

ФИЗИКА ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ

PACS numbers: 62.20.Qр, 68.60.-р, 81.05.Вх, 81.05.Ni, 81.20.Еv, 81.40.Рq, 81.65.Mq

Властивості порошкових стопів на основі кобальту з карбідним зміцненням

Т. С. Черепова, Г. П. Дмитрієва

*Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины,
бульв. Акад. Вернадського, 36,
03142 Київ, Україна*

Досліджено важливі для експлуатації властивості одержаних методом порошкової металургії кобальтових стопів, зміцнених карбідами ніобію та титану. Визначено залежність твердості порошкових стопів від вмісту в них карбіду при температурах від кімнатної до 1150°C. Встановлено, що за характеристиками жаростійкості при температурі 1100°C порошкові кобальтові стопи з карбідом титану переважають стопи з карбідом ніобію. Стопи з об'ємним вмістом карбіду титану у 30, 50 та 70% досліджено на зносостійкість в умовах фретинг-корозії за температур у 20, 300, 650, 800 та 1050°C. Визначено оптимальний склад стопу авіаційного призначення з температурою топлення, вищою за 1300°C, для подальших промислових випробувань.

Ключові слова: порошкові кобальтові стопи, карбід титану, карбід ніобію, твердість, температура топлення, жаростійкість, зносостійкість.

Cobalt alloys obtained by powder metallurgy and reinforced by carbides of niobium and titanium (that is important for their operation properties) are investigated. The dependence of the hardness of powder alloys on content of carbide at temperatures from room temperature to 1150°C is determined. As established, the characteristics of heat resistance of powder cobalt alloys with titanium carbide at temperature of 1100°C predominate over alloys with niobium carbide. Alloys of titanium carbide with volume content of 30, 50

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

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

Please cite this article as: T. S. Cherepova and G. P. Dmitrieva, Properties of Powder Alloys Based on a Cobalt with Carbide Strengthening, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 38, No. 11: 1497–1512 (2016) (in Ukrainian), DOI: 10.15407/mfint.38.11.1497.

and 70% are studied for wear resistance under fretting corrosion at temperatures of 20, 300, 650, 800, and 1050°C. The optimum composition of the alloy of aviation appointment with a melting point higher than 1300°C is determined for further field tests.

Key words: powder cobalt alloys, titanium carbide, niobium carbide, hardness, melting temperature, heat resistance, wear resistance.

Исследованы важные для эксплуатации свойства полученных методом порошковой металлургии кобальтовых сплавов, упрочнённых карбидами ниобия и титана. Определена зависимость твёрдости порошковых сплавов от содержания в них карбида при температурах от комнатной до 1150°C. Установлено, что по характеристикам жаростойкости при температуре 1100°C порошковые кобальтовые сплавы с карбидом титана превышают сплавы с карбидом ниобия. Сплавы с объёмным содержанием карбида титана 30, 50 и 70% исследованы на износостойкость в условиях фреттинг-коррозии при температурах 20, 300, 650, 800 и 1050°C. Определён оптимальный состав сплава авиационного назначения с температурой плавления выше 1300°C для дальнейших промышленных испытаний.

Ключевые слова: порошковые кобальтовые сплавы, карбид титана, карбид ниобия, твёрдость, температура плавления, жаростойкость, износостойкость.

(Отримано 26 червня 2016 р.)

1. ВСТУП

Підвищення надійності і ресурсу авіаційних газотурбінних двигунів значною мірою забезпечують деталі їх гарячої частини, зокрема, робочі лопатки турбіни високого тиску, працездатність яких залежить від величини зносу їх контактних поверхонь та корозійно-ерозійної стійкості. За результатами дослідження [1] розподіл дефектів деталей турбін є наступним: робочі лопатки турбіни — 40%, камери згоряння — 24%, соплові лопатки — 20%, диски — 7,8%, інші деталі — 8,2%, тобто, серед деталей гарячої частини двигуна найбільше відмов припадає на робочі лопатки. Під час експлуатації контактні поверхні лопаток зазнають змінних навантажень, співударянь, коливань, стирання та високотемпературного окиснення. Всі ці процеси проходять в атмосфері згоряння авіаційного палива в діапазоні робочих температур від 20 до 1100°C. Пошук шляхів захисту від зношування контактуючих поверхонь робочих лопаток турбіни є однією з актуальних проблем авіаційного двигунобудування [2], один з яких — це їх бандажування — нанесення на контактні поверхні більш зносостійкого матеріалу, ніж матеріал лопатки, що уможливить продовжити строк експлуатації лопаток до ремонту, а сам ремонт полягатиме в заміні напайок або натопів, а не в заміні лопаток. Створення зносостійких матеріалів,

які б могли працювати в жорстких умовах експлуатації, є актуальним завданням, а результати роботи мають важливе практичне значення та є ваговою підставою для його виконання. Для захисту від зношування бандажних полиць лопаток газотурбінних двигунів на підприємствах ДП «Прогрес» та ВАТ «Мотор Січ» протягом 20 років використовуються розроблені в Інституті металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України стопи ХТН-61 та ХТН-62 [3, 4], що уможливило підвищити ресурс роботи двигунів до 12000 годин [5, 6]. Створення двигунів нового покоління та модернізація існуючих, коли, окрім збільшення ресурсу, ставиться задача підвищення потужності на одиницю маси двигуна, що, відповідно, приводить до підвищення робочих температур і діючих навантажень, вимагають і створення більш зносостійких матеріалів. Стопи типу ХТН — ливарні стопи на основі евтектики кобальт–карбід ніобію — мають зміцнювальною фазою тонкі та довгі кристали карбіду, вміст якої (19% об.) обмежений складом евтектики. Для підвищення їх зносостійкості потрібно збільшити кількість цієї зміцнювальної фази, але при цьому в заевтектичних стопах виникають грубі великі кристали карбіду і значно підвищується температура кінця топлення стопу. Ці обставини спричиняють зменшення пластичності стопу та роблять неможливим виготовлення його методом топлення в керамічних тиглях.

Для збільшення в стопі кількості дисперсних кристалів зміцнювальної карбідної фази вирішено розробити стопи, що виготовляються методами порошкової металургії. У цьому випадку є можливість досягти необхідного дисперсного зміцнення, не знижуючи температуру початку топлення стопу. Високий вміст твердої структурної складової — карбіду, яка бере на себе основне навантаження, та пластичної кобальтової основи, що рівномірно перерозподіляє його, підвищують опір матеріялу зношуванню. Враховуючи те, що твердість матеріялу розглядається як запорука зносостійкості, доцільно вивчити фактор впливу температури на твердість одержаних стопів. Також необхідно дослідити інші властивості порошкових стопів з метою досягнення таких показників, які б задовольняли певний комплекс експлуатаційних вимог, основними з яких є температура топлення $\geq 1300^{\circ}\text{C}$, що задовольняє умовам технологічного процесу виготовлення лопаток (1270°C — дегазація і пайка), висока жаростійкість в порівнянні з існуючими аналогами [7], структурна і фазова стабільність в процесі експлуатації, та висока рівномірна зносостійкість в діяпазоні робочих температур від 20 до 1100°C .

2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Об'єктами дослідження обрані багатокомпонентні стопи, одержані з суміші порошоків карбідів ніобію або титану і кобальту та легуючих елементів — хрому, заліза і алюмінію. Для виготовлення зразків в

якості вихідних компонентів використовували достатньо чисті порошки кобальту марки ПЖ-1У, хрому ПАХ 99Н5, алюмінію ПА-0, заліза ПЖВ1.71 та карбіди відповідних стандартів: ТУ 06173-74 — TiC та МРТУ 6-09-5896-69 — NbC. Зразки виготовляли методом порошкової металургії, яка включала розмел порошоків сумішей в планетарному млині, активоване спікання при гарячому пресуванні порошоків сумішей в графітових прес-формах на гідравлічному пресі при температурах 1100–1300°C і навантаженнях 2–3 кН [8].

Дослідження твердості проводили на установці УВТ-2, яка призначена для дослідження твердості матеріалів в інтервалі температур від кімнатної до 3000°C у вакуумі або середовищі захисних газів [9, 10]. Температури фазових перетворень — початок і кінець топлення, початок і кінець кристалізації, перетворення в твердому стані — визначали за допомогою диференційного термічного аналізу на обладнанні ВДТА-8М. Дослідження мікроструктури проводились на оптичному мікроскопі OLYMPUS IX70 при збільшеннях $\times(50-500)$ та методом електронної сканувальної мікроскопії (прилад JSM-6400 (JEOL Ltd), оснащений енергодисперсійним спектрометром) при збільшеннях $\times(1500-2000)$. Жаростійкість визначали по збільшенню ваги зразка, віднесеному до його площі поверхні. В електричній печі опору кожен зразок знаходився в окремому тиглі з окису алюмінію, нагрівання до температури 1100°C на повітрі контролювалося термопарою, витримка становила 10 годин і охолодження здійснювалося з піччю. Процедура повторювали п'ять разів. Загальна витримка зразків при 1100°C становила, таким чином, 50 годин. Жаростійкість стопів визначали після кожних 10 годин відпалу. Випробування на зносостійкість пресованих порошоків стопів на основі кобальту з карбідом титану проведені на установці для дослідження матеріалів в умовах фретингу МФК-1 [11]. Для забезпечення температурного режиму від 20 до 1050°C вона додатково обладнана кільцевою електричною піччю. Обладнання уможливило проводити дослідження фретинг-корозії в діапазоні частот 10–30 Гц при нормальному тиску до 60 МПа і при амплітудах вібропереміщення 0,001–2,5 мм.

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ

3.1. Гаряча твердість кобальтових стопів з карбідами ніобію та титану

Для дослідження твердості в діапазоні температур 20–1150°C пресованих порошоків стопів на основі кобальту з карбідами ніобію або титану були виготовлені зразки, склад яких приведено в табл. 1. Використання порошоків низької дисперсності (до 10 мкм) в поєднанні з оптимальними режимами гарячого пресування уможливило досягти їх малої пористості.

Результати проведених вимірювань твердості кобальтових сто-

ТАБЛИЦЯ 1. Склад і пористість досліджених стопів.**TABLE 1.** Composition and porosity of the investigated alloys.

Номер зразка	Склад, % мас.								Пористість, %
	NbC		TiC		Cr	Al	Fe	Co	
	% об.	% мас.	% об.	% мас.					
1	30	27,0	–	–	17,7	2,66	2,66	49,98	1,0
2	40	36,5	–	–	15,39	2,31	2,31	43,49	4,4
3	50	46,5	–	–	12,97	1,95	1,95	36,63	5,0
4	–	–	30	19,0	19,6	2,95	2,95	55,5	5,0
5	–	–	40	27,0	17,7	2,66	2,66	49,98	3,4
6	–	–	50	36,0	15,51	2,33	2,33	43,83	3,5

пів з карбідами ніобію або титану в інтервалі температур 20–1150°C представлено в табл. 2.

За даними експериментального дослідження гарячої твердості матеріалів в залежності від складу можна констатувати, що зі збільшенням вмісту карбідів твердість збільшується у всьому температурному діапазоні. Як видно, з підвищенням температури твердість всіх досліджених стопів знижується. Твердість пресованих стопів з карбідом титану перевищує твердість стопів з карбідом ніобію у всьому діапазоні температур. Характерним для всіх стопів є малі значення твердості в діапазоні температур від 1000 до 1150°C.

ТАБЛИЦЯ 2. Твердість порошкових стопів в інтервалі температур 20–1150°C.**TABLE 2.** Hardness of the powder alloys in the temperature range 20–1150°C.

T, °C	Твердість зразків H_V , МПа					
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6
20	7987	9263	9587	9239	10170	10440
250	5750	7987	9263	8376	9312	9669
400	4336	7445	7987	7201	7792	8036
550	3913	5750	7445	5341	5747	6023
700	2718	3550	4336	2611	2897	3671
850	1143	1395	1997	1100	1445	2154
1000	286	442	614	604	741	956
1100	81	129	139	170	202	306
1150	60	62	64	78	87	139

3.2. Температура топлення та жаростійкість стопів кобальту з карбідами ніобію і титану

Температура топлення розроблених стопів набуває важливого значення, тому що повинна задовольняти умовам технологічного процесу виготовлення лопаток (1270°C — дегазація і пайка), тобто, в нашому випадку, з врахуванням можливих відхилень, повинна бути вищою за 1300°C. Склад стопів для визначення їх температури топлення та жаростійкості наведено в табл. 3.

Термограми стопів свідчать про те, що кобальтові стопи, зміцнені карбідами, не містять додаткових легкотопких фаз та не мають фазових перетворень до температури топлення, яка складає 1300–1350°C незалежно від типу карбіду, про що свідчить відсутність додаткових ефектів на них, за виключенням стопів з великим вмістом карбіду, де, на наш погляд, складно досягти рівноважного стану.

ТАБЛИЦЯ 3. Склад і пористість досліджених стопів.

TABLE 3. Composition and porosity of the investigated alloys.

Номер зразка	Склад, % мас.								Пористість, %
	NbC		TiC		Cr	Al	Fe	Co	
	% об.	% мас.	% об.	% мас.					
1	30	27,0	–	–	17,7	2,66	2,66	49,98	1,0
2	40	36,5	–	–	15,39	2,31	2,31	43,49	4,4
3	50	46,5	–	–	12,97	1,95	1,95	36,63	5,0
4	70	61	–	–	8,0	1,2	1,2	22,6	4,2
5	–	–	30	19,0	19,6	2,95	2,95	55,5	25,0
6	–	–	30	19,0	19,6	2,95	2,95	55,5	3,2
7	–	–	30	19,0	19,6	2,95	2,95	55,5	18,0
8	–	–	40	27,0	17,7	2,66	2,66	49,98	10,0
9	–	–	50	36,0	15,51	2,33	2,33	43,83	6,0
10	–	–	50	36,0	15,51	2,33	2,33	43,83	3,1
11	–	–	50	36,0	15,51	2,33	2,33	43,83	10,4
12	–	–	50	36,0	15,51	2,33	2,33	43,83	28,0
13	–	–	50	36,0	15,51	2,33	2,33	43,83	3,4
14	–	–	60	45,5	13,21	1,98	1,98	37,33	9,5
15	–	–	60	45,5	13,21	1,98	1,98	37,33	4,4
16	–	–	70	56,5	10,54	1,58	1,58	29,8	25,0
17	–	–	70	56,5	10,54	1,58	1,58	29,8	6,7

Але ці стопи зберігають форму до 1400°C, що важливо для технології їх застосування.

Важливою властивістю є жаростійкість, оскільки стопи, призначені для нанесення на кромки бандажних полиць робочих лопаток газотурбінних двигунів, знаходяться в контакті з високотемпературними продуктами згоряння, що містять велику кількість кисню. Тому зазначені стопи повинні мати високу стійкість до окиснення. Визначення легувальних добавок з метою підвищення жаростійкості порошкових кобальтових стопів проведено з урахуванням досліджень ливарних стопів. Ключовим елементом є хром, який надає стопу необхідний опір окисненню і гарячій корозії, а для додаткового підвищення жаростійкості — алюміній. Всі легувальні елементи мають більшу спорідненість до кисню, ніж кобальт. Застосування методів порошкової металургії при виготовленні уможливило використати два типи карбідів: окрім карбиду ніобію, в якості зміцнювальної фази взято карбід титану, як найбільш стійкий до окиснення з-поміж інших карбідів тяжкотопких металів [12]. Одержані методом гарячого пресування кобальтові стопи з карбідами ніобію або титану були досліджені на жаростійкість (табл. 4).

Стопи з карбідом титану показали вищу жаростійкість порівняно зі стопами, що містять карбід ніобію. Подальші вимірювання жаростійкості стопів з карбідом ніобію (більше 10 годин) виявились нецільними через низькі показники. Оскільки металевою складовою всіх досліджених стопів є однаково легований кобальт, то різниця в показниках жаростійкості зумовлена стійкістю до окиснення самих карбідів. Дослідження жаростійкості стопів з карбідом титану показали, що процес високотемпературного окиснення спочатку (протягом перших 10 годин) перебігає швидко, але через деякий час встановлюється практично постійна і незначна швидкість приросту маси. Найбільш суттєвим фактором, що впливає на жаростійкість стопів, є пористість виготовлених стопів: з її збільшенням показники знижуються незалежно від типу та вмісту карбиду. Це наглядно демонструє, наприклад, залежність приросту маси зразків від тривалості витримки при 1100°C для стопів з однаковим вмістом карбиду титану (50% об.), але з різною пористістю (рис. 1).

Порівняльна аналіза уможливорює зробити висновок: більш компактний матеріал має ліпшу жаростійкість. Наявність великої кількості пор полегшує проникнення кисню в основний матеріал на значну глибину. Ширина окисненого приповерхневого шару може досягати десятків мікрон. Крім того, хемічному впливу піддаються і внутрішні поверхні пор та тріщин, тобто збільшується площа взаємодії, в результаті чого жаростійкість матеріалу знижується. Дослідження поверхні стопів після випробувань на жаростійкість методом електронної сканувальної мікроскопії вказують на наявність значного окисного шару в приповерхневій зоні (рис. 2).

ТАБЛИЦЯ 4. Температура топлення та жаростійкість стопів.**TABLE 4.** The melting temperature and heat resistance of the alloys.

Номер зразка	Температура топлення, °С	Збільшення маси $\Delta m \cdot 10^{-5}$, г/мм ²				
		10 год	20 год	30 год	40 год	50 год
1	1340	81,36				
2	1320	75,82				
3	1320	112,75				
4	1270	222,03				
5	1340	13,505	18,0	20,25	24,4	28,6
6	1350	4,098	6,831	18,85	24,04	28,96
7	1240	12,634	19,35	25,0	30,9	36,8
8	1320	18,39	29,502	37,55	40,99	48,27
9	1270	8,971	12,69	16,19	20,34	23,84
10	1325	5,6	7,67	9,14	10,32	11,8
11	1315	20,16	26,703	28,61	30,25	30,79
12	1280	24,479	43,48	61,7	74,47	84,36
13	1250	11,42	15,38	18,4	21,44	23,77
14	1325	32,55	38,936	49,79	57,02	64,89
15	1260	6,86	9,35	11,22	13,3	14,97
16	1200	37,065	67,15	84,57	94,5	103,2
17	1300	29,27	44,058	58,26	67,82	78,55

Основними складовими незначної кількості окалини в тиглі після випробувань на жаростійкість за даними рентгеноструктурної аналізи були рутил TiO_2 , кобальт-титановий оксид CoTi_2O_5 , кобальт-хромовий оксид CoCr_2O_4 та ільменіт FeTiO_3 .

Підсумовуючи одержані результати по оцінюванню та порівнянню гарячої твердості і жаростійкості кобальтових стопів з карбідами ніобію і титану, та враховуючи явну перевагу стопів з карбідом титану, було прийнято рішення надалі досліджувати лише стопи з карбідом титану.

3.3. Зносостійкість кобальтових стопів з карбідом титану

Для дослідження зносостійкості було виготовлено зразки порошкових стопів, склад яких (в % мас.) наведено в табл. 5. Також для порівняння досліджено стоп № 1, витоплений в лабораторній дуговій печі, який за припущенням, трактували як стоп з нульовою пористістю.

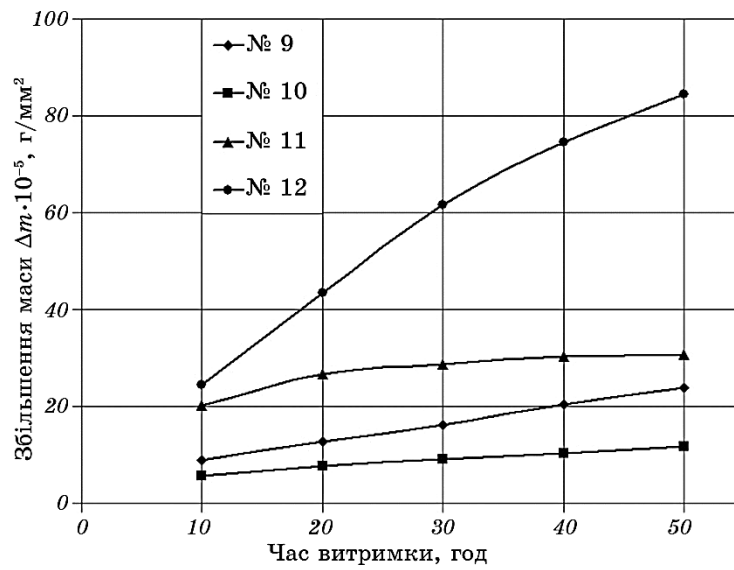


Рис. 1. Жаростійкість порошкових стопів $Co_{дер}-50\% TiC$ різної пористості: № 10 — 3,2%, № 9 — 6,0%, № 11 — 10,4%, № 12 — 28,0%.

Fig. 1. Heat resistance of the powder alloys $Co-50\% TiC$ with different porosity: No. 10—3.2%, No. 9—6.0%, No. 11—10.4%, No. 12—28.0%.

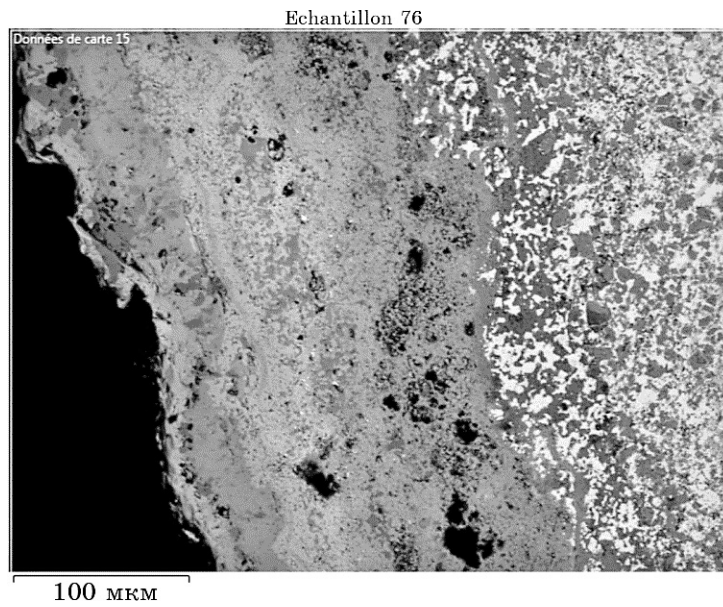


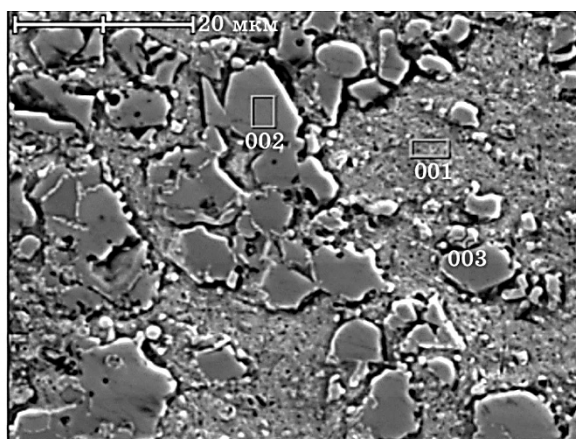
Рис. 2. Мікроструктура окисного шару стопу № 10.

Fig. 2. Microstructure of oxide layer of the alloy No. 10.

ТАБЛИЦЯ 5. Склад і пористість досліджених стопів.**TABLE 5.** Composition and porosity of the investigated alloys.

№ зразка	TiC		Co	TiH	Cr	Al	Fe	Пористість, %
	% об.	% мас.						
1 (литий)	30	19	55,5	–	19,6	2,95	2,95	0
2	30	17,84	55,5	1,16	19,6	2,95	2,95	25
3	30	17,84	55,5	1,16	19,6	2,95	2,95	3,2
4	50	33,8	43,83	2,2	15,51	2,33	2,33	28
5	50	33,8	43,83	2,2	15,51	2,33	2,33	3,1
6	50	33,8	43,83	2,2	15,51	2,33	2,33	10,4
7	70	53,06	29,8	3,44	10,54	1,58	1,58	6,7

Зносостійкість — структурно чутлива властивість, тому важливими були металографічні дослідження одержаних гарячепресованих стопів (рис. 3).



№ точки	C	Al	Ti	Cr	Fe	Co	Всього, %
001	0,63	1,99	5,74	22,79	3,69	65,16	100
002	3,28		96,72				100
003	4,01		91,85	1,50		2,65	100

Рис. 3. Мікроструктура стопу № 5 та хемічний склад фаз, $\times 2000$.**Fig. 3.** The microstructure of the alloy No. 5 and the chemical composition of phases, $\times 2000$.

Мікроструктура зразків представляє собою кобальтову основу, леговану алюмінієм, хромом і залізом, в якій знаходиться карбід титану у вигляді дисперсних частинок. Ніяких інших фаз в стопі не виявлено. Структура всіх одержаних стопів досить дрібнозерниста, розмір частинок карбіду титану складає, в основному, 5–10 мкм. Дані мікроструктурної аналізи уможливають зробити наступні висновки: титан сконцентрований тільки в карбіді; кобальт і хром знаходяться в металевій складовій стопів и не спостерігаються в карбіді; алюміній, вуглець і залізо відносно рівномірно розподілені в усіх структурних складових стопів, лише в карбіді їх дещо менше.

Сукупність високого вмісту твердої структурної складової — карбіду титану, яка бере на себе основне навантаження, та пластичної металевої основи, що рівномірно перерозподіляє його, є запорукою підвищення опору зношуванню. Оцінювання зносостійких характеристик пресованих порошкових стопів при кімнатній температурі було проведено при частоті коливань 30 Гц, амплітуді 200 мкм та різних навантаженнях. Випробування складали $2 \cdot 10^6$ циклів (табл. 6).

Цілком очевидно, що збільшення навантаження спричиняє зростання зношування стопів, незалежно від вмісту карбідної фази. Порівняння показників зносу стопів з однаковим вмістом карбіду але з різною щільністю (зразки № 1 і № 2 з 30% об. та № 4 і № 5 з 50% об.) свідчать про негативний вплив пористості на зносостійкість порошкових стопів та необхідність аналогічних випробувань низькопористих стопів при підвищених температурах.

Середній лінійний знос стопів в залежності від кількості циклів випробувань за температури 650°C, амплітуді коливань 120 мкм та навантаженні 30 МПа представлено в табл. 7.

Порівняння середнього лінійного зносу стопів однакової щільності (№ 3 і № 5) уможливає зробити висновок про те, що збільшення вмісту карбідної складової позитивно впливає на опір матеріалу зношуванню. Випробування стопів з однаковим вмістом карбіду титану різної щільності (№ 5 і № 6) ще раз доводить необхідність досягнення її максимальної величини при виготовленні стопів. Однак найбільш інтенсивного зношування зазнає стоп прийнятної щільності з найвищим вмістом карбіду титану — № 7. Ймовірно, недостатня кількість міжкарбідних прошарків металевої складової стопу не може ефективно утримувати карбідні частинки, що призводить до їх викришування і, як наслідок, до зниження зносостійкості.

За результатами випробувань в залежності від їх тривалості стоп № 5 в усіх обраних діапазонах часу зношується найменш інтенсивно. Тут значну роль відіграє низька пористість стопу та значний вміст карбіду, який міцно утримується металевою матрицею. При такій кількості карбіду тертя відбувається на поверхні його зерен, котрі мають високу твердість та стійкість до абразивного зношування. Тому для подальших досліджень базу випробувань для пер-

ТАБЛИЦЯ 6. Зносостійкість стопів при 20°C.**TABLE 6.** Wear resistance of the alloys at 20°C.

№ зразка	Знос при навантаженні, мкм		
	20 МПа	40 МПа	60 МПа
1	19	43	86
2	48	120	205
4	40	105	180
5	11	18	30

ТАБЛИЦЯ 7. Середній лінійний знос стопів при 650°C.**TABLE 7.** Average linear wear of the alloys at 650°C.

№ стопу	Середній лінійний знос, мкм			
	Кількість циклів, тис.			
	100	200	400	1000
3	2	4	10	16
5	0	1	3	5
6	0	2	5	8
7	4	7	11	19

спективного стопу № 5 збільшено до 5 млн. циклів та розширено температурні параметри, при яких визначали лінійний знос: 300, 650, 800 і 1050°C. Всі інші умови збережені: навантаження — 30 МПа, амплітуда — 120 мкм та частота коливань — 30 Гц. Для порівняння приведено результати випробувань стопу № 1 з меншим вмістом карбіду — 30% об. (рис. 4).

Як видно, з підвищенням температури зносостійкість обох досліджених стопів знижується. В усьому діапазоні температур порошковий стоп № 5 перевищує за зносостійкістю литий стоп № 1. Високі трибологічні характеристики цього стопу підтверджено випробуваннями при температурі 1050°C, де він володіє високою несучою здатністю та опором зношуванню, що робить його перспективним в якості матеріялу для зміцнення бандажних полиць лопаток газотурбінного двигуна, що склало основу для патентування стопу [14].

4. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

На основі виконаних досліджень можна стверджувати, що порошкові стопи на основі кобальту з карбідом титану мають ліпші показ-

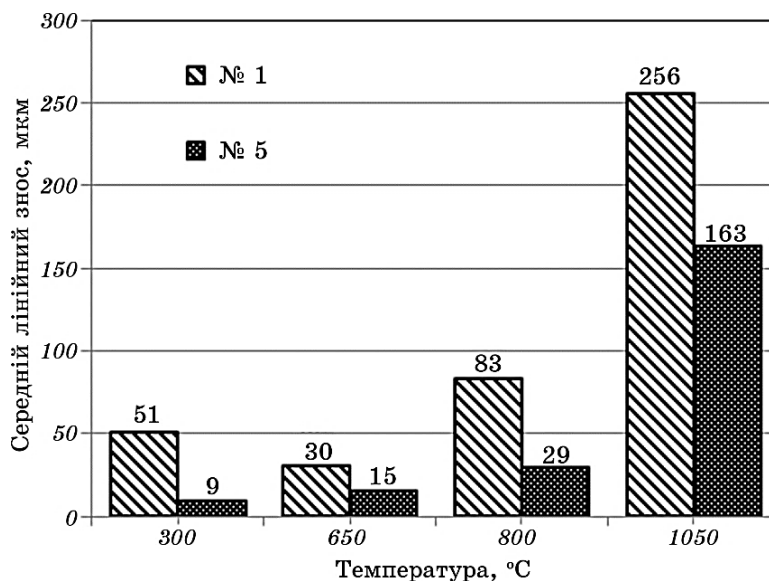


Рис. 4. Зношування стопів в умовах високотемпературного фретингу.

Fig. 4. Wear of the alloys at high temperature fretting conditions.

ники твердості в діапазоні температур 20–1150°C, ніж аналогічні стопи з карбідом ніобію. Враховуючи той факт, що поєднання високої твердості і пластичності при відсутності крихкості, а також стійкості механічних властивостей проти дії високих температур та тисків в умовах роботи на знос є запорукою зносостійкості матеріалу, то перевага по твердості в усьому діапазоні температур оцінюється позитивно. Температура топлення була визначена для всіх досліджуваних стопів з метою виключення з розгляду таких, що топляться нижче 1300°C і становить більше 1320°C. Кобальтові порошкові стопи з карбідом титану в межах від 30 до 70% (об.) переважають за жаростійкістю стопи з карбідом ніобію, щонайменше, в 5 разів. Обґрунтувати одержані результати можна перевагами карбіду титану над карбідом ніобію [12, 13], базуючись на відомостях щодо стійкості проти окиснення карбідів металів IV(A)–VI(A) підгруп. В таблиці 8 представлено температури початку активного окиснення карбідів.

Відомо, що найбільш високим опором окисненню характеризується карбід хрому Cr_3C_2 ; трохи уступає йому карбід титану. Однак в карбіді титану, на відміну від інших карбідів, в області високих температур утворюється фаза TiO_2 за рахунок переважної дифузії катіонів Титану між вузлами ґратниці. Це уповільнює розчинність кисню в карбіді титану і підвищує його стійкість проти окиснення порівняно з іншими карбідами. Крім того, карбід титану в 2–3 рази

ТАБЛИЦЯ 8. Властивості карбідів.**TABLE 8.** Properties of the carbides.

Карбід	Температура початку активного окиснення, °С	Твердість, кгс/мм ²	T_{melt} , °С
TiC	1200	2900	3067
ZrC	1100	2600	3420
HfC	900	2700	3828
VC	800	2900	2648
NbC	600	2400	3600
TaC	650	2500	3983
Cr ₃ C ₂	1300–1400	970	1500
Mo ₂ C	900	1500	2400
WC	800	2100	2776

перевищує карбіди хрому за твердістю, в 1,5–2 рази за температурою топлення та в 2 рази перевищує карбід ніобію за стійкістю до окиснення. Тому кобальтові стопи з карбідом титану виявилися більш перспективними для подальших досліджень їх стійкості щодо зношування в умовах фретинг-корозії.

Стопи, одержані методом гарячого пресування, представляють собою кобальтову основу, леговану Al, Cr і Fe та зміцнену карбідами титану. Інших фаз не виявлено, а розмір складових не перевищує 20 мкм. В умовах, максимально наближених до експлуатаційних, підвищення навантаження та температури випробувань спричиняє зростання зношування стопів, незалежно від вмісту карбіду. Зносостійкість стопів зростає при збільшенні вмісту карбіду від 30 до 50% (об.) та при підвищенні щільності порошкових стопів. Карбіди приймають основну частину зовнішньої дії, далі напруги цих часток передаються в металеву складову, де проходить їх релаксація. Низька пористість матеріялу наряду з рівномірним розподілом карбіду титану і, при цьому, значний його вміст, уможливили одержати підвищені характеристики зносостійкості та прийнятну жаростійкість. За попередніми даними, зносостійкість порошкового стопу в 5–7 разів перевищує зносостійкість серійних ливарних стопів.

5. ВИСНОВКИ

1. Твердість в діяпазоні температур 20–1150°C порошкових стопів на основі кобальту з карбідами ніобію і титану залежить від вмісту

карбіду і зростає при його збільшенні від 30 до 50% (об.). З підвищенням температури твердість досліджених матеріалів, як правило, зменшується. Найбільша інтенсивність втрати твердості характерна для матеріалів з 30% (об.) карбідів. Стопи на основі кобальту з карбідом титану перевищують за твердістю стопи з карбідом ніобію у всьому діапазоні температур.

2. Температура топлення досліджених порошкових стопів перевищує 1320°C, що на 50 градусів вище за температуру технологічних операцій та не залежить від вмісту карбіду.

3. Кобальтові порошкові стопи з карбідом титану в межах від 30 до 70% (об.) переважають за жаростійкістю стопи з карбідом ніобію і знаходяться на рівні жароміцного лопаткового стопу ЖС-32.

4. В умовах, наближених до експлуатаційних, підвищення навантаження та температури випробувань спричиняє зростання зношування стопів незалежно від вмісту карбідної складової. Зносостійкість стопів зростає при збільшенні вмісту карбіду від 30 до 50% (об.).

5. Суттєвим фактором, що впливає на жаростійкість та зносостійкість порошкових стопів кобальту з карбідами, є пористість: з її збільшенням властивості погіршуються, незалежно від типу та вмісту карбіду.

6. Стоп на основі кобальту з вмістом карбіду титану біля 50% об., що має найліпші властивості, запропоновано для подальших промислових випробувань в якості матеріялу для зміцнення бандажних полиць робочих лопаток газотурбінних двигунів.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Г. Н. Третьяченко, С. В. Кравчук, Р. И. Курият, А. П. Волощенко, *Несущая способность лопаток газовых турбин при нестационарном тепловом и силовом воздействии* (Київ: Наукова думка: 1975).
2. Г. И. Пейчев, В. Е. Замковой, Н. В. Ахрамеев, *Технологические системы*, № 2: 5 (2000).
3. Г. П. Дмитриева, Т. С. Черепова, Т. А. Косорукова, В. И. Ничипоренко, *Металлофиз. новейшие технол.*, 37, № 7: 973 (2015).
4. Т. С. Черепова, Г. П. Дмитриева, А. В. Носенко, О. М. Семирга, *Наука та інновації*, 10, № 4: 22 (2014).
5. В. А. Леонтьев, С. Д. Заличихис, Э. В. Кондратюк, В. Е. Замковой, *Вестник двигателестроения*, № 4: 99 (2006).
6. Г. И. Пейчев, В. Е. Замковой, Н. В. Андрейченко, *Авиационно-космическая техника и технология*, № 8: 11 (2007).
7. Г. И. Пейчев, В. Е. Замковой, Н. В. Андрейченко, *Авиационно-космическая техника и технология*, № 9: 102 (2010).
8. Т. С. Черепова, Г. П. Дмитриева, *Порошковая металлургия*, № 1–2: 58 (2016).
9. М. М. Алексюк, В. А. Борисенко, В. П. Кращенко, *Механические испытания при высоких температурах* (Київ: Наукова думка: 1980).
10. *Расчёты и испытания на прочность. Метод определения высокотемпературной твёрдости вдавливанием пирамидального и бицилиндрического ин-*

дентора. ДСТУ 2434-94.

11. О. І. Духота, О. В. Тісов, *Проблеми тертя та зношування*, № 53: 195 (2010).
12. Р. Ф. Войтович, *Окисление карбидов и нитридов* (Київ: Наукова думка: 1981).
13. *Энциклопедия неорганических материалов* (Київ: Высшая школа: 1977).
14. Т. С. Черепова, Г. П. Дмитрієва, Н. В. Андрійченко, *Сплав на основі кобальту*: Патент України № 92883 (Опубл. 10 грудня 2010 р.).

REFERENCES

1. G. N. Tret'yachenko, S. V. Kravchuk, R. I. Kuriat, and A. P. Voloshchenko, *Nesushchaya Sposobnost' Lopatok Gazovykh Turbin pri Nestatsionarnom Teplovom i Silovom Vozdeystvii* [The Bearing Capacity of Gas Turbine Blades in Nonstationary Thermal and Force Action] (Kiev: Naukova Dumka: 1975) (in Russian).
2. G. I. Peychev, V. E. Zamkovoy, and N. V. Akhrameev, *Tekhnologicheskie Sistemy*, No. 2: 5 (2000) (in Russian).
3. G. P. Dmitrieva, T. S. Cherepova, T. O. Kosorukova, and V. I. Nichiporenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **37**, No. 7: 973 (2015) (in Russian).
4. T. S. Cherepova, G. P. Dmytrieva, A. V. Nosenko, and O. M. Semyrha, *Nauka ta Innovatsiyi*, **10**, No. 4: 22 (2014) (in Ukrainian).
5. V. A. Leont'ev, S. D. Zalichikhis, E. V. Kondratyuk, and V. E. Zamkovoy, *Vestnik Dvigatelistroyeniya*, No. 4: 99 (2006) (in Russian).
6. G. I. Peychev, V. E. Zamkovoy, and N. V. Andreychenko, *Aviatsionno-Kosmicheskaya Tekhnika i Tekhnologiya*, No. 8: 11 (2007) (in Russian).
7. G. I. Peychev, V. E. Zamkovoy, and N. V. Andreychenko, *Aviatsionno-Kosmicheskaya Tekhnika i Tekhnologiya*, No. 9: 102 (2010) (in Russian).
8. T. S. Cherepova and G. P. Dmitrieva, *Poroshkovaya Metallurgiya*, Nos. 1–2: 58 (2016) (in Russian).
9. M. M. Aleksyuk, V. A. Borisenko, and V. P. Krashchenko, *Mekhanicheskie Ispytaniya pri Vysokikh Temperaturakh* [Mechanical Tests at High Temperatures] (Kiev: Naukova Dumka: 1980) (in Russian).
10. *Raschety i Ispytaniya na Prochnost'. Metod Opredeleniya Vysokotemperaturnoy Tverdosti Vdavlivaniem Piramidal'nogo i Bitsilindricheskogo Indentora* [Calculations and Tests of Strength. Method for Determination of the High-Temperature Hardness by Indentation of Pyramidal and Bicylindrical Indenters]. DSTU 2434-94 (in Russian).
11. O. I. Dukhota and O. V. Tisov, *Problemy Tertya ta Znoshuvannya*, No. 53: 195 (2010) (in Ukrainian).
12. R. F. Voytovich, *Okislenie Karbidov i Nitridov* [Oxidation of Carbides and Nitrides] (Kiev: Naukova Dumka: 1981) (in Russian).
13. *Entsiklopediya Neorganicheskikh Materialov* (Kiev: Vysshaya Shkola: 1977) (in Russian).
14. T. S. Cherepova, G. P. Dmytrieva, and N. V. Andriychenko, *Splav na Osnovi Kobal'tu* [An Alloy Based on Cobalt]: Ukrainian Patent No. 92883 (Publ. December 10, 2010) (in Ukrainian).