PACS numbers: 61.66.Dk, 68.60.Bs, 81.20.Ev, 81.05.Ni, 81.40.Pq, 81.65.Mq

Апробація методів нанесення зносостійких порошкових стопів на основі кобальту і нікелю з карбідом титану

Т. С. Черепова, Г. П. Дмитрієва, Ю. С. Семенова*

*Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України,
бульв. Академіка Вернадського, 36,
03142 Київ, Україна*

**Інститут магнетизму НАН України та МОН України,
бульв. Академіка Вернадського, 36-б,
03142 Київ, Україна*

Розглянуто практичні аспекти застосування порошкових стопів високої зносостійкості з використанням сучасних технологій їх нанесення. Об'єктами досліджень обрано стопи багатокомпонентних систем на основі легovanого кобальту та нікелю з карбідом титану. Розглянуто особливості нанесення стопів, виготовлених методами порошкової металургії на матеріал лопаток авіаційних газотурбінних двигунів. Приведено результати промислових випробувань гарячепресованих порошкових стопів на основі кобальту з карбідом титану, нанесених методом налятування. Проведено апробацію методу нанесення розроблених порошкових стопів на основі нікелю плазмово-порошковим методом. Експериментальну роботу з нанесення виконано на устаткуванні за допомогою базової технології, яку застосовують для ремонту робочих лопаток ГТД, пошкоджених під час експлуатації. Показано перспективність і ефективність застосування даного методу на прикладі використання зносостійких порошкових матеріалів на основі нікелю, зміцнених карбідом титану для захисту торців бандажних полиць лопаток ГТД від зношування.

Corresponding author: Tetyana Stepanivna Cherepova
E-mail: cherepova_ts@meta.ua

*G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics, N.A.S. of Ukraine,
36 Academician Vernadsky Blvd., UA-03142 Kyiv, Ukraine*

**Institute of Magnetism of N.A.S. of Ukraine and M.E.S. of Ukraine,
36-b Academician Vernadsky Blvd., UA-03142 Kyiv, Ukraine*

Citation: T. S. Cherepova, G. P. Dmytrieva, and Yu. S. Semenova, Approbation of Methods of Application of Wear-Resistant Powder Alloys Based on Cobalt and Nickel with Titanium Carbide, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **43**, No. 10: 1335–1349 (2021) (in Ukrainian), DOI: [10.15407/mfint.43.10.1335](https://doi.org/10.15407/mfint.43.10.1335).

Ключові слова: порошковий стоп, зносостійкість, мікроструктура, нанесення, метод налятування, плазмово-порошковий метод.

Practical aspects of use of high wear resistance powder alloys with modern processing of their application technology are considered. Alloys of multi-component systems based on alloyed cobalt and nickel with titanium carbide are selected as research objects. Developed alloys belong to a broad class of wear-resistant materials with high heat resistance, thermal stability and melting point. Peculiarities of application of alloys made by powder metallurgy methods on the material of blades of aircraft gas turbine engines are considered. The results of industrial tests of hot-pressed powder alloys based on cobalt with titanium carbide, applied by soldering are presented. Approbation of the method of application of the developed powder alloys on the basis of nickel by plasma-powder method is carried out. Experimental application work is performed on the equipment using the basic technology used in the repair of gas turbine blades damaged during operation. The prospects and efficiency of this method are shown on the example of the use of wear-resistant powder materials based on nickel, reinforced with titanium carbide to protect the ends of the bandage shelves of the blades of the gas turbine engine from wear.

Key words: powder alloy, wear resistance, microstructure, application, soldering method, plasma-powder method.

(Отримано 8 липня 2021 р.)

1. ВСТУП

Створення методом порошкової металургії композиційних штучних матеріалів на основі кобальту і нікелю з карбідом титану з високою зносостійкістю за температур до 1100°C [1–7] викликає необхідність пошуку прийнятної сучасної технології їх нанесення. На сьогодні існують та застосовують методи мікроплазмового порошкового натоплення [8], реакційно-дифузійного натоплення [9], лазерно-порошкового натоплення [10], яке є основою плазмово-порошкового методу. Але всі вони потребують наявності конструкторської і технологічної бази та відпрацювання технології процесу нанесення.

У роботі представлено дослідження можливості застосування доступніших технологій нанесення розроблених стопів. Це відома технологія вакуумного лютування порізаних пластин необхідного розміру з гарячепресованих порошкових стопів і плазмово-порошковий метод нанесення зносостійкого стопу у вигляді порошку, які використовують на виробництві ДП «Івченко-Прогрес». Устаткування, за допомогою якого відновлюють геометрію робочих лопаток ГТД, пошкоджених під час експлуатації, базується на використанні плазмово-порошкового методу натоплення стопу ЖС32-

ВИ. Враховуючи те, що наступним етапом технологічного процесу є нанесення зносостійкого матеріалу на торці бандажних полиць відновлених лопаток, можна за допомогою базової технології, замінивши порошкову суміш, одержати лопатку безпосередньо зі зносостійким покриттям, що є економічно обґрунтованим щодо часу і витрат.

Слід відмітити, що технології нанесення розроблених порошкових матеріалів для зміцнення повинні забезпечити надійне з'єднання з матеріалом лопатки в умовах експлуатації, гранично мінімізувати негативний вплив технологічних особливостей способу з'єднання на службові властивості матеріалу зносостійкої вставки, забезпечити відсутність дефектів мікро- та макроструктури, зокрема, тріщин у зоні з'єднання основний метал (матеріал лопатки)–зносостійка вставка. Апробацію нанесення обома способами проведено у співпраці з лабораторією металознавства ДП «Івченко–Прогрес».

2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Об'єктами дослідження обрані багатокomпонентні стопи, одержані з суміші карбідів титану і складної зв'язки $\text{Co}(\text{Ni})\text{--Cr--Fe--Al}$, тобто основою композицій є системи $\text{Co}(\text{Ni})\text{--TiC}$. Як вихідні компоненти використовували порошки кобальту марки ПК-1У, нікелю марки ПНЭ-1, хрому ПАХ 99Н5, алюмінію ПА-0, заліза ПЖВ1, карбіду титану стандарту ТУ 06173-74. Для застосування за високих температур карбід титану з високою температурою топлення (3065°C), високою твердістю (31 ГПа) і низькою щільністю ($4,94 \text{ г/см}^3$) є дуже привабливим і може бути перспективним матеріалом як зміцнювальної фази для підвищення зносостійкості завдяки його високій окислювальності та здатності протистояти термоудару [11, 12]. Вміст хрому, заліза та алюмінію забезпечує необхідні показники жаростійкості стопів.

Зразки для дослідження виготовляли методом порошкової металургії, що включав розмелювання порошкових сумішей з кобальту, хрому, алюмінію, заліза та карбіду титану в планетарному млині і активоване спікання з гарячим ізостатичним пресуванням. Оптимальні режими одержання стопів полягали у виборі величин температури і тиску, які б не призводили до витікання зв'язки (основи) стопів і, водночас, сприяли досягненню низької поруватості зразків. Для нанесення і випробувань виготовляли пресовані стопи у вигляді шайб діаметром 45 мм та висотою 3–5 мм з вмістом карбіду титану 40% об., 50% об., 60% об., 80% об. (табл. 1).

Одержані композиційні стопи на основі кобальту з карбідом титану мали відносну щільність 0,92–0,97, нанесення стопів на контактні поверхні здійснювали шляхом налутування литих профіль-

них пластин високотемпературними лютцями ВПр24 та ВПр36. Перевагою застосування вакуумного лютування у випадку нанесення зносостійких вставок є низька ймовірність утворення тріщин в матеріалі підкладки і вставки за рахунок рівномірного нагрівання і охолодження в печі. Оскільки стопи працюватимуть в умовах специфічного навантаження (питомий тиск в зоні контакту 2,5–100 МПа, діапазон температур від 0°C до 1100°C, швидкість нагрівання і охолодження до 250 °/с, швидкість корозійно-ерозійного газового потоку продуктів згоряння палива — 500 м/с), то доцільно провести випробування в робочих умовах.

Трибологічні випробування в умовах силового та температурного навантаження в атмосфері продуктів згоряння авіаційного палива проводили на стенді з використанням Т-подібних державок на двох однойменних зразках, площа стикання яких приблизно 50%. Дослідження проводили в ізотермічних умовах за температур 20°C і 1000°C, навантаженні — 50 МПа, амплітуді взаємного переміщення — 1,5 мм. Установка дозволяє створити умови для випробувань, які забезпечують контактну взаємодію з одночасним співударянням і проковзуванням, що максимально наближує їх до експлуатаційних [13]. З пресованих заготовок були виготовлені зразки — по 6 шт. кожного варіанту стопу у вигляді пластин розміром 2×2×24 мм, які методом високотемпературного лютування лутцем ВПр36 за температури 1270°C були нанесені на торці державок із стопу ЖС26-ВИ (рис. 1). Готові зразки після шліфування лютованого з'єднання проходили стандартний відпал для зняття напруг та контроль ЛЮМ1-ОВ, який не виявив дефектів в зоні люту та в нанесеному матеріалі. Після певної кількості циклів, однакової для даної серії випробувань, з допомогою профілографа вимірювали об'єм зносу матеріалу. Відношення об'єму зносу матеріалу (мм³) до числа циклів і є об'ємним зносом матеріалу за цикл, який характеризує його зносостійкість (обернена величина) за даної температури, величині навантаження та в певній атмосфері.

ТАБЛИЦЯ 1. Склад зразків для випробувань.

TABLE 1. Composition of samples for testing.

№ стопу	Склад, % об.	Поруватість, %
П 75 (1)	Со _{лер} + 40% TiC	5,1
П 75 (2)	Со _{лер} + 40% TiC	6,8
П 76	Со _{лер} + 50% TiC	3,2
П 77 (1)	Со _{лер} + 60% TiC	8,5
П 77(3)	Со _{лер} + 60% TiC	5,6
П 79 (1)	Со _{лер} + 80% TiC	3,9
П 79 (2)	Со _{лер} + 80% TiC	4,3

Рис. 1. Ескіз зразка для випробувань (стрілками вказані лютовані пластини).

Fig. 1. Sketch of the test sample (arrows indicate the soldered plates).

Експериментальну роботу по нанесенню плазмово-порошковим методом виконано на устаткуванні за допомогою базової технології, яку застосовують на підприємстві для натоплення стопу ЖС32-ВИ у випадку ремонту робочих лопаток ГТД, пошкоджених під час експлуатації [14, 15]. Для цього виготовляли 3 партії порошкових сумішей, основою яких є кобальт або нікель з додаванням легуючого комплексу і лопатковий стоп ЖС32-ВИ, а фазою для зміцнення в усіх трьох партіях — карбід титану, вміст якого становив 50% об. (табл. 2). Величина фракцій компонентів становила 50–80 мкм, кожна партія порошкової суміші мала вагу ~300 г.

Мікроструктурний аналіз зон фретинг-зносу проводили на оптичному мікроскопі OLYMPUS IX70 за збільшення $\times 50$ та $\times 500$ по зовнішній поверхні зразків на шліфах, виготовлених перпендикулярно контактній поверхні. Деякі зразки підлягали додатковому дослідженню рентгеноспектральним мікроаналізом (РСМА) безеталонним методом на енергодисперсійній приставці до електронного мікроскопа JSM6360LA в лабораторії металофізики УГМет АТ «Мотор Січ». Зйомку проводили в режимі поелементного визначення хемічного складу, а також в режимі картирування, який відображає розподіл легованих елементів в структурних складових стопу (на картограмах більшому вмісту елемента відповідає інтенсивніший колір).

ТАБЛИЦЯ 2. Склад порошкових сумішей.

TABLE 2. The composition of powder mixtures.

№	Склад, % мас.					
	TiC	Co	Ni	ЖС32-ВИ	Cr	Al
1	36,0	46,17	—	—	15,5	2,33
2	36,0	—	46,17	—	15,5	2,33
3	36,0	—	—	64,0	—	—

3. ЕКСПЕРИМЕНТ І ОБГОВОРЕННЯ

3.1. Метод налютовування пластин з порошкових стопів

Гетерогенна двофазна структура стопу, одержаного методом гарячого ізостатичного пресування складається з м'якої пластичної металеві основи з розташованими у ній твердими включеннями карбідів кількістю до 80% об. (рис. 2).

Така структура з високим вмістом стабільних карбідів на ділянках фактичного контакту, які сприймають основну частину зовнішнього навантаження і передають напруги карбідних часток в матрицю, де і проходить їх релаксація, є запорукою опору матеріалу зношуванню. Мала поруватість матеріалу і рівномірний розподіл карбиду титану по об'єму, дозволяє одержати його підвищені характеристики по зносостійкості, хорошу термостабільність та задовільну жаростійкість.

Після налютовування пластин на Т-подібні державки зразки всіх стопів підлягали випробуванню на зношування. Металографічні дослідження, метою яких була оцінка стану зон контакту зразків і визначення механізму пошкоджень пластин під час випробувань за кімнатної температури, представлено на рис. 3. Загалом пошкодження пластин характеризувалось незначним лінійним зносом. Однак, в механізмі зношування спостерігались елементи схоплення і взаємного перенесення металу, що провокувало утворення локальних лунок. Зношування по механізмі формування щільних окислів за місцем контакту і утворення глазуrowаного шару практично не проявилось як у литих стопів ХТН. Такому механізму віддають найбільшу перевагу, так як він забезпечує мінімальний лінійний

Рис. 2. Структура стопу $\text{Co}_{\text{дер}} + 50\% \text{TiC}$ у вихідному стані, $\times 500$.

Fig. 2. The structure of the alloy $\text{Co}_{\text{dop.}} + 50\% \text{TiC}$ in the initial state, $\times 500$.

Рис. 3. Топографія контактних зон зносостійких зразків після випробувань за кімнатної температури: *a* — П 75 (40% TiC); *б* — П 76 (50% TiC), $\times 50$.

Fig. 3. Topography of contact zones of wear-resistant samples after tests at room temperature: *a*—П 75 (40% TiC); *б*—П 76 (50% TiC), $\times 50$.

знос на тривалому ресурсі.

Зовнішній огляд та мікроструктурні дослідження зразків після випробування на зносостійкість за температури 1000°C свідчать про те, що в механізмі зношування переважають процеси схоплення і взаємного перенесення металу на великій площі, а це викликає підвищене лінійне зношування. Вигляд зони фретинг-зносу зразка П75 характеризується перенесенням металу, пластичною деформацією пластини, слідами від взаємного переміщення та лінійною виробкою за рахунок перенесення металу на спряжену пластину (рис. 4).

Мікроструктурний аналіз шліфа по зовнішній поверхні зразка П76 (50% об. TiC) перпендикулярно до контактної поверхні свідчить про те, що у разі випробувань спостерігають утворення поверхневих окислів в зоні фретинг-зносу. На поверхні пластини в зоні контакту глибина окислів, зазвичай, незначна (рис. 5).

У зоні контакту з однієї пластини на іншу переносяться частинки металу, відбувається їхнє окислення і вже ці окисли, що володіють

Рис. 4. Вигляд зони фретинг-зносу зразка П 75 за 1000°C , $\times 50$.

Fig. 4. View of the fretting wear zone of sample П 75 at 1000°C , $\times 50$.

Рис. 5. Окислення пластини на зразку П 76, $\times 200$.Fig. 5. Oxidation of the plate on the sample П 76, $\times 200$.

підвищеною твердістю, працюють як абразив і зношують спряжену поверхню.

За результатами дослідження всім зразкам більшою чи меншою мірою притаманні наступні особливості фретинг-зношування:

- лінійне зношування;
- наявність слідів взаємного переміщення матеріалу поперек контактних площадок (вздовж осі зразка);
- схоплення, взаємне перенесення металу;
- розвальцювання з утворенням задирок;
- окислення в зоні контакту частинок металу, що переносяться.

За даними ЛРСА (рис. 6) фазовими складовими стопу П 76 є фаза на основі кобальту, в якій присутні хром, алюміній і залізо. Другою фазою є карбід титану у вигляді дисперсних частинок розміром 5–10 мкм, складовими якого є титан і вуглець. Розподіл карбідних частинок є рівномірним, структура однорідна по всій площі зразка. Ніяких інших фаз у стопі не виявлено. Аналізуючи картограми мікроструктур, можна зробити наступні висновки:

- титан і вуглець концентруються в карбідній фазі TiC і практично відсутні в металевій матриці;
- кобальт і хром знаходяться в металевій матриці і не спостерігаються в карбідній фазі;
- алюміній і залізо відносно рівномірно розподілені у всіх фазах стопу, лише в карбідній фазі їх трохи менше.

3.2. Нанесення розроблених стопів плазово-порошковим методом

Для апробації нанесення розроблених стопів плазово-порошковим методом першою для дослідження обрана суміш № 3 (табл. 2), так як лопатковий стоп ЖС32-ВИ використовують на обладнанні підприємства для ремонту пошкоджених під час експлуатації деталей двигуна. Присадкою служили подрібнені карбіди титану, фракцією

від 40 мкм до 80 мкм в кількості 50% об. (36% мас.).

Карбіди вносили в гранульований стоп ЖС32-ВИ (фракція 63–160 мкм) з подальшим ретельним перемішуванням. Нанесення проведено за технологією нагрівання стопу ЖС32-ВИ у разі ремонту лопаток. Розміри карбідної фракції підбирали експериментально, щоб забезпечити сипучість суміші «гранульований стоп ЖС32-ВИ + карбіди» в трубопроводі подачі суміші установки.

У разі проведення експерименту однією з проблем було формування нагрітого валика. Як виявилось на практиці, під час просування в трубопроводі суміш частково розшаровувалася на гранули

Рис. 6. Результати РСМА зразка П 76 в режимі картирування, $\times 1000$.

Fig. 6. The results of PCMA sample П 76 in the mapping mode, $\times 1000$.

ЖС32-ВИ і карбід. Першими просипалися гранули ЖС32-ВИ, а зверху надходили гранули карбіду. Очевидно, що в такій ситуації стоплення стопу ЖС32-ВИ затруднялося, потрібно було «перетримувати» дугу полум'я, тобто зменшувати швидкість натоплення, і перегрітий метал не формував валик правильної форми типу півсфери, а стікав на один бік. Водночас карбідна частка суміші, всупереч ідеї введення в розтопу, у великій кількості осідала в кращому випадку на поверхні натопленого металу, а в основному зсипалася в піддон. Через сепарацію суміші карбід надходив в зону натоплення із запізненням, коли температура поверхні розтопу натопленого металу вже була занизька для його введення.

Зовнішній огляд показав, що натоплений валик сформувався в дві, так звані «хвилі». Перша хвиля має глибокий натоп у разі стікання розтопленого металу на одну сторону пластини-зразка. Друга хвиля — менш глибока, стікання розтопленого металу на сторону в цій зоні не відбулося. На вершині застиглого валика є багато карбідів, деякі карбіди приварилися до поверхні, але більша частина їх зсипалася з поверхні у разі дотику. Потрібно зауважити, що нанесене покриття не бездоганне, не має постійної товщини, подекуди спостерігаються дефектні ділянки, що, на наш погляд, може бути результатом неправильного підходу до технологічного процесу натоплення. Як кожен новий метод застосування порошкових матеріалів, він потребує відпрацювання температурних режимів, сили струму, швидкості подачі порошку тощо.

Для проведення металографічного дослідження натопленого металу виготовляли шліфи — поздовжній по площині зразка підкладки уздовж натопленого валика та поперек натопленого валика, де закінчився натоп. На поздовжньому макрошліфі після щавлення в електроліті проявилися дві зони натопленого металу: перша зона на початку натоплення — найглибша (3,5–4 мм), друга — значно менша ~1,5 мм, — в завершенні натопу. На вершині натопленого валика є кірка оксидів чорного кольору і вкраплення карбідів, що не ввійшли в розтоплений метал, а приварилися до поверхні натопленого валика. Потім розташовані зони, які не щавляться або слабо щавляться зі слабо вираженою структурою у разі збільшення бінокулярного мікроскопа. Далі метал з вираженою дендритно-стовпчастою структурою і, нарешті, зона основного металу, щавлення якої підвищується, якщо віддалятися від зони натопу. Під час дослідження шліфа умовно виділені 4 зони — А, Б, В, С (рис. 7).

Зона А — зону натопленого стопу ЖС32-ВИ з втіленими карбідами титану товщиною 0,8–1,0 мм представлено неоднорідною структурою з дендритами білого кольору на тлі світло-сірих міждендритних проміжків. У матриці хаотично розташовані карбіди пластинчастої форми величиною 25–45 мкм, товщина представленої зони 400–800 мкм (рис. 8).

Зона Б — перехід від зони з карбідами до нагрітого металу, її глибина становить 3–4 мм (рис. 9).

Структура карбідів зони Б набуває більш виражену дендритну і стовпчасту форму. У міждендритних проміжках з'явилися утворення карбо-боридної евтектики. Типових виділень зміцнювальної γ' -фази, характерних для стопів типу ЖС, за оптичних збільшень не видно, зважаючи на її високу дисперсність.

Товщина зони термічного впливу В становить 0,8–1 мм, в якій кількість і величина виділень карбо-боридної евтектики зменшуються з віддаленням від зони нагрітого металу, γ' -фаза залишається дуже тонкодисперсною.

Рис. 7. Умовні зони дослідження нагрітої зони.

Fig. 7. Conditional zones of research of the deposited zone.

Рис. 8. Зона А: а — зона карбідів нещавлена; б, в — зона карбідів після щавлення.

Fig. 8. Zone A: а—zone of carbides not etched; б, в—carbide zone after digestion.

Мікроструктура матеріалу зразка-підкладки за межами зони термічного впливу (зона С) відповідає звичайному термообробленому стану ступу ЖС32-ВИ (рис. 10).

На поперечному шліфі відзначено описані вище структурні особливості формування нагрітого металу в аналізі поздовжнього шліфа. Відмінність полягає лише в тому, що дендрити в даному перетині спроектовані у поперечному перерізі і стовпчастої структури не видно (рис. 11). На мікрорівні структурні закономірності такі самі, як ми спостерігали і на поздовжньому шліфі.

Таким чином, результати проведеної роботи з промислового нанесення порошкових сумішей та дослідження мікроструктури одержаних напояк свідчать про те, що процес нанесення плазмово-порошковим методом потребує вдосконалення.

Рис. 9. Зона Б: (на межі переходу до основного матеріалу підкладки).

Fig. 9. Zone B: (at the boundary of the transition to the main substrate material).

Рис. 10. Зона С: мікроструктура підкладки (вихідна структура), ×500.

Fig. 10. Zone C: the microstructure of the substrate (original structure) ×500.

Рис. 11. Мікроструктура нагрітого стопу у поперечному шліфі.

Fig. 11. The microstructure of the weld alloy in the transverse section.

Але самі штучні зносостійкі матеріали, одержані методом порошкової металургії перспективні як зносостійкі матеріали для захисту від зношування контактних поверхонь пар тертя в газотурбінних двигунах.

4. ВИСНОВКИ

Зносостійкі стопи, на основі легованого кобальту і нікелю з карбідом титану, одержані методом порошкової металургії, мають перспективу практичного застосування для зміцнення і відновлення різних типів контактних поверхонь. Розроблені стопи дуже тверді завдяки вмісту карбідів від 30 до 80% об. і їх можна застосовувати в інтервалі температур до 1100°C; володіють задовільною жаростійкістю; температура їх нагрівання вища за 1300°C. За попередніми дослідженнями стопи такого класу перевищують за зносостійкістю литі типу ХТН у 5–7 разів.

Нанесення пресованих порошкових стопів методом лютування за допомогою високотемпературних лютців ВПр-24 чи ВПр-36 порізанних пластин необхідного розміру може бути успішно застосоване

для масивних зразків (~10мм), так як тонкі пластини або маленькі зразки важко виготовити через їхню низьку міцність, яка проявляється у відсутності здатності до деформації і крихкому руйнуванні. Виходом з цього може бути визначення технології нанесення розроблених матеріалів, який забезпечить надійне з'єднання з матеріалом лопатки в умовах експлуатації.

Для більш повного розуміння надійності і працездатності плазмово-порошкового методу нанесення необхідно провести дослідження запропонованих стопів різної дисперсності, які будуть використовувати для натопу. У рамках доопрацювання технологічного процесу також було б доцільним створення шкали складів і відповідних мікроструктур стопів. Зауважимо, що дуже інформативними і корисними були б дослідження нагрітого металу на лопатках після їх експлуатації на двигуні.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. T. S. Cherepova, G. P. Dmytrieva, and V. K. Nosenko, *Sci. Innov.*, **12**(1):5 (2016).
2. Т. С. Черепова, Г. П. Дмитрієва, *Порошковая металлургия*, **1–2**: 58 (2016).
3. T. S. Cherepova, H. P. Dmytrieva, O. I. Dukhota, and M. V. Kindrachuk, *Mater. Sci.*, **52**, No. 2: 173 (2016).
4. Т. С. Черепова, Г. П. Дмитрієва, *Порошковая металлургия*, **5–6**: 153 (2016).
5. Т. С. Черепова, Г. П. Дмитрієва, *Металлофиз. новейш. технол.*, **38**, 11: 1497 (2016).
6. Г. П. Дмитрієва, Т. С. Черепова, О. І. Духота, В. І. Ничипоренко, *Порошковая металлургия*, **11–12**: 68 (2017).
7. T. Cherepova, G. Dmitrieva, O. Tisov, O. Dukhota, and M. Kindrachuk, *Acta Mechanica et Automatica, Republic of Poland*, **13**: 1: 57 (2019).
8. К. А. Ющенко, В. С. Савченко, А. В. Яровицын, А. А. Наконечный, Г. Ф. Настенко, В. Е. Замковой, О. С. Белозерцев, Н. В. Андрейченко, *Автоматическая сварка*, **8**: 25 (2010).
9. В. С. Несміх, К. А. Ющенко, Т. М. Кушнарєва, *Спосіб дифузійно-реактивного з'єднання металів і сплавів*: Патент України 73308. МПК C27, B23K1/20, B23K20/16, № 7 (2005).
10. С. Краузе, *Газотурбинные технологии*, **9–10**: 24 (2003).
11. С. С. Кипарисов, Ю. В. Левинский, А. П. Петров, *Карбид титана. Получение, свойства, применение* (Москва: Металлургия: 1987).
12. Р. П. Х. Флеминг, *Жаропрочные сплавы для газовых турбин* (Москва: Металлургия: 1981).
13. Л. Й. Івченко, А. Г. Андрієнко, *Металознавство та обробка металів*, **3**: 62 (1996).
14. В. А. Леонтьев, С. Д. Заличихис, Э. В. Кондратюк, В. Е. Замковой, *Вестник двигателестроения*, **4**: 99 (2006).
15. А. В. Яровицын, Г. Д. Хрущов, Н. О. Червяков, *Вестник Полоцкого государственного университета*, **11**: 61 (2016).

REFERENCES

1. T. S. Cherepova, G. P. Dmytrieva, and V. K. Nosenko, *Sci. Innov.*, **12**(1): 5 (2016).
2. T. S. Cherepova and G. P. Dmitrieva, *Poroshkovaya Metallurgiya*, **1–2**: 58 (2016) (in Ukrainian).
3. T. S. Cherepova, H. P. Dmytrieva, O. I. Dukhota, and M. V. Kindrachuk, *Mater. Sci.*, **52**, No. 2: 173 (2016).
4. T. S. Cherepova and G. P. Dmitrieva, *Poroshkovaya Metallurgiya*, **5–6**: 152 (2016) (in Ukrainian).
5. T. S. Cherepova and G. P. Dmitrieva, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **38**, 11: 1497 (2016) (in Ukrainian).
6. G. P. Dmitrieva, T. S. Cherepova, O. I. Dukhota, and V. I. Nychyporenko, *Poroshkovaya Metallurgiya*, **11–12**: 68 (2017) (in Ukrainian).
7. T. Cherepova, G. Dmitrieva, O. Tisov, O. Dukhota, and M. Kindrachuk, *Acta Mechanica et Automatica, Republic of Poland*, **13**: 1: 57 (2019).
8. K. A. Yushchenko, V. S. Savchenko, A. V. Yarovytsyn, A. A. Nakonechnyi, H. F. Nastenka, V. E. Zamkovo, O. S. Belozertsev, and N. V. Andreichenko, *Avtomaticheskaya Svarka*, **8**: 25 (2010) (in Russian).
9. V. S. Nesmikh, K. A. Yushchenko, and T. M. Kushnarova, *Sposib Dyfuziino-reaktyvnoho Ziednannya Metaliv i Splaviv*: Patent of Ukraine 73308. MPK S27, V23K1/20, V23K20/16, No. 7 (2005) (in Ukrainian).
10. S. Krauze, *Gazoturbinnye Tekhnologii*, **9–10**: 24 (2003) (in Russian).
11. S. S. Kyparysov, Yu. V. Levynskyi, and A. P. Petrov, *Karbid Titana. Poluchenie, Svoystva, Primenenie* (Moscow: Metallurgiya: 1987) (in Russian).
12. R. P. Kh. Flemynh, *Zharoprochnye Splavy dlya Gazovykh Turbin* (Moscow: Metallurgiya: 1981) (in Russian).
13. L. I. Ivshchenko and A. H. Andriienko, *Metaloznavstvo ta Obrobka Metaliv*, **3**: 62 (1996) (in Ukrainian).
14. V. A. Leontev, S. D. Zalychychys, E. V. Kondratiuk, and V. E. Zamkovo, *Vestnyk Dvygatelestroeniya*, **4**: 99 (2006) (in Russian).
15. A. V. Yarovytsyn, H. D. Khrushchov, and N. O. Cherviakov, *Vestnik Polotskogo Gosudarstvennogo Universiteta*, **11**: 61 (2016) (in Russian).