

УДК 621.791.923.6

Костін О. М.<sup>1</sup>, Мартиненко В. О.<sup>1</sup>, Квасницький В. В.<sup>2</sup>, Шкурат С. І.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Національний університет кораблебудування, Україна. м. Николаїв

<sup>2</sup> Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». Україна, м. Київ

## СТВОРЕННЯ НОВИХ ЖАРОМІЦНИХ ЗНОСОСТІЙКИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ КМХ ТА КМХС

*Розроблено нові жароміцні зносостійкі композиційні матеріали КМХ та КМХС. Основою сплавів є твердий розчин на основі кобальту легований молибденом, хромом, бором та кремнієм. Сплав КМХС додатково легований карбідом хрому. Додаткове введення карбіду хрому забезпечує зменшення температури плавлення сплаву КМХС та сприяє стабілізації його структури за робочих температур. Розроблені нові композиційні сплави КМХ та КМХС демонструють високу зносостійкість наплавлених шарів за критичних умов нагріву, яка значно перевищує показники відомих промислових сплавів.*

*Ключевые слова:* адгезійно-активні зносостійкі композиційні матеріали; жароміцні сплави; структура; зносостійке наплавлення.

### Вступ

В теперішній час на підприємствах судового газотурбобудування гостро стоїть проблема вибору матеріалу та технологій його нанесення на бандажні полиці робочих лопаток турбін наплавленням, без порушення властивостей основного металу.

На вітчизняних підприємствах, в якості основного металу для виготовлення турбінних робочих

лопаток використовують жаростійкі жароміцні дисперсійнотвердіючі нікелеві сплави типу ЧС88У-ВІ, ЧС70У-ВІ та ін. Ці сплави в якості фази, що зміцнює, містять дисперсні виділення  $\gamma'$ -фази  $Ni_3(Al, Ti)$ , яка має схильність до коагуляції в процесі контактної взаємодії при робочих температурах, що створює сприятливі умови для збільшення інтенсивності зношування, в тому числі і за рахунок інтенсифікації процесів окиснення поверхневого шару, що

супроводжується вигоранням легуючих елементів. Ці сплави практично не зварюються плавленням, тому температура їх нагріву при наплавленні на контактні поверхні, не повинна перевищувати  $1220 \pm 10$  °С [1], інакше не вдається уникнути падіння міцності основного металу, що відбувається за рахунок деградації  $\gamma'$ -фази, та утворення тріщин в перехідній зоні. Тому, сплави, що наплавляються, повинні мати температуру плавлення бажано не вище  $1220 \pm 10$  °С. В іншому випадку, нанесення матеріалів, що зміцнюють, виконують, переважно, за допомогою паяння, але це не завжди технологічно можливо.

### Постановка задачі

Метою роботи було розроблення нових зносостійких жароміцних матеріалів з температурою плавлення меншою за 1220 °С, що забезпечують високий рівень зносостійкості наплавлених шарів за робочих температур та здатних витримувати тимчасові термічні навантаження до температури 1150 °С в середовищі, що окиснює.

### Основна частина

Існуючі зносостійкі жароміцні сплави, що використовуються в судовому газотурбобудуванні, зручно розподілити на дві групи за температурою плавлення: до та понад  $1220 \pm 10$  °С.

Складною проблемою є розробка сплавів, які відносяться до першої групи, мають необхідний рівень зносостійкості за робочих температур (до 900 °С) та витримують тимчасове термічне навантаження до температури 1150 °С, що близька до температури розчинення  $\gamma'$ -фази в основному металі.

До сплавів першої групи відноситься композиція КБНХЛ-2 [2], що має нікель-кобальтову матрицю та містить нікель (35,5–36,5 мас. %), кобальт (20,5–21,5 мас. %), хром (24,5–25,5 мас. %), карбід хрому (11,5–12,5 мас. %), борид хрому (2,5–3,5 мас. %) та бор (2,9–3,1 мас. %). Відносно висока зносостійкість забезпечується завдяки зміцненню нікель-кобальної матриці карбідами та борідами хрому. Недоліком сплаву є його низька температура плавлення ( $\sim 1070$ – $1090$  °С).

Всі інші відомі сплави можна віднести до другої групи, що вкрай ускладнює їх використання при нанесенні на контактну поверхню наплавленням.

Відомий сплав на основі кобальту ВЗК-р [3], котрий містить хром (28,0–32,0 мас. %), вольфрам (7,0–11,0 мас. %), вуглець (1,6–2,0 мас. %) як основні легуючі елементи та додатково в невеликій кількості Si, Mn, Ni, B і Fe. Зміцнення сплаву відбувається за рахунок утворення карбідів вольфраму

та хрому. Температура стабільної експлуатації цього сплаву не перевищує 600 °С.

Широко відомий сплав на основі нікелю Х30Н50Ю5Т2, який містить хром (32,0–36,0 мас. %), алюміній (5,0–6,0 мас. %), титан (1,4–2,1 мас. %), вуглець (1,2–1,6 мас. %) як основні легуючі елементи та додатково в невеликій кількості В та Fe. Відносно висока зносостійкість забезпечується інтерметалідами  $Ni_3(Al, Ti)$  та комплексними карбідами хрому і титану. Але, такий механізм зміцнення в умовах контактного навантаження в середовищі, що окиснює, недостатньо ефективний і сприяє пришвидшеному зношуванню сплаву, що є його суттєвим недоліком.

Відомий сплав на кобальтовій основі ХТН-61 [4], який містить хром (19,0–21,0 мас. %), ніобій (15,0–16,0 мас. %), вольфрам (2,7–3,3 мас. %), молібден (1,8–2,2 мас. %), алюміній (0,8–1,2 мас. %), вуглець (1,95–2,30 мас. %). Його зміцнення відбувається дисперсними виділеннями монокарбиду ніобію. Сплав має високу зносостійкість, показники якої перевищують зносостійкість сплавів на основі нікелю. До недоліків сплаву відносять його низьку жаростійкість та втрату властивостей при плавленні (температура плавлення  $1340 \pm 10$  °С). Його нанесення на контактні поверхні виконують виключно паянням.

В основу розробки нових зносостійких жароміцних композиційних матеріалів поставлена задача забезпечення необхідного рівня їх зносостійкості за робочих температур (до 900 °С), здатності витримувати тимчасові термічні навантаження до температури 1150 °С в середовищі, що окиснює, та можливості нанесення в рідкому стані на контактні поверхні за температур їх нагріву не вище  $1220 \pm 10$  °С.

Спільно з ДП НВКГ «Зоря-Машпроект» розроблені нові зносостійкі жароміцні композиційні матеріали КМХ та КМХС, які відповідають наведеним вимогам [5, 6].

Ідеологія побудови матеріалів базується на використанні в якості матриці сплавів твердого розчину на основі кобальту, що легований молібденом та хромом, який добре витримує контактні та термічні навантаження до температур 1000 °С включно, з додатковим введенням бору та кремнію, які зменшують температуру плавлення та одночасно надають сплавам деякі самофлюсуючі властивості, що забезпечує підвищення адгезійної активності сплавів до необхідного рівня під час їх нанесення на контактні поверхні в рідкому стані. Крім того, після кристалізації бор та кремній беруть участь у формуванні високодисперсної фази, що зміцнює, яка складається з комплексних силіцидів та боридів. Це надає сплавам потрібний рівень зносостійкості. Введення карбиду хрому в сплав КМХС дещо зменшує температуру його плавлення, порівняно із

сплавом КМХ, та стабілізує його структуру і властивості.

Хімічний склад сплавів КМХ та КМХС наведений в таблиці 1. Характерна мікроструктура сплавів після вакуумно-індукційного плавлення та відпалу при 1100 °С на протязі однієї години представлена на рисунку 1.

Температуру плавлення сплавів визначали методом високотемпературного диференційного термічного аналізу. Температура солідус сплаву КМХ дорівнює 1185 °С, а сплаву КМХС – 1165 °С.

Порівняльні випробування зносостійкості промислових сплавів та нових композиційних матеріалів КМХ і КМХС здійснювали в умовах високотемпературного фретингу за наступних умов: статичне контактне навантаження – 50 МПа;

амплітуда відносного переміщення зразків – 0,169 мм; частота коливань – 2500 хв<sup>-1</sup>; час випробувань – 2 години; температура в області контакту зразків – ~1150 °С.

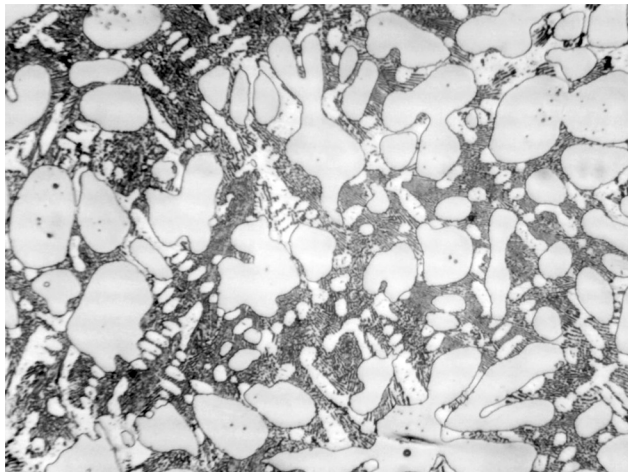
Оцінку зносостійкості дослідних зразків виконували за інтенсивністю зношування:  $Jv = V/N$ , де  $Jv$  – об’ємна інтенсивність зношування, мм<sup>3</sup>/цикл;  $V$  – об’єм матеріалу, що зношується, мм<sup>3</sup>;  $N$  – кількість циклів навантаження (відповідає частоті коливань зразків).

Аналіз результатів випробувань (таблиця 2) показав, що зносостійкість сплавів КМХ та КМХС за критичних умов нагріву значно перевищує показники відомих промислових сплавів КБНХЛ-2, ВЗК-р та Х30Н50Ю5Т2, що дозволило його рекомендувати до промислового застосування (особливо в умовах ремонту судових газотурбінних двигунів).

Таблиця 1

Хімічний склад сплавів КМХ та КМХС [5, 6]

Марка сплаву	Хімічний склад, % мас.						
	Со	Cr	Mo	Si	В	Ni	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>
КМХ	решта	17–18	27–28	2,8–3,2	0,8–1,2	–	–
КМХС	решта	17–18	27–28	2,8–3,2	0,8–1,2	2,8–3,2	1,9–2,1



а)



б)

Рис. 1. Мікроструктура сплавів КМХ (а) та КМХС (б), × 600

Таблиця 2

Результати випробувань зносостійкості досліджуваних матеріалів

Матеріал, що випробовується	Х30Н50Ю5Т2	ВЗК-р	КБНХЛ-2	КМХ	КМХС
$\frac{\text{min-max}}{\text{середня}}$	$\frac{7,718-14,408}{10,126}$	зруйнувався	зруйнувався	$\frac{1,817-3,750}{2,761}$	$\frac{1,548-2,894}{2,372}$
інтенсивність зношування, $Jv$ , мм <sup>3</sup> /цикл	(на базі випробувань 40 хвилин)			(на базі випробувань 2 години)	(на базі випробувань 2 години)

**Висновки**

1. В умовах нагріву до критичних температур (~1150 °С) в середовищі продуктів згоряння палива типу гас та контактного навантаження промислові сплави ВЗК-р, КБНХЛ-2 та Х30Н50Ю5Т2 руйнуються та не забезпечують необхідного рівня зносостійкості.

2. Нові зносостійкі матеріали КМХ та КМХС витримують короткочасні критичні температури нагріву до 1150 °С та демонструють належні показники зносостійкості, що задовольняють вимогам експлуатації та ремонту сучасних судових газотурбінних двигунів.

**Література**

[1] Костин А.М., Бутенко А.Ю., Квасницький В.В. Материалы для упрочнения лопаток газовых турбин. Автоматическая сварка, 2014, №6-7 (733) – С. 136 – 138.  
 [2] Алтухов, А.А. Применение жаростойкого материала КБНХЛ-2 для наплавки деталей газовых турбин /

А.А. Алтухов, О.В. Гаврилов // Информационно-технический журнал «Сварщик». – 2004. – № 2. – С. 22-23.

[3] Пейчев, Г.И. Сравнительные характеристики износостойких сплавов для упрочнения бандажных полок рабочих лопаток газотурбинных двигателей / Г.И. Пейчев, В.Е. Замковой, Н.В. Андрейченко // Вестник двигателестроения. – 2009. – № 2. – С. 123-125.  
 [4] Структура и свойства износостойкого сплава на основе кобальта с карбидом ниобия / Г.П. Дмитриева, Т.С. Черепова, Т.А. Косорукова, В.И. Нечипоренко // Металлофизика и новейшие технологии. ИМФ им. Г.В. Курдюмова НАН Украины, – 2015, т. 37, №7, С. 973-986.  
 [5] Зносостійкий жароміцний композиційний сплав на основі кобальту Патент на корисну модель № 107286, Бюл. №10, 25.05.2016 р. Костін О.М., Мартиненко В.О., Малий О.Б., Бутенко А.Ю.  
 [6] Жароміцний зносостійкий композиційний сплав на основі кобальту. Патент на корисну модель № 111213, Бюл. №21, 10.11.2016 р. Костін О.М., Малий О.Б., Бутенко А.Ю., Мартиненко В.О.

*Kostin O. M.<sup>1</sup>, Martynenko V. O.<sup>1</sup>, Kvasnytskyi V. V.<sup>2</sup>, Shkurat S. I.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Ukraine, Mykolaiv

<sup>2</sup> National Technical University of Ukraine «Kiev Polytechnic Institute». Ukraine, Kyiv

**THE CREATION OF NEW HIGH-TEMPERATURE WEAR-RESISTANT COMPOSITE MATERIALS KMX AND KMXC**

*The new high-temperature wear-resistant composite materials KMX and KMXC are created. The basis of the alloys is a solid solution based on cobalt alloyed of molybdenum, chromium, boron and silicon. The alloy KMXC additionally alloyed with chromium carbide. Additional input of chromium carbide decreases the melting point of the alloy KMXC and helps to stabilize its structure at operating temperatures. The new composite alloys KMX and KMXC at the critical conditions of heating demonstrate a high wear-resistant levels of deposited layers, which is much higher than the known industrial alloys.*

*Keywords:* adhesive-active wear-resistant composite materials; high temperature alloys; structure; wear-resistant surfacing.

**References**

[1] Kostin A.M., Butenko A.Iu., Kvasnytskyi V.V. Materialy dlia uprochneniia lopatok gazovih turbin. Avtomaticheskaia svarka, 2014, №6-7 (733) – S. 136 – 138.  
 [2] Altuhov, A.A. Primenenie zharostoykogo materiala KBNXL-2 dlia naplavki detaley gazovih turbin / A.A. Altuhov, O.V. Gavrilov // Informacionno-tehnicheskij zhurnal «Svarschik». – 2004. – № 2. – S. 22-23.  
 [3] Peychev, G.I. Cravnitelnie harakteristiki iznosostoykih splavov dlia uprochneniia bandazhnih polok rabochih lopatok gazoturbinnih dvigateley / G.I. Peychev, V.E. Zamkovoy, N.V. Andreychenko // Vestnik dvigatelestroeniia. – 2009. – № 2. – S. 123-125.

- [4] Ctruktura i svoystva iznosostoykogo splava na osnove kobalta s karbidom niobiia / G.P. Dmitrieva, T.S. Cherepova, T.A. Kosorukova, V.I. Nechiporenko // Metallophisika I noveyshie tehnologii. IMPh im. G.V. Kurdiumova NAN Ukrainy, -2015, t. 37, №7, S. 973-986.
- [5] Znosostiykiy zharomicniy kompozitsiyniy splav na osnove kobaltu. Patent na korysnu model № 107286, Bul. №10, 25.05.2016 r. Kostin O.M., Martynenko V.O., Malyyi O.B., Butenko A.Iu.
- [6] Zharomicniy znosostiykiy kompozitsiyniy splav na osnove kobaltu. Patent na korysnu model № 111213, Bul. №21, 10.11.2016 r. Kostin O.M., Malyyi O.B., Butenko A.Iu., Martynenko V.O.