263–284. [in English]
- [2] Tichy, J.A., Meyer, D.M. (2000). Review of solid mechanics in tribology. *Int. J. Solids Struct.* 37, 391–400. [in English]
- [3] Bermúdez, M.D., Jiménez, A.E., Sanes, J., Carrión, F.J. (2009). Ionic liquids as advanced lubricant fluids. *Molecules.* 14, 2888–2908. [in English]
- [4] Spalvins, T. (1987). A review of recent advances in solid film lubrication. *J. Vac. Sci. Technol. A.* 5, 212–219. [in English]
- [5] Shah, F.U., Glavatskih, S., Antzutkin, O.N. (2013). Boron in tribology: From borates to ionic liquids. *Tribol. Lett.* 51, 281–301. [in English]
- [6] Scharf, T.W., Prasad, S.V. (2013). Solid lubricants: A review. *J. Mat. Sci.* 48, 511–531. [in English]
- [7] Mannix, A.J., Kiraly, B., Hersam, M.C., Guisinger, N.P. (2017). Synthesis and chemistry of elemental 2D materials. *Nat. Rev. Chem.* 1.2, 1–14. [in English]
- [8] Winer, W.O. (1967). Molybdenum disulfide as a lubricant: A review of the fundamental knowledge. *Wear.* 10, 422–452. [in English]
- [9] Gaidamak, O. L. (2016). Pristriy dla gazodinamichnogo nanesennia pokrittia z radialnoyu podacheyu poroshkovogo materialu [Device for gas-dynamic coating with radial flow of powder material]. Pat. 110552 Ukraine, IPC6 C23C24 / 00 № а 201405543; claimed 05/23/14; publ. 01/12/16, Bul. №1. 12 sec. [in Ukrainian].
- [10] Gaidamak, O.L., Savulyak, V.I. (2018). VI Experimental study of the process of cold gas-dynamic coating and methods for calculating its modes. *Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute.* 4 (14). 88–94. [in Ukrainian]
- [11] Gaidamak, O.L. (2019). Cold gas-dynamic coating, equipment and technology. *Proceedings of the XLVIII Scientific and Technical Conference of VNTU, Vinnytsia, March 13-15, 2019*[in Ukrainian].
- [12] Gaidamak, O.L., Savulyak, V.I., (2017). Research of functional coatings obtained by gas-dynamic spraying, and prospects for their application in computer technology. *Scientific works of VNTU.* 2. [in Ukrainian].
- [13] Gaidamak, O.L., Matviychuk, V.A. (2021). Creation of composite electrically conductive coatings by gas-dynamic spraying. *Vibrations in technology and technology.* 1 (100). 126–136. [in Ukrainian].





- [14] Matviychuk, V.A., Gaidamak, O.L., Kolisnyk, M.A. (2020). Improving the performance of the surface layer of parts by applying surface plastic deformation and gas-dynamic spraying. *Vibrations in engineering and technology*. 2 (97). 90–100. [in Ukrainian].

### PROSPECTS FOR CREATING SURFACE LAYERS OF DETA-LEU WITH INCREASED TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS USING GAS-DYNAMIC FILLING

*The article presents the results of the analysis of antifriction materials based on tin and lead, copper, aluminum, plastics. The advantages and disadvantages of one or another antifriction material, as well as the possibility of their application on the surface of parts by the method of cold gas-dynamic spraying, are shown. The use of liquid and solid anti-friction materials as lubricating oils is considered. Considerable attention has been paid to materials with the same crystal structure as graphite, now known as two-dimensional (2D) materials. Among these 2D materials, the most studied materials are MoS<sub>2</sub> and a carbon-based compound, including graphite and graphene. The scheme of interaction of sliding surfaces is considered, including wear, molecular deformation, adhesion, thermal effect and the environment. Analysis of anti-friction materials showed that their application to the surface of parts can be carried out using the process of cold gas-dynamic spraying. The article shows a diagram and type of installation for cold gas-dynamic spraying of antifriction surface layers. For the research, copper-graphite powder with a particle size of 10,7 – 80,8 microns was used. Using the application "Maso central characteristics" of the software "Compass-3D", the mass of the deposited figure as a continuous material for copper-graphite coatings, with a density of  $\rho_1 = 0,0086454 \text{ g / mm}^3$ , and the porosity of the deposited figure were determined. In the course of the study, it was found that, in comparison with the substrate material AA7075, the sliding friction coefficient was reduced by 47% - 62% for the copper-graphite surface layer. To obtain composite coatings, a mechanical mixture of A30-01 aluminum powder and C01-00 copper was used. The dependences of the coefficients of sputtering of copper and aluminum on the mass content of aluminum in the sprayed mixture at an initial concentration of aluminum of less than 66% are found. The copper deposition rate is higher than the aluminum deposition rate. Both monotonically increase with increasing aluminum concentration until it reaches 61%. At high concentrations of aluminum (more than 66%), the coefficients of deposition of copper, aluminum and their mixtures coincide.*

**Key words:** *antifriction materials, cold gas-dynamic spraying, surface layer, aggressive environment, equipment.*

*F. 5. Table. 5. Pic. 12. Ref. 14.*

### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

**Матвійчук Віктор Андрійович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: [vamatv50@gmail.com](mailto:vamatv50@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-7837-5174>).

**Гайдамак Олег Леонідович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: [haidamak@vsau.vin.ua](mailto:haidamak@vsau.vin.ua), <https://orcid.org/0000-0001-5116-6017>).

**Карпійчук Михайло Федорович** – аспірант кафедри «Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: [ashenvale228@gmail.com](mailto:ashenvale228@gmail.com)).

**Viktor Matviychuk** – Doctor of Technical Sciences, Professor, of the Department of Electric Power, Electrical Engineering and Electromechanics of Vinnitsa National Agrarian University (3 Soniachna St., Vinnitsa, Ukraine, 21008, e-mail: [vamatv50@gmail.com](mailto:vamatv50@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-7837-5174>).

**Oleg Gaidamak** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electric Power, Electrical Engineering and Electromechanics of Vinnytsia National Agrarian University (3 Soniachna str., Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: [vntu1Vf11@gmail.com](mailto:vntu1Vf11@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0001-5116-6017>).

**Mykhailo Karpiiichuk** – Postgraduate Student of the Department of Electric Power, Electrical Engineering and Electromechanics of Vinnytsia National Agrarian University (3 Soniachna str., Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: [ashenvale228@gmail.com](mailto:ashenvale228@gmail.com)).