

УДК 621.793:620.17

DOI: 10.18372/0370-2197.3(100).17893

В. І КУБІЧ, Є. О. ФАСОЛЬ

Національний університет «Запорізька політехніка», Україна

ВИЗНАЧАЛЬНІ ВИПРОБУВАННЯ ЖАРОМІЦНИХ УЩІЛЬНЮВАЛЬНИХ ІТРІЙВМІСТНИХ ПОКРИТТІВ НА ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНУ ГАЗОЕРОЗІЙНУ СТІЙКІСТЬ

В роботі представлено випробування жароміцних ущільнювальних ітрійвмістних покриттів на високотемпературну газоерозійну стійкість. Дослідження включає в себе візуалізацію та характеристику геометрії профілю доріжок врізання, оцінку зміни кольору поверхонь та внутрішньої структури порошкових покриттів. Отримані результати вказують на відсутність значущих геометричних змін на поверхнях, а також свідчать про можливе утворення оксидів під впливом високої температури. Зауважено деформування структури порошкових покриттів, накопичення мікронапружень та ущільнення об'ємної структури. Додатково, в статті розглянуто вплив концентрації ітрію на мікрозношування, зазначено приріст маси покриттів. Встановлено, що присутність ітрію в складі ущільнювального покриття впливає на швидкість приросту маси в залежності від концентрації та способу нанесення. Отримані результати відкривають перспективи подальших досліджень ущільнювальних покриттів, які експлуатуються в умовах гарячого тракту ГТД.

Ключові слова: *ущільнювальні покриття; газотурбінні двигуни; газоерозійна стійкість; ітрій; доріжки врізання*

Вступ. В сучасних умовах розвитку технологій, особливо в аерокосмічній, енергетичній та авіаційній галузях, виникає все більше необхідність в матеріалах, які могли б забезпечити надійну роботу в умовах високих температур, агресивного впливу середовища та інтенсивного газоерозійного впливу. Одним із найважливіших напрямків досліджень і розробок в цьому контексті є створення жаростійких ущільнювальних покриттів, які б виявилися ефективними в умовах високотемпературного агресивного газового потоку та підвищили коефіцієнт корисної дії двигуна. Серед сучасних матеріалів, що мають високу термічну витривалість та відмінну стійкість до абразивного та газоерозійного зносу, ітріймісткі покриття займають особливе місце. Використання ітрію у складі покриттів дозволяє підвищити газоерозійну стійкість, забезпечити надійне зчеплення з матеріалом основи та покращити механічні властивості.

Аналіз публікацій. Одним з основних параметрів при проектуванні сучасних газотурбінних двигунів (ГТД) є коефіцієнт корисної дії. Зазначається [1], що одним із основних напрямів удосконалення конструкції двигуна, спрямованих на зниження втрат газового потоку та раціоналізації паливних витрат, є зменшення радіальних зазорів в роторно-статорній частині двигуна. На управління величиною осьових і радіальних зазорів у ГТД спрямовані дослідження багатьох авторів, однак це завдання на сьогодні не має остаточного вирішення. Забезпечити конструктивно величину зазору досить складно, тому існує необхідність використання ущільнювальних покриттів. Зокрема, покриттів системи Ni-Co-Cr-Al-Y. Авторами роботи [2] відзначається перспективність використання рідкоземельних металів у жаростійких покриттях. Активна взаємодія із домішками – елементами впровадження (переважно з вуглецем та

киснем) спричиняє утворення стабільних карбідів на границях поділу (міжфазні границі, скупчення дислокацій). Ітрій у відповідних пропорціях стабілізує оксидні плівки алюмінію і хрому, покращує адгезію покриттів, що наносяться, до матеріалу основи, підвищує термічну стабільність сплавів, сповільнює коагуляцію зміцнювальних фаз [3]. Встановлено, що ітрій, розчинений у нікелевій матриці, підвищує жароміцність. Введення ітрію в кількості, що перевищує його границю розчинності, призводить до виділення всередині та на границях зерен сполуки, за хімічним складом близької до фази Ni_3Y [4]. Також введення ітрію сприяє утворенню на поверхні сплаву оксидів $Ni(Cr,Al,Y)_2O_4$ і $(Cr, Y)_2O_3$. У покриттях системи Ni-Co-Cr-Al-Y сегрегація Y на границі поділу окалина-покриття призводить до меншого утворення порожнин і, отже, покращує зчеплення оксидної окалини $\alpha-Al_2O_3$. Проте незважаючи на вказані дослідження, результатів експериментальних випробувань щодо впливу ітрію на високотемпературну газерозійну стійкість покриттів наразі наведено недостатньо для визначення кількості та ефективності його використання.

Метою роботи є попереднє встановлення опору до високотемпературного газерозійного зношування поверхонь доріжок врізання ітрійованих покриттів, що сформовані на малогабаритних зразках газополуменевим та іоноплазмовим способами. При цьому доріжки врізання відіграють роль примусово змодельованого профілю зношування матеріалу покриттів, що наносяться на поверхню статора лабіринтного газодинамічного ущільнення (силової турбіни).

Методика досліджень. Для проведення досліджень покриття формувались товщиною до 5 мм на одній із сторін кубічних зразків, основа яких нікелевий сплав ЭИ435 (ХН78Т). Випробувались покриття, які активно використовуються на підприємстві ПАТ «Мотор Січ» КНА – 82 у складі якого присутні нікель (основа), кремній, алюміній та тверді мастила (графіт і нітрид бору) із додаванням 0,1 %; 0,3 %; 0,5 % ітрію. Покриття формувались газополуменевим та іоноплазмовим способами.

Для моделювання процесу взаємодії поверхні матеріалу з високотемпературним потоком газів застосовані методичні підходи, які запропоновані та використані в роботі [5] для визначення термокавітаційного зносу у високотемпературних потоках газу, та обладнання, яке наведено на рис. 1.

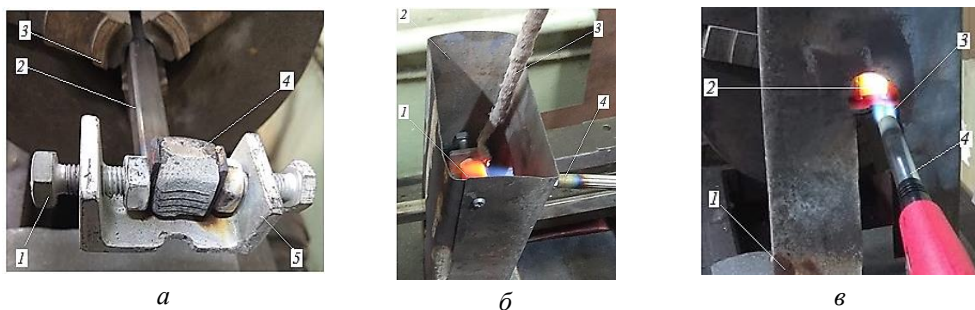


Рис. 1. Методичне забезпечення експериментальних досліджень на газерозійну стійкість покриттів: а – кріплення зразка: 1 – болт кріплення з гайкою; 2 – штир опорний; 3 – губки бабки токарного верстата; 4 – дослідний зразок; 5 – тримач зразка; б – взаємодія з факелом полум'я горіння газу, вид збоку: 1 – дослідний зразок; 2 – захисний кожух; 3 – ізольована трубка дроту термопар; 4 – розпилювач пильника; в – вид спереду: кожух захисний; 2 – дослідний зразок; 3 – потік струменя; 4 – розпилювач пильника

Дослідні зразки 4, на поверхні яких попередньо сформовано доріжки врізання 2 (рис. 2, б), закріплювались у тримачі 5 за допомогою болтів з гайками 1, рис. 1, а. Високотемпературний потік горіння суміші 3 у складі ізобутану 65 %, пропану 10 %, бутану 25% спрямовувався безпосередньо на поверхню зразка 2, рис.1, в. Відстань від пальника 3 марки GB-0022 до поверхні зразка 2 складала 6 см. Екранування зони моделювання газоерозійного зношування матеріалів покриттів здійснювалось за допомогою металевого захисного кожуха 1. Час взаємодії з полум'ям потоку газів для кожного зразка складав 30 хв.

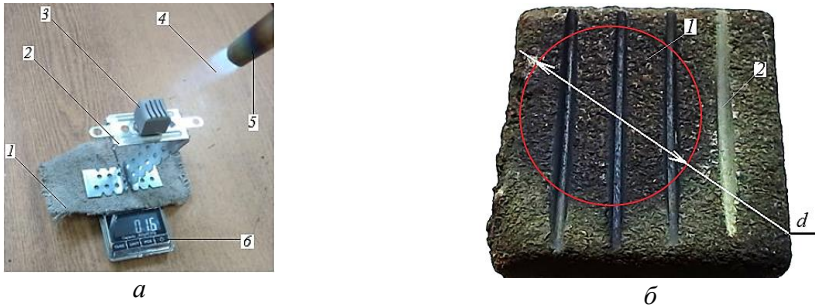


Рис. 2. Методичне забезпечення визначення сили тиску струменя газового потоку: а – розташування зразка на вагах: 1 – захисна азбестова накладка; 2 – металева просторова підставка; 3 – дослідний зразок; 4 – потік струменя газів; 5 – розпилювач пильника; б – електронні ваги; б – поверхня зразка: 1 – відбиток полум'я газів; 2 – доріжка врізання

Вимірювання температурного стану палаючого газового потоку та зразка здійснювалось за допомогою мультиметра DT-838 з термопарою TP-3. При цьому температура палаючого газового середовища біля поверхні зразка складала 950-1220 °С, поверхнева температура основи зразка складала 630–660 °С.

Параметри силового та швидкісного навантаження поверхонь зразків визначались у наступний спосіб.

Швидкість розповсюдження полум'я в потоці розраховувалась у відповідності з виразом (1) та рис. 3, якій викладено у роботі [6]. При цьому з урахуванням початкової середньої за перерізом пальника швидкості розповсюдження полум'я $W = 0,5 - 0,7$ м/с, діаметру перерізу $d = 9,8$ мм, довжини кінетичного факелу (відстань від перерізу до поверхні) $l = 60$ мм, швидкість розповсюдження полум'я складала $U = 0,042 - 0,049$ м/с. Тобто визначене значення швидкості газового потоку вважалось як таке, що мале місце перед зразком, та при русі поверхнею доріжок врізання. Сила тиску струменя газового потоку на доріжки врізання визначалась експериментально у відповідності з забезпеченням, яке наведено на рис. 2, а.

Сила тиску з урахуванням маси зрідженого газу у балоні, яка вимірялось на відстані 60 мм від зразка 3, що розміщувався на металевій підставці 2 на вагах б, при повній подачі складала 0,45–0,48 гс. А відповідно, при перерахунку у механічний тиск – при площі $S = 113$ мм² відбитку 1 від дії потоку струменя тиск дорівнював $p = 38-42$ Па, рис. 2, б.

Для визначення маси зразків та для визначення складової високотемпературного газоерозійного зношування зразки попередньо зважувались на вагах Radwag AS 220.R2 з точністю до 0,0001 г. Кількість зразків з кожним складом покриття становила $n = 3$. Для аналізу використовувались середньоарифметичні значення. Середнє середньоквадратичне відхилення становило $\sigma = 0,0055$ г.

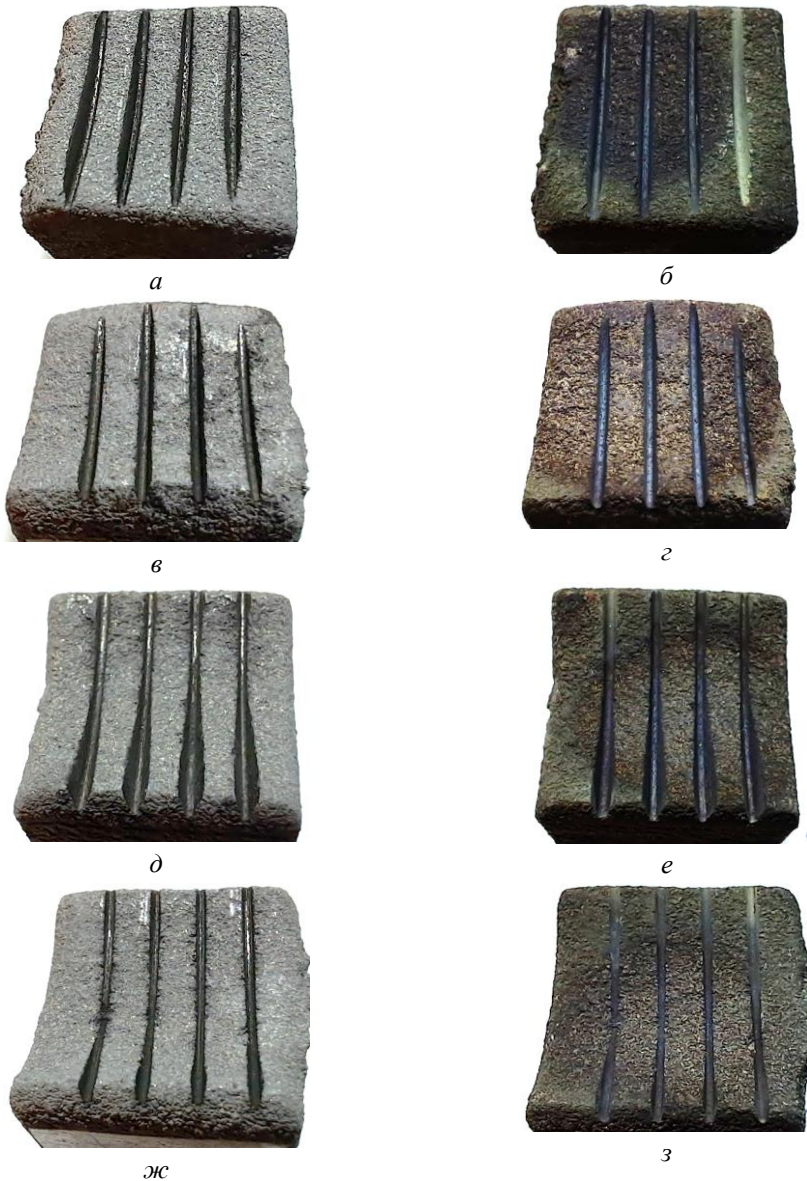


Рис. 3. Стан поверхонь дослідних зразків з газополумневим способом (а-з) способом формування покриттів (ліворуч – вихідний стан, праворуч – після газоерозійного впливу) : а, б – 0 % Y; в, г – 0,1 % Y; д, е – 0,3 % Y; ж, з – 0,5 % Y

Отримані результати та їх обговорення. Візуалізований трибологічний стан поверхонь зразків наведений на рис. 3 – 4. По - перше, відмічається те, що явних змін у геометрії профілю доріжок врізання не має. Конфігурація кромки, нижньої та бокових сторін залишається без помітних змін. Це вказує на те, що зношування поверхні матеріалів покриттів у наслідок дії високотемпературного потоку газу з визначеними параметрами не відбулось. Як модельовані механічний тиск, так і швидкість руху струменя факелу виявилась надто малими щоб протидіяти силам когезії між елементами конструкції покриттів та спричинили їх руйнування.

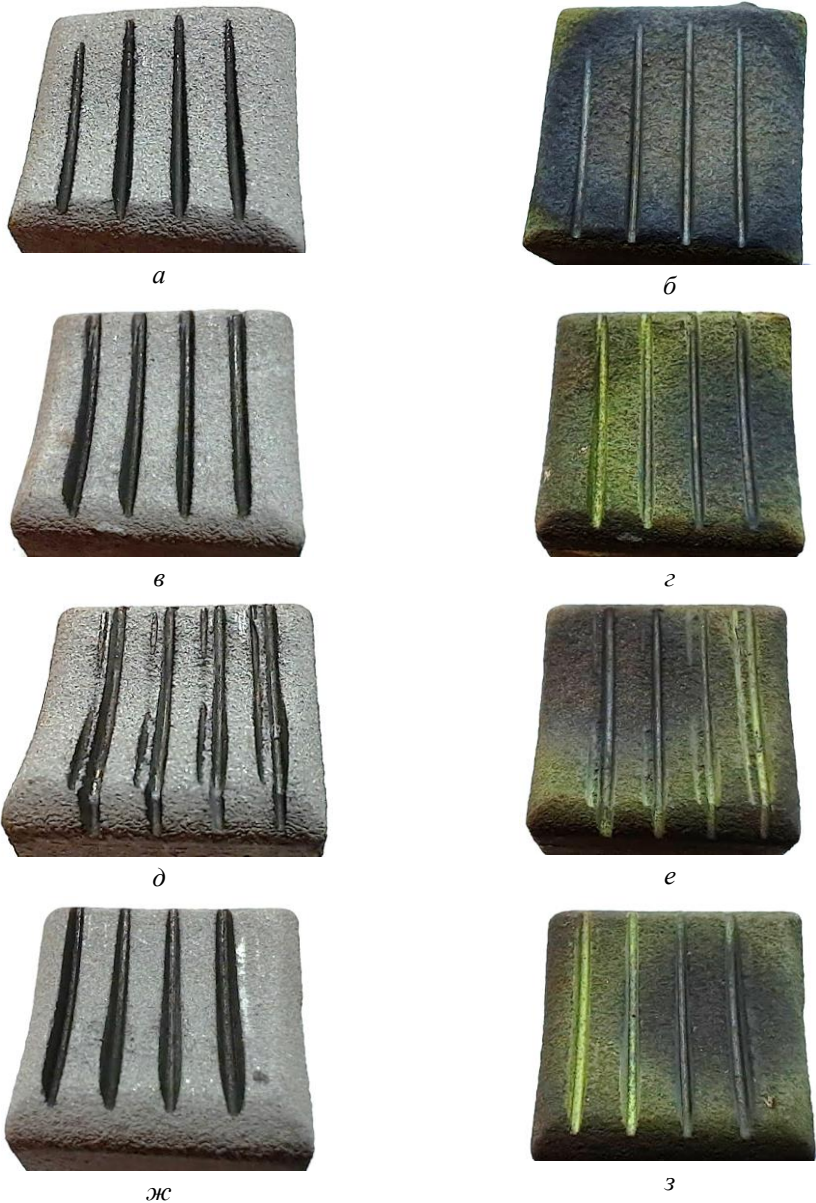


Рис. 4. Стан поверхонь дослідних зразків з іоноплазмовим способом формування покриттів (ліворуч – вихідний стан, праворуч – після газозерозійного впливу): *а, б* – 0 % Y; *в, г* – 0,1 % Y; *д, е* – 0,3% Y; *ж, з* – 0,5 %.

По-друге, має місце помітна зміна кольору поверхонь. Колір змінився від світло-сірого до темного з чорними, коричневими, зеленими, синіми та фіолетовими відтінками. Зміна кольору може свідчити, що в процесі експлуатації із підвищенням температури на поверхні можуть утворюватися оксиди. Для визначення хімічного складу та природи утворень необхідні проведення подальших досліджень. Проте в роботі [7] зазначається, що в покритті КНА-82 із ітрієм (вміст невідомий) можуть утворюватися окрім очевидного оксиду ітрію Y_2O_3 , який присутній і в вихідному стані, можуть бути присутні NiO , B_2O_3 , $\alpha-Al_2O_3$.

По-третє, позначені процеси супроводжуються деформуванням внутрішньої структури порошкових покриттів, накопиченням зон високих та малих мікронапружень, ущільненням об'ємної структури, або насиченням її порами з формуванням міцного каркасу. Тому наведене можливо розглядати та оцінювати як складові процесу зношування матеріалу покриттів, які відбуваються на мікрометричному рівні відносно руйнування (мікрозношування) вихідних та створення вторинних когезійних зв'язків. При цьому останні не приводять до явно виражених змін розмірів і форми, що і спостерігалось під час дослідів. Також при цьому можливі зміни у масі, що і мало місце.

Результати вимірювання маси дослідних зразків наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Данні по змінам маси дослідних зразків

Номер зразку	Спосіб нанесення	Вміст ітрію, %	Початкова маса, г	Маса після дослідів, г	+ Δm , г	v_m , мг/с
1	газополуменевий	0	50,4898	50,557	0,0672	0,373
2		0,1	53,8147	53,8654	0,0507	0,28
3		0,3	48,5179	48,5316	0,0137	0,076
4		0,5	52,5793	52,6368	0,0575	0,32
5	іоноплазмовий	0	53,0012	53,1145	0,1133	0,63
6		0,1	53,2248	53,2835	0,0587	0,326
7		0,3	51,8475	51,889	0,0415	0,23
8		0,5	52,468	52,5319	0,0639	0,355

Отримані данні вказали на збільшення маси дослідних покриттів. Приріст маси, можна припустити, пов'язаний із утворення в процесі горіння палива утворень карбідів на поверхні зразків. Очевидним буде утворення карбиду бору B_4C , може давати чорний колір та карбиду ітрію Y_2C_3 . Проте, дані припущення потребують проведення подальших досліджень.

Для попереднього аналізу закономірностей впливу вмісту ітрію на мікрозношування когезійних зв'язків розрахована швидкість приросту маси, та для наочності за допомогою Microsoft Excel Worksheet побудована графічна залежність, рис. 5.

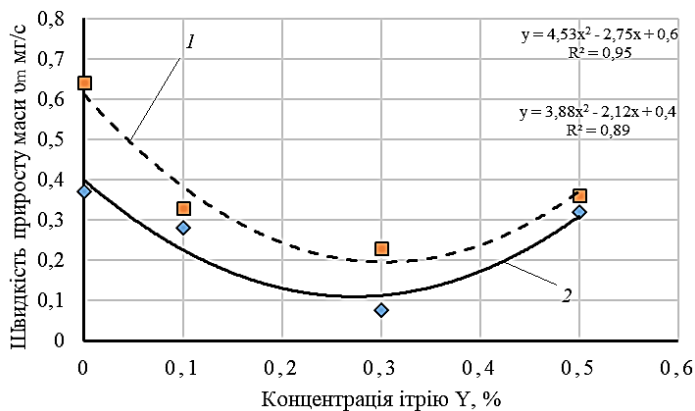


Рис. 5. Вплив вмісту ітрію на приріст маси зразків: 1 – покриття, що сформоване іоноплазмовим способом; 2 – покриття сформоване газополуменевим способом

Аналіз даних наведених на рис. 5 вказує на те, що по-перше, отримані дані апроксимуються у вигляді параболічної залежності випуклістю донизу для обох способів нанесення покриттів з досить високою достовірністю. При цьому явних відмінностей у кривизні гілок параболи не має, що вказує однотипність протікання процесів у структурі покриттів під дією високих температур.

По-друге, визначається, що ітрії:

– з концентрацією, яка наближена від 0,1 % до 0,25 % чинить опір приросту маси покриття, яке сформоване тільки з лігатур КНА – 82. Мінімальні швидкості приросту мають місце у діапазоні від 0,25 % до 0,35 %. При цьому графоаналітична швидкість σ_m приросту маси покриття, яке сформоване в іоноплазмовий спосіб при концентрації ітрію 0,1 % в 1,73 разів більше ніж в покритті, яке сформоване газополуменевим способом, і, відповідно, в 2 рази більше при концентрації в 0,3 %;

– з концентрацією від 0,35 % до 0,5 % швидкість приросту маси покриттів зростає. Але для іоноплазмового способу нанесення покриття вплив на опір приросту зберігається в усьому позначеному діапазоні. Тобто приріст маси зменшений в 2,7 разів відносно покриття без ітрію при концентрації 0,3 % залишається також зменшеним, але тільки у 1,77 разів при концентрації 0,5 %. Для газополуменевого покриття приріст маси, який був зменшений в 4,9 разів відносно покриття без ітрію при концентрації 0,3 % не остається таким, і при концентрації ітрію у 0,5 % практично вирівнюється, тобто зменшення складає 1,17 разів.

Висновки. При проведенні досліджень жароміцних ущільнювальних ітріївмістних покриттів на високотемпературну газозерозійну стійкість було визначено зміни в геометрії профілю доріжок врізання не виявлені, що свідчить про відсутність значущих зносів поверхні матеріалів покриттів під впливом високотемпературного потоку газу. Зміна кольору поверхні може вказувати на утворення оксидів внаслідок дії високої температури. Для точного визначення складу і природи цих оксидів потрібні додаткові дослідження. Зазначено, що процеси супроводжуються деформуванням структури порошкових покриттів, накопиченням мікронапружень, ущільненням об'ємної структури. Ці явища можна розглядати як складові процесу зношування матеріалу покриттів на мікрометричному рівні. Відзначено збільшення маси покриттів, і це може бути пов'язано з утворенням карбідів на поверхні зразків під час горіння палива. Для точної ідентифікації цих сполук потрібні подальші дослідження. Відзначено, що приріст маси зразку спочатку зменшується при додаванні ітрію у концентрації від 0,1% до 0,25%, а потім зростає при концентраціях від 0,35 % до 0,5 %. Різниця між різними способами нанесення покриттів також врахована.

Список літератури

1. Грешта В.Л., Ткач Д.В., Сотніков Є.Г., Леховіцер З.В., Климов О.В., Фасоль Є.О. Особливості вибору лігатури для підвищення експлуатаційних властивостей ущільнювальних покриттів деталей турбіни газотурбінних двигунів / Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні, 2018, № 1, с.25-31.
2. Sloof W. G., Nijdam T. J. On the high-temperature oxidation of MCrAlY coatings / International Journal of Materials Research, 2009, №100 (10), pp.1318–1330.
3. Wu Y., Kang M., Wang J, Li Y., Xu Y. Unveiling the mechanism of yttrium-related microstructure inhibiting or promoting high-temperature oxidation based on Ni-Al-Y alloys / Acta Materialia, 2021, T. 211, pp. 116-124.

-
4. Wu Y., Li Y., Xu Y., Kang M., Wang J., Sun B. Unveiling the precipitation-induced high-temperature oxidation behavior in a Ni-Al-Y alloy / *Materials Letters*, 2021, Т 297. pp 129977.
 5. Скачков В. О., Бережна О. Р. Оцінка стійкості вуглецевих композиційних матеріалів у високоенергетичних газових потоках / *Збірник наукових статей міжнародної наукової конференції «Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 6»*, 2016. С. 116-121.
 6. Норкин Н. Н. Факельный процесс горения газа в условиях свободной турбулентной струи / *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 1953, Т. 77, С. 19-27.
 7. Грешта В. Л., Ткач Д. В., Климов А. В., Сотников Е. Г., Леховицер З. В., Степанова Л. П. Исследование фазового состава жаростойких уплотнительных покрытий, применяемых в ГТД / *Авиационно-космическая техника и технология*, 2016, № 8, С.113-121.

Стаття надійшла до редакції 09.08.2023.

Кубіч Вадим Іванович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автомобілів Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Гоголя 64 - А, м. Запоріжжя, Україна, 69063, E-mail: schmirung@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6230-9263>.

Фасоль Єлизавета Олександрівна – старший викладач кафедри фізичного матеріалознавства Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського 64, м. Запоріжжя, Україна, 69063, E-mail: selvluna@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4846-9046>.

V. I. KUBICH, Ye. O. FASOL

DEFINING TESTS OF HEAT-RESISTANT YTTRIUM-CONTAINING SEALING COATINGS FOR HIGH-TEMPERATURE GAS-EROSION RESISTANCE

This article describes the testing of heat-resistant yttrium-containing sealing coatings for high-temperature gas-erosion resistance. The study includes careful visualization and characterization of the geometry of the cut-in profile, observation of changes in surface color, and analysis of the internal structure of powder coatings. The first important conclusion is that there are no obvious changes in the geometry of the flute profile and the configuration of the edges, bottom and sides. This indicates the absence of significant mechanical wear of the surface of the coating materials under the influence of high-temperature gas flow. Further analysis suggests that the modeled mechanical pressure and velocity of the flare jet were not large enough to cause destruction of the coating surfaces. A noticeable change in the color of the surfaces was noted. This phenomenon may be the result of the formation of oxides on the surface of materials under the influence of elevated temperature. The exact chemical composition and nature of these oxides require further research to fully understand. Studies indicate the presence of deformation of the internal structure of powder coatings, as well as the accumulation of zones with high and low microstresses. These phenomena indicate the possibility of micro-wear of the coating materials and the formation of additional cohesive bonds. It was found that the yttrium content affects the rate of mass gain of coatings. The weight gain depends on the yttrium concentration and the method of coating application. This relation can have important practical applications in the development of tribological materials with improved properties.

Keywords: sealing coatings; gas turbine engines; gas erosion resistance; yttrium; cut-in tracks.

References

1. Hreshta V.L., Tkach D.V., Sotnikov Ye.H., Lekhovitser Z.V., Klymov O.V., Fasol Ye.O. Osoblyvosti vyboru lihatury dlia pidvyshchennia ekspluatatsiinykh vlastyivostei ushchilniuvalnykh pokryttiv detalei turbiny hazoturbinykh dvyyhuniv / Novi materialy i tekhnologii v metalurhii ta mashynobuduvanni, 2018, № 1, s.25-31.
2. Sloof W. G., Nijdam T. J. On the high-temperature oxidation of MCrAlY coatings / International Journal of Materials Research, 2009, №100 (10), pp.1318–1330.
3. Wu Y., Kang M., Wang J, Li Y., Xu Y. Unveiling the mechanism of yttrium-related microstructure inhibiting or promoting high-temperature oxidation based on Ni-Al-Y alloys / Acta Materialia, 2021, T. 211, pp. 116-124.
4. Wu Y, Li Y., Xu Y., Kang M., Wang J., Sun B. Unveiling the precipitation-induced high-temperature oxidation behavior in a Ni-Al-Y alloy / Materials Letters, 2021, T 297. pp 129977.
5. Skachkov V. O., Berezhna O. R. Otsinka stiikosti vuhletsevykh kompozytsiinykh materialiv u vysokoenerhetychnykh hazovykh potokakh / Zbirnyk naukovykh statei mizhnarodnoi naukovoï konferentsii «Materialy dlia roboty v ekstremalnykh umovakh – 6», 2016. C. 116-121.
6. Norkin N. N. Fakelnii protsess gorennya gaza v usloviyakh svobodnoi turbulentnoi strui / Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. 1953, T. 77, S. 19-27.
7. Greshtha V. L., Tkach D. V., Klimov A. V., Sotnikov Ye. G., Lekhovitser Z. V., Stepanova L. P. Issledovanie fazovogo sostava zharostoikikh uplotnitelnykh pokritii, primenyamikh v GTD / Aviatsonno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya, 2016, № 8, S.113-121.

Kubich Vadym Ivanovych – PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automobiles National University «Zaporizhzhia Polytechnic», 64-A Gogol str., Zaporizhzhia, Ukraine, 69063, E-mail: schmirung@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6230-9263>.

Fasol Yelyzaveta Oleksandrivna – Senior Lecturer at the Department of Physical Materials Science National University «Zaporizhzhia Polytechnic», 64 Zhukovskoho St., Zaporizhzhia, Ukraine, 69063, E-mail: selvluna@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4846-9046>.