

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕРМОБАР'ЄРНОГО ПОКРИТТЯ ТИПУ $\text{CoCrAlY/ZrO}_2\text{-}8\% \text{Y}_2\text{O}_3$ ШЛЯХОМ ЛЕГУВАННЯ АЛЮМІНІЄМ ПОВЕРХНІ МЕТАЛЕВОГО ШАРУ

К.Ю. Яковчук¹, Г.П. Мьяльниця², А.В. Микитчик¹, Ю.Е. Рудой¹, Р.О. Ткач¹

¹Державне підприємство «Міжнародний центр електронно-променевих технологій ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України». 03150, м. Київ, вул. Антоновича, 68. E-mail: office@paton.kiev.ua
²Державне підприємство «Науково-виробничий комплекс газотурбобудування «Зоря»–«Машпроект». 54018, м. Миколаїв, пр. Богоявленський, 42-а. E-mail: presz@zorya.com.ua

Вивчено дифузійні процеси, що відбуваються при насиченні алюмінієм конденсаційного шару CoCrAlY під час відпалу у вакуумі з нанесеної на його поверхню шлікерної суспензії, та їх вплив на структуру, хімічний склад та властивості термобар'єрних покриттів $\text{CoCrAlY/ZrO}_2\text{-}8\% \text{Y}_2\text{O}_3$, отриманих способом електронно-променевого випаровування на зразках нікелевих жароміцних сплавів. Показано, що сформований на поверхні сплаву CoCrAlY дифузійний шар, збагачений алюмінієм, має неоднорідну товщину та містить дві мікроструктурні зони з різним вмістом алюмінію (зовнішню — до 31 % та внутрішню — до 19 %). Встановлено, що під час термічної обробки в вакуумі відбувається дифузія кобальту та хрому в шар шлікера, в результаті чого його мікротвердість підвищується до рівня 9 ГПа, в ньому утворюються мікротріщини, що поширюються в шар CoCrAlY . Встановлено параметри низькотемпературної термічної обробки, при якій забезпечується формування бездефектної дифузійної зони в CoCrAlY . Отримано результати, що дозволили оптимізувати технологію термодифузійного насичення алюмінієм шару CoCrAlY із шлікера для покриттів $\text{CoCrAlY/ZrO}_2\text{-}8\% \text{Y}_2\text{O}_3$ з метою підвищення температури експлуатації робочих лопаток, виготовлених із сплавів СМ-88У та СМ-93. Бібліогр. 9, табл. 6, рис. 7.

Ключові слова: електронно-променеве випаровування; конденсація у вакуумі; термобар'єрні покриття; нікелевий жароміцний сплав; сполучний шар CoCrAlY ; термодифузійне насичення; алюміній; шлікер; термічно вироблений оксид Al_2O_3 (TGO); керамічний шар $\text{ZrO}_2\text{-}8\% \text{Y}_2\text{O}_3$; дифузія елементів

Вступ. Сплави типу MCrAlY (M—Ni, Co або їх комбінація) використовують у вигляді покриттів або сполучного шару в термобар'єрних покриттях $\text{MCrAlY/ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ для захисту лопаток сучасних газотурбінних двигунів (ГТД), виготовлених із жароміцних сплавів (ЖС), від високотемпературного окислення та корозії. Вміст алюмінію в них зазвичай становить 8...12 % (тут і далі мас. %) і забезпечує формування поверхні шару окалини на основі Al_2O_3 (TGO — thermally grown oxide) за високої температури у процесі експлуатації [1, 2].

Поліпшення ефективності роботи ГТД супроводжується зростанням робочої температури, внаслідок чого виникає потреба підвищення опору окисленню (жаростійкості) металу MCrAlY . Одним із можливих напрямів такого підвищення є насичення алюмінієм поверхні металевого шару зі сплаву MCrAlY різними методами [2–6]. Серед цих методів найбільш простим та економічно ефективним є насичення алюмінієм з обмазок чи шлікерів шляхом попереднього нанесення на поверхню металевого шару присадкового матеріалу у вигляді суспензії, що містить необхідні легуючі елементи, та подальшої термічної обробки [7, 8].

Мета цього дослідження — оптимізація параметрів процесу термодифузійного насичення алюмінієм поверхні конденсаційного шару CoCrAlY зі шлікера з подальшою термообробкою та нанесенням керамічного шару $\text{ZrO}_2\text{-}8\% \text{Y}_2\text{O}_3$ методом електронно-променевого випаровування та конденсації у вакуумі.

Матеріали і методика досліджень. Нанесення термобар'єрних покриттів $\text{CoCrAlY/ZrO}_2\text{-}8\% \text{Y}_2\text{O}_3$ проводилося методом електронно-променевого випаровування та конденсації у вакуумі на зразки (сегменти пера робочих лопаток, виготовлених з нікелевих жароміцних сплавів типу СМ-88У та СМ-93) за серійною багатостадійною технологією, що використовується на ДП «Науково-виробничий комплекс газотурбобудування «Зоря»–«Машпроект».

На першій стадії нанесення покриття на лопатки осаджували шар CoCrAlY (склад зливків для випаровування у відповідності до ТУ У 27.4-20113410.002–2001), після чого лопатки піддавали вакуумній термічній обробці (ТО).

На другій стадії на поверхню шару CoCrAlY наносили шар шлікера методом розпилення рід-

К.Ю. Яковчук — <https://orcid.org/0000-0001-8446-1645>, А.В. Микитчик — <https://orcid.org/0000-0002-9761-9429>, Ю.Е. Рудой — <https://orcid.org/0000-0002-7265-1879>, Р.О. Ткач — <https://orcid.org/0000-0002-6085-8901>

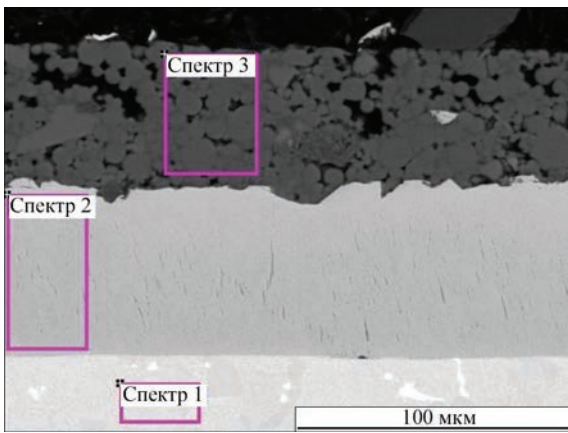


Рис. 1. Мікроструктура та склад шару CoCrAlY зі шлікером ПМС-Ю на поверхні після термофіксації

кої суспензії складу ПМС-Ю (аналог суспензії Sermetel W), потім проводили термофіксацію нанесеного шлікера шляхом сушіння при 350 °C.

На третій стадії проводили вакуумну ТО для насичення поверхні шару CoCrAlY алюмінієм.

На четвертій стадії проводили повітряно-абразивну обробку (ПАО) частинками абразиву з оксиду алюмінію для видалення залишків шлікера і на поверхню пера лопаток осаджували зовнішній керамічний шар ZrO₂-8 % Y₂O₃ (8YSZ).

Частину лопаток після другої стадії було передано до ДП «МЦ ЕЛТ ІЕЗ ім. Е.О. Патона НАНУ» для подальших досліджень та нанесення зовнішнього керамічного шару.

Товщину окремих шарів покриття визначали оптичним мікроскопом PolivarMet. Дослідження мікроструктури та визначення мікротвердості покриттів проводили на зразках у вихідному стані (стан постачання) та після термічної обробки.

Структуру шарів покриття вивчали за допомогою растрового мікроскопа Carl Zeiss Sigma 300. Хімічний склад визначали за допомогою мікrorентгеноспектральної енергодисперсійної приставки XMAX 50 до електронного мікроскопа.

Вимірювання мікротвердості проводили на шліфах поперечного перерізу покриттів за допомогою приставки Micro-Duomat 4000 E до оптичного мікроскопа Polyvar-Met стандартним інденатором Віккерса при навантаженні 200 Н та часом витримки 10 с.

Термоциклічну довговічність покриттів CoCrAlY/8YSZ на сегментах пера лопаток до-

сліджували методом пічних випробувань на повітрі за режимом: нагрівання до 1100 °C протягом 6 хв, витримка за цієї температури — 50 хв, охолодження вентилятором до температури близько 60...80 °C — 4 хв. Через кожні 20 циклів випробувань проводили огляд сегментів. За руйнування покриття приймали відшарування зовнішнього керамічного шару з 20 % поверхні сегмента пера.

Результати досліджень та їх обговорення. На рис. 1 і в табл. 1 наведено мікроструктуру та хімічний склад шару CoCrAlY з шаром шлікера ПМС-Ю після термофіксації (після стадії 2).

Шар CoCrAlY містить близько 22 % Cr та 11 % Al та низький вміст ітрію (0,1 %), який виявляється лише в окремих ділянках шару.

Шар шлікера на основі алюмінію має порувану мікроструктуру, що містить переважно сфероподібні частинки діаметром 4...15 мкм.

Товщина шару CoCrAlY складає 55...65 мкм, мікротвердість на рівні 5,8 ГПа, товщина шару нанесеного шлікера коливається в інтервалі 30...50 мкм, його мікротвердість не перевищує 0,7 ГПа.

Подальша високотемпературна ТО у вакуумі в інтервалі температур 950...1100 °C протягом 0,5...1,0 год призводить до формування на поверхні сплаву CoCrAlY дифузійного шару, насиченого алюмінієм (рис. 2, табл. 2). При цьому цей сформований дифузійний шар має неоднорідну товщину (20...40 мкм) і містить дві зони з характерною мікроструктурою та різним вмістом алюмінію. Зовнішня зона має зеренну структуру, розмір глобулярних частинок інтерметалідів складу Co-(26...31) % Al-(9...14) % Cr складає 25...35 мкм, при цьому в ній спостерігаються численні мікротріщини та пори, мікротвердість досягає 8,0...8,2 ГПа, внутрішня зона містить 15...19 % алюмінію, мікротвердість складає близько 6 ГПа.

Зі збільшенням тривалості ТО у вакуумі при 1100 °C до 4 год загальна товщина цього дифузійного шару зростає на 15...20 мкм (рис. 2, а-к). Вміст алюмінію у зовнішній зоні знижується з 31 до 25 %, при цьому глобулярні частинки інтерметалідів CoAlCr суттєво не змінюють свій склад та розміри. Внутрішня зона поряд зі збільшенням товщини на 10...15 мкм насичується алюмінієм за рахунок його дифузії зі шлікера та зовнішньої

Таблиця 1. Хімічний склад шару CoCrAlY зі шлікером ПМС-Ю на поверхні після термофіксації, мас. %

Спектр	O	Mg	Al	Si	P	Ti	Cr	Co	Ni	Y	Mo	W	Re
1	—	—	2,6	1,0	—	4,7	14,1	7,8	63,0	—	1,0	3,6	2,5
2	—	—	11,1	—	—	—	22,0	66,9	—	0,1	—	—	—
3	14,0	1,6	71,5	4,0	6,1	—	2,8	—	—	—	—	—	—

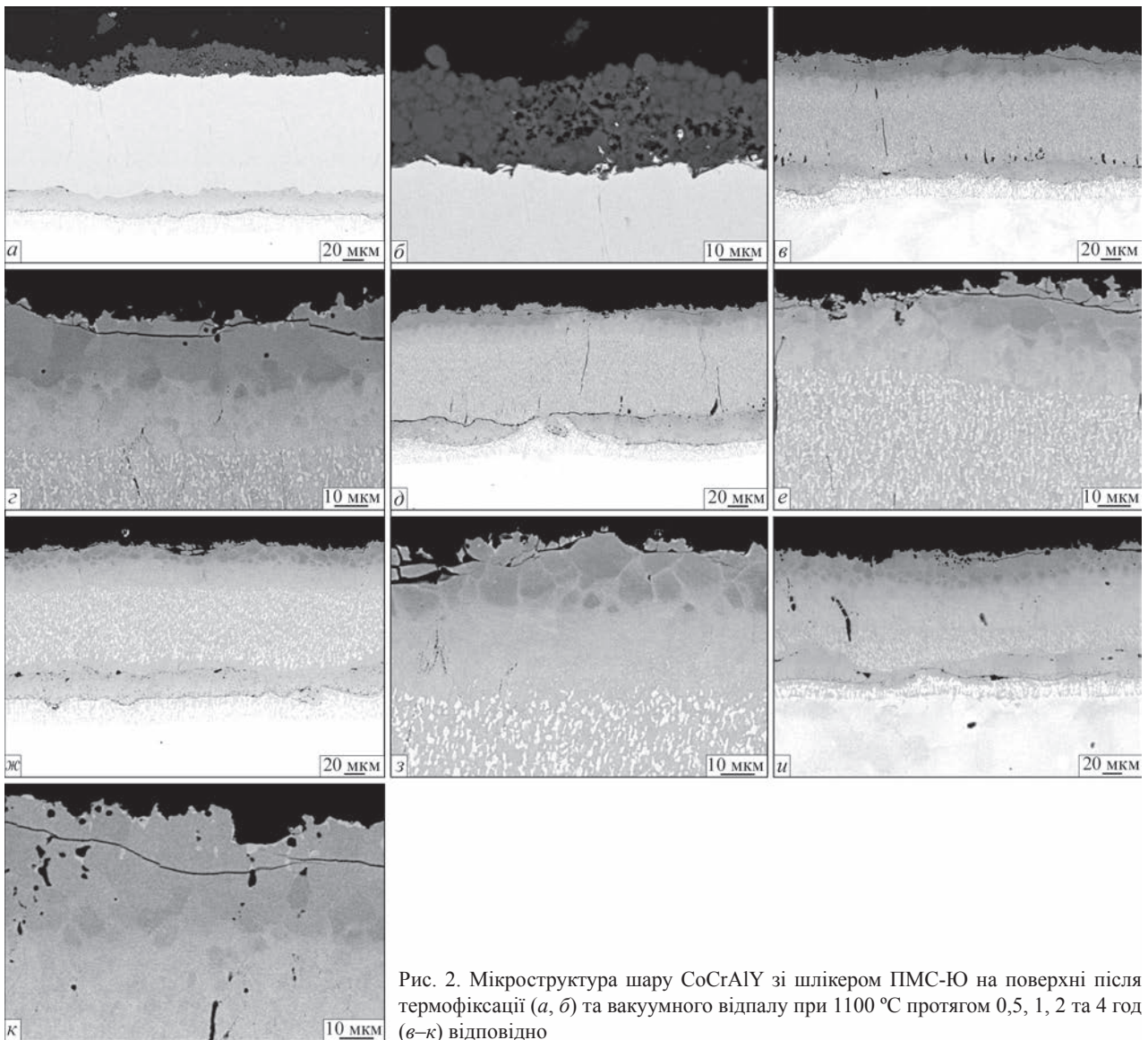


Рис. 2. Мікроструктура шару CoCrAlY зі шлікером ПМС-Ю на поверхні після термофіксації (а, б) та вакуумного відпалу при 1100 °С протягом 0,5, 1, 2 та 4 год (в–к) відповідно

зони, його вміст зростає з 14,7 до 17,5 %. При цьому також спостерігається зниження загального вмісту алюмінію в об'ємі шару CoCrAlY (з 11 до 10 %), що може пояснюватися його дифузиею в жароміцний сплав.

Зниження температури ТО у вакуумі до 950 °С не вплинуло на дефекти, що виникають. У зовнішній зоні шару CoCrAlY з'являються мікротріщини, які, як правило, розповсюджуються паралельно підкладці (рис. 3).

Найбільш ймовірною причиною появи мікротріщин може бути спікання шлікерної су-

спензії протягом процесу високотемпературної ТО, в результаті чого мікротвердість шару шлікера зростає до рівня 9 ГПа. Цьому також сприяють дифузія в шлікер кобальту (близько 41 %) та хрому (близько 8 %) із шару CoCrAlY (рис. 3, табл. 3). На границі контакту шлікера, який містить до 50 % алюмінію, і поверхні шару CoCrAlY, збагаченого алюмінієм до 30 %, в процесі охолодження після ТО виникають напруження, які призводять до розтріскування шлікера та розповсюдження тріщин у насичений алюмінієм металевий шар.

Таблиця 2. Склад (мас. %) та мікротвердість шару CoCrAlY (ГПа) в залежності від часу відпалу при 1100 °С

Зона шару CoCrAlY, насиченого Al	Вихідний		0,5 год		1 год		2 год		4 год	
	H_{μ}	Al	H_{μ}	Al	H_{μ}	Al	H_{μ}	Al	H_{μ}	Al
Зовнішня	–	–	8,8	31,2	8,2	31,0	7,6	28,2	6,5	25,5
Внутрішня	–	–	6,4	14,7	6,2	16,3	7,0	16,0	6,9	17,5
Шар	6,0	12,0	5,3	10,7	5,7	11,5	6,1	10,6	6,5	9,9

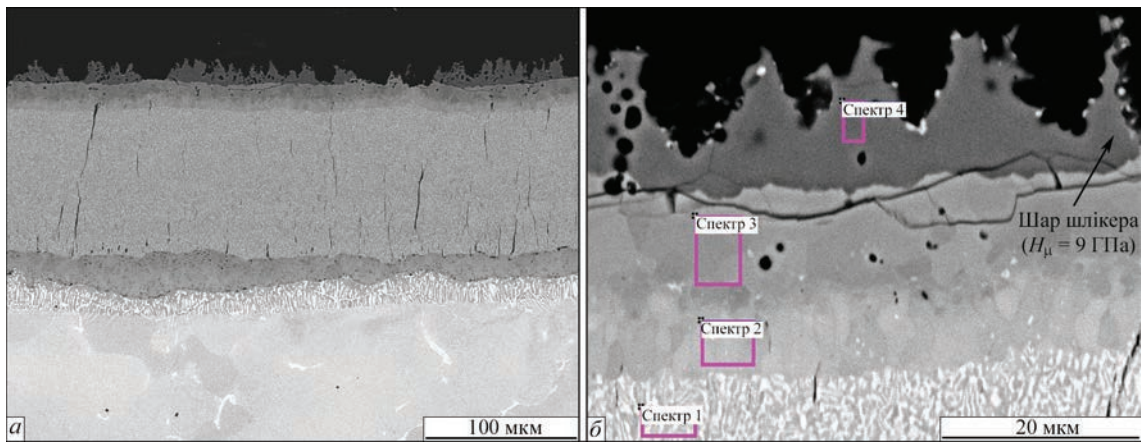


Рис. 3. Мікроструктура (а — $\times 300$; б — $\times 1800$) шару CoCrAlY після нанесення шлікера ($H_{\mu} = 9$ ГПа) та вакуумної ТО при 950°C , 1 год

Спроби прибрати дефектний поверхневий шар шляхом інтенсивної повітряно-абразивної обробки перед нанесенням зовнішнього керамічного шару також не досягли бажаного результату, на границі метал–кераміка спостерігалася поява мікротріщин (рис. 4).

Оскільки зменшити товщину шлікерної суспензії, що наноситься, не є можливим (її наносять шаром мінімально можливої товщини), то доцільно на стадії 3 процесу нанесення покриття знизити температуру ТО, для того, щоб сповільнити як дифузійні процеси насичення алюмінієм шару CoCrAlY, так і процес спікання шару шлікера. При цьому дифузійна взаємодія в системі шлікер–шар CoCrAlY відбувалася б лише в обмеженому об’ємі шлікера, який примикає до металевої поверхні. Це дозволило б знизити вміст алюмінію в дифузійному шарі, товщину цього шару і зменшити мікротвердість спеченого шлікера (попередити зародження мікротріщин у ньому). Після цього при проведенні подальшої ПАО частина шлікера, яка не прореагувала і залишилася, буде видалена з поверхні насиченої алюмінієм дифузійної зони в

шарі CoCrAlY, що попередить його подальше насичення алюмінієм.

З метою з’ясування можливості попередження появи подібних мікротріщин в насиченому алюмінієм шарі CoCrAlY виконані дослідження щодо впливу температури та часу термічної обробки після нанесення шлікера (стадія 3 — нанесення покриття).

Встановлена мінімальна температура ТО, при якій не відбувається утворення мікротріщин за час відпалу в інтервалі $0,5 \dots 8,0$ год (не вище $700 \dots 750^{\circ}\text{C}$).

На рис. 5 та в табл. 4 наведені мікроструктура та склад шару CoCrAlY з нанесеним шлікером після низькотемпературної ТО протягом 6 год. На поверхні шару CoCrAlY після ТО шар шлікера містить три зони: зовнішню — товщиною близько 30 мкм (шлікер, який не прореагував) з мікротвердістю на рівні 0,65 ГПа; середню — товщиною близько 20 мкм (спечений шлікер) із мікротвердістю на рівні 3,9 ГПа; дифузійну — товщиною близько 8 мкм (мікротвердість складає 6,7 ГПа), яка дотична до поверхні шару CoCrAlY (мікротвердість 6 ГПа).

Вміст алюмінію в дифузійній зоні досягає 42,5 %. При цьому утворення мікротріщин в шарі спеченого шлікера і в дифузійній зоні не виявлено.

Пониження температури вакуумної ТО дозволяє: забезпечити формування в CoCrAlY більш однорідної за товщиною насиченої алюмінієм

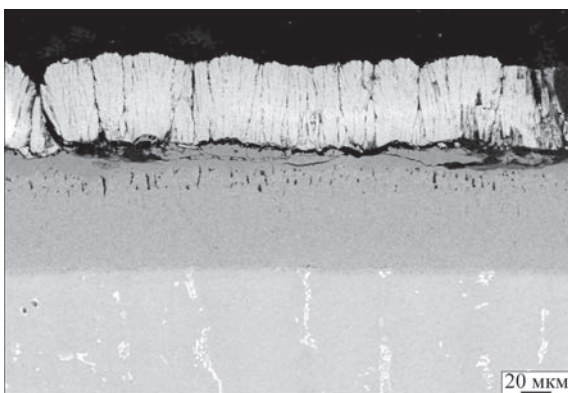


Рис. 4. Мікроструктура покриття CoCrAlY/8YSZ після стадій 1–4 нанесення покриття (ТО у вакуумі за температури 950°C протягом 1 год)

Таблиця 3. Склад шару CoCrAlY зі шлікером після вакуумної ТО при 950°C , 1 год

Спектр	Al	Cr	Co	Y
1	11,3	21,4	67,2	–
2	17,5	15,9	66,4	0,15
3	30,6	6,8	62,1	0,4
4	50,5	8,2	41,3	–

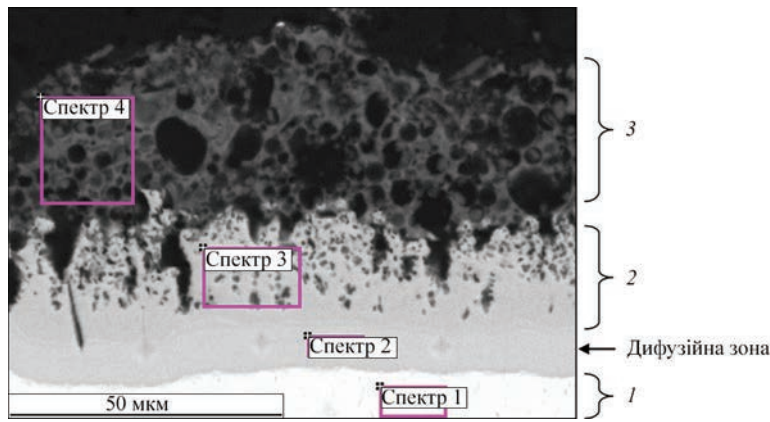


Рис. 5. Мікроструктура та склад шару CoCrAlY зі шлікером ПМС-Ю на поверхні після термофіксації та низькотемпературної ТО протягом 6 год: 1 — шар CoCrAlY; 2 — шар спеченого шлікера; 3 — шар шлікера, який не прореагував

Таблиця 4. Хімічний склад (мас. %) шару CoCrAlY зі шлікером ПМС-Ю на поверхні після термофіксації та низькотемпературної ТО протягом 6 год

Спектр	O	Na	Mg	Al	Si	P	Cl	Ca	Cr	Co	Y
1	–	–	–	10,9	–	–	–	–	23,0	66,1	–
2	–	–	–	42,6	2,6	–	–	–	14,4	40,5	0,1
3	2,4	–	–	48,8	2,8	–	–	–	12,1	33,9	–
4	39,1	2,1	4,4	37,7	3,5	7,4	0,4	0,4	4,1	0,8	–

дифузійної зони, за рахунок того, що алюміній поступає не зі всього об’єму неоднорідного за товщиною шлікерного шару, а тільки із зони шлікера, який безпосередньо контактує з поверхнею CoCrAlY; регулювати як товщину, так і вміст алюмінію в дифузійній зоні за рахунок зміни часу ТО.

При цьому важливе значення має підбір параметрів режиму ПАО, який забезпечує видалення

залишків шлікерної маси з поверхні дифузійного шару після ТО.

Після проведення стадії 4 (нанесення шару 8YSZ) товщина дифузійної зони збільшилася до 15 мкм, вміст Al склав близько 21 % та градієнтно знизився до рівня 12 % в шарі CoCrAlY, між шаром CoCrAlY та шаром 8YSZ був прошарок TGO товщиною близько 1 мкм (рис. 6, табл. 5).

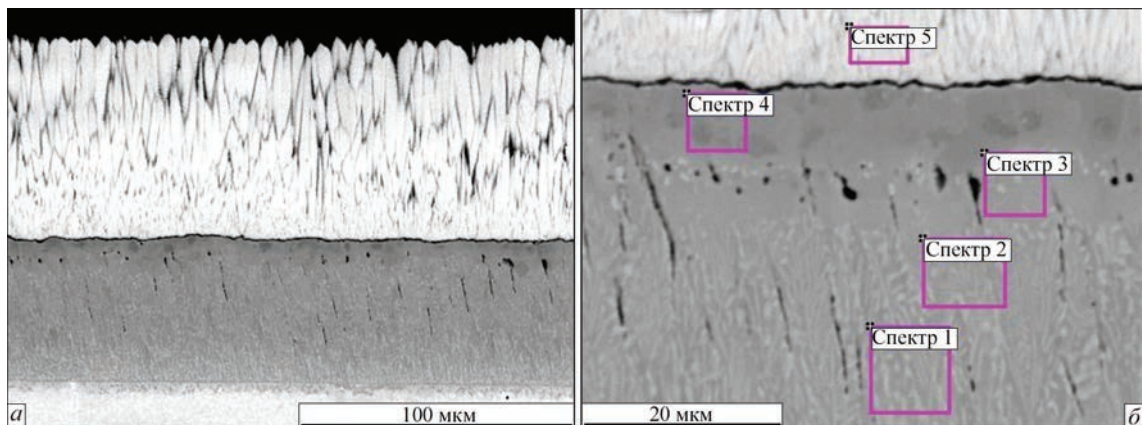


Рис. 6. Мікроструктура (а — $\times 500$; б — $\times 1800$) та склад покриття CoCrAlY/8YSZ із попередньо нанесеним шлікером ПМС-Ю після стадій 1–4 (варіант із низькотемпературною ТО)

Таблиця 5. Хімічний склад (мас. %) шару CoCrAlY/8YSZ із попередньо нанесеним шлікером ПМС-Ю після стадій 1–4 (варіант із низькотемпературною ТО)

Спектр	O	Al	Si	Cr	Co	Y	Zr	Hf
1	–	11,3	–	22,8	65,9	–	–	–
2	–	11,6	–	22,9	65,5	–	–	–
3	–	14,9	0,4	21,3	63,4	–	–	–
4	–	21,7	0,8	13,4	64,0	–	–	–
5	25,1	–	–	–	0,6	7,6	64,6	2,2

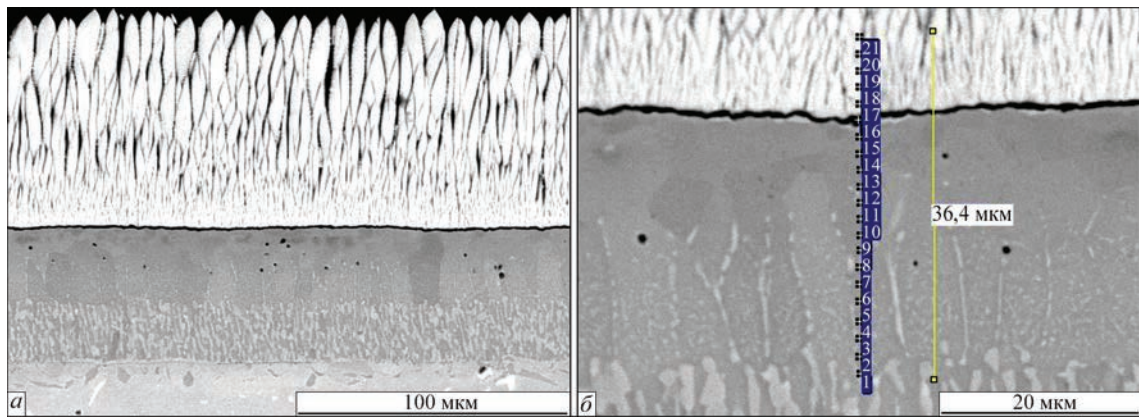


Рис. 7. Мікроструктура (а — $\times 500$; б — $\times 1800$) покриття CoCrAlY/8YSZ та розподіл хімічних елементів в насиченій алюмінієм дифузійній зоні з попередньо нанесеним шлікером ПМС-Ю після стадій 1–4 (варіант із низькотемпературною ТО)

Таблиця 6. Розподіл хімічних елементів (мас. %) в насиченій алюмінієм дифузійній зоні із попередньо нанесеним шлікером ПМС-Ю після стадій 1–4 (варіант із низькотемпературною ТО)

Спектр	O	Al	Ti	Cr	Co	Ni	Y	Zr	Hf
1	–	12,7	0,8	23,9	54,4	8,3	–	–	–
2	–	14,0	0,7	18,4	56,4	10,4	–	–	–
3	–	14,9	0,8	19,4	56,2	8,8	–	–	–
4	–	10,5	0,5	21,8	60,0	7,3	–	–	–
5	–	14,9	–»–	17,9	59,5	7,2	–	–	–
6	–	15,6	–»–	18,0	59,8	6,1	–	–	–
7	–	13,0	–»–	20,9	59,6	6,0	–	–	–
8	–	15,4	0,4	18,5	61,1	4,6	–	–	–
9	–	15,3	0,2	18,6	61,7	4,3	–	–	–
10	–	–»–	0,1	18,2	62,4	4,0	–	–	–
11	–	14,8	0,3	20,6	61,4	2,9	–	–	–
12	–	–»–	0,1	18,5	63,9	2,6	–	–	–
13	–	16,4	0,2	17,2	63,8	2,4	0,1	–	–
14	–	15,8	–	16,3	65,6	2,3	–	–	–
15	–	15,6	–	16,9	64,6	–»–	–	0,7	–
16	31,8	19,3	–	5,4	9,6	0,2	2,9	29,7	1,2
17	24,6	1,2	–	0,5	0,8	–	6,9	63,4	2,6
18	–»–	–	–	–	–	–	7,7	65,7	2,1
19	24,0	–	–	–	–	–	7,6	66,6	1,7
20	24,8	–	–	–	–	–	7,9	65,5	1,9
21	25,1	–	–	–	–	–	7,3	64,5	3,1

Змінюючи час та температуру ТО можна збільшити товщину дифузійної зони, насиченої алюмінієм до 40 мкм, та зменшити вміст алюмінію в ній до 15...16 % (рис. 7, табл. 6).

Виконані термоциклічні випробування сегментів пера лопаток із покриття CoCrAlY/8YSZ показали, що нанесення шлікера покращує довговічність на 25...30 % завдяки позитивному впливу дифузійної зони, насиченої алюмінієм, в умовах високотемпературних циклічних випробувань (збільшення жаростійкості та запобігання утворення шпінелей під час росту шару Al_2O_3) [9].

Розроблені рекомендації щодо вдосконалення технології термодифузійного насичення алюмінієм поверхні металевого шару покриттів

CoCrAlY/8YSZ (зниження температури вакуумної термічної обробки до 700...750 °C на стадії 3 та оптимізовані параметри для ПАО на стадії 4) передані кінцевому споживачу.

Висновки

1. Встановлено, що вакуумна термічна обробка шару CoCrAlY з нанесеним на поверхню шлікером, що містить алюміній, за температури в інтервалі 950...1100 °C забезпечує формування в ньому поверхневого дифузійного шару неоднорідної товщини (10...40 мкм), який містить дві мікроструктурні зони із різним вмістом алюмінію. Зовнішня зона містить глобулярні частинки розміром до 20 мкм із інтерметалідів зі складом 60 % Co–31 % Al–9 % Cr. В цій зоні спостерігаються численні мі-

кротріщини, мікротвердість досягає 8 ГПа. Внутрішня зона містить 15...19 % алюмінію.

2. Встановлено, що в результаті дифузії кобальту та хрому із шару CoCrAlY в шар шлікера (40 та 9 % відповідно) мікротвердість шару шлікера зростає до рівня 9 ГПа, в ньому утворюються численні мікротріщини, що переходять в шар CoCrAlY.

3. Визначено режим вакуумної низькотемпературної термічної обробки (не вище 700...750 °С), при якому забезпечується формування в CoCrAlY бездефектного поверхневого дифузійного шару товщиною близько 8 мкм із вмістом алюмінію приблизно 42 %, при цьому шлікер містить дві зони: зовнішню товщиною близько 30 мкм (шлікер, який не прореагував) та внутрішню товщиною близько 20 мкм (спечений шлікер, який містить приблизно 34 % Co та 12% Cr).

4. Виконані термоциклічні випробування сегментів пера лопаток з покриттям CoCrAlY/8YSZ, у яких товщина насиченої алюмінієм зі шлікера дифузійної зони складала 15 мкм, а вміст алюмінію — 21 %, показали, що нанесення шлікера підвищує довговічність на 25...30 % за рахунок підвищення жаростійкості металевого шару та здатність запобіганню утворення шпінелей під час росту шару Al₂O₃.

5. Розроблені рекомендації щодо вдосконалення технології термодифузійного насичення алюмінієм поверхні металевого шару покриттів CoCrAlY/8YSZ для забезпечення роботи робочих лопаток, які виго-

товлені із жароміцних сплавів типу CM-88У та CM-93, при підвищеній температурі.

Список літератури/References

1. Darolia, R. (2013) Thermal barrier coatings technology: Critical review, progress update, remaining challenges and prospects. *Int. Mater. Rev.*, **58**, 315–348. DOI: <https://doi.org/10.179/1743280413Y.0000000019>
2. Pollock, T.M., Lipkin, D.V., Hemker, K.J. (2012) Multifunctional coating interlayers for thermal-barrier systems. *MRS Bulletin*, **37**, 923–931.
3. Movchan, B.A., Yakovchuk, K.Yu. (2004) Graded thermal barrier coatings, deposited by EB-PVD. *Surface & Coatings Technology*, **188–189**, 85–92.
4. Bababdani, S., Nogorani, F. (2014) Overalluminizing of a CoCrAlY coating by inward and outward diffusion treatments. *Metallurg. and Mater. Transact.*, **A45**, 2116–2112.
5. Jiang, J., Zhao, H., Zhou, X. et al. (2013) Oxidation resistance of vacuum plasma sprayed CoNiCrAlY coating modified by filtered cathodic vacuum arc deposition aluminizing. *J. of Thermal Spray Technology*, **22**, 69–74.
6. Pillai, R., Jalowicka, A., Galiullin, T. et al. (2019) Simulating the effect of aluminizing on a CoNiCrAlY-coated Ni-base superalloy. *Calphad*, **65**, 340–345. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2019.04.004>
7. Boissonnet, G., Grégoire, B., Bonnet, G., Pedraza, F. (2019) Development of thermal barrier coating systems from Al microparticles. Pt I: Influence of processing conditions on the mechanisms of formation. *Surface and Coatings Technology*, **380**, 125085. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125085>
8. Kashin, D.S., Dergacheva, P.E., Stekhov, P.A. (2018) Heat-resistant coatings deposited by slip method (Review). *Trudy VIAM*, **65(5)**, 64–75 [in Russian].
9. Jalowicka, A., Naumenko, D., Ernsberger, M. et al. (2018) Alumina formation and microstructural changes of aluminized CoNiCrAlY coating during high temperature exposure in the temperature range 925–1075 °C. *Materials at High Temperatures*, **35(1–3)**, 66–77. DOI: <https://doi.org/10.1080/09603409.2017.1392114>

DEVELOPMENT OF THE CoCrAlY/ZrO₂-8 % Y₂O₃ TYPE THERMAL BARRIER COATING BY SURFACE DOPING OF THE METAL LAYER WITH ALUMINUM

K.Yu. Yakovchuk¹, G.P. Myalnitsya², A.V. Mykytychuk¹, Yu.E. Rudoy¹, R.O. Tkach¹

¹State-Run Enterprise «International Center for Electron Beam Technologies of the E.O. Paton Electric Welding Institute, NASU», 68 Antonovych Str. 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: yakovchuk@paton-icebt.kiev.ua

²State-Run Enterprise «Gas Turbine Research & Production Complex «Zorya»-«Mashproekt»», 42-a Bohoyavlenskyi Prosp., 54018, Mykolayiv, Ukraine. E-mail: presz@zorya.com.ua

The diffusion processes occurring at aluminum enrichment of the CoCrAlY overlayer during vacuum annealing from the slurry suspension applied to its surface and their influence on the structure, chemical composition and properties of CoCrAlY/ZrO₂-8 % Y₂O₃ electron beam evaporated on nickel-based superalloy samples were studied. It is shown that the diffusion layer formed on the surface of the CoCrAlY alloy, enriched in aluminum, has a heterogeneous thickness and contains two microstructural zones with different aluminum content (external zone with aluminum up to 31 % and inner with aluminum up to 19 %). It was found that during vacuum heat treatment, cobalt and chromium diffuse into the slurry layer. As a result, microhardness increases up to 9 GPa and microcracks that propagate into the CoCrAlY layer are formed. The parameters of low-temperature heat treatment, which provides the formation of a defect-free diffusion zone in CoCrAlY, are established. The attained results allowed us to optimize the technology of CoCrAlY layer thermodiffusional aluminization from the slurry for CoCrAlY/ZrO₂-8 % Y₂O₃ coatings in order to increase the operating temperature of the turbine blades made of CM-88U and CM-93 superalloys. Ref. 9, Tabl. 6, Fig. 7.

Key words: electron beam physical vapor deposition; thermal barrier coatings; nickel-based superalloy; CoCrAlY metal bond coat; thermodiffusional aluminization; slurry; thermally grown Al₂O₃ oxide (TGO); ZrO₂-8 % Y₂O₃ outer ceramic layer; diffusion of elements

Надійшла до редакції 30.06.2022