

Д-р техн. наук С. Б. Беліков<sup>1</sup>, канд. техн. наук В. Л. Грешта<sup>1</sup>, канд. техн. наук Д. В. Ткач<sup>1</sup>,  
Є. Г. Сотніков<sup>2</sup>, канд. техн. наук З. В. Леховіцер<sup>2</sup>, канд. техн. наук О. В. Климов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Запорізький національний технічний університет, <sup>2</sup> АТ «Мотор Січ»;  
м. Запоріжжя

## ОЦІНКА ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ ТЕПЛОЗАХИСНИХ УЩІЛЬНЮВАЛЬНИХ ПОКРИТТІВ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

*Вивчено характер впливу легування ущільнювальних покриттів на нікелевій основі ітрієвміщуючими лігатурами на їх фізико-механічні та експлуатаційні властивості. Встановлено, що легування ущільнювального покриття КНА-82, яке застосовується в умовах виробництва АТ «Мотор Січ», лігатурами різних складів: № 1 – Ni-Y; № 2 – Y; № 3 – Co-Ni-Cr-Al-Y, підвищує їх твердість і, відповідно, ерозійну стійкість. Границю міцності на відрив досліджували нанесенням на різні основи ВЖ-102 та ЭИ-435, це дало можливість встановити, що покриття леговане Co-Ni-Cr-Al-Y забезпечує задовільний рівень зчеплення з різними матеріалами основи.*

**Ключові слова:** ущільнювальне покриття, газополуменеve нанесення, ерозія, твердість, фазовий склад, оксиди, інтерметаліди.

### Вступ

Сучасні вимоги підвищення економічних показників газотурбінних двигунів авіаційної техніки обумовлюють необхідність зменшення зазорів між роторними та статорними частинами енергетичних установок, що може забезпечуватись нанесенням ущільнювальних покриттів. Під час експлуатації двигуна внаслідок таких факторів як взаємодія статору та ротору турбіни під час дотику лопаток та покриття (або лабіринтного ущільнення та покриття), дії високотемпературного середовища та газової ерозії відбувається руйнування покриттів і збільшення зазорів, що призводить до зростання втрат газів і, відповідно, до більш суттєвих витрат палива.

Відомо, що для забезпечення задовільного розміру зазору необхідно щоб матеріали покриттів задовільняли ряду взаємовиключних вимог [1–4]: покриття на початковому етапі експлуатації має бути досить м'яким, щоб під час дотику лопатки (або лабіринтного ущільнення) з покриттям не відбувався знос або руйнування деталі статору, при цьому ерозійний знос під дією газового потоку має бути мінімальним. Також матеріал покриття повинен мати задовільну жаростійкість. Іншою задачею є забезпечення високої адгезії між матеріалом основи та покриттям як під час взаємодії ротору і статору, так і впродовж всього міжремонтного періоду експлуатації двигуна.

Оскільки для підвищення ефективності сучасних авіаційних двигунів конструктори підвищують температуру газів в камері згорання, виникає необхідність розробки нових ущільнювальних покриттів. В роботі [4] вказується, що при температурах вище 1100 °С можна

застосовувати покриття на основі МСrAlY або керамічні. Досліджені в ній експлуатаційні властивості покриттів на основі МСrAlY показали задовільні результати при температурі порядку 1100 °С. Відомо також, що регулюванням співвідношення пор, металевої та неметалевої фаз можна регулювати жаростійкість, зносостійкість та ерозійну стійкість [5]. Крім того, при виборі матеріалу ущільнювального покриття необхідно приймати до уваги вартість матеріалу покриття та технології його нанесення.

Отже, має бути забезпечена ерозійна стійкість в умовах дії агресивного високотемпературного газового середовища, низька робота врізання покриття, щоб під час дотику лопатки (або лабіринтного ущільнення) з покриттям не відбувався знос або руйнування деталі статору, це також забезпечить мінімальні зазори та дозволить значно знизити знос торцевої поверхні лопатки.

На сьогодні існує незначна кількість публікацій, яка присвячена розробці та дослідженню експлуатаційних властивостей ущільнювальних покриттів, що застосовуються в газових турбінах [6]. Тому актуальною задачею є створення таких ущільнювальних покриттів, що легко б прироблювались на початковому етапі роботи двигуна і зберігали мінімальний зазор впродовж заданого періоду експлуатації.

### Матеріали та методи дослідження

Оскільки на виробництві при робочих температурах порядку 900 °С успішно використовувалось покриття КНА-82, але при подальшому підвищенні робочих температур різко знижувалась його жаростійкість, було прийнято рішення підвищити його експлуатаційні ха-

рактеристики додатковим введенням легувальних елементів в шихту. Основним легувальним елементом, який би підвищив жаростійкість покриттів, було обрано ітрію. Оскільки він позитивно впливає на структурну стабільність сплавів за рахунок розташування на поверхнях розподілу, що призводить до затримки розвитку дифузійних процесів, зв'язування домішок та підвищення адгезії оксидної плівки при газовій корозії [7].

Досліджували три варіанти легування базового матеріалу ітрієм. До шихти основного матеріалу вносили додатково лігатури різного складу: склад 1 – Ni-Y; склад 2 – Y; склад 3 – Co-Ni-Cr-Al-Y. Вміст ітрію в цих лігатурах відрізнявся, що, відповідно, вплинуло на остаточний вміст ітрію в отриманих покриттях [8–9].

Покриття наносили газополуменим методом на спеціально підготовлені зразки.

Оцінка мікротвердості покриттів проводилась на мікротвердомері моделі LECO AMH 43 USA у відповідності до вимог ДСТУ ISO 6507:1-2007. Навантаження складало 10 г.

Для вимірювання твердості покриття у відповідності до ДСТУ ISO 6506:1-2007 використовували твердомір WPM-250 (виробництво Німеччина) НВ-5/62,5/60.

Для оцінки ерозійної стійкості не існує стандартних методів [6], тому тестування проводили на пікоструйній установці для визначення твердості абразивних інструментів ТФ 21-11. Для порівняльної якісної оцінки поверхню покриття обробляли під тиском 0,5 атм оксидом кремнію зернистістю 63...80 (ГОСТ 3647-80) під кутом 90°. Величина ерозійного зношування визначалась в найбільш глибокій точці та додатково оцінювалась втрата маси під час випробування.

### Результати дослідження

Оскільки ущільнювальне покриття в процесі експлуатації має відповідати таким вимогам як висока прироблюваність на початковому етапі та високий опір ерозійному зношуванню, необхідно було визначити як змінюється твердість матеріалу покриття в процесі експлуатації. Було встановлено, що на початковому етапі, без впливу високих температур, покриття має досить низькі показники мікротвердості та твердості (рис. 1, 2), що, ймовірно, пов'язано з високою пористістю отримуваних покриттів, особливостями когезійної взаємодії між частинками покриття та незначним вмістом оксидів та інтерметалідів [9].

Більш висока твердість покриттів додатково легованих різними складами лігатур обумовлена по-перше посиленням дифузійної взаємодії в результаті термічного впливу, по-друге наявністю після напилення оксидів  $Al_2O_3$ ,  $Y_2O_3$  та інтерметалідів  $Ni_3Y$ ,  $NiAl$ ,  $Ni_3Al$ ,  $Co_2Al_3$ ,  $CoCr_2$ . Причому, оскільки співвідношення даних фаз в отриманих експериментальних покриттях варіюється, твердість експериментальних покриттів також змінюється (хоча і незначно). Після витримки зразків при температурі 1100 °C впродовж 50 та 100 годин мікротвердість зразків значно зросла, що, скоріше, по-

в'язано зі значним зростанням кількості оксидів на поверхні досліджуваних покриттів. Незначний приріст мікротвердості після витримки 100 годин порівняно із 50 годинами, ймовірно, свідчить про зниження швидкості процесів окислення та формування на поверхні покриттів шару з твердих фаз оксидів.

З точки зору експлуатації ущільнювальних покриттів такий характер зміни є найбільш вигідним, оскільки на початку експлуатації покриття при взаємодії з лабіринтним ущільненням або лопаткою турбіни має бути досить м'яким для забезпечення легкої прироблюваності поверхонь тертя.

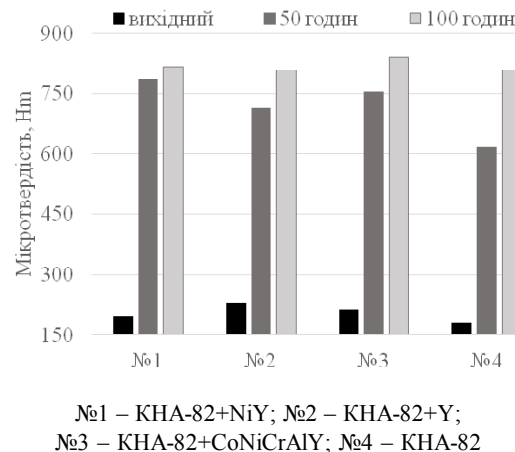


Рис. 1. Залежність мікротвердості покриттів від вмісту лігатур та часу витримки при температурі 1100 °C

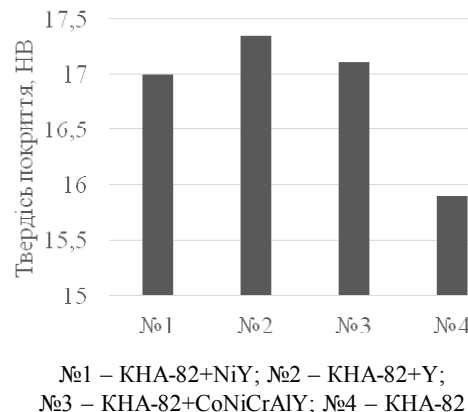


Рис. 2. Залежність твердості покриттів від вмісту лігатур

Після того, як в процесі роботи двигуна та взаємодії його роторно-статорних елементів будуть сформовані контури «доріжки», по яких буде відбуватись рух роторних деталей, подальша дія високотемпературного газового середовища буде приводити до реалізації структурно-фазових перетворень з утворенням на поверхні покриттів оксидів і, як наслідок, зростання їх твердості. Відповідне формування оксидних і інтерметалідних сполук, у свою чергу, сприятиме підвищенню опору газовій ерозії.

На рисунку 3 представлені результати дослідження впливу легування на опір ерозійному зношуванню. Як видно з представлених гістограм найбільший опір ерозії демонструють покриття складів № 2 і № 3, що підтверджується результатами вимірювання твердості зразків. Отримані дані дозволяють припустити, що в подальшому, під час роботи у високотемпературному газовому середовищі ці покриття матимуть більш високий опір газовій ерозії. Це пов'язано з формуванням на поверхні покриттів щільних оксидних плівок та шпінелей, які підвищують його ерозійну стійкість та позитивно впливають на жаростійкість матеріалу покриття.

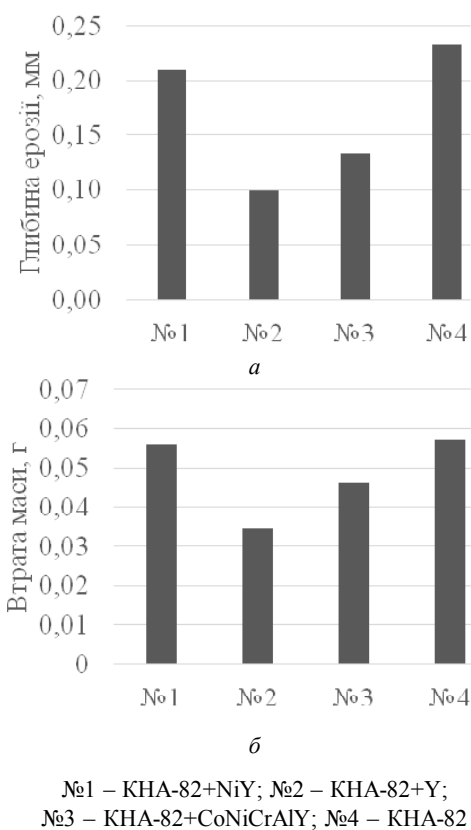


Рис. 3. Залежність опору ерозії покриттів від вмісту лігатури: а – глибина ерозії; б – втрата маси

Оскільки під час взаємодії ротору і статору на ущільнювальне покриття будуть діяти як нормальні, так і тангенціальні навантаження, необхідно було встановити характер адгезійної взаємодії покриттів. Враховуючи, що ущільнювальні покриття наносять на різні жароміцні сплави, досліджували границю міцності на відрив покриттів нанесених на основи ВЖ-102 та ЭИ-435 (рис. 4).

Як видно з представлених гістограм, матеріал основи значно впливав на адгезійну міцність зчеплення матеріалу покриття та основи. Найбільш стабільні показники спостерігались у покриттів складу № 3. Цілоком ймовірно, що присутність ітрію у складі комплексної

лігатури Co-Ni-Cr-Al-Y забезпечує його найбільш ефективну дію із розташуванням на поверхнях поділу, що забезпечує більш міцну фізико-хімічну взаємодію активних груп матеріалу покриття із активними центрами основи.

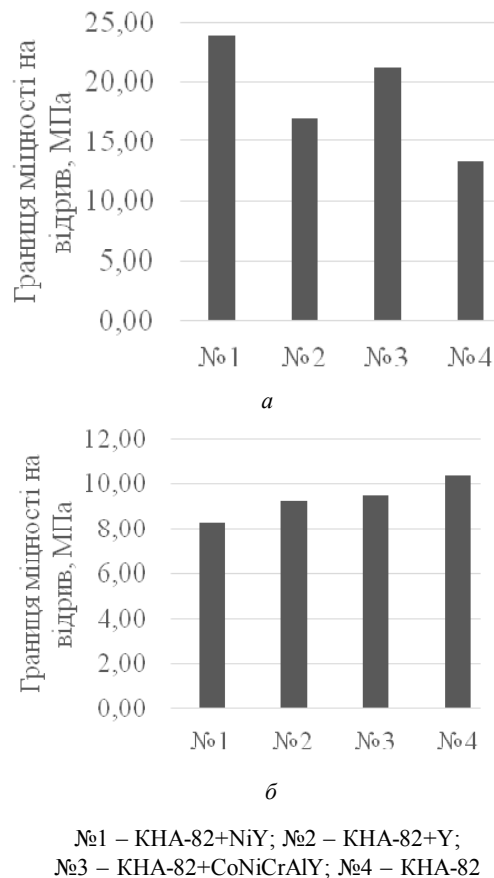


Рис. 4. Залежність границі міцності на відрив від вмісту лігатури: а – основа ВЖ-102; б – основа ЭИ-435

## Висновки

Таким чином, встановлено позитивний вплив легування ітрійвміщуючими лігатурами на експлуатаційні властивості ущільнювальних покриттів на нікелевій основі. Твердість має бути обмежена, оскільки її високі значення будуть призводити до зносу деталей ротору, а занадто низькі – не забезпечать необхідного опору ерозійному зношуванню. Отже, виходячи з отриманих результатів досліджень, можна стверджувати, що легування ущільнювального покриття на основі нікелю комплексною лігатурою Co-Ni-Cr-Al-Y дозволяє забезпечити рівень твердості з задовільними показниками опору ерозійному зношуванню. Ця лігатура також дозволяє забезпечити задовільний рівень адгезійної міцності покриття і різних матеріалів основи.

## Список літератури

1. Эксплуатационные повреждения турбореактивных двухконтурных авиационных двигателей с форсажной камерой сгорания / [Б. С. Карпинос, А. В. Коровин, А. П. Лобунько, М. Ю. Ведищева] // Вестник двигателестроения. – 2014. – № 1. – С. 18–24.
2. Bounazef M. The wear, deterioration and transformation phenomena of abrasible coating BN-SiAl-bonding organic element, caused by the friction between the blades and the turbine casing / M. Bounazef, S. Guessasma, B. Ait Saadi // Materials Letters. – 2004. – 58. – P. 3375–3380.
3. Clegg M. A. NiCrAl/Bentonite thermal spray powder for high temperature abrasible seals // Surface and Coatings Technology / Clegg M. A., Mehta M. H. – 1988. – 34. – P. 69–77.
4. Chupp\_Development of Higher Temperature Abrasible Seals for Gas Turbine Applications // ASME Turbo Expo 2004: Power for Land, Sea, and Air Volume 4: Turbo Expo / [Raymond E. Chupp, Yuk-Chiu Lau, Farshad Ghasripour and etc.]. – Vienna, Austria : 2004, June 14–17, P. 221–229.
5. Abrasible seals for gas turbines and other rotary equipment // Proceedings of ASME Turbo Expo 2004 Power for Land, Sea, and Air / [Karel Hajmrl, Petr Fiala, Anthony P. Chilkowich, Lawrence T. Shiembob Sulzer Metco]. – Vienna, Austria : 2004, June 14–17, P. 673–682.
6. E. Irissou Tribological Characterization of Plasma-Sprayed CoNiCrAlY-BN Abrasible Coatings // Journal of Thermal Spray Technology / E. Irissou, A. Dadouche, R. S. Lima. – 2014. – Vol. 23(1–2). – P. 252–261.
7. Абраимов Н. В. Высокотемпературные материалы и покрытия для газовых турбин / Н. В. Абраимов. – М. : Машиностроение, 1993. – 336 с.
8. Разработка состава теплозащитного покрытия на детали газотурбинных двигателей, работающих в условиях высоких температур / [Е. Г. Сотников, З. В. Леховицер, В. Л. Грешта и др.] // Авиационно-космическая техника и технология. – 2015. – № 10. – С. 6–10.
9. Исследование фазового состава жаростойких уплотнительных покрытий, применяемых в ГТД / [В. Л. Грешта, Д. В. Ткач, А. В. Климов и др.] // Авиационно-космическая техника и технология. – 2016. – № 8. – С. 113–121.

Одержано 14.12.2017

**Беликов С.Б., Грешта В.Л., Ткач Д.В., Сотников Е.Г., Леховицер З.В., Климов А.В. Оценка эксплуатационной надежности теплозащитных уплотнительных покрытий деталей газотурбинных двигателей**

*Изучен характер влияния легирования уплотнительных покрытий на никелевой основе иттрийсодержащими лигатурами на их физико-механические и эксплуатационные свойства. Установлено, что легирование уплотнительного покрытия КНА-82, применяемого в условиях производства АО «Мотор Сич», лигатурами разных составов: № 1 – Ni-Y; № 2 – Y; № 3 – Co-Ni-Cr-Al-Y, повышает их твердость и, соответственно, эрозионную стойкость. Предел прочности на отрыв исследовали напылением на различные основы ВЖ-102 и ЭИ-435, это позволило установить, что покрытие, легированное Co-Ni-Cr-Al-Y обеспечивает удовлетворительный уровень сцепления с различными материалами основы.*

**Ключевые слова:** уплотнительное покрытие, газопламенное напыление, эрозия, твердость, фазовый состав, оксиды, интерметаллиды.

**Byelikov S., Greshta V., Tkach D., Sotnikov E., Lkhovitsers Z., Klymov O. Estimation of operational reliability of thermal protective sealing coatings of gas turbine engines parts**

*The nature of influence of alloying nickel-based sealing coatings with yttrium-containing ligatures on physical-mechanical and operational properties was studied. It was proved that alloying KNA-82 sealing coating, which is used at Motor Sich JSC, with the alloys of different composition, namely No. 1 – Ni-Y; No. 2 – Y; No. 3 – Co-Ni-Cr-Al-Y, enhances their hardness and, respectively, erosion durability. The ultimate tearing off strength was tested through spraying ВЖ-102 and ЭИ-435 onto different surfaces. The test showed that Co-Ni-Cr-Al-Y alloyed sealing coating ensures a satisfactory degree of adhesion with various surfaces.*

**Key words:** sealing coating, gas flame spraying, erosion, hardness, phase composition, oxides, intermetallides.