

на їх геометричні, міцнісні та пружні характеристики. Для забезпечення заданого рівня функціональних характеристик трубок даного типу запропоновано підхід, що засновано на статистичному опису зазначених характеристик після кожного технологічного переділу виробництва таких трубок з оцінкою ступеню їх деформаційної анізотропії.

Ключові слова: методи волочіння, алюмінієві трубки прецизійної точності, функціональні характеристики, деформаційна анізотропія.

Воденников Сергей Анатольевич, доктор технических наук, профессор, кафедра металлургии черных металлов, Запорожская государственная инженерная академия, Украина, e-mail: vodennikov_dom@mail.ru.

Скачков Виктор Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра металлургии черных металлов, Запорожская государственная инженерная академия, Украина, e-mail: Skachkov48@mail.ru.

Иванов Виктор Ильич, старший научный сотрудник, кафедра металлургии черных металлов, Запорожская государственная инженерная академия, Украина, e-mail: colourmet@zgia.zp.ua.

Воденникова Оксана Сергеевна, кандидат технических наук, доцент, кафедра металлургии черных металлов, Запорожская государственная инженерная академия, Украина, e-mail: vodennikov_dom@mail.ru

Воденников Сергей Анатольевич, доктор технических наук, профессор, кафедра металлургии черных металлов, Запорожская государственная инженерная академия, Украина.

Скачков Виктор Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра металлургии черных металлов, Запорожская государственная инженерная академия, Украина.

Иванов Виктор Ильич, старший научный сотрудник, кафедра металлургии черных металлов, Запорожская государственная инженерная академия, Украина.

Воденникова Оксана Сергеевна, кандидат технических наук, доцент, кафедра металлургии черных металлов, Запорожская государственная инженерная академия, Украина.

Vodennikov Sergii, Zaporozhye State Engineering Academy, Ukraine, e-mail: vodennikov_dom@mail.ru.

Skachkov Victor, Zaporozhye State Engineering Academy, Ukraine, e-mail: Skachkov48@mail.ru.

Ivanov Victor, Zaporozhye State Engineering Academy, Ukraine, e-mail: colourmet@zgia.zp.ua.

Vodennikova Oksana, Zaporozhye State Engineering Academy, Ukraine, e-mail: vodennikov_dom@mail.ru

УДК 621.891 (045)

**Кіндрачук М. В.,
Тісов О. В.,
Стебелецька Н. М.**

РОЗРОБКА ГРАДІЄНТНИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ НАКЛАДОК ГАЛЬМІВНИХ ПРИСТРОЇВ

В роботі запропоновано використовувати композиційні матеріали, в основу створення яких покладено принцип додатного градієнта механічних властивостей. Виготовлено та проведено триботехнічні випробування таких композиційних матеріалів. У якості матриці запропоновано використовувати композиційний евтектичний сплав на основі сталі 12X18H9T з урахуванням теплофізичних характеристик зміцнювальних фаз. Обґрунтовано проведення поверхневої комплексної лазерної обробки поверхні з метою покращення структури та триботехнічних властивостей поверхневого шару.

Ключові слова: гальмівні пристрої, евтектичний сплав, сталь, TiB_2 , VC, теплофізичні властивості, лазерна обробка.

1. Вступ

Фрикційні матеріали застосовують у фрикційних динамічних пристроях, до яких належать гальма, накладки, спеціальні опори ковзання, муфти, варіатори. Ці пристрої призначені для розгону (муфти зчеплення) і зупинки (гальма, ковзні опори ковзання) транспортних машин, а також для приводів технологічного устаткування (різні фрикційні муфти і регулятори) та передавання і змінення напряму руху.

Фрикційні матеріали працюють у важких умовах зношення за високих питомих навантажень (до 8 МПа), швидкостей ковзання (до 50 м/с) і температур, що можуть миттєво підвищуватися до температури 1200 °С.

Механічна енергія рухомих елементів у разі гальмування переходить у теплову, а потім розсіюється. Теплова дія у сукупності з багаторазовими циклічними навантаженнями, нагріванням і охолодженням, термічними і силовими деформаціями, утворенням градієнта температур істотно впливає на кінетику тертя і зношення фрикційних матеріалів.

2. Актуальність дослідження

Матеріали гальмівних пристроїв працюють в умовах жорсткого контактного і температурного навантаження. Від їх надійності і працездатності напряму залежить безпека персоналу та третіх

осіб. Часто від правильного спрацювання гальмівних пристроїв залежить правильність і точність технологічних процесів, а отже — кінцева якість продукції. Найбільше уваги при створенні фрикційних матеріалів приділяють коефіцієнту тертя, однак не менш важливою є задача забезпечення його стабільності (незмінності) протягом розрахованого ресурсу, а також — довговічність накладок гальмівних пристроїв, що може досягатись підвищенням їх зносостійкості. Також, необхідно приділяти увагу впливу температури у зоні контакту не тільки на коефіцієнт тертя, а й на термодинамічну рівновагу компонентів, що входять до складу фрикційного матеріалу.

На сучасному рівні розвитку технології значна увага приділяється розвитку полімерних фрикційних матеріалів, матеріалів на основі вуглецю. Однак, вони мають обмеження до використання, пов'язані із температурою, міцністю, вартістю. Зокрема, для багатьох механізмів можна обмежитись використанням металевих накладок. Аналіз показує, що ще є невичерпані резерви у металевих матеріалів, таких як економно леговані сталі, доповнені високо зносостійкими тугоплавкими сполуками (евтектичні і порошкові сплави). У зв'язку з цим виникає необхідність провести триботехнічні випробування таких матеріалів, визначити вплив тугоплавких сполук на зносостійкість та термодинамічну стабільність компонентів, розробити додаткові методи поліпшення їх структури та службових характеристик, встановити можливість керування триботехнічними властивостями.

Предметом дослідження обрано фрикційні матеріали, **об'єктами дослідження** були сплави на основі сталі 12X18H9T, у складі яких містяться бориди титану і хрому (ХТН), бориди титану і карбід уанадію (ВТН).

Завдання дослідження — для досягнення мети роботи необхідно було обрати склад композиційного матеріалу, зокрема — матричний матеріал і матеріал наповнювача, їх співвідношення, встановити закономірності формування структури плазових покриттів, визначити вплив структурних факторів на їх зносостійкість, встановити оптимальний вміст наповнювача у композиційному матеріалі, встановити вплив додаткової обробки лазером на їх зносостійкість, визначити триботехнічні властивості запропонованих матеріалів.

3. Аналіз літературних джерел

Матеріал фрикційного призначення вибирають за граничною поверхневою температурою нагрівання, що залежить від режимів гальмування і максимальним тиском, який він витримує (залежить від конструктивного виконання).

І. В. Крагельський запропонував фрикційні матеріали поділити на групи:

- 1) матеріали для легких умов тертя (короткочасна температура до 400 °С, тривала до 120 °С, тиск 8 МПа);
- 2) матеріали для середніх умов тертя (короткочасна температура до 400 °С, тривала до 250 °С, тиск до 1,5 МПа);
- 3) матеріали для важких умов тертя (короткочасна температура до 1100 °С, тривала до 400 °С, тиск до 6 МПа).

Висока зносостійкість фрикційних матеріалів визначає економічність експлуатації і їх надійність для працездатності машин та механізмів, у яких їх застосовують. Зусилля, спрямовані на підвищення зносостійкості матеріалів, передусім пов'язані із заходами запобігання надмірному підвищенню температури на поверхні тертя і схоплювання. Підвищення зносостійкості має три основні напрями:

- 1) удосконалення властивостей безпосередньо фрикційного матеріалу;
- 2) удосконалення конструкцій гальмівних або передавальних пристроїв;
- 3) регламентація умов експлуатації.

І. В. Крагельський вважає, що у процесі розроблення фрикційних матеріалів необхідно враховувати такі основні положення.

Для зниження інтенсивності зношення потрібно: — забезпечити позитивний градієнт механічних властивостей за глибиною від поверхні тертя, що збереже поверхню від руйнування внаслідок глибинного виривання;

— щоб матеріал у контактній зоні міг опиратися багаторазовому передеформуванню.

Щоб забезпечити додатний градієнт механічних властивостей по глибині, здатності опиратися передеформуванню, зниженню місцевого питомого тиску, а отже, і поверхневих температур, добру припрацьовуваність, поверхневий (робочий) шар має бути достатньо пластичним.

Для досягнення високого і стабільного коефіцієнта тертя проміжний робочий шар повинен мати особливу гетерогенну структуру і властивості, що забезпечували б велике значення коефіцієнта внутрішнього тертя при високих температурах та запобігали пошкодженням поверхні тертя основних матеріалів.

Разом з тим, відомі теоретичні і експериментальні дослідження впливу температури і температурних градієнтів на тертя та зношування в парах тертя різного призначення [1–3]. Окрім прямого впливу температури на знос, силу (коефіцієнт) тертя, теоретично і експериментально було виявлено вплив на ці характеристики і температурного градієнта ($\text{grad } T$). При цьому встановлено, що коефіцієнт тертя збільшується з ростом $\text{grad } T$ і зменшенням загальної температури у вузлі тертя. Проте вважається, що ефект збільшення тертя

буде мати місце лише стосовно до фрикційних матеріалів з малою теплопровідністю і лише в тому випадку, коли в зоні тертя виникає температура, постійна для зміни механічних і фізичних властивостей матеріалів.

Важливий вплив на зношування пари тертя будуть відігравати компоненти композиту, а також їх співвідношення [4]. Тут автори привели результати для широкого спектру неметалевих композиційних матеріалів. Очевидно, що схожа залежність матиме місце і для металевих матеріалів.

У роботах [5, 6] наголошується на необхідності дослідження впливу температури на стабільність коефіцієнта тертя та на загальну працездатність гальм. Також, тут пропонується створення біметалевих накладок із додатковим шаром, що забезпечує ефективне тепловідведення. Однак, така конструкція передбачає використання «традиційних» матеріалів. Оптимізувавши склад композиційного матеріалу, можна досягти необхідного рівня тепловідведення в одному шарі.

Значна увага в світі приділяється неметалевим фрикційним матеріалам із металевими включеннями [7, 8]. Однак, і тут полімерна і неорганічна

4. Евтектичні сплави для покриттів

Важливу роль у формуванні триботехнічних властивостей покриттів відіграють фізико-механічні характеристики металевої основи та зміцнювальної фази. У зміцнювальній фазі має бути висока зносостійкість, твердість, міцність як за низьких, так і підвищених температур, корозійна стійкість у хімічно активних середовищах, оптимальна зносостійкість.

Як основу композиційних евтектичних матеріалів перспективно використовувати аустенітну сталь 12X18H9T, що зумовлено характеристиками, котрі відрізняють її від інших матеріалів. Це, зокрема, висока корозійна стійкість, жароміцність у температурному інтервалі до 900 К і низька енергія дефектів упакування, а отже, зменшення трибоактивування у процесі пластичної деформації в процесі тертя. Важливою є також можливість заміни дорогих нікелевих сплавів оцценолегованими сплавами на основі заліза. Як зміцнювальні фази найбільш доцільно використовувати жаростійкі, корозійностійкі, зносостійкі сполуки.

Хімічний і фазовий склад сплавів наведено у табл. 1, теплофізичні властивості у табл. 2 [9].

Таблиця 1

Хімічний і фазовий склад евтектичних сплавів

Маркування сплавів	Уміст компонентів за масою, %							Фазовий склад		Твердість, НВ	Температура плавлення, К
	Cr	Ni	Ti	V	B	C	Fe	Матриця	Зміцнювальні сполуки		
ВТН	15,4	7,7	3,2	8,1	1,4	1,9	62,3	X18H9	TiB ₂ + VC	470	1460
ХТН	20,5	8,6	2,5	—	2,6	—	65,8		(Ti, Cr)B ₂	370	1490

матриця вносить свої обмеження на використання матеріалу. Зокрема, через невисоку теплопровідність та невисоку механічну міцність.

Перераховані недоліки у значній мірі можуть бути усунені шляхом використання композиційного матеріалу з металевою матрицею та неметалевим тугоплавким наповнювачем. Зокрема, вирішуються питання теплопровідності і механічної міцності. Легувальні елементи в матричному матеріалі можуть у широких межах змінювати її міцність, жаростійкість, а зміцнювальні фази — зносостійкість і коефіцієнт тертя.

В зв'язку з цим, представляє науковий і прикладний інтерес створення фрикційних матеріалів і композиційних покриттів, які б дозволяли ціленаправлено керувати тепловим станом вузла тертя. Особливістю композиційних матеріалів є наявність неперервної зв'язуючої фази (полімерної, металевої), в якій розподілені дискретні фази у вигляді твердих тіл — наповнювачів. Саме наповнювачі (дисперсні, волокнисті) надають основний вплив на механічні, електро- і теплофізичні та інші властивості.

Таблиця 2

Теплофізичні властивості

Матеріал	Теплопровідність λ , Вт (м. град)	Теплоємність C , кдж (кг. град)
12X18H9T	15,9	0,505
VC	25	0,531
TiB ₂	21	0,636
CrB ₂	22	0,695

Формування структури у процесі кристалізації цих сплавів відбувається за тим самим механізмом, за яким кристалізуються квазібінарні евтектики з фазами проникнення.

У переохоложеній рідині евтектичного складу спочатку утворюються зародки фаз проникнення (наприклад, зародки дибориду титану в сплаві ВТН). Із зародків, що досягли критичного розміру, виростають кристали правильної форми, названі базовими, оскільки вони є базою зростання евтектичних колоній. Кожна така евтектична колонія — це бікристалічне утворення, скелетом

якого є пластинчастоподібні монокристали фаз проникнення, що виростили на базовому кристалі. У проміжках між цими пластинчастими кристалами розташована матрична металева фаза. Велике значення відношення довжини пластинчастих кристалів до їх товщини (понад 100) створює природне армування зміцнювальними кристалами.

5. Структура та триботехнічні властивості плазмових покриттів

Для нанесення покриттів використовували порошки евтектичних сплавів двох систем: ВТН та ХТН [10]. Вихідні порошки містять дисперсні кристали фаз проникнення, причому розміри цих кристалів залежать від швидкості охолодження порошку в процесі його виготовлення, тобто від діаметра порошинок.

У напилених евтектичних покриттях спостерігаються слабкопротравлені ділянки, білі шари, нерозплавлені або частково розплавлені порошинки та невелика кількість пор (рис. 1).

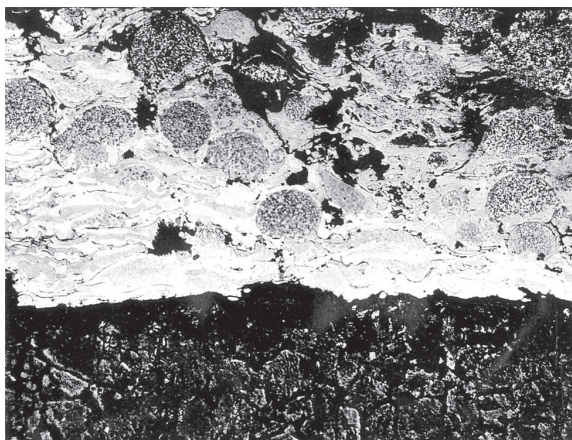


Рис. 1. Мікроструктура плазмового покриття ВТН, $\times 500$

Основний об'єм покриттів становлять білі, слабо протравлені (70...80 %) шари. Утворення білих шарів напиленням напевно зумовлено особливістю евтектичних сплавів на основі заліза. Вони, на думку авторів, виникають унаслідок швидкої кристалізації рідких крапель на холодній основі. Такі шари мають високу хімічну стійкість, майже не взаємодіють із реактивом, яким визначають структуру сплаву до напилення. Досліджувати структуру білих шарів важко через високу дисперсність фазових складових. Оскільки досліджувані евтектичні системи схильні до утворення ультрадисперсних структур за зазначених швидкостей охолодження, то в них можуть з'явитися ділянки в аморфному стані.

Характерна особливість напилених покриттів — це вища (порівняно з литими сплавами) мікротвердість. Передумовою цього може бути реалізація

в плазмових покриттях механізму дисперсного зміцнення, на відміну від переважно композиційного, характерного для евтектичних сплавів. Високу мікротвердість, зокрема, мають білі шари. Так, їх мікротвердість за навантаження 0,98 Н становить 12,7 ГПа, а нерозплавлених порошинок і ділянок з евтектичною структурою — 8,7 ГПа. Мікротвердість за товщиною покриття має східчастий характер зміни від покриття до основи.

Результати досліджень свідчать про низьку міцність зчеплення покриття з основою (16...20 МПа). Такий рівень адгезійної міцності визначають, на думку авторів, великий градієнт властивостей (від досить твердого покриття до м'якої підкладки), а отже, і великі напруження, а також характер з'єднання напиленого покриття з основою.

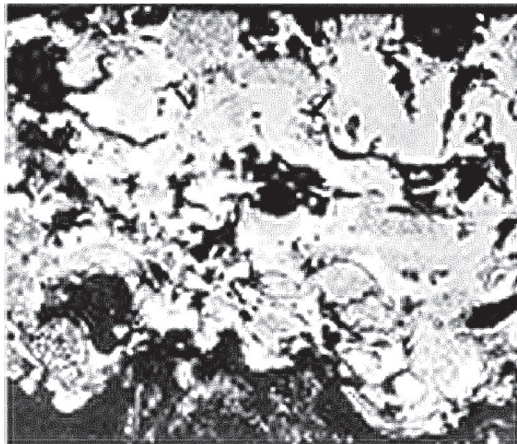
Випробування на тертя та зношування проводили на машині тертя М22-М, що дозволяє в процесі проведення експерименту автоматично реєструвати основні характеристики процесів тертя і зношування (лінійний знос пари і коефіцієнт тертя) без знання зразка з машини. В якості контртіла використовували ролики діаметром 40 мм, виготовлені із сірого чавуну СЧ-15-32. На відстані 0,5 мм від поверхні тертя в зразок вводилась хромель-копелева термопара, що дозволяє контролювати зміну температури в зоні тертя та судити про стабілізацію процесів тертя та зношування. Випробування зразків з покриттями проводили в умовах тертя без мащення за схемою вал-площина, навантаження при терті складами $P=20; 40; 60; 150$ Н, швидкість ковзання $V=0,1-2$ м/с. Шлях тертя $L=1$ км.

Одержані дані підтверджують високу зносостійкість покриттів. Підвищена дисперсність зміцнювальної фази проникнення та її рівномірний розподіл у залізній основі покриттів створюють передумови для зворотних послідовних структурних перетворень під час переходу до нового стану в зоні високої пластичної деформації і місцевого локального нагрівання в зоні тертя. Крім цього, нерівноважний стан евтектичних плазмових покриттів, очевидно, сприяє структурній самоорганізації під час тертя.

Залежності інтенсивності зношування і коефіцієнта тертя від питомого навантаження для покриттів з евтектичних порошків ВТН і ХТН показують, що в обох системах покриттів знижується коефіцієнт тертя зі збільшенням навантаження. Характер зношування покриттів ВТН і ХТН подібний.

На мікрофотографіях поперечного перерізу випробуваних на тертя зразків видно, що на поверхні тертя покриття ВТН виступають ділянки з евтектичною структурою (рис. 2, а). Саме вони визначають величину зносу та характер залежності інтенсивності зношування від питомого навантаження. Ділянки білих шарів, що розміщені між

евтектичними ділянками, через низьку пластичність і недостатню їх когезію викришуються. Зруйновані тверді білі шари, потрапляючи в зону тертя, виконують роль абразиву (рис. 2, б). При цьому інтенсифікується зношення спряженої пари. Крихке руйнування на поверхні тертя чітко виражене для плазмового покриття ХТН. За питомих навантажень 8 МПа відбувається продавлювання покриття.



а



б

Рис. 2. Мікроструктури плазмового покриття (а), $\times 200$ і поверхні тертя (б), $\times 500$, з евтектичного порошку ВТН

Різну окислювальну здатність структурних складових покриттів під час тертя можна визначити опосередковано за ступенем їх протравлювання в процесі приготування металографічного шліфа. Так, білі складові, що займають в плазмових покриттях значний об'єм, майже не взаємодіють з реактивом, який чітко виявляє структуру сплаву в литому стані. Напевно, підвищення температури поверхні тертя за високих швидкостей ковзання призводить до розпаду метастабільних білих шарів і, отже, до підвищення окислювальної здатності.

Рентгеноструктурним аналізом встановлено, що на поверхнях тертя покриттів ВТН і ХТН,

випробуваних за температури 20 °С, і швидкості ковзання 0,1 м/с утворюються оксиди заліза Fe_3O_4 і Fe_2O_3 . У разі випробування за швидкості 2 м/с (поверхнева температура 850 °С), коли пластична деформація локалізується в тонких поверхневих шарах і зношення спричиняється здебільшого вилученням оксидних плівок, зносостійкість плазмового покриття буде нижчою від зносостійкості евтектичного сплаву в литому стані. Це зумовлено нестабільністю їх фазового складу, повним розпадом твердих метастабільних структур і вилученням із зони тертя оксидних плівок, що інтенсивно утворюються в покритті через його розвинену поверхню.

Рентгеноспектральним аналізом встановлено високий вміст кисню в поверхневому шарі покриття (масова частка становить майже 34 %). Водночас поверхня тертя збіднена нікелем.

На дифрактограмах поверхні тертя покриття ХТН виявляються рефлекси оксидів Fe_3O_4 , Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , TiO_2 , V_2O_5 . У покритті системи ХТН, порівняно з покриттям ВТН, утворюється більша кількість оксидів V_2O_5 , Cr_2O_3 . Напевно, цим фактором, а також підвищеною жаростійкістю пояснюється вища зносостійкість покриття ХТН за підвищених температур, ніж за низьких.

Отже, триботехнічні характеристики напиленних плазмових ЕП залежно від навантаження і температури визначаються ступенем їх нерівноважного стану, пористістю та адгезійно-когезійною міцністю. Нормальний режим тертя плазмових покриттів перебуває у вузькому інтервалі навантажень і температур. Якщо навантаження $P > 5$ МПа, спостерігається інтенсифікація зношення внаслідок крихкого руйнування покриття, що супроводжується викришуванням його елементів, які мають абразивні властивості. За підвищених температур ($T > 600$ °С) низька зносостійкість зумовлюється зниженням твердості покриття внаслідок розпаду перенасичених твердих розчинів, а покриття зношується через вилучення із зони тертя пухких оксидних плівок, що інтенсивно утворюються на пористій поверхні тертя.

Отже, плазмові покриття не можуть реалізувати свої потенційно високі триботехнічні властивості. Існує тільки обмежений діапазон зовнішніх факторів, за якого покриття працездатні, задовільно припрацьовуються й утворюють вторинні структури.

6. Структура, механічні та триботехнічні властивості градієнтних плазмових покриттів, отриманих опаленням лазером

Лазерна обробка у зв'язку з її специфічною (швидким нагрівом і наступним прискореним

охлажденням) забезпечує отримання дрібно-дисперсних структур, перенасичених твердих розчинів і, отже, високих властивостей покриттів. Тому практичний інтерес має розгляд особливостей будови і властивостей плазмових покриттів після обробки їх лазером в режимі оплавлення.

Оплавлення плазмових покриттів проводили на установці «ЛАТУС-31» при такому режимі:

- потужність випромінювання, $P = 10^5 - 10^8$ Вт/см²;
- діаметр плями фокусування, $d = 4,0$ мм;
- швидкість пересування лазерного пучка, $V = 0,4$ м/хв.

При цьому режим опромінення вибирався таким, щоб глибина проплавлення дорівнювала товщині нанесеного покриття або перевищувала її. На рис. 3 подана мікроструктура плазмового покриття на сталі 40Х, оплавленого променем лазера.

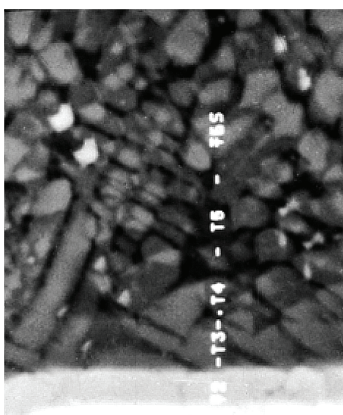


Рис. 3. Мікроструктура оплавленого плазмового покриття ВТН, $\times 500$

Структура покриття має стовпчасто-дендритну будову. Порівнюючи з вихідною мікроструктурою, можна відзначити, що метал внаслідок дії концентрованої енергії випромінювання перебував у рідкому стані. Під впливом великого температурного градієнта і, як результат, величезної швидкості кристалізації, ріст головних осей дендритів відбувався паралельно напрямку тепловідведення. Слід відмітити, що поблизу самої поверхні напрямок тепловідведення має менш виражений характер, і відбувається паралельно переміщенню пучка лазера по поверхні. Таким чином, орієнтація дендритів у зоні оплавлення визначається напрямком тепловідведення.

Характерною особливістю оплавлених покриттів є зниження їх мікротвердості порівняно з вихідною мікротвердістю напилених покриттів. Зміна твердості від покриття до підкладки має більш плавний характер, ніж при напиленні. Оплавлені покриття стають практично безпористими (пористість 0,5–1,0 %), міцність зчеплення підвищується до 400–450 МПа.

У результаті триботехнічних випробувань встановлено підвищення стійкості проти зношування оплавлених покриттів порівняно з вихідним без обробки більше ніж у 2 рази. Так, якщо зведене зношування напиленого покриття ВТН при 293 К становить $51,1$ мг/см² · 1 км, то оплавленого — $27,9$ мг/см² · 1 км. При цьому зношування контртіла при терті по напиленому покритті менше, ніж при терті по оплавленому покритті.

Разом з тим відомо, що умовою існування зовнішнього тертя (задовільне припрацювання і зносостійкість) є забезпечення правила градієнта зсувного опору, згідно з яким зсувний опір τ в зоні контакту твердих тіл повинен бути меншим, ніж на деякій глибині, тобто повинна дотримуватись умова $\delta\tau/\delta z > 0$.

Тому було поставлено задачу створення способу нанесення плазмового покриття з високою зносостійкістю і припрацьовуваністю за рахунок формування його градієнтної структури: тонкого поверхневого шару з дисперсною структурою з пониженим опором зсуву і глибокого зі стовпчастою структурою нормально орієнтованою до поверхні тертя.

Дисперсна структура поверхневого шару буде сприяти процесу припрацювання, а глибокий шар зі стовпчастою структурою, де зосереджуються максимальні напруження тертя, розподіляти рівномірно навантаження в об'ємі покриття і чинити опір руйнуванню під дією тангенціально направлених сил тертя, тобто слугувати міцною основою для вторинних структур. Крім того дисперсна, більш пластична структура поверхневого шару, підвищить свою здатність опиратися багаторазовому передеформуванню, тобто контактну втомну міцність.

Для створення такого покриття був вибраний сплав ВТН системи 12Х18Н9Т — TiB_2 — VC, оскільки він більш зносостійкий, за ніж сплав ХТН (рис. 2). Попередньо було досліджено оптимальний склад зміцнюючих фаз (TiB_2 , VC) щодо зносостійкості покриття, з урахуванням їх теплофізичних властивостей (табл. 2).

Відомо, що коли матеріал наповнювача в композиційному покритті має більш високу теплопровідність, ніж матеріал матриці (зв'язуючого), тоді збільшення частки наповнювача приводить до пониження поверхневої температури і навпаки, для включення з теплопровідністю меншою, ніж у зв'язуючого, температура підвищується зі збільшенням частки наповнювача. Дослідженнями встановлено, що такі триботехнічні властивості як знос, максимальна приповерхнева температура і коефіцієнт тертя залежать від співвідношення вмісту включень TiB_2 і VC (рис. 4). Це обумовлено напевно не тільки їх різними фізико-механічними властивостями, але й теплофізичними. Так, зі збільшенням вмісту карбіда ванадію максимальна

температура поверхні знижується. Поряд з іншим, це обумовлено тим, що карбід ванадію, який має вищу теплопровідність, ніж диборид титану, знижує поверхневу температуру.

вання променя — 4–6 мм, швидкістю пересування променя 0,2–0,5 м/хв, глибиною проплавлення, рівною товщині покриття; друге оплавлення потужністю 10^5 – 10^8 Вт/см², діаметром плями фокусування променя 1–3 мм, швидкістю пересування променя — 1–1,5 м/хв, глибиною 0,1–0,3 від товщини покриття (рис. 5).

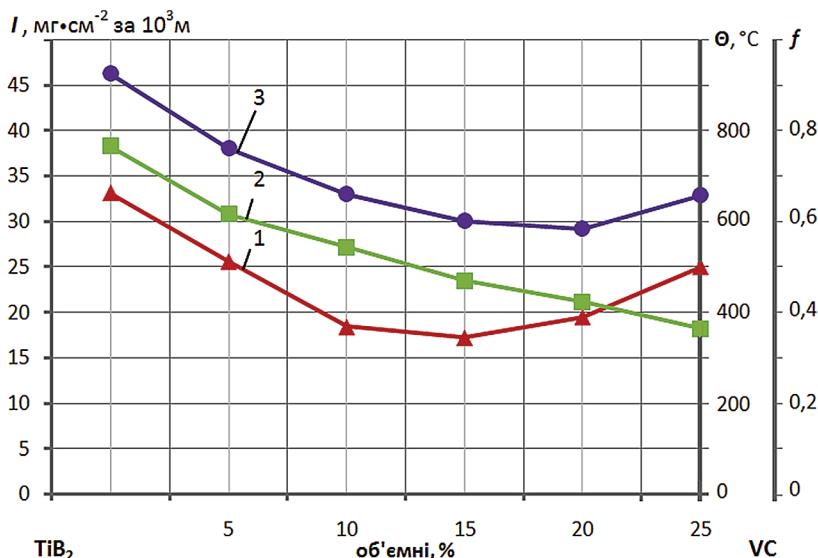


Рис. 4. Залежність триботехнічних властивостей оплавленого плазмового покриття ВТН від об'ємного вмісту TiB₂ і VC при P = 2 МПа, V = 0,5 м/с: 1 — f; 2 — Θ; 3 — I

Варто відзначити, що зниження зносу і коефіцієнта тертя в інтервалі температур 300–500 °C при збільшенні вмісту карбиду ванадію мабуть пов'язано з його окислювальною здатністю. На відміну від його дибориду титану, карбід ванадію. За цих температур починає окислюватися. Утворені окисні плівки, що містять FeO, TiO₂, V₂O₃, B₂O₃ слугують твердим мастилом і захищають робочу поверхню від зношування.

Тому для подальших досліджень, з огляду оптимальних триботехнічних властивостей покриття (I, f, Θ), вибраний сплав евтектичного складу: 10 об. % TiB₂ і 15 об. % VC.

На процес формування градієнтного покриття одержано патент [11]. Згідно з корисною моделлю плазмове покриття піддається лазерній обробці з подвійним оплавленням: перше оплавлення потужністю 10^5 – 10^8 Вт/см², діаметром плями фокусу-

вання променя — 4–6 мм, швидкістю пересування променя 0,2–0,5 м/хв, глибиною проплавлення, рівною товщині покриття; друге оплавлення потужністю 10^5 – 10^8 Вт/см², діаметром плями фокусування променя 1–3 мм, швидкістю пересування променя — 1–1,5 м/хв, глибиною 0,1–0,3 від товщини покриття (рис. 5).

Підвищення зносостійкості покриття і зокрема на етапі припрацювання (табл. 3) обумовлено його градієнтною структурою, поверхневий шар якої із пружно-пластичною дрібнозернистою структурою сприяє припрацюванню і самоорганізації вторинних структур, а розташований нижче шар стовбчастої структури ефективно демпфує зовнішні нормальні та зсувні навантаження [12, 13].

При цьому підвищується контактна міцність. Проведені випробування на контактну міцність в умовах циклічного навантаження кулькою (табл. 3) за напружень в зоні контакту 1,50–1,70 ГПа, показали, що втомна міцність сталі з двошаровим градієнтним покриттям вища, ніж у одношарового.

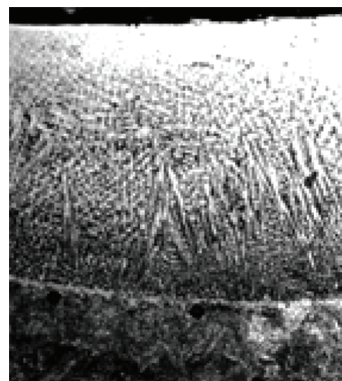


Рис. 5. Мікроструктура градієнтного плазмового покриття системи ВТН, × 500

Таблиця 3

Фізико-механічні та трибо технічні властивості градієнтного покриття: P = 2 МПа, V = 1 м/с

Обробка	Мікротвердість, Н ₁₀₀ , МПа	Знос, мг/см ² за 10 ³ м		Максим. темпер., t °C	Коефіцієнт тертя, f	Кількість циклів до руйнування, × 10 ⁶
		Припрацювання	Квазістаціонарне тертя			
Оплавлення	11200	42,7	18,9	490	0,40–0,48	0,5–0,6
Подвійне оплавлення	10050	31,5	12,0	450	0,35–0,42	0,7

Розроблене покриття, як фрикційний матеріал, відповідає також таким вимогам як: стабільний хімічний та фазовий склад, структура, а також буде забезпечувати сталість властивостей поверхневого шару в процесі експлуатації.

Разом з тим, матеріал вибирають для певних умов експлуатації (режим гальмування, навантаження тощо), а граничною поверхневою температурою нагрівання [14]. Тому були проведені триботехнічні дослідження впливу швидкості ковзання і навантаження на фрикційний нагрів поверхонь тертя (рис. 6).

На рис. 7 наведені мікроструктури поверхонь тертя. При швидкостях ковзання 0,2–0,8 м/с (температура поверхні 300 °С) має місце утворення вторинних структур, поверхня гладка (рис. 7, а). Зі збільшенням швидкостей ковзання до 1,2 м/с (температура 400 °С) та до 1,6 м/с (температура 550 °С) процеси тертя і зношування визначаються утворенням оксидних плівок (рис. 7, б, в).

У діапазоні швидкостей ковзання 1,8–2 м/с (температура 800–850 °С) відбувається контактне плавлення поверхні тертя. Сліди на зразках — це напливи і кристали застиглої евтектики (рис. 7, г). При цьому спостерігається різке зниження коефіцієнта тертя до значень, характерних для граничного тертя (0,05–0,10).

Таким чином, згідно з класифікацією І. В. Крагельського, розроблення покриття можна віднести до матеріалів для середніх умов тертя (коротко-

часна температура до 400 °С, тривала до 250 °С, тиск до 1,5 МПа).

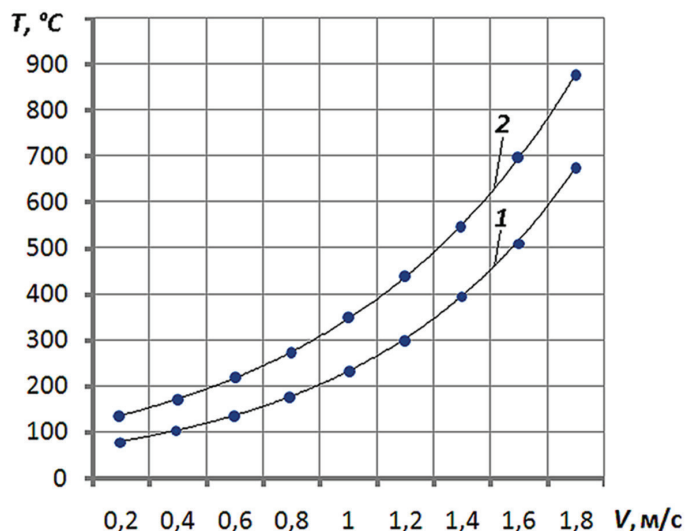


Рис. 6. Залежність приповерхневої температури покриття ВНТ від швидкості ковзання: 1 — навантаження 2 МПа, 2 — навантаження 5 МПа

7. Висновки

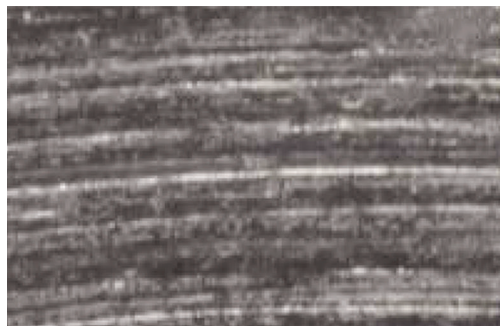
1. Обґрунтовано і експериментально підтверджено склад композиційного евтектичного сплаву для градієнтного покриття з урахуванням теплофізичних властивостей зв'язуючого і наповнювачів (теплопровідність, теплоємність): зв'язуюче — сталь 12Х18Н9Т — 75 %; наповнювачі — TiB_2 — 10 %, VC — 15 %.



а



б



в



г

Рис. 7. Мікроструктура поверхонь тертя градієнтного покриття, $P = 2$ МПа: а — $V = 0,4$ м/с, $t = 250$ °С; б — $V = 1,2$ м/с, $t = 400$ °С; в — $V = 1,6$ м/с, $t = 560$ °С; г — $V = 2$ м/с, $t = 850$ °С

2. Розроблено спосіб [11] формування градієнтного плазмового покриття для накладок гальмівних пристроїв лазерною обробкою з подвійним оплавленням: перше оплавлення потужністю 10^5 – 10^8 Вт/см², діаметром плями фокусування променя – 4–6 мм, швидкістю пересування променя – 0,2–0,5 м/хв, глибиною проплавлення, рівною товщині покриття; друге оплавлення потужністю 10^5 – 10^8 Вт/см², діаметром плями фокусування променя – 1–3 мм, швидкістю пересування променя – 1–1,5 м/хв, глибиною 0,1–0,3 від товщини покриття.

3. Підвищення зносостійкості дворазового оплавленого плазмового покриття обумовлено його градієнтною структурою, поверхневий шар якої із пружно-пластичною дрібнозернистою структурою сприяє припрацюванню і самоорганізації вторинних структур, а розташований нижче шар стовбчастої структури ефективно демпфує зовнішні нормальні та зсувні навантаження. При цьому підвищується контактна міцність покриття, знижується коефіцієнт тертя та градієнт температур.

4. Розроблене покриття для накладок гальмівних пристроїв можна віднести до фрикційних матеріалів для середніх умов тертя (короткочасна температура до 400 °С, тривала – до 250 °С, тиск до 1,5 МПа.

Література

1. Чичинадзе, А. В. Материалы в триботехнике нестационарных процесов [Текст] / А. В. Чичинадзе, Р. М. Матвеевский, Э. Д. Браун. – М.: Наука, 1986. – 248 с.
2. Чичинадзе, А. В. Расчет, испытание и подбор фрикционных пар [Текст] / А. В. Чичинадзе, Э. Д. Браун, А. Г. Гинзбург, З. В. Игнатъев. – М.: Наука, 1989. – 267 с.
3. Chichinadze, A. V. Evaluation method of the carbon friction composite materials used in multiple disk aviation brakes [Text] / A. V. Chichinadze // Tribologia. – 2000. – № 1, Part 1. – P. 7–22.
4. Cho, M. H. Effects of ingredients on tribological characteristics of a brake lining: an experimental case study [Text] / M. H. Cho, S. J. Kim, D. Kim, H. Jang // Wear. – 2005. – Vol. 258, № 11–12. – P. 1682–1687. doi:10.1016/j.wear.2004.11.021.
5. Томский, К. О. Повышение эффективности работы и износостойкости тормозных устройств путем применения биметаллических материалов [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.04 / К. О. Томский; ФГБОУ ВПО «Российский государственный университет нефти и газа им. И. М. Губкина». – М., 2013. – 24 с.
6. Елагина, О. Ю. Использование биметаллических поверхностей для снижения температуры на поверхности трения [Текст] / О. Ю. Елагина, А. В. Коновалов, К. О. Томский // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2009. – № 12. – С. 30–34.
7. Talib, R. J. The Performance Of Semi-Metallic Friction Materials For Passenger Cars [Text] / R. J. Talib, A. Muchtar, C. H. Azhari // Jurnal Teknologi. – 2007. – Vol. 46, № 1. – P. 53–72. doi:10.11113/jt.v46.282.
8. Talib, R. J. Microstructural characteristics on the surface and subsurface of semimetallic automotive friction materials during braking process [Text] / R. J. Talib, A. Muchtar, C. H. Azhari // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – Vol. 140, № 1–3. – P. 694–699. doi:10.1016/s0924-0136(03)00769-6.
9. Киндрачук, М. В. Износостойкость нержавеющей эвтектических сплавов с фазами внедрения [Текст] / М. В. Киндрачук, А. К. Шурин, В. Е. Панарин // Проблемы трения и изнашивания. – 1981. – № 19. – С. 17–28.
10. А. с. № 1050179 СССР. Порошковый материал для износостойких покрытий [Текст] / Киндрачук М. В., Корнеев В. Г., Мелентев О. П., Панарин В. Е. (СССР). – № 3411077/27; заявл. 05.03.1982; опубл. в БИ 1983.
11. Пат. 84998 України МПК C21D1/78 (2006.01) Спосіб отримання градієнтних зносостійких плазмових покриттів з високою припрацюваністю [Текст] / Киндрачук М. В., Стебелецька Н. М., Киндрачук В. М., Лобурак В. Я., Головка Л. Ф., Діденко О. Л., Корбут Є. В., Духота О. І., Хлевна Ю. Л. – № у 201304817; заявл. 16.04.2013; опубл. 11.11.2013, Бюл. № 21. – 4 с. – Режим доступу: \www/URL: <http://uapatents.com/4-84998-sposib-otrimannya-gradiehnitnikh-znosostij-kikh-plazmovikh-pokrittiv-z-visokoyu-pripracovanisty.html>.
12. Tubielewicz, K. Influence of wear during friction of chosen properties of a steel surface after burnishing process [Text] / Krzysztof Tubielewicz, Andrzej Zaborski, Wladyslaw Skoneczny // Tribologia. – 2003. – Т. 22, № 2. – P. 13–19.
13. Gershman, J. S. Thin films and self-organization during friction under the current collection conditions [Text] / J. S. Gershman, N. A. Bushe // Surface and Coat. Technol. – 2004. – Vol. 186, № 3. – P. 405–411. doi:10.1016/j.surfcoat.2003.11.016.

14. Бородай, А. В. О фрикционном взаимодействии, самоорганизации систем и их основных механизмах [Текст] / А. В. Бородай // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. техн. н. спец. вып. Пробл. трибоэлектрхим. — 2005. — С. 84–89.

РАЗРАБОТКА ГРАДИЕНТНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ НАКЛАДОК ТОРМОЗНЫХ УСТРОЙСТВ

В работе предложено использовать композиционные материалы, в основу создания которых положен принцип положительного градиента механических свойств. Изготовлено и проведено триботехнические испытания таких композиционных материалов. В качестве матрицы предложено использовать композиционный эвтектический сплав на основе стали 12X18H9T с учетом теплофизических характеристик укрепляющих фаз. Обоснованно проведение поверхностной комплексной лазерной обработки поверхности с целью улучшения структуры и триботехнических свойств поверхностного слоя.

Ключевые слова: тормозные устройства, эвтектический сплав, сталь, TiB₂, VC, теплофизические свойства, лазерная обработка.

Кіндрачук Мирослав Васильович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри машинознавства, Національний авіаційний університет, Київ, Україна, e-mail: nau12@ukr.net.

Тісов Олександр Вікторович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра машинознавства, Національний авіаційний університет, Київ, Україна, e-mail: tisso@ukr.net.

Стебелецька Наталя Миронівна, аспірант, кафедра машинознавства, Національний авіаційний університет, Київ, Україна, e-mail: nau12@ukr.net.

Kindrachuk Myroslav Vasylievich, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри машинобудування, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Tisov Oleksandr Viktorovich, кандидат технічних наук, доцент, кафедра машинобудування, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Stebeletska Natalia Myronovna, аспірант, кафедра машинобудування, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Kindrachuk Myroslav, National Aviation University, Kyiv, Ukraine, e-mail: nau12@ukr.net.

Tisov Oleksandr, National Aviation University, Kyiv, Ukraine, e-mail: tisso@ukr.net.

Stebeletska Natalia, National Aviation University, Kyiv, Ukraine, e-mail: nau12@ukr.net

УДК 66.099.2

Склябинский В. И.,
Скиданенко М. С.,
Кононенко Н. П.

ТЕХНИЧЕСКИЙ АУДИТ УЗЛОВ ГРАНУЛЯЦИИ РАСПЛАВА В ПРОИЗВОДСТВЕ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ БАШЕННЫМ СПОСОБОМ

В статье рассмотрены результаты экспериментальных исследований влияния различных параметров, частота и амплитуда специального сигнала, уровень жидкости в устройстве, на процесс диспергирования жидкости. Объединение полученных экспериментальных результатов и теоретических исследований стали основой для проектирования генератора специальных частот, для модернизации существующих грануляторов.

Ключевые слова: монодисперсность, азотные удобрения, вибрационный гранулятор, генератор специальных частот, приллирование.

1. Введение

В последние годы, широко обсуждаются в научных публикациях некоторые результаты исследований когерентных потоков частиц (например, капель или гранул) [1]. Интерес к подобным структурам имеет как фундаментальный характер, так

и связан с разработкой и созданием монодисперсных технологий [2].

В современном химическом производстве применение когерентных систем реализовано, в частности, в крупнотоннажных производствах азотных и комплексных минеральных удобрений, получаемых башенным способом (приллированием).