

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.039.4

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/03>**Гапонова О.П.**

Сумський державний університет

Тарельник Н.В.

Сумський національний аграрний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ І ТРИБОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ MoS_2 -ПОКРИТТІВ, ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ЛЕГУВАННЯ¹

В статті розглянуті електроіскрові покриття, що містили MoS_2 , й отримані за пропонуваними авторами технологіями: перша полягала у нанесенні на оброблену поверхню пасти з вмістом сірки 33,3% і легування молибденовим електродом (покриття $Mo+S$), друга полягала у попередньому нанесенні на оброблену поверхню дисульфиду молибдену і легування молибденовим електродом (покриття $Mo+MoS_2$). Представлені результати дослідження структури, фазового складу і трибологічних властивостей. Встановлено, що самозмащувальні покриття, нанесені методом електроіскрового легування (ЕІЛ), мають складну структуру, що складається із верхнього пухкого не твердого шару, зміцненого білого шару, дифузійної зони і основного металу. Аналіз складу і зміни твердості у поперечному перерізі показали, що дифузія елементів відбулася на межі між покриттям і підкладкою. Це свідчить про те, що між покриттям і підкладкою формується міцний міжатомний зв'язок. Фазовий склад покриттів $Mo+S$ при енергії розряду ЕІЛ 3,4 Дж, представлений твердими розчинами ОЦК і ГЦК, а також MoS_2 , якого близько 8% на поверхні і ~5% на відстані 15 мкм від поверхні. Зі збільшенням енергії розряду в білому шарі покриття $Mo+MoS_2$ збільшується кількість і змінюється форма пор. Вони розподіляються рівномірно і мають округлу форму. Рентгеноструктурним аналізом встановлено, що фазовий склад поверхні покриттів представлений двома твердими розчинами з ОЦК кристалічною структурою, що відрізняються періодом ґратки, ГЦК твердим розчином – аустенітом, і MoS_2 . Дисульфиду молибдену виявляється 26-44% MoS_2 .

Самозмащувальні покриття демонструють дуже хороші трибологічні властивості порівняно з молибденовими ЕІЛ покриттями. Значно зменшується сила тертя у 10 разів для покриття $Mo+MoS_2$, більше 40 разів для покриття $Mo+S$ при $P=20$ Н, коефіцієнти тертя при цьому зменшуються у 10 і 40 разів, відповідно, для покриттів $Mo+MoS_2$ і $Mo+S$, а при $P=40$ Н зменшується у 64 рази для $Mo+S$ -покриття. Дослідження твердості і її розподілу в модифікованих шарах показали, що покриття мають приблизно однакові параметри, HV близько 1100, товщину ~60 мкм. Очевидно, значний ефект покриттів $Mo+S$ пов'язаний зі структурно-фазовим станом модифікованих шарів.

Ключові слова: технологія, метод, електроіскрове легування, дисульфід молибдену, молибден, структура, шорсткість, мікротвердість, білий шар, дифузійна зона.

Постановка проблеми. 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 працездатність вузлів тертя, зменшується продуктивність устаткування, що призводить до зниження якості продукції [1, 2].

Завдання підвищення зносостійкості і довговічності деталей тертя динамічного обладнання шляхом створення нових технологій поверхневого оброблення антифрикційних деталей, які б відповідали сучасним вимогам машинобудування та були б здатні працювати без мастила, а також

¹Результати частково отримано в рамках науково-дослідного проекту «Розробка екологічно безпечних технологій модифікації поверхні деталей обладнання електростанцій комбінованими методами, заснованими на електроіскровому легуванні» за фінансування Міністерства освіти і науки України (держ. реєстр. № 0124U000539, Сумський державний університет).

були б недорогими, є вельми актуальним і потребує подальших досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Триботехнічні властивості пари тертя залежать від властивостей поверхонь контактуючих деталей і змащувальної речовини, що знаходиться між ними. В якості змащувальної речовини, як правило використовують мастило, яке створює між робочими поверхнями масляний шар [3]. Залежно від наявності мастильного матеріалу між робочими поверхнями деталей пари тертя, наприклад, опорною поверхнею вкладишу підшипника ковзання і поверхнею шийки валу, вони можуть працювати в умовах «сухого», змішаного (напівсухого, напіврідинного) або рідинного тертя [4].

Огляд літературних джерел показує, що в сучасному машинобудуванні найбільш широкого застосування отримали гідродинамічні підшипники завдяки простоті конструкції, хоча в період пуску, повільного прокручування і зупинки вони працюють в умовах граничного (або навіть «сухого») тертя [5].

Слід відмітити, що існують виробництва (харчове, текстильне, хімічне тощо) в яких, в зв'язку з можливістю псування продукції, між контактуючими деталями в парі тертя змазки зовсім не використовують і вони працюють в умовах тертя без мастильного матеріалу [6]. Також, тертя без мастильного матеріалу використовують з міркувань безпеки, наприклад в гальмах [6].

Покриття, нанесені на поверхні, що труться, дозволяють значно підвищити надійність машин і приладів. За допомогою покриттів можна забезпечити [7]: припрацьовуваність тертьових поверхонь і запобігання задирів; змащування в початковий момент пуску двигуна до надходження масла до поверхонь, що труться; мінімальний знос поверхонь, що труться; найнижчий коефіцієнт тертя та мінімальна зміна його в процесі роботи.

У [8] для практичного застосування запропонований спосіб обробки шийок валів, що включає нанесення м'якого антифрикційного металевого покриття з групи: індій, олово, мідь, срібло, який відрізняється тим, що покриття наноситься методом електроерозійного легування на поверхню шийки валу і підлягає подальшій обробці, наприклад, методом неабразивної ультразвукової фінішної обробки.

В якості припрацьовувальних покриттів використовують тверді змащувальні матеріали, такі як графіт, дисульфід молібдену (MoS_2), які у вигляді порошків наносять на робочі поверхні натиранням, або напилюванням.

В даний час в промисловості гостро стоїть проблема створення багатофункціональних зносостійких покриттів для важконавантажених пар тертя, що працюють в умовах високих лінійних швидкостей і доданих тисків, при недостатній кількості мастила або за повної її відсутності [9].

В останні роки проводяться роботи зі створення виробів, які можна було б використовувати без зовнішнього мастила. До цих виробів застосовують термін «самозмащувальні», оскільки при їх експлуатації не використовується зовнішнє мастило, а застосовуються в основному композиційні матеріали з дисульфідом молібдену (MoS_2). Формування та дослідження покриттів на основі дисульфиду молібдену є одним з найбільш перспективних напрямків у галузі створення твердозмащувальних покриттів.

Здатність виявляти ефект «самозмащування», тобто забезпечувати працездатність вузла тертя ковзання без введення зовнішнього мастила, є основною особливістю більшості полімерів, що використовуються у вузлах тертя. Природа ефекту «самозмащування» полімерів полягає в особливостях формується на полімерних і металевих поверхнях так званого «третього тіла», будова і склад якого є своєрідним «змащувальним» шаром, що забезпечує можливість передеформування без абразивного зношування і заїдання [10].

Відомий спосіб сульфидування, який зводиться до створення на поверхні деталі плівки сульфідів [11]. Останні підвищують поверхневу активність металів та сплавів, а також змочування поверхнево активними речовинами та опір схоплюванню. Плівка сульфиду заліза (FeS) підвищує зносостійкість поверхонь, що труться, і покращує їх припрацьовуваність. Феросульфідне покриття має досить високу пористість і вбирає велику кількість мастила, забезпечуючи матеріалу властивість самозмащування.

Традиційно сульфидування полягає у насиченні поверхневого шару металу (сталі, чавуну, сплавів титану та ін.) сіркою у відповідних соляних ваннах. Глибина сульфидованого шару досягає 50 мкм. До недоліків традиційного сульфидування, крім збільшення шорсткості поверхні та розмірів деталі, слід віднести: нагрівання всієї деталі, а відповідно і структурні зміни металу; жолоблення та деформації; велика тривалість процесу; значні витрати електроенергії; негативний вплив на екологію й інше [12].

З розробкою нових методик модифікації поверхні із застосуванням спеціальних технологічних насичуючих середовищ (СТНС) з'явилась

можливість вводити сірку й інші елементи в поверхневий шар сталених деталей методом електроіскрового легування (ЕІЛ) [13, 14]. Завдяки своїй ефективності, простоті, економічності та низькій витраті тепла технологія ЕІЛ довела свою ефективність як для покращення властивостей поверхні, таких як жаро- та зносостійкість, підвищена твердість і стійкість до корозії, так і для ремонту виробів дорогого обладнання [15].

В [16] було проілюстровано реальну можливість та доцільність використання пропонованої технології ЕІЛ із застосуванням сірки для створення MoS_2 -вмісних покриттів.

Постановка завдання. Метою роботи є удосконалення технології синтезу замозмашувальних покриттів на основі MoS_2 , отриманих енергоефективним і недорогим методом ЕІЛ, дослідження їх структури та триботехнічних властивостей.

Методика досліджень.

Електроіскрове легування здійснювали молібденовим електродом, з використанням установки «Елітрон – 52А». Режими обробки зразків зі сталі 12Х18Н10Т відповідали енергіям розряду (W_p) 0,13; 0,55 і 3,4 Дж. Тривалість обробки становила 1 хв/см².

Досліджувались дві технології сульфомолібденування.

Перша полягала у нанесенні на оброблену поверхню пасти з вмістом сірки 33,3% і легування молібденовим електродом.

Друга полягала у попередньому нанесенні на оброблену поверхню порошку дисульфиду молібдену і легування молібденовим електродом.

Після ЕІЛ визначалась шорсткість поверхні за допомогою приладу профілограф-профілометр мод. 201 заводу «Калібр» шляхом зняття і обробки профілограм.

Металографічний аналіз покриттів виконували за допомогою оптичного та сканувального електронного мікроскопів за стандартною методикою. Для дослідження розподілу елементів по глибині шару проводився локальний мікрорентгеноспектральний аналіз за допомогою сканувального електронного мікроскопу SEO-SEM Inspect S50-B, оснащеного енергодисперсійним спектрометром AZtecOne з детектором X-MaxN20 (виробник: Oxford Instruments plc). Для аналізу розподілу твердості по Віккерсу в поверхневому шарі по глибині шліфу від поверхні, використовували твердомір NOVA 330/360 (виробник INNOVATEST Europe BV, Нідерланди) відповідно до ISO 6507.

Рентгенографічні дослідження проводили в $CoK\alpha$ -випромінюванні на дифрактометрі

ДРОН-УМ1. Дифрактограми знімали методом покрокового сканування. Крок сканування становив 0.050, час експозиції в точці - 3 с. Обробку дифрактограм виконували за допомогою програми для повнопрофільного аналізу рентгенівських спектрів від суміші полікристалічних складових.

Трибологічні властивості формованого поверхневого шару визначали на тестері Т-01М відповідно до трибологічного стандарту DIN-50324:1992-07 «Випробування на тертя та зношування твердих тіл тертя ковзання». Схема випробування «кулька – диск» (рис. 1). Зразки, випробувані на тестері мали розмір $\varnothing 25 \times 6$ мм.

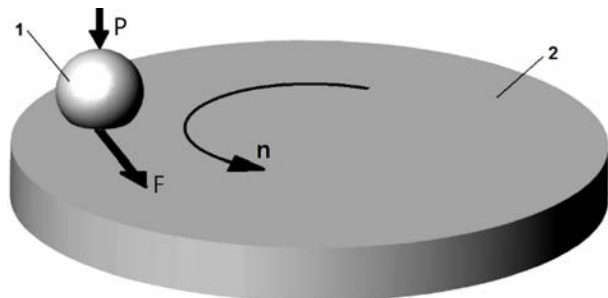


Рис. 1. Схема випробування на трибо-тестері Т-01 М: 1 – кулька з радіусом r; 2 – диск [17]

У процесі досліджень використовували такі робочі параметри тестера:

- швидкість обертання $\omega = 360$ об/хв;
- навантаження Р складало 20 і 40 Н.

У процесі випробувань визначали силу тертя F і коефіцієнт тертя μ .

В таблиці 1 представлені серії зразків для випробувань на зносостійкість. Для порівняння виготовляли зразки без обробки, після ЕІЛ молібденовим електродом і за двома пропонованими режимами обробки.

Таблиця 1

Серії зразків для триботехнічних досліджень

№ серії зразків	Матеріал кільця	Вид оброблення
1	12Х18Н10Т	Без обробки
2		ЕІЛ Мо-електродом
3		ЕІЛ Мо-електродом із застосуванням пасти, що містить S
4		ЕІЛ Мо-електродом із застосуванням порошку MoS_2

Виклад основного матеріалу дослідження.

Досліджена мікроструктура покриттів на сталі 12Х18Н10Т після ЕІЛ молібденовим електродом із застосуванням пасти, що містить сірку зве-

дені до табл. 2. Такі покриття складаються з 4-х зон: верхній пухкий шар з низькою твердістю HV 146,4-240,3, «білий» зміцнений шар з HV 651.4 для $W_p = 0,13$ Дж і HV 1137.3 для $W_p = 3,4$ Дж, дифузійна зона і основний метал.

Визначено що білі шари утворюється з рідкої фази шляхом перемішування з основою та взаємопроникною дифузією. Як правило він складається з матеріалу легуючого електрода та елементів міжелектродного середовища. Дифузійна зона утворюється в результаті дифузії хімічних елементів матеріалу анода та елементів міжелектродного середовища в матеріал катода (поверхні), а також внаслідок теплової дії. Дифузійна зона ЕІЛ покриттів плавно перетворюється на структуру основного матеріалу [16].

Білий шар розміщується світлою смужкою вздовж меж основи, нижче за яку утворюється дифузійна зона. Мікротвердість модифікованого легованого шару зменшується від поверхні і далі до матеріалу основи.

Металографічний аналіз покриттів, отриманих за технологією ЕІЛ Мо-електродом з попереднім нанесенням порошку MoS_2 на поверхню сталі 12X18H10T показав (рис. 2), що на поверхні фіксується темний шар з порошку дисульфиду молібдену, який був нанесений перед ЕІЛ та молібдену – матеріалу ЕІ. Далі розташовується зміцнений «білий» шар. Його товщина 20-30 і 50-60 мкм, твердість HV 534 і HV1127, відповідно, у зразків після ЕІЛ з енергією розряду 0,55 і 3,4 Дж (табл. 3).

Слід відмітити, що попередньо нанесений порошок дисульфиду молібдену значно покращує

процес ЕІЛ (відсутні залипання і зчеплення ЕІ з поверхнею зразка) в результаті значно знижується шорсткість сформованого шару [18] (див. табл. 3).

Електронномікроскопічні дослідження у зворотньо-розсіяних (відбитих) електронах (BSE) дозволили визначити будову і якісний розподіл елементів в покритті (рис. 3, 4). На рисунках добре виявляються зони покриття – верхній темний шар, білий зміцнений шар, дифузійна зона і основа. Зі збільшенням енергії розряду білий шар характеризується наявністю вихроподібних

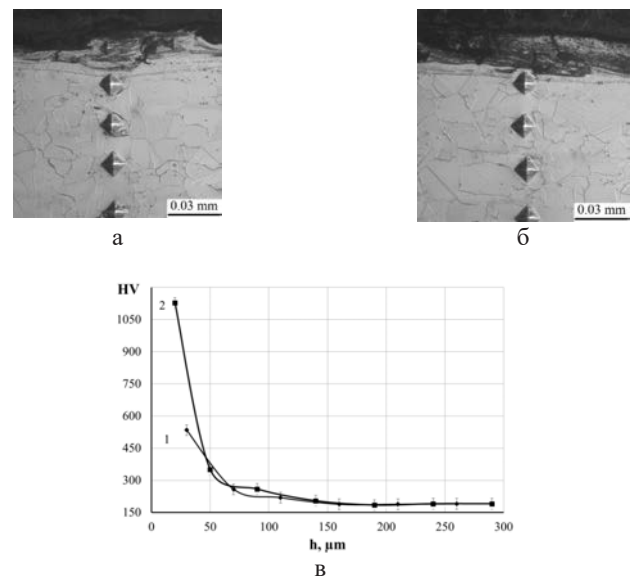


Рис. 2. Мікроструктури (а, б) і розподіл мікротвердості (в) у поверхневому шарі сталі 12X18H10T після обробки за технологією ЕІЛ Мо-електродом з попереднім нанесенням порошку MoS_2 . ЕІЛ з W_p : а – 0,55 Дж; б – 3,4 Дж; в – на графіку 1 – $W_p = 0,55$ Дж, 2 – $W_p = 3,4$ Дж

Таблиця 2

Параметри покриттів сталі 12X18H10T, отриманих за технологією ЕІЛ Мо-електродом із використанням пасти, що містить сірку

Енергія розряду, W_p , Дж	Шорсткість, R_a , мкм	Шар зниженої мікротвердості		Зміцнений «білий» шар		
		HV	h, мкм	HV	h, мкм	Суцільність «білого» шару S, %
0.13	0,9	146.4	10	651.4	20	80
0.55	2,2	173.2	15	882.7	30	90
3.4	6,2	240.3	20	1137.3	55	До 100

S, % – суцільність «білого» шару

Таблиця 3

Параметри покриттів, отриманих за технологією ЕІЛ Мо-електродом з попереднім нанесенням порошку MoS_2 на поверхню сталі 12X18H10T

Енергія розряду, W_p , Дж	Шорсткість, R_a , мкм	Зміцнений «білий» шар		
		HV	h, мкм	Суцільність шару S, %
0.55	1,2	534	20-30	65
3.4	3,2	1127	50-60	80

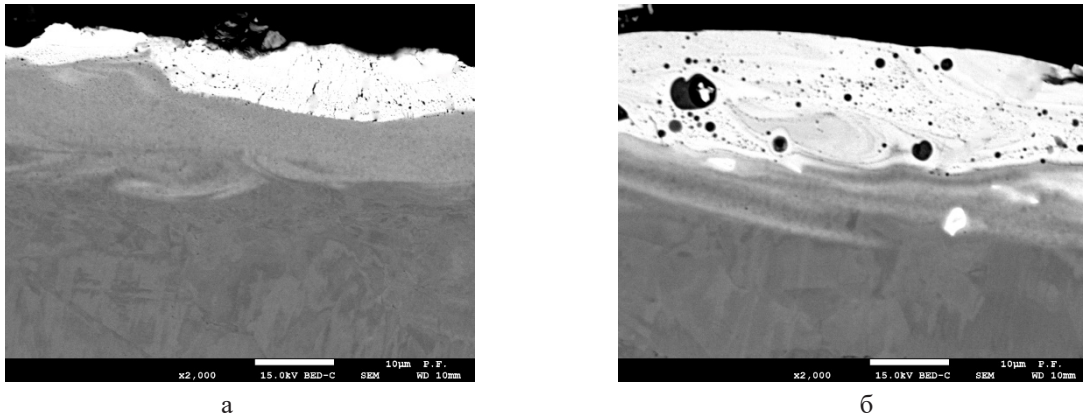


Рис. 3. Результати електронно-мікроскопічних досліджень покриттів, отриманих за технологією ЕІЛ Мо-електромом з попереднім нанесенням MoS_2 на поверхню сталі 12X18H10T ЕІЛ з енергією розряду (W_p): а – 0,55 Дж; б – 3,4 Дж

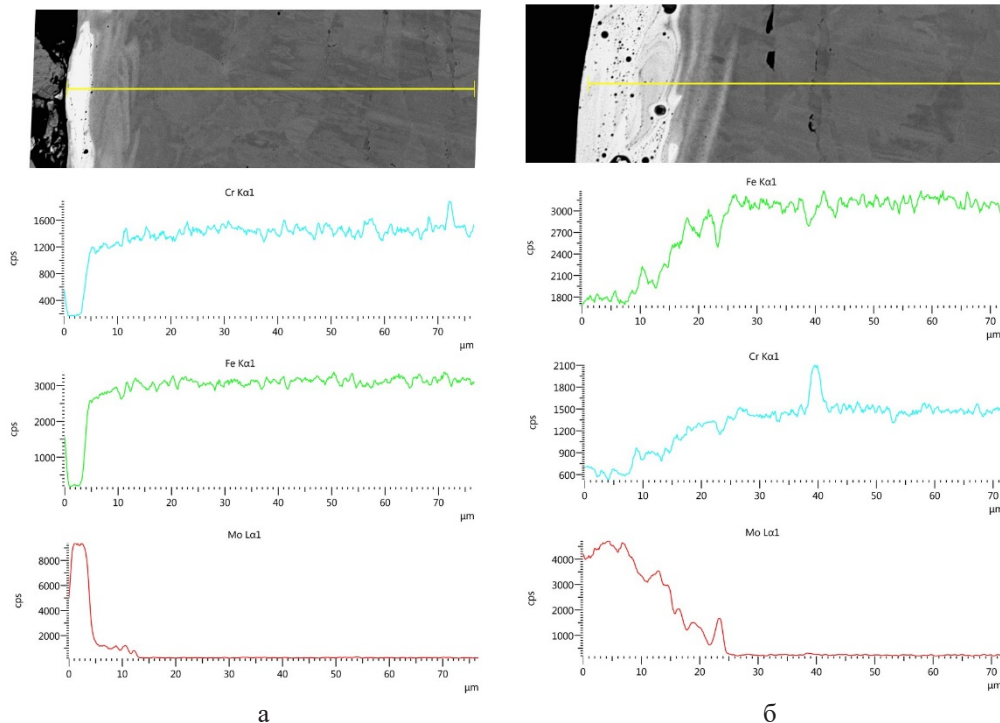


Рис. 4. Розподіл елементів покриттях, триманих за технологією ЕІЛ Мо-електромом з попереднім нанесенням MoS_2 на поверхню сталі 12X18H10T ЕІЛ з енергією розряду (W_p): а – 0,55 Дж; б – 3,4 Дж

утворень, обумовлених ефектом Марангоні-Гібса [19]. Крім того, за результатами локального рентгеноспектрального аналізу зміцнений шар насичений молібденом, кількість якого поступово зменшується від поверхні до основи (рис. 4). Отже в дифузійній зоні має місце взаємне проникнення складових елементів покриття та основи, що забезпечує високу міцність зчеплення покриття до основи.

Необхідно відмітити, що зі збільшенням енергії розряду в білому шарі збільшується кількість і змінюється форма пор. Вони розподіляються рів-

номірно і мають округлу форму. Вплив пористості на міцність і триботехнічні параметри покриттів добре описані в [20]. Як відомо [21] для ущільнюючих, припрацювальних та самозмащувальних покриттів наявність пористості є бажаним. Завдяки пористості, покриття добре втримують на робочій поверхні мастило, тому можуть працювати в умовах недостатнього мастильного забезпечення. Крім того, дисульфід молібдену є прекрасним мастилом і отримані покриття можна віднести до самозмащувальних з низькою швидкістю зносу.

Дослідження показали, що фазовий склад поверхні покриттів представлений двома твердими розчинами з ОЦК кристалічною структурою, що відрізняються періодом ґратки (рис. 5, табл. 4), ГЦК твердим розчином – аустенітом, і дисульфідом молібдену.

Необхідно відмітити, що на поверхні виявляється 26-44% MoS₂, що очевидно позитивно вплине на трибологічні властивості покриттів. Однак, зі збільшенням енергії розряду, кількість фази MoS₂ зменшується. Можливою причиною зменшення дисульфиду молібдену може бути його розпад під дією електричного розряду під час ЕІЛ.

Триботехнічні властивості покриттів

На рисунку 6 показано характер зміни сили тертя для серії зразків з покриттям Мо, Мо+S і Мо+MoS₂, які отримані методом ЕІЛ при енергії розряду 3,4 Дж на сталі 12Х18Н10Т. Випробування проведені за умови проходження сталеву кулькою шляху тертя L=4000 м з навантаженням P=20 Н і L=1000 м з навантаженням P=40 Н. Радіус кульки r = 10 мм.

У зразків з молібденовим покриттям сила тертя з моменту початку шляху тертя до його завершення зростає від 9 до 15 Н при навантаженні P=20 Н. Крім того, зростання сили тертя супроводжується появою коливань значень при збільшенні часу випробування від 2000 с. Сила тертя, як і амплітуда коливань з моменту початку шляху тертя до його завершення, збільшується, що свідчить про появу схильності до схоплювання (рис. 6, а і б), і внаслідок чого на контактній поверхні з'явилися характерні лунки і викришування. При збільшенні навантаження до P=40 Н сила тертя F стабілізується і складає близько 20 Н. Отже, зі збільшенням сили навантаження сила тертя зростає, але при цьому стабілізується процес зношування. Коефіцієнти тертя відповідно при P=20 Н і P=40 Н відповідають значенням $\mu_{cp}=0,6469$ і $\mu_{cp}=0,4999$ (табл. 5).

Дослідження характеру зміни сили тертя серії зразків з покриттями Мо+S, в яких під час ЕІЛ утворюється дисульфід молібдену, свідчать про те, що і сила тертя, і коефіцієнт тертя в таких зразках значно менші і відповідають значенням

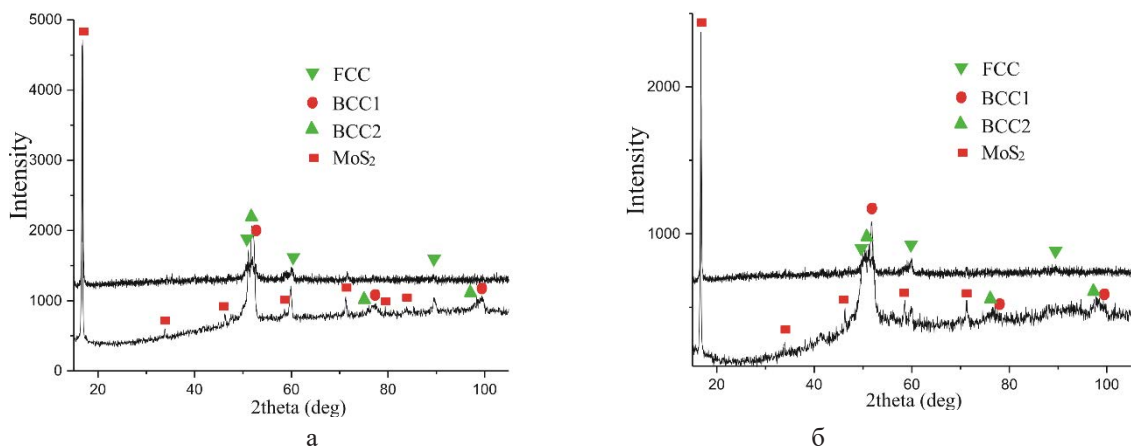


Рис. 5. Дифрактограми покриттів, отриманих за технологією ЕІЛ Мо-електродом з попереднім нанесенням MoS₂ на поверхню сталі 12Х18Н10Т ЕІЛ з енергією розряду (W_p): а – 0,55 Дж; б – 3,4 Дж

Таблиця 4

Параметри кристалічних ґраток фаз і кількісний фазовий аналіз покриттів, отриманих за технологією ЕІЛ Мо-електродом з попереднім нанесенням MoS₂ на поверхню сталі 12Х18Н10Т

Енергія розряду, Дж	Фаза	Період ґраток, a, нм	Вміст фази, % (мас.)
0.55	Твердий розчин ОЦК	2.8700	14.3
	Твердий розчин ОЦК	2.8900	15.73
	Твердий розчин ГЦК	3.5900	25.77
	MoS ₂	a = 3.1612 c = 12.2985	44.2
3.4	Твердий розчин ГЦК	3.6500	24.45
	Твердий розчин ГЦК	3.5970	25.51
	Твердий розчин ОЦК	2.8950	24.02
	MoS ₂	a = 3.1612 c = 12.2985	26.01

$F_{\max}=0,41$ Н і $\mu_{\text{cp}}=0,0156$ при $P=20$ Н і $F_{\max}=0,43$ Н і $\mu_{\text{cp}}=0,0078$ при $P=40$ Н (табл. 5). Необхідно зазначити, що зміна сили тертя впродовж випробувань була стабільною і складала близько $\sim 0,3$ Н в обох випадках (рис. 6, в і г).

Характер зміни сили тертя із часом покриттів $\text{Mo}+\text{MoS}_2$ свідчить про стабільний процес зношування (рис. 6, д і е). Коефіцієнти тертя відповідно при $P=20$ Н і $P=40$ Н відповідають значенням $\mu_{\text{cp}}=0,0630$ і $\mu_{\text{cp}}=0,0510$ (табл. 5). Покриття $\text{Mo}+\text{MoS}_2$ сприяють значному зменшенню сили тертя та зменшенню інтенсивності зношування порівняно з молібденовими.

Отже, молібденові покриття без пасти, що містить сірку, і MoS_2 схильні до схоплювання і мають не стабільний характер зношування. Пропоновані технології ЕІЛ позитивно впливають на триботехнічні властивості поверхонь, що труться. При цьому значно зменшується середня сила тертя у 10 разів для покриття $\text{Mo}+\text{MoS}_2$, більше 40 разів для покриття $\text{Mo}+\text{S}$ при $P=20$ Н, коефіцієнти тертя

при цьому зменшуються у 10 і 40 разів, відповідно, для покриттів $\text{Mo}+\text{MoS}_2$ і $\text{Mo}+\text{S}$, а при $P=40$ Н μ зменшується у 64 рази для $\text{Mo}+\text{S}$ -покриття.

Дослідження твердості і її розподілу в модифікованих шарах показали, що покриття мають приблизно однакові параметри, HV близько 1100, товщина ~ 60 мкм (табл. 2, 3). На нашу думку, значний ефект покриттів $\text{Mo}+\text{S}$ пов'язаний зі структурно-фазовим станом, що забезпечується технологією ЕІЛ. Так, в покриттях $\text{Mo}+\text{S}$ дисульфід молібдену синтезується під час ЕІЛ [22]. Очевидно, що MoS_2 не скупчується на поверхні, порах, а рівномірно розподіляється в металевій матриці. Крім того, металографічними методами встановлено, що пористість і величина пор в одержаних покриттях не значна. В покриттях $\text{Mo}+\text{MoS}_2$, що мають більшу пористість, можливе інтенсивніше руйнування шару під дією питомих навантажень під час тертя. Однак, не зважаючи на нижчі триботехнічні показники покриття $\text{Mo}+\text{MoS}_2$, порівняно з молібденовими, показали добрі результати.

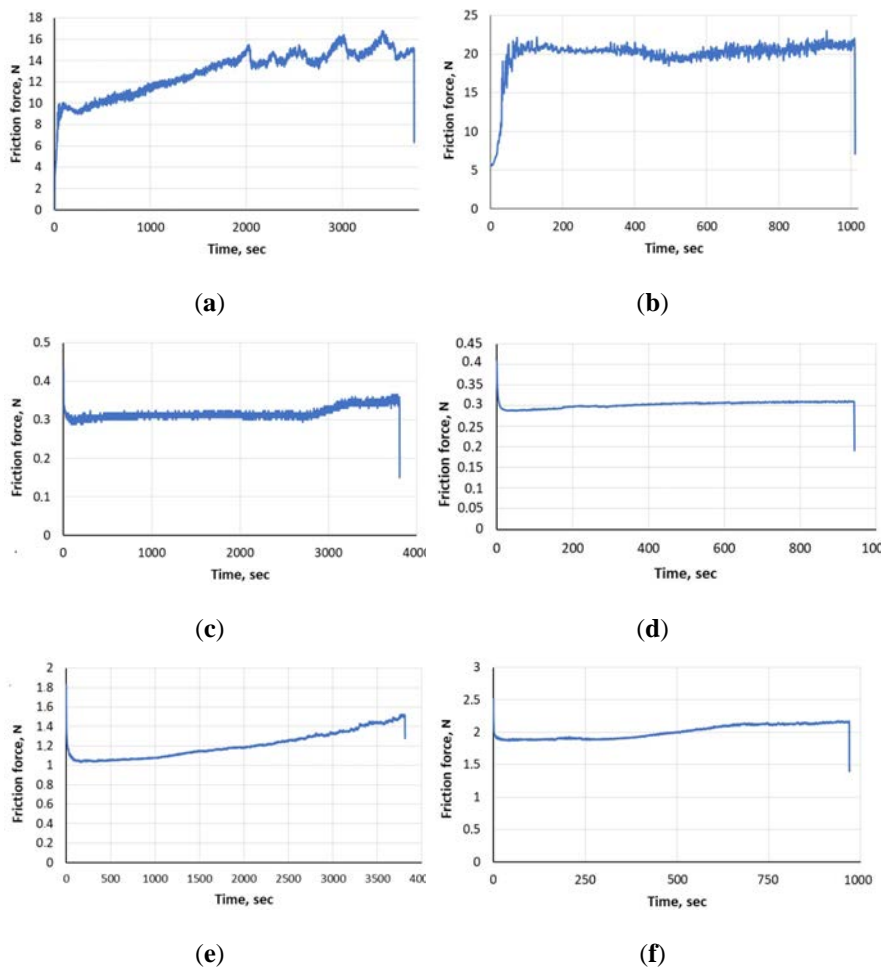


Рис. 6. Характер зміни сили тертя T (Н) сталевій кульки по поверхні випробовуваного зразка: а – покриття Mo , $P=20$ Н, б – покриття Mo , $P=40$ Н, в – покриття $\text{Mo}+\text{S}$, $P=20$ Н, г – покриття $\text{Mo}+\text{S}$, $P=40$ Н, д – покриття $\text{Mo}+\text{MoS}_2$, $P=20$ Н, е – покриття $\text{Mo}+\text{MoS}_2$, $P=40$ Н

Трибологічні властивості досліджуваних покриттів

Серія зразків	Навантаження, Р, Н	Максимальна сила тертя, F_{max} , Н	Середнє значення сили тертя, F_{av} , Н	Середній коефіцієнт тертя, μ_{cp}
Mo	20	16,79	12,938	0,6469±0,0257
	40	23,06	19,97	0,4999±0,0074
Mo+S	20	0,41	0,31	0,0156±0,0059
	40	0,43	0,31	0,0078±0,0001
Mo+ MoS ₂	20	1,83	1,20	0,0630±0,0001
	40	2,51	2,0	0,0510±0,0031

Висновки. Електроіскрові покриття, що містили MoS₂, були отримані за пропонуваннями авторами технологіями: перша полягала у нанесенні на оброблену поверхню пасти з вмістом сірки 33,3% і легування молибденовим електродом (покриття Mo+S), друга полягала у попередньому нанесенні на оброблену поверхню дисульфиду молибдену і легування молибденовим електродом (покриття Mo+MoS₂). Були досліджені структура, фізичний склад і їхні трибологічні властивості. Основні висновки, отримані в цьому дослідженні, можна підсумувати таким чином:

1. Самозмащувальні покриття, нанесені методом ЕІЛ, мають складну структуру, що складаються із верхнього пухкого не твердого шару, зміцненого білого шару, дифузійної зони і основного металу. Аналіз елементів і зміна твердості у поперечному перерізі показали, що дифузія елементів відбулася на межі між покриттям і підкладкою. Це свідчить про те, що між покриттям і підкладкою формується міцний міжатомний зв'язок.

2. Фазовий склад покриттів Mo+S при енергії розряду ЕІЛ 3,4 Дж, представлений твердими розчинами ОЦК і ГЦК, а також MoS₂, якого близько 8% на поверхні і ~5% на відстані 15 мкм від поверхні.

3. Зі збільшенням енергії розряду в білому шарі покриття Mo+MoS₂ збільшується кількість і змінюється форма пор. Вони розподіляються рівномірно і мають округлу форму. Рентгеноструктурним аналізом встановлено, що фазовий склад поверхні покриттів представлений двома твердими розчинами з ОЦК кристалічною структурою, що відрізняються періодом ґратки, ГЦК твердим розчином – аустенітом, і MoS₂. Дисульфиду молибдену виявляється 26-44% MoS₂.

4. Самозмащувальні покриття демонструють дуже хороші трибологічні властивості порівняно з молибденовими ЕІЛ покриттями. Значно зменшується сила тертя у 10 разів для покриття Mo+MoS₂, більше 40 разів для покриття Mo+S при P =20 Н, коефіцієнти тертя при цьому зменшуються у 10 і 40 разів, відповідно, для покриттів Mo+MoS₂ і Mo+S, а при P =40 Н μ зменшується у 64 рази для Mo+S-покриття. Дослідження твердості і її розподілу в модифікованих шарах показали, що покриття мають приблизно однакові параметри, HV близько 1100, товщину ~60 мкм. Очевидно, значний ефект покриттів Mo+S пов'язаний зі структурно-фазовим станом модифікованих шарів.

Список літератури:

1. Roik T.A., Gavrysh O.A., Vitsiuk Iu.Iu., Kholiavko V.V. Wear-Resistant Composites Produced from Tool Steel Waste for Contact Joints of High-Speed Printing Machines. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, Vol. 62, no 3-4, P. 215 – 224. URL: DOI:10.1007/s11106-023-00385-2
2. Чернець М. В., Пашечко М. І., Невчас А. Методи прогнозування та підвищення зносостійкості триботехнічних систем ковзання. 3т. – Дрогобич, Коло, 2001. — 512 с. Журавель Д. П. Триботехніка. Курс лекцій з навчальної дисципліни. Мелітополь: ВПЦ «Люкс», 2019. 280 с.
3. Martsinkovsky, V., Yurko, V., Tarel'nik, V., Filonenko, Y. Designing radial sliding bearing equipped with hydrostatically suspended pads. *Procedia Engineering*. 2012. 39. P 157-167. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.020>
4. Антипенко А.М., Белас О.М., Войтов В.А., Вотченко О.С. Основи трибології. Харків: ХНТУСГ, 2008. 342 с.
5. Martsinkovsky, V., Yurko, V., Tarel'nik, V., Filonenko, Y. Designing thrust sliding bearings of high bearing capacity. *Procedia Engineering*. 2012. 39, P. 148-156. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.019>
6. Колесніков В.О. Конспект лекцій з дисципліни Триботехніка. Частина І», для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) та другого (магістерського) рівня денної та заочної форм навчання спеціальності 015.38 «Професійна освіта» освітньої-професійної програми «Транспорт». Полтава: Вид-во ДЗ «ЛНУ імені Тараса Шевченка», 2023. 132 с.
7. Tarel'nik V.B., Paustovskii A.V., Tkachenko Y.G., Martsinkovskii V.S., Konoplyanchenko E.V., Antoshevskii K. Electric-spark coatings on a steel base and contact surface for optimizing the working characteristics of babbitt friction bearings. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2017. 53 (3), P. 285-294. URL: <https://doi.org/10.3103/S1068375517030140>

8. Tarelnyk V., Martsynkovskyy V., Dziuba A. New method of friction assemblies reliability and endurance improvement. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. 630, P. 388-396. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.630.388>
9. Shipway P.H., McCartney D.G., Sudaprasert T. Sliding wear behaviour of conventional and nanostructured HVOF sprayed WC-Co coatings. *Wear*. 2005. Vol. 259. P. 820-827.
10. Tarelnyk V.B., Martsynkovskii V.S., Zhukov A.N. Increase in the Reliability and Durability of Metal Impulse End Seals. Part 1. *Chemical Petroleum Engineering*. 2017. Vol. 53, No 1–2. P. 114–120. URL: <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0305-y>
11. Tarelnyk V., Martsynkovskyy V., Gaponova O., Tarelnyk N., Gorovoy S. New sulphiding method for steel and cast iron parts. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017, 233(1), 012049 URL: DOI: 10.1088/1757-899X/233/1/012049
12. Спосіб сульфидування поверхні сталевих і чавунних деталей методом електроерозійного легування / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Білоус А. В., Жуков О. М., Косенко П. В., Гапонова О. П.: пат. 117528 UA, МПК В23Н 1/04 (2006.01), С23С 8/60 (2006.01); заявл. 24.11.2016 ; опубл. 10.08.18, Бюл. № 15, 2018.
13. Спосіб сульфоцементатії поверхні сталевих деталей / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Білоус А. В., Жуков О. М., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В.: пат. 117867 UA, МПК В23Н 1/00, В23Н 9/02 (2006.01), С23С 8/64 (2006.01), В23Н 5/02 (2006.01), С23С 8/66 (2006.01); заявл. 22.12.2016 ; опубл. 10.10.2018, Бюл. № 19, 2018.
14. Спосіб сульфоцементатії сталевих деталей / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Тарельник Н. В., Думанчук М. Ю., Гончаренко М. В., Антошевський Б., Кундера Ч.: пат. на корисну модель 130866 UA, МПК В23Н 1/00, В23Н 9/00, С23С 10/48 (2006.01), С23С 8/60 (2006.01); заявл. 06.07.2018 ; опубл. 26.12.2018, Бюл. № 24, 2018.
15. Barile C., Casavola C., Pappaletta G., Renna G. Advancements in Electrospark Deposition (ESD) Technique: A Short Review. *Coatings*. 2022, 12, 1536. URL: <https://doi.org/10.3390/coatings12101536>
16. Gaponova O.P., Antoszewski B., Tarelnyk V.B., Kurp P., Myslyvchenko, O.M., Tarelnyk N.V. Analysis of the Quality of Sulfomolybdenum Coatings Obtained by Electrospark Alloying Methods. *Materials*. 2021, 14, 6332. URL: <https://doi.org/10.3390/ma14216332>
17. Yue M., Zhao W., Wang S., Li J., Zhu C., Jin H., Guo C. Tribological properties of electrospark depositing Ni-WS2 self-lubricating coating. *Chalcogenide Letters*. 2021. 18(10), P. 557. URL: <https://doi.org/10.15251/CL.2021.1810.557>
18. Спосіб усунення зчеплення електродів при електроіскровому легуванні сталевих деталей обладнання, яке підлягає радіаційному опромінюванню: пат. 155134 України на корисну модель, МПК (2024.01) В23Р 6/00 / Тарельник Н.В. - у 2023 04455 (22); опубл. 17.01.2024, Бюл. № 3.
19. Wang J.M., Liu G.H., Fang Y.L., Li W.K Marangoni effect in nonequilibrium multiphase system of material processing. *Rev. Chem. Eng.* 2016. Vol. 32. P. 551 – 585. URL: DOI:10.1515/revce-2015-0067
20. Tuo Y., Yang Z., Guo Z., Chen Y., Hao J., Zhao Q., Kang Y., Zhang Y., Zhao Y. Pore structure optimization of MoS₂/Al₂O₃ self-lubricating ceramic coating for improving corrosion resistance. *Vacuum*. 2023, 207, 111687. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.111687>
21. Borysov Yu.S., Vihilianska N.V., Burlachenko O.M., Olevska L.P., Lopata V.M. Analysis of modern experience in development of sealing coatings for parts of gas turbine engines (Review). *Automatic Welding*. 2022, Vol. 4, P. 41-49. URL: DOI: <https://doi.org/10.37434/as2022.04.06> (in Ukraine)
22. Gaponova O.P., Antoszewski B., Tarelnyk V.B., Kurp P., Myslyvchenko O.M., Tarelnyk N.V. Analysis of the Quality of Sulfomolybdenum Coatings Obtained by Electrospark Alloying Methods. *Materials*. 2021, 14, 6332. URL: <https://doi.org/10.3390/ma14216332>

Gaponova O.P., Tarelnyk N.V. RESEARCH OF STRUCTURE AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF MoS₂ COATINGS OBTAINED BY ELECTRO-SPARK ALLOYING METHOD

The paper focuses on MoS₂ electrospark coatings obtained by the technologies proposed by the authors: the first one consisted in applying a paste with a sulphur content of 33.3% on the treated surface and alloying it with a molybdenum electrode (Mo+S coating), and the second one consisted in pre-applying molybdenum disulfide on the treated surface and alloying it with a molybdenum electrode (Mo+MoS₂ coating). The results of the structure, phase composition and tribological properties studies are presented. It is found that self-lubricating coatings applied by electric spark alloying (ESA) have a complex structure consisting of an upper loose non-solid layer, a hardened white layer, a diffusion zone and a substrate metal. Analysis of the composition and changes in cross-sectional hardness showed that the diffusion of elements occurred at the interface between the coating and the substrate. This indicates that a strong interatomic bond is formed between the coating and the substrate. The phase composition of Mo+S coatings at the ESA discharge energy of 3.4 J is represented by solid bcc and fcc solutions, as well as MoS₂, the availability of which is about 8% on the surface and ~5% at a distance of 15 μm from the surface. While increasing the discharge energy in the white layer of the Mo+MoS₂ coating, the number and the shape of the pores have been increasing. They are distributed evenly and have a rounded shape. The X-ray structural analysis has stated that the phase composition of the coating surface is represented by two solid solutions having bcc crystal structures, which differ in the lattice periods, an fcc solid solution, namely, austenite, and MoS₂. The molybdenum disulfide content is 26-44%. The self-lubricating coatings demonstrate very good tribological properties as compared to the molybdenum ESA coatings. The friction force has been significantly reduced: by 10 times - for the Mo+ MoS₂ coatings, more than 40 times - for the Mo+S coatings at P =20 N. The friction coefficients have been reduced by 10 and 40 times, respectively, for the Mo+MoS₂ and Mo+S coatings; and at P =40 N, μ has been reduced by 64 times for Mo+S-coatings. The investigations of hardness and its distribution in the modified layers have shown that the coatings have approximately the same parameters, the HV values of about 1100, the thickness of about 60 μm. Obviously, the significant effect of Mo+S coatings would be related to the structural and phase states of the modified layers.

Key words: technology, method, electrospark alloying, molybdenum disulfide, molybdenum, structure, roughness, microhardness, white layer, diffusion zone.