

УДК 621.891 (045)

ГРАДІЄНТНІ КОМПОЗИЦІЙНІ ПОКРИТТЯ ДЛЯ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ НАКЛАДОК ГАЛЬМІВНИХ ПРИСТРОЇВ

М. В. Кіндрачук, д-р техн. наук, проф.; **О. В. Тісов**, канд. техн. наук, доц.;
Н. М. Стебелецька, **В. В. Харченко**, **Є. П. Костюк**

Національний авіаційний університет

nau12@ukr.net

У роботі проведено дослідження з метою розробки композиційного зносостійкого покриття для нанесення на робочі поверхні накладок гальмівних пристроїв, в основу якого покладено правило додатного градієнта механічних властивостей. Створено та випробувано композиційний евтектичний сплав на основі сталі 12X18H9T з урахуванням теплофізичних характеристик усіх компонентів. Обґрунтовано проведення поверхневої комплексної лазерної обробки поверхні з метою покращення структури та триботехнічних властивостей поверхневого шару. Розроблено та запатентовано спосіб формування плазмових покриттів шляхом їх подвійного оплавлення лазером. Доведено, що покращення триботехнічних властивостей дворазово оплавленого покриття досягається шляхом утворення поверхневих структур, що відповідають правилу додатного градієнта механічних властивостей. Встановлено, що обробка лазером значно підвищує міцність зчеплення плазмового покриття з основним матеріалом.

Ключові слова: гальмівні пристрої; евтектичний сплав; сталь; TiB₂; VC; теплофізичні властивості; лазерна обробка; тертя та зношування.

The paper is devoted to the theoretical and experimental investigation in order to develop a wear resistant composite coating for deposition to the working surfaces of breaking devices. The research is based on the idea of forming a positive gradient of mechanical properties of the coating. It was elaborated and tested a composite eutectic alloy based on steel 12X18H9T. For better serviceability the thermal properties of all components of the alloy were considered. It was also argued that additional laser treatment of the surface contributes to better structure and tribological properties of the coating.

Keywords: breaking devices; eutectic alloy; steel; TiB₂; VC; thermal and physical properties; laser treatment, friction and wear.

Вступ і постановка завдань дослідження

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 зміни напрямку руху.

До фрикційних матеріалів висувають ряд вимог, зокрема – зносостійкість, здатність до припрацювання, фазова стабільність у широкому діапазоні температур тощо.

Підвищення зносостійкості має три основні напрями:

- 1) удосконалення властивостей безпосередньо фрикційного матеріалу;
- 2) поліпшення конструкцій гальмівних або передавальних пристроїв;
- 3) обмеження (регламентація) режимів роботи.

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

Для зниження інтенсивності зношування потрібно забезпечити додатний градієнт механічних властивостей за глибиною від поверхні тер-

тя, що збереже поверхню від руйнування внаслідок глибокого виривання, забезпечити опір матеріалу багаторазовому передеформуванню тощо.

Щоб забезпечити додатний градієнт механічних властивостей по глибині, здатності опиратися передеформуванню, зниженню місцевого питомого тиску, а отже, і поверхневих температур, хорошу 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 за високих температур та запобігали б 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 [1–4]. Окрім прямого впливу температури на знос, силу (коефіцієнт) тертя, теоретично й експериментально було виявлено, що коефіцієнт тертя збільшується зі зростанням градієнта температур і зменшенням загальної температури у вузлі тертя.

У зв'язку з цим, науковий і прикладний інтерес становить створення фрикційних матеріалів і композиційних покриттів, які б дозволяли ціле-

направлено керувати тепловим станом вузла тертя. Особливістю композиційних матеріалів є наявність неперервної зв'язувальної фази (полімерної, металевої матриці, в якій розподілені дискретні фази у вигляді твердих тіл – наповнювачів. Як основу композиційних евтектичних матеріалів перспективно використовувати аустенітну сталь 12X18H9T, що зумовлено характеристиками, котрі відрізняють її від інших матеріалів. Як зміцнювальні фази найбільш доцільно використовувати жаростійкі і зносостійкі карбіди і бориди.

Об'єктами дослідження були сплави на основі сталі 12X18H9T, у складі яких: бориди титану і хрому (ХТН), бориди титану і карбіду ванадію (ВТН). Хімічний і фазовий склад сплавів наведено в табл. 1, теплофізичні властивості в табл. 2 [5].

Структура та триботехнічні властивості плазмових покриттів

Для нанесення покриттів використовували порошки евтектичних сплавів двох систем: ВТН і ХТН [6]. Вихідні порошки містять дисперсні кристали фаз проникнення, причому розміри цих кристалів залежать від швидкості охолодження порошку в процесі його виготовлення, тобто від діаметра порошинок.

Таблиця 1

Хімічний і фазовий склад евтектичних сплавів

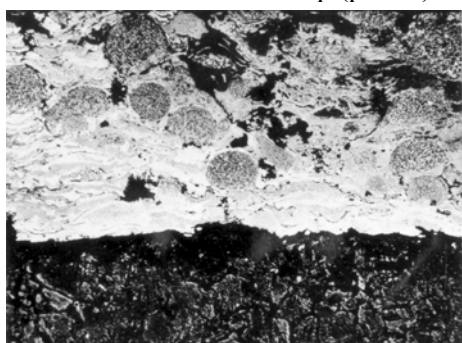
Маркування сплавів	Уміст компонентів за масою, %							Фазовий склад		Твердість, НВ	Температура плавлення, К
	Cr	Ni	Ti	V	B	C	Fe	Матриця	Зміцнювальні сполуки		
ВТН	15,4	7,7	3,2	8,1	1,4	1,9	62,3	12X18H9T	TiB ₂ + VC	470	1460
ХТН	20,5	8,6	2,5	–	2,6	–	65,8		(Ti, Cr)B ₂	370	1490

Таблиця 2

Теплофізичні властивості компонентів сплаву

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
CvB ₂	22	0,695

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; $\times 500$

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 також свідчать про низьку міцність зчеплення покриття з основою (16...20 МПа).

Методика випробувань

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 зняття зразка з машини. Як контртіло використовували ролики діаметром 40 мм, виготовлені зі 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 спостерігати за стабілізацією процесів тертя та зношування. Випробування зразків з покриттями проводили в умовах тертя без мащення за схемою вал-площина, навантаження при терті становили $P = 20; 40; 60; 150$ Н, швидкість ковзання $V = 0,1-2$ м/с. Шлях тертя $L = 1$ км.

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.

Хімічний склад та структуру складових поверхневого шару, утвореного внаслідок трибологічної взаємодії, визначали методом рентгеноструктурного аналізу.

Результати досліджень та їх обговорення

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 порошоків 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, розміщених 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 зношування спряженої пари. Крихке руйнування на поверхні тертя чітко виражене для плазмового покриття ХТН. За питомих навантажень 8 МПа відбувається продавлювання покриття.

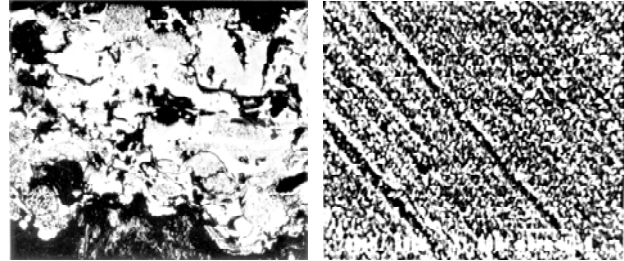


Рис. 2. Мікроструктури плазмового покриття (а), $\times 200$ і поверхні тертя (б), $\times 500$, з евтектичного порошка ВТН

Триботехнічні характеристики напилених 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 зношування 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.

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

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

Лазерна обробка у зв'язку з її специфікою (швидким нагрівом і наступним прискореним охолодженням) забезпечує отримання дрібнодисперсних структур, перенасичених твердих розчинів і, отже, високих властивостей покриттів. Тому практичний інтерес має розгляд особливостей будови і властивостей плазмових покриттів після обробки їх лазером у режимі опалення.

При цьому режим опромінення вибирався таким, щоб глибина пропалення дорівнювала товщині нанесеного покриття або перевищувала її. На рис. 3 подана мікроструктура плазмового покриття на сталі 40Х, опаленого променем лазера. Структура покриття має стовпчасто-дендритну будову. Порівнюючи з вихідною мікроструктурою, можна відзначити, що метал унаслідок 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 зазначити, що поблизу самої поверхні напрямок тепловідведення має менш виражений характер, і відбувається паралельно переміщенню пучка лазера по поверхні. Таким чином, орієнтація дендритів у зоні опалення визначається напрямком тепловідведення. Опалені покриття стають практично безпористими (пористість 0,5–1,0 %), міцність зчеплення підвищується до 400–450 МПа.

На процес формування градієнтного покриття одержано патент [7]. Згідно з корисною моделлю плазмові покриття піддається лазерній обробці з подвійним опаленням: перше опалення потужністю 10^5 – 10^8 Вт/см², діаметром плями фокусування променя — 4–6 мм, швидкістю пересування променя 0,2–0,5 м/хв, глибиною пропал-

ення, що дорівнює товщині покриття; друге опалення 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. 4).

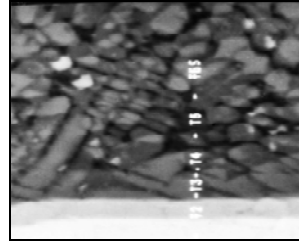


Рис. 3. Мікроструктура опаленого плазмового покриття ВТН, х 500

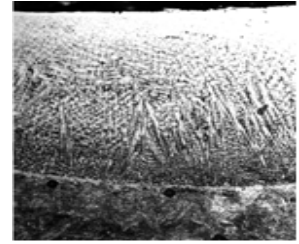


Рис. 4. Мікроструктура градієнтного плазмового покриття системи ВТН, х 500

Триботехнічними випробуваннями встановлено підвищення стійкості проти зношування опалених покриттів порівняно з вихідним без обробки більше ніж у два рази. Так, якщо зведене зношування напиленого покриття ВТН при 293 К становить 51,1 мг/см²·км, то опаленого — 27,9 мг/см²·км. При цьому зношування контртіла при терті по напиленому покритті менше, ніж при терті по опаленому 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 у зоні контакту твердих тіл повинен бути меншим, ніж на деякій глибині, тобто повинна дотримуватись умова $\delta\tau/\delta z > 0$.

Тому було поставлено завдання 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 глибинного зі стовпчастою структурою нормально орієнтованою до поверхні тертя.

Дисперсна структура поверхневого шару буде сприяти процесу припрацювання, а глибинний 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 переддеформуванню, тобто контактну втомну міцність.

Для створення такого покриття був вибраний сплав ВТН системи 12Х18Н9Т — TiB_2 – VC, оскільки він більш зносостійкий, ніж сплав ХТН.

Попередньо було досліджено оптимальний склад зміцнюючих фаз (TiB_2 , VC) щодо зносостійкості покриття, з урахуванням їх теплофізичних властивостей.

Так, зі збільшенням вмісту карбіду ванадію максимальна температура поверхні знижується. Поряд з іншим, це зумовлено тим, що карбід ванадію, який має вищу теплопровідність, ніж диборид титану, знижує поверхневу температуру.

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.

Варто зазначити, що зниження зносу і коефіцієнта тертя в інтервалі температур 300–500 °C при збільшенні вмісту карбіду ванадію мабуть пов'язано з його здатністю до окиснення. На відміну від його дибориду титану, карбід ванадію. За цих температур починає окиснюватися. Утворені окисні плівки, що містять FeO , TiO_2 , V_2O_3 , B_2O_3 слугують твердим мастилом і захищають робочу поверхню від зношування.

Тому для подальших досліджень, з огляду оптимальних триботехнічних властивостей покриття (I , f , Θ), обрано сплав евтектичного складу: 10 об. % TiB_2 і 15 об. % VC.

Дослідженнями встановлено, що такі триботехнічні властивості як знос, максимальна приповерхнева температура і коефіцієнт тертя залежать від співвідношення вмісту включень TiB_2 і VC (рис. 5). Це зумовлено напевно не тільки їх різними фізико-механічними властивостями, але й теплофізичними.

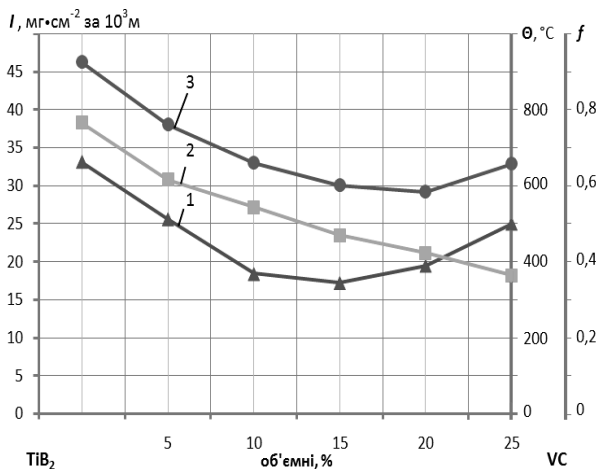


Рис. 5. Залежність триботехнічних властивостей оплавленого плазмового покриття ВТН від об'ємного вмісту TiB_2 і VC при $P = 2$ МПа, $V = 0,5$ м/с: 1 - f ; 2 - Θ ; 3 - I

На рис. 6 наведені мікроструктури поверхонь тертя. За швидкостей ковзання 0,2–0,8 м/с (температура поверхні 300 °C) має місце утворення вторинних структур, поверхня гладка (рис. 6, а). Зі збільшенням швидкостей ковзання до 1,2 м/с (температура 400 °C) та до 1,6 м/с (температура 550 °C) процеси тертя і зношування визначаються утворенням оксидних плівок (рис. 6, б, в). У діапазоні швидкостей ковзання 1,8–2 м/с (температура 800–850 °C) відбувається контактне тертя. Сліди на зразках — це напливи і кристали застиглої евтектики (рис. 6, г). При цьому спостерігається різке зниження коефіцієнта тертя до значень, характерних для граничного тертя (0,05–0,10).

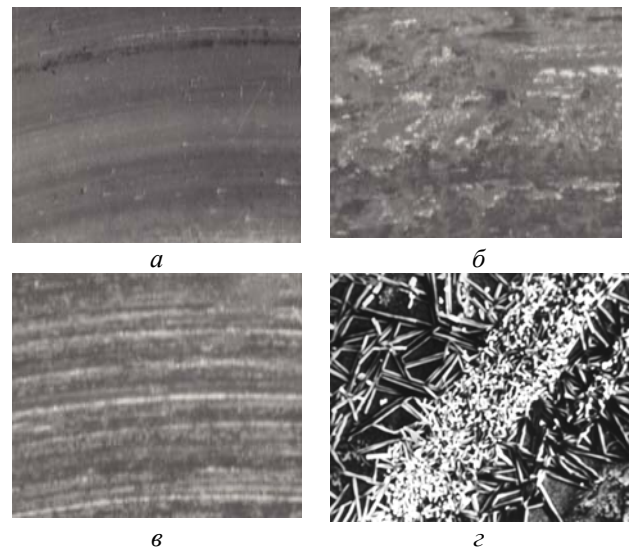


Рис. 6. Мікроструктура поверхонь тертя градієнтного покриття, $P = 2$ МПа:
 а - $V = 0,4$ м/с; $t = 250$ °C;
 б - $V = 1,2$ м/с; $t = 400$ °C;
 в - $V = 1,6$ м/с; $t = 560$ °C;
 г - $V = 2$ м/с; $t = 850$ °C.

Висновки

1. Обґрунтовано й експериментально підтверджено склад композиційного евтектичного сплаву для градієнтного покриття з урахуванням теплофізичних властивостей зв'язуючого і наповнювачів (теплопровідність, теплоємність): зв'язуюче сталь 12X18H9T – 75 %; наповнювачі TiB_2 – 10 %, VC – 15 %.

2. Розроблено спосіб (пат. № 84998) 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, що дорівнює 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 дворазово оплавленого плазмового покриття зумовлено його градієнтною структурою, поверхневий шар якої із пружно-пластичною дрібнозернистою структурою сприяє припрацюванню і самоорганізації вторинних структур, а розташований нижче шар стовпчастої структури ефективно демпфує зовнішні нормальні та зсувні навантаження. При цьому підвищується контактна міцність покриття, знижуються 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. Крагельський І. В. Тертя та зношування / І. В. Крагельський. — М. : Машиностроение, 1986. — 480 с.
2. Чичинадзе А. В. Матеріали в триботехніке нестационарних процесов / А. В. Чичинадзе, Р. М. Матвеевський, Э. Д. Браун. — М. : Наука, 1986. — 248 с.
3. Расчёт, испытание и подбор фрикционных пар / А. В. Чичинадзе, Э. Д. Браун, А. Г. Гинзбург, З. В. Игнатъев. — М. : Наука, 1989. — 267 с.
4. Chichinadze A. V. Evaluation method of the carbon friction composite materials used in multiple disk aviation brakes / A.V. Chichinadze // Tribologia. Warszawa. № 1 (2000). Part 1. — P. 7–22; № 2 (2000). Part 2. — P. 133–154; № 1 (2001). Part 3. — P. 23–38.
5. Киндрачук М. В. Износостойкость нержавеющей эвтектических сплавов с фазами внедрения / М. В. Киндрачук, А. К. Шурин, В. Е. Панарин // Проблемы трения и изнашивания. — К. : Техніка. — 1981. — № 19. — С. 17–28.
6. А.с. № 1050179 СССР. Порошковый материал для износостойких покрытий / М. В. Киндрачук, В. Г. Корнеев, О. П. Мелентев, В. Е. Панарин (СССР)-№ 3411077/27; заявл. 05.03.1982; опубл. в БИ 1983.
7. Пат. 84998 України МПК C21D1/78 (2006.01) Спосіб отримання градієнтних зносостійких плазмових покриттів з високою припрацюваністю / М. В. Кіндрачук, Є. В. Корбут, Н. М. Стебелецька та ін., № 201304817; заявл. 16.04.2013; опубл. 11.11.2013; бюл. № 21. — 4 с.

Стаття надійшла до редакції 20.01.2014