

В.І. КУБІЧ¹, Є.О. ФАСОЛЬ¹, О.Г. ЧЕРНЕТА²

¹ Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна

² Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, Україна

ВПЛИВ УМОВ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ЗМІНУ ФІЗИЧНОГО СТАНУ ІТРІЙВІСНИХ ПОКРИТТІВ

Наведено результати випробувань вихідних структур жаростійких ущільнювальних покриттів з вмістом ітрію 0,1%; 0,3%; 0,5% у складі лігатур КНА-82, які попередньо були сформовані у газополум'яний та іоноплазмовий спосіб на малогабаритних дослідних зразках. Оцінені зміни фізичного стану зразків за приростом маси при моделюванні статичного високотемпературного навантаження шляхом витримки у обмеженому просторі електричної печі при температурі 1100 °С. Визначено, що приріст маси зразків із збільшенням вмісту ітрію змінюється за лінійною залежністю та суттєво відрізняється від характеру приросту маси за умовами моделювання динамічного навантаження у середовищі палаючої газової ізооктан-пропан-бутанові суміші при температурі 950-1020 °С

Ключові слова: *ущільнювальні покриття, температура, приріст маси, моделювання, статичне навантаження, вміст ітрію*

Вступ. Відомо, що застосування жаростійких ущільнювальних покриттів у рухомих трибоз'єднаннях ГТУ є ефективним конструкторсько-технологічним рішенням, яке спрямоване на зменшення втрат потужності в умовах зміни допустимого зазору за режимами їх роботи та дії високотемпературного агресивного газового потоку. Останнє, по-перше, викликає ерозійне зношування робочих поверхонь – це негативний фактор впливу, і, по-друге є джерелом надпотужної зайвої енергії, використання якої є корисним, якщо передбачаються прогнозовані структурно-фазові перетворення у попередньо створених вихідних структурах. Тобто існують можливості для здійснення процесів самоорганізації в умовах високотемпературного навантаження.

Аналіз публікацій та постановка мети досліджень. Експлуатаційні властивості жароміцних ітрієвих покриттів, які використовуються у рухомих високотемпературних трибоз'єднаннях газотурбінних установок, формуються на робочих поверхнях на двох етапах їх створення. Перший етап полягає у нанесенні на поверхню деталі порошкових лігатур покриття КНА-82 (нікель (основа), кремній, алюміній та тверді мастила (графіт і нітрид бору) із додаванням ітрію у газополум'яний та іоноплазмовий спосіб. При цьому з урахуванням надійного адгезійного зв'язку покриття з основою у його об'ємі формуються структури з первинними фізико-механічними властивостями: твердість, міцність, пластичність, теплопровідність, теплове розширення тощо.

Зазначені властивості поверхнево-об'ємних структур обумовлюють наслідки першочергової механічної взаємодії з контртілом. На другому етапі первинні структури на перших хвилинах пуску газотурбінної установки починають сприймати вплив високотемпературного потоку продуктів горіння паливо-повітряної суміші, що зумовлює вторинне протікання структурно-фазових перетворень. Службові властивості покриттів вже прогнозовано будуть відрізнятися за вихідні за рахунок створення нових фаз та сполук. При цьому, як попередньо встановлено, каталітичний вплив роль буде грати вміст ітрію [1-4].

В роботі [5] визначено, що результатом високотемпературного динамічного навантаження покриттів (рис. 1) з вмістом ітрію 0,1%; 0,3%; 0,5% у складі лігатур КНА-82 у середовищі палаючої газової ізооктан-пропан-бутанові суміші при температурі $T=950-1020$ °C протягом 30 хв є приріст маси зразків. При цьому цей приріст неоднозначний і пов'язується із утворенням нових кисне - та вуглецевмісних сполук.

Однак, як зазначено, умови моделювання були динамічними, і кількість кисню з навколишнього середовища не лімітувалася, тобто надходило скільки, скільки було за потребою при протіканні хімічних реакцій. Вуглець при цьому був невід'ємною складовою горіння вуглеводневої суміші. Але, наприклад, у відсіках газодинамічного навантаження миттєвих рухливих контактів покриття з контртілом (гребінець ущільнення) кількість кисню обмежена. Цей факт викликає необхідність проведення моделювання зазначених умов експлуатації покриттів, що дасть можливість визначити об'єм можливо утворених нових сполук. Ці умови слід розглядати як статичні.

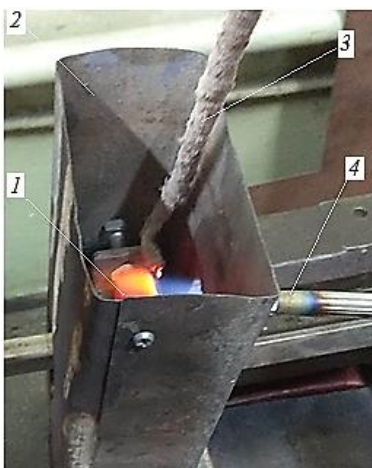


Рис. 1. Взаємодія покриття з факелом полум'я горіння газу:

1 – дослідний зразок; 2 – захисний кожух; 3 – ізольована трубка дроту термопар; 4 – розпилювач пильника

Метою роботи є моделювання статичного високотемпературного навантаження ітріймісних покриттів та здійснення оцінки характеру приросту їх маси у порівнянні із високотемпературним динамічним навантаженням.

Методика проведення досліджень. Статичне високотемпературне навантаження ітріймісних покриттів, які були використанні у роботі [4] здійснювали шляхом витримки у муфельної електропечі СНО-1,6.2,5.1/12,5 ІІ при температурі $T=1100$ °С протягом 3 годин.

Ваговий знос зразків вимірявся на електронних вагах AXIS ANAG 100 з дискретністю 0,0001 г. Кількість зразків за кожним покриттям становила $n=3$. Для аналізу використовувались середньоарифметичні значення. Середнє середньоквадратичне відхилення становило $\sigma = 0,0055$ г.

У якості оцінки приросту маси зразків використано швидкість збільшення маси дослідних зразків, яка визначалась за виразом:

$$v_m = \frac{\Delta m}{t}, \quad (1)$$

де Δm - різниця у масі зразку до і після випробувань, мг; t – час випробувань, с.

Цей показник використаний з метою узагальнення часу протікання процесів структурно-фазових перетворень, які однозначно мають місце у досліджуваних ітріймісних покриттях та можливості здійснення порівняльної оцінки відносно умов навантаження. Процеси створення нових хімічних сполуку за часом у об'ємах сформованих покриттів на даному етапі розглядаються як такі, що однозначно мають місце. Але годинний показник за швидкістю протікання та терміном завершення фізико-хімічних перетворень поки що не визначено. Виходячи з цього прийнято допущення, що за часом статичного і динамічного високотемпературного навантаження хімічні перетворення відбулись на перших хвилинах випробувань, а останній час випробувань з певним запасом обумовлював вже сталий фізичний стан. Такий підхід спричинений насамперед тим, що перша ударна хвиля високотемпературного навантаження на поверхневі структури покриттів здійснюється при спалахах гасо-повітряної суміші у камері згоряння ГТУ при його пуску та наступних хвилинах при виході на сталий режим роботи. На ці процеси витрачається до 5 хвилин.

Результати дослідження та їх обговорення. За розрахунковими значеннями швидкості збільшення маси з використанням програми Microsoft Excel побудовані графічні залежності $v_m=f(C_{Y\%})$ та визначені достовірності апроксимації даних, результати наведено на рисунку 2. Значення достовірності $R^2 > 0,8$ графічного виразу отриманих даних вказують на закономірні зміни швидкості приросту маси покриттів у діапазоні концентрацій ітрію, що досліджується.

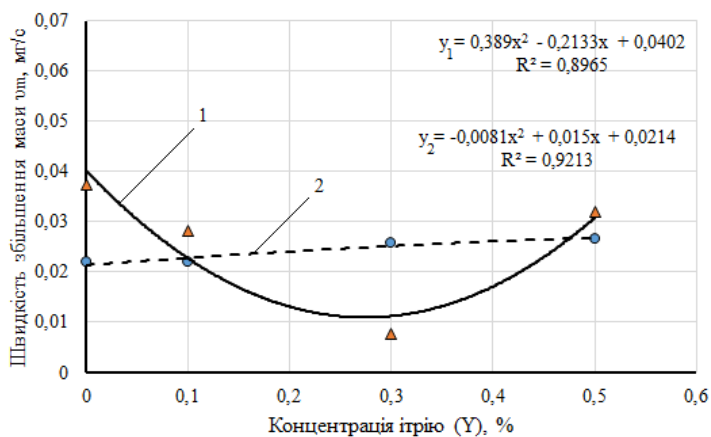
Аналіз отриманих даних відносно швидкості збільшення маси зразків дозволив визначити наступне.

Має місце суттєва різниця у характерах приросту маси зразків в залежності від умов високотемпературного навантаження. Якщо при статичному

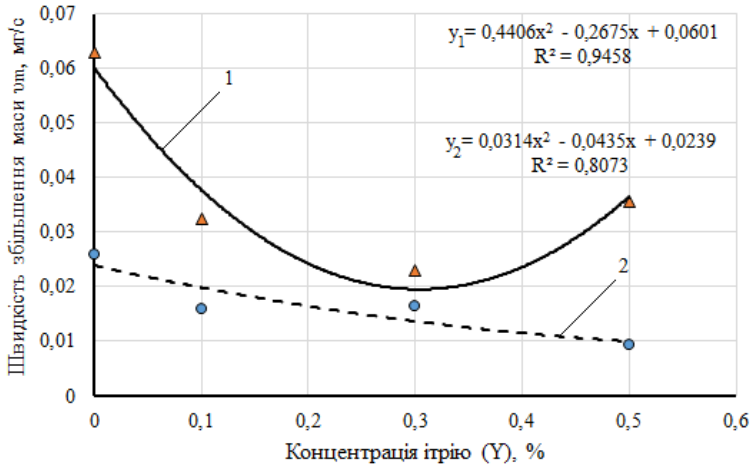
навантаженні швидкості приросту маси мають незначне монотонне збільшення для газополум'яних покриттів, і монотонне зменшення для іоноплазмових покриттів, то при динамічному навантаженні мав місце екстремальний мінімум приросту. При цьому максимальне збільшення маси для газополум'яних покриттів при статичному навантаженні складає 30-35% при концентрації ітрію 0,3-0,5%. А для іоноплазмових покриттів із такою же концентрацією ітрію приріст маси майже у 2 рази менший, ніж у газополум'яних покриттів.

Поля зміни приросту маси газополум'яних покриттів для обох умов навантаження накладаються один на одного, а для іоноплазмових покриттів поля відокремлені один від одного, що пропонується розглядати як графічну модель зміни фізичного стану покриттів за наявності додаткових джерел формування вторинних хімічних сполук у об'ємах покриттів.

Зазначене попередньо пояснюється по-перше, мікрогеометричними параметрами сформованих структур покриттів, по-друге, присутністю вуглецю у середовищі динамічного навантаження. Перше пояснення ґрунтується на тому, що структура покриттів, сформованих у газополум'яний спосіб менш щільна, ніж у покриттів, які сформовані у іоноплазмовий спосіб, що надає можливість кисню проникати у більш глибокі шари та створювати оксидні сполуки. Друге пояснення ґрунтується на тому, що наявність додаткового хімічного елемента безумовно буде сприяти створюванню нових хімічних сполук- карбідів із відповідною молярною масою. Тобто мова може йти про карбід бора B_4C та ітрію YC_2 , але для цього необхідні додаткові рентгеноструктурні дослідження, що планується у подальшому.



a



б

Рис. 2. Вплив вмісту ітрію на приріст маси зразків:

а – покриття сформоване газополуменевим способом; б – покриття сформоване іоноплазмовим способом; 1 – динамічне високотемпературне навантаження;

2 – статичне високотемпературне навантаження

Виходячи з отриманої графічної моделі зміни фізичного стану покриттів мінімальна кількість вторинних сполук за виразом (2) буде мати місце:

- при газополум'яному способі формування з концентрацією ітрію від 0,1% до 0,47%;

- при іоноплазмовому способі формування з концентрацією значно меншого діапазону, тобто від 0,25% до 0,35% (за умовами незначного збільшення кисню у середовищі взаємодії).

$$N_{min}^{BT} = N_{сеп}^{вих} + \sum_{i=1}^n N_{XO} + \sum_{j=1}^m N_{YC} \quad (2)$$

де $N_{сеп}^{вих}$ - вихідна кількість сполук з початковою масою, мг; $\sum_{i=1}^n N_{XO}$ - кількість знову створених оксидів з відповідною масою, мг; $\sum_{j=1}^m N_{YC}$ - кількість знову створених карбідів з відповідною масою, мг.

Якщо виключити показник протікання фізико-хімічних процесів за часом та оцінювати виключно приріст маси покриттів, то отримані закономірності не зміняться, а пряме порівняння отриманих даних буде мати інший вигляд (таблиця 1).

Таблиця 1

Дані із збільшення маси покриттів дослідних зразків

Номер зразку	Спосіб формування покриття	Вміст ітрію, %	Δm, %	
			Динамічне навантаження	Статичне навантаження
1	газополум'яний	0	0,13	0,47
2		0,1	0,09	0,48
3		0,3	0,03	0,58
4		0,5	0,11	0,55
5	іоноплазмовий	0	0,21	0,53
6		0,1	0,11	0,38
7		0,3	0,08	0,35
8		0,5	0,12	0,18

Отже, у даному випадку приріст маси матеріалів покриттів при статичному навантаженні значно більший, ніж при динамічному. При цьому для покриттів, які сформовані у газополум'яний спосіб зазначене збільшення складає в середньому у 4,6 разів, для іоноплазмового відповідно у 3,4 рази. Отримане пояснюється процесами створення оксидів нікелю NiO, ітрію Y₂O₃, бору B₂O₃ за рахунок вільного кисню, який знаходився у камери електropечі при моделюванні високотемпературного навантаження. Значно менший приріст маси при динамічному навантаженні пояснюється швидкістю протікання реакцій окислення, опір її протікання спричиняв спрямований потік палаючої газової ізооктан-пропан-бутанові суміші який з певною швидкістю обдував поверхню покриттів.

Висновки. Результати проведених модельованих умов високотемпературних навантажень дозволили опосередковано визначити характер змін у фізичному стані ітрійвмісних покриттів, що є необхідним для подальшого врахування зазначеного фактору при розробці рекомендацій для практичного впровадження результатів досліджень. Основним підґрунтям для цього слід вважати механічні властивості вторинних структур у приповерхневих шарах покриттів, які утворюються високотемпературним середовищем і каталітичним впливом ітрію в залежності від способу формування вихідних структур.

Наведені та розглянути підходи до оцінки характеру збільшення маси зразків вказують на необхідність врахування часу протікання структурно-

фазових перетворень та хімічних реакцій створення оксидів та карбідів із лігатур матеріала покриттів.

Список літератури

1. Білик І.І., Руденький С.О. Технологія нанесення покриттів та їх властивості. Навчальний посібник. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/56927/1/Tekhnolohiia_nanesennia_pokryttiv_ta_yikh_vlastyvosti.pdf
2. Копей Б. В. Підвищення надійності газотранспортних систем: монографія / Б. В. Копей, А. Бенмуна, В. І. Слободян, А. Беллауар, С. І. Галій, Д. Халімі, А. М. Найда. Серія «Нафтогазове обладнання», том 8. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2012. 300 с.
3. Грешта В. Л., Ткач Д. В., Климов О. В., Сотніков Є. Г., Леховіцер З. В. Дослідження впливу легування на температурний коефіцієнт лінійного розширення покриттів. Авиационно-космическая техника и технология, 2018, № 7(151). С.81-87
4. Fasol Y., Kubich V. Analysis of the coefficient of linear thermal expansion of sealing coatings of gas turbine engine parts (2023)/ International young scientists conference on materials science and surface engineering (September 27-29). Karpenko Physico-Mechanical Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine. Lviv: с 25-27.
5. Кубіч В.І., Фасоль Є.О. Визначальні випробування жароміцних ущільнювальних ітрійвмісних покриттів на високотемпературну газоерозійну стійкість/ Проблеми тертя та зношування. №3(100), 2023. К.: НАУ. С.40-48

Стаття надійшла до редакції 23.01.2024

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>.

Чернета Олег Георгійович - канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри «Автомобілів та транспортно-логістичних систем» Дніпровський державний технічний університет, вул. Дніпробудівська, 2, м. Каменське, Україна, 51918, E-mail: OCherneta@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3871-6923>

V. I. KUBICH, Ye. O. FASOL, O.G. CHERNETA

INFLUENCE OF HIGH-TEMPERATURE LOADING CONDITIONS ON CHANGES IN THE PHYSICAL STATE OF YTTRIUM-CONTAINING COATINGS

The results of studies of the initial structures of high temperature resistant sealing coatings with yttrium content of 0.1%, 0.3% and 0.5% in the composition of KNA-82 ligatures, which were previously formed by gas flame and ion plasma methods on small-sized prototypes, are presented. The changes in the physical state of the samples in terms of mass gain during the simulation of static high-temperature loading by holding them in a confined space of an electric furnace at a temperature of 1100 °C were evaluated. It is determined that the mass gain of samples with increasing yttrium content varies linearly and significantly differs from the nature of the mass gain under the conditions of modelling dynamic loading in a burning iso-octane-propane-butane gas mixture at a temperature of 950-1020 °C. It is determined that the maximum mass increase for gas-flame coatings under static loading is 30-35% at the yttrium concentration of 0.3-0.5%. However, for ionoplasma coatings with the same yttrium concentration, the mass gain is almost 2 times less than that of gas flame coatings. Comparing the peculiarities of changes in the rate of increase in the mass of coatings under dynamic conditions of high-temperature loading, a graphical model of changes in the physical state of coatings was obtained, according to which the minimum amount of secondary compounds will occur at the gas-flame method of formation with a yttrium concentration of 0.1% to 0.47%, at the ion-plasma method of formation with a concentration of 0.25% to 0.35% (under conditions of a slight increase in oxygen in the interaction medium). It was determined that, without taking into account the time of structural-phase transformations and chemical reactions, the weight gain of coating materials under static loading is much greater than under dynamic loading.

Keywords: sealing coatings, temperature, weight gain, modelling, static load, yttrium content

References

1. Bilyk I.I., Rudenkyi S.O. Tekhnolohiia nanesennia pokryttiv ta yikh vlastyvoli. Navchalnyi posibnyk. K.: KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2023. https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/56927/1/Tekhnolohiia_nanesennia_pokryttiv_ta_yikh_vlastyvoli.pdf
2. Kopei B. V. Pidvyshchennia nadiinosti hazotransportnykh system: monohrafiia / B. V. Kopei, A. Benmuna, V. I. Slobodian, A. Bellauar, S. I. Halii, D. Khalimi, A. M. Naida. Seriia «Naftohazove obladnannia», tom 8. Ivano-Frankivsk: IFNTUNH, 2012. 300 s.
3. Hreshta V. L., Tkach D. V., Klymov O. V, Sotnikov Ye. H., Lekhovitser Z. V. Doslidzhennia vplyvu lehuвання na temperaturnyi koefitsient liniinoho rozshyrennia pokryttiv. Avyatsyonno-kosmycheskaia tekhnika y tekhnolohyia, 2018, № 7(151). S.81-87
4. Fasol Y., Kubich V. Analysis of the coefficient of linear thermal expansion of sealing coatings of gas turbine engine parts (2023)/ International young scientists conference on materials science and surface engineering (September 27-29). Karpenko Physico-Mechanical Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine. Lviv: c 25-27.

5. Kubich V.I., Fasol Ye.O. Vyznachalni vyprobuvannia zharomitsnykh ushchilniuvalnykh itriivmisnykh pokryttiv na vysokotemperaturnu hazoeroziinu stiikist/ Problemy tertia ta znoshuvannia. №3(100), 2023. K.: NAU. S.40-48

Kubich Vadim Ivanovich – 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>.

Cherneta Oleg Georgievich - PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of automobiles and automotive industry Dniprovsky State Technical University, Kamianske, Str. Dniprobudovskaya, 2, Kamenske, Ukraine, 51918, E-mail: OCherneta@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3871-6923>