

Перспективність використання ущільнювальних покриттів на основі нікелю в гарячому тракті газотурбінних двигунів

В. Л. Грешта, кандидат технічних наук, професор, професор кафедри,
greshta@zpu.edu.ua,

Д. В. Ткач, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри,
darynka.odarkivna@gmail.com,

Є. Г. Сотніков*, кандидат технічних наук, начальник цеху

О. В. Климов, кандидат технічних наук, доцент, декан факультету,
klimovo@zntu.edu.ua

Є. О. Фасоль, асистент кафедри, selvluna@gmail.com

Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя

*АТ «Мотор Січ», Запоріжжя

Виконано аналіз можливостей підвищення температури експлуатації газотермічних ущільнювальних покриттів на нікелевій основі легуванням рідкісноземельними металами. За літературними даними температура експлуатації газотермічних ущільнювальних покриттів на нікелевій основі, що легко спрацьовують сягає близько 900 °С, а її підвищення можливе за рахунок легування матеріалу покриттів рідкісноземельними металами (РЗМ). Відмічається позитивний вплив легування РЗМ, особливо ітрію, на експлуатаційні властивості жароміцних сплавів на нікелевій основі. Введення в жароміцний сплав 0,01...0,05 % Y підвищує його термічну стабільність, уповільнює коагуляцію основної зміцнювальної γ'-фази та утворення подвійного карбиду M_6C несприятливої морфології. Легування ітрієм сприяє утворенню на поверхні сплаву захисних оксидів $Ni(Cr, Al, Y)_2O_4$ та $(Cr, Y)_2O_3$. Також зазначено, що мікролегування Hf, La, Ce, Zr, Y, Yb, Th, Er підвищує адгезію оксидної плівки, а введення лантану в сплав типу ВКНА дозволяє сформувати в сплавах модифіковану структуру, яка стабілізована нанорозмірними виділеннями лантанідів нікелю і алюмінію та нанорозмірними виділеннями фаз, утворених тугоплавкими елементами.

В дослідженні розглядається вплив легування ущільнювального покриття типу КНА ітріїмісткими лігатурами (порошок лігатури Ni-Y, чистий ітрій, порошок лігатури Co-Ni-Cr-Al-Y). Для визначення розподілу хімічних елементів проведено мікрорентгеноспектральні дослідження. Зазначається позитивний вплив легування ітрієм на підвищення дисперсності та рівномірності розподілу елементів, про що свідчить те, що найбільш рівномірний розподіл елементів спостерігається у покриттів легованих монолігатурою Y та комплексною лігатурою Co-Ni-Cr-Al-Y.

Ключові слова: ущільнювальні покриття, нікелевий сплав, газотермічне покриття, рідкісноземельний метал, мікролегування, експлуатаційні властивості.

Реалії розвитку вітчизняного авіадвигунобудування потребують пошуку та реалізації нових конструкторських рішень щодо з підвищення потужності та коефіцієнта корисної дії газотурбінних двигунів (ГТД).

Одним із основних напрямів удосконалення конструкції двигуна, спрямованих на зниження втрат газового потоку і раціоналізації паливних витрат, є зменшення радіальних зазорів в роторно-статорній частині двигуна ущільнювальних покриттів. При цьому, зважаючи на умови експлуатації газотурбінних двигунів (високоградієнтне термоциклювання і, відповідно, значні зміни об'єму матеріалів деталей ГТД при термічному розширенні) необхідно вирішувати складні технологічні задачі, виходячи з умов мінімізації радіальних зазорів, з одного боку, та запобігання схопленню та заклинюванню елементів конструкції двигуна, що обертається, з іншого боку. Одним з таких компромісних рішень, по суті, є створення ущільнювальних покриттів, які легко припрацьовуються на початкових етапах експлуатації двигуна із формуванням характерного рельєфу відповідно до контурів роторних деталей двигуна та в подальшому зберігають сформовану геометрію покриттів за умов впливу високотемпературного агресивного газового потоку.

Вважається [1], що при температурах вищих за 1100 °С доцільно застосовувати керамічні матеріали, проте це призводить до абразивного зношування лопаток і потребує напilenня на їх лезо додаткових захисних покриттів. Газотермічні ущільнювальні покриття на нікелевій основі, в свою чергу, досить легко спрацьовуються, проте такі покриття зберігають задовільні експлуатаційні характеристики при температурах близько 900 °С. Підвищення температури експлуатації можливе за рахунок легування матеріалу покриттів рідкісноземельними металами (РЗМ). Наприклад, введення лантану в сплав типу ВКНА (ПК75Ю23В) дозволяє сформувати модифіковану структуру, яка стабілізована нанорозмірними виділеннями лантанідів нікелю та алюмінію і нанорозмірними виділеннями фаз, утворених тугоплавкими елементами [2]. При цьому відзначається підвищення довговічності 1000...1200 °С: в 1,7 рази – для сплавів типу ВКНВ-1В із 0,5 % Re та в 3 рази – для сплавів типу ВКНА-25 із 1,2 % Re і Co. Проте лантаніди Al_2La , Ni_3La_2 можуть сприяти утворенню мікротріщин, і тим самим знецінювати сплав [3].

Введення в нікелевий сплав 0,01...0,05 % Y підвищує його термічну стабільність, уповільнює коагуляцію основної зміцнювальної γ' -фази та утворення подвійного карбіду M_6C несприятливої морфології [4]. Ітрій сприяє також утворенню на поверхні сплаву захисних оксидів $Ni(Cr, Al, Y)_2O_4$ та $(Cr, Y)_2O_3$ [5].

В роботі [6] показано, що легування нікелевого сплаву ЖС47 лантаном і ітрієм дозволяє істотно підвищити його жаростійкість. В роботі [7] зазначено, що введення ітрію позитивно позначається на жаростійкості тільки при наявності в сплаві хрому, не менше 13 %. Хром підвищує опір сульфідній корозії сплавів Ni-Co-Cr-Al-Y з невисоким вмістом алюмінію та рівномірно розподіляється в γ -твердому розчині. В роботі [8] вказано, що мікролегування Hf, La, Ce, Zr, Y, Yb, Th, Er дозволяє підвищити адгезію оксидної плівки.

Технічна інформація

Отже, легування рідкісноземельними елементами дозволяє підвищити експлуатаційні характеристики жароміцних сплавів на нікелевій основі, проте в літературі практично відсутні дані, щодо їх впливу на структуру та властивості газотермічних ущільнювальних покриттів.

Виходячи з цього досліджено вплив легування ущільнювального покриття типу КНА (1.5-2.5 % С, 0.3-1.2 % Al, 7-13 % BN, 91.8-83.3 % Ni+Si) ітріймісткими лігатурами на можливість підвищення температури його експлуатації до 1050-1100 °С. Дослідження проводили на ущільнювальних покриттях, що застосовуються АТ «МОТОР СІЧ» при виробництві авіаційних двигунів. З метою визначення хімічного складу та характеру розподілу хімічних елементів в структурі покриттів були проведені рентгенівський флюоресцентний та рентгеноспектральний аналізи. За результатами проведених досліджень було встановлено вміст ітрію на різних етапах формування досліджуваних покриттів (таблиця).

Склад вихідного матеріалу та вміст ітрію (% мас.)

№ п/п	Матеріал	Склад	Вміст ітрію, %		
			Лігатура	Шихта	Покриття
1	Покриття складу №1	КНА-82 + порошок лігатури Ni-Y	18,4	0,3	0,3
2	Покриття складу №2	КНА-82 + чистий ітрій	99	2,3	2,1
3	Покриття складу №3	КНА-82 + порошок лігатури Co-Ni-Cr-Al-Y	0,7	0,1	0,1
4	Покриття складу №4	КНА-82	-	-	-

Для визначення розподілу хімічних елементів в ущільнювальному покритті за перетином шліфа було проведено мікрорентгеноспектральні дослідження. Розподіл основних елементів наведено на рис. 1 – 4.

На отриманих спектрограмах чітко виявляється проміжний світлий шар з нікель-хромової композиції, який наноситься для компенсації напружень, які виникають під час формування ущільнювальних покриттів за рахунок зменшення різниці температурного коефіцієнту лінійного розширення. Також фіксується наявність глобулярних виділень оксидних включень алюмінію та кремнію (світлі вкраплення). Слід відзначити позитивний вплив легування ітрієм на підвищення дисперсності та рівномірності розподілу елементів в площині шліфа. Причому найбільш

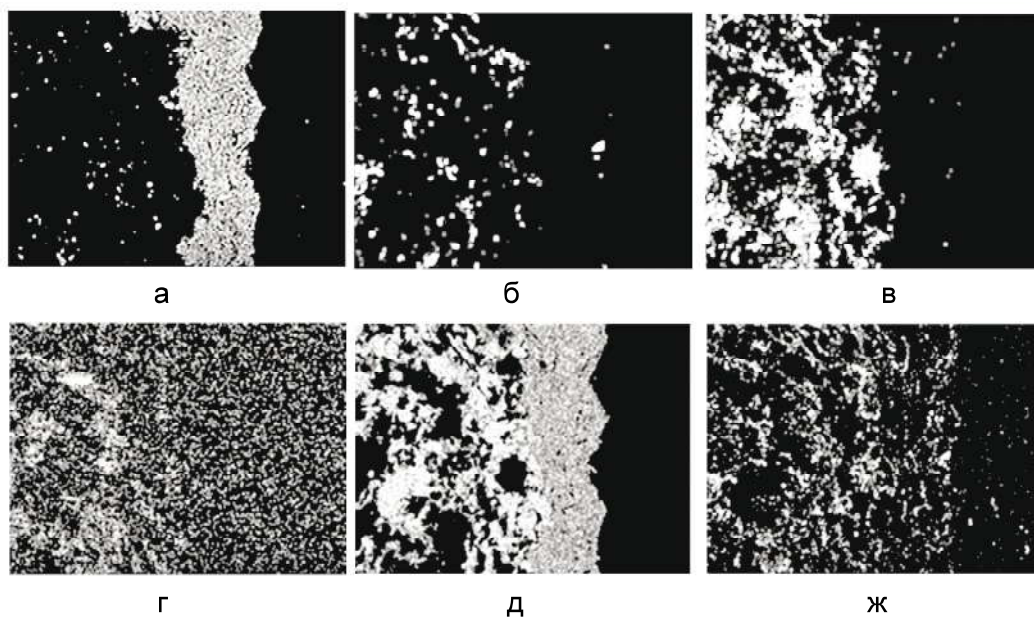


Рис.1. Розподіл хімічних елементів в покритті KHA-82+Ni-Y: а – Cr; б – Al; в – Si; г – B; д – Ni; ж – O.

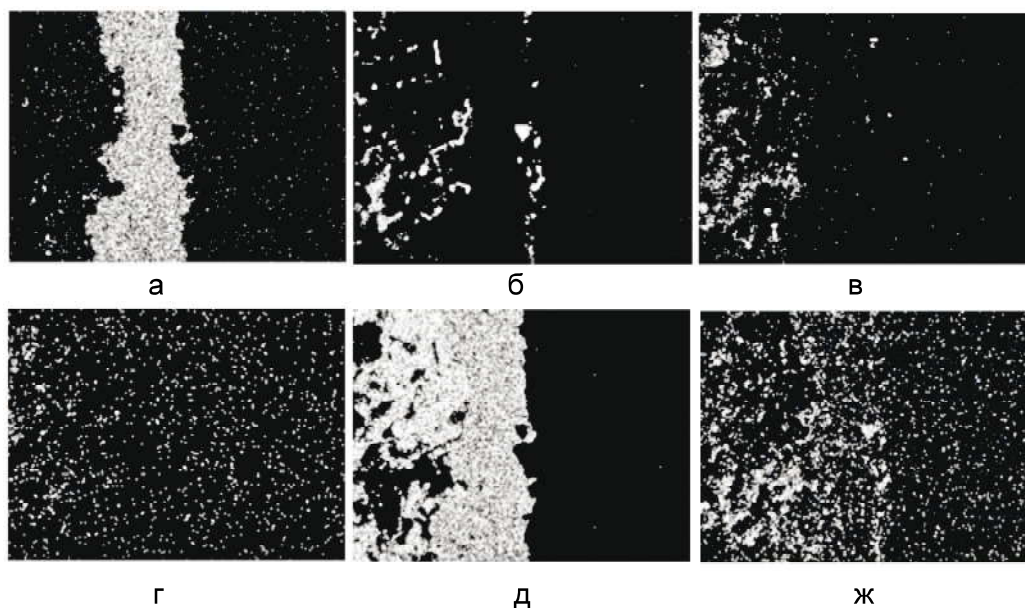


Рис. 2. Розподіл хімічних елементів в покритті KHA-82+Y: а – Cr; б – Al; в – Si; г – B; д – Ni; ж – O.

рівномірний розподіл елементів спостерігається у покриттів легованих монолігатурою Y та комплексною лігатурою Co-Ni-Cr-Al-Y. Незначна кількість хрому і алюмінію, що знаходяться в матеріалі покриття досить нерівномірно розподіляється і утворює оксиди на поверхні пор.

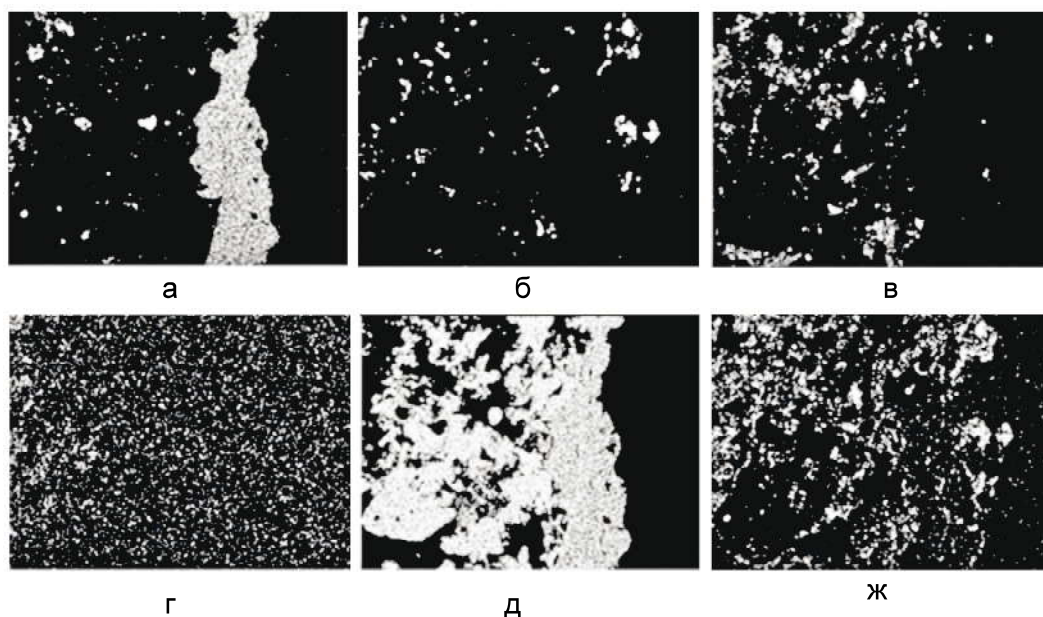


Рис. 3. Розподіл хімічних елементів в покритті КНА-82+Co-Ni-Cr-Al-Y: а – Cr; б – Al; в – Si; г – B; д – Ni; ж – O.

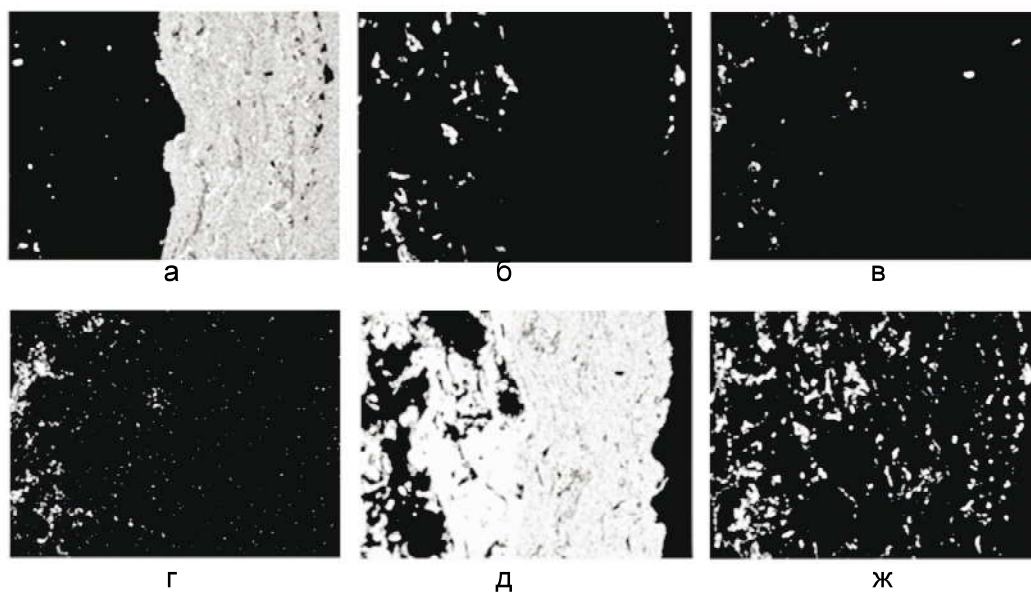


Рис. 4. Розподіл хімічних елементів в покритті КНА-82: а – Cr; б – Al; в – Si; г – B; д – Ni; ж – O.

Нітрид бору розподілений за перерізом шліфа більш рівномірно, проте у випадку покриттів КНА-82 та КНА-82 легованого Ni-Y спостерігається його накопичення в окремих порах (світлі крапління).

Таким чином, оцінка хімічного складу та розподілу хімічних елементів за перерізом ущільнювального покриття дозволила встановити позитивний

вплив ітрію на розподіл елементів. Ймовірно це пов'язано з його рафінуючою дією та здатністю до модифікування завдяки високій хімічній активності.

Раніш в роботі [9] було також показано позитивний вплив ітрію на експлуатаційні властивості ущільнювальних покриттів типу КНА. Однак проведені дослідження є достатньо обмеженими, оскільки отримані результати хоча і дозволили підвищити температуру експлуатації ущільнювальних покриттів, проте їх недостатньо, щоб можна було управляти властивостями залежно від умов експлуатації. Доцільно проведення комплексного дослідження щодо впливу мікролегуювання РЗМ на структуру та властивості ущільнювальних покриттів на нікелевій основі. Це дозволить розробити науковий підхід до управління процесами формування заданої структури покриттів при їх розробці та удосконаленні.

Література

1. Chupp R. E., Lau Y.-C., Ghasripoor F., Baldwin, D. J., Ng C., McGovern T., Berkeley, D. Development of Higher Temperature Abradable Seals for Gas Turbine Applications. Vol. 4, Turbo Expo 2004. doi:10.1115/gt2004-53029
2. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение: итоги и перспективы // Вестник Российской академии наук. – 2002. – №1. – С. 3–12.
3. Козлов Э.В. Влияние легирования лантаном на фазовый состав суперсплава на основе Ni-Al-Cr // Вестник Тамбовского университета. – 2013. – Т. 18, №. 4-2
4. Крюков Ш. И., Масалева Е. Н., Рыбников А.И. Влияние малых добавок иттрия на структуру и фазовый состав сплава ЖС6К // МнТОМ. – 1983. – № 3. – С. 44-47.
5. Томашов Н. Д., Чернова Г.П. Теория коррозии и коррозионностойкие конструкционные сплавы. – М.: Металлургия, 1993. – 472 с.
6. Сидоров В.В. Влияние лантана и иттрия на жаростойкость монокристаллов из жаропрочных высокорениевых никелевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. – 2005. – №1. – С. 7–15
7. Альтовский Р. М. Коррозионные свойства иттрия. – М: Атомиздат, 1969. – 354 с.
8. Абраимов Н.В. Высокотемпературные материалы и покрытия для газовых турбин. – М.: Машиностроение, 1993. – 336 с.
9. Gresha V., Tkach D., Sotnikov Ye., Pavlenko D., Klymov O. Studying and designing improved coatings for labyrinth seals of gas-turbine engine turbines // Eastern-european jornal of enterprise technologies. – 2018. Vol. 4, 12 (94). P. 56-63.

References

1. Chupp R. E., Lau Y.-C., Ghasripoor F., Baldwin, D. J., Ng C., McGovern T., Berkeley, D. *Development of Higher Temperature Abradable Seals for Gas Turbine Applications*. Vol. 4, Turbo Expo 2004. [in English]. <https://doi.org/10.1115/GT2004-53029>.
2. Kablov E. N., *Visnyk Rosiyskoyi akademiyi nauk*, 2002, No.1, pp. 3-12 [in Russian].
3. Kozlov E. V. *Visnyk Tambovskoho universytetu*, 2013, T. 18, No. 4-2. [in Russian].
4. Kryukov SH. I., Masaleva E. N., Rybnykov A.I., *MiTOM*, 1983, No. 3. pp. 44-47 [in Russian].

5. Tomashov N.D., Chernova H.P. *Teoriya korozii i korozionostoykosti konstruktsionnykh splavov* (Corrosion Theory and Corrosion Resistant Structural Alloys), Moscow, Metalurhiya, 1993, 472 p. [in Russian].
6. Sydorov V.V., *Aviatsionni materialy ta tekhnolohiyi*, 2005, No.1, pp. 7-15 [in Russian].
7. Altovskiy R. M. *Korozionni vlastyvoosti itriyu* (Corrosive properties of yttrium.), Moscow, Atomyzdat, 1969, 354 p. [in Russian].
8. Abraimov N.V. *Vysokotemperaturni materialy i pokryttya dlya hazovykh turbin* (High temperature gas turbine materials and coatings), Moscow, Mashynobuduvannya. 1993, 336 p. [in Russian].
9. Greshta V., Tkach D., Sotnikov Ye., Pavlenko D., Klymov O., *Estern-european journal of enterprise technologies*. 2018, Vol. 4, 12 (94), pp. 56-63 [in English]. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.140912>.

Одержано 19.03.20

V. L. Greshta, D. V. Tkach, Ye. H. Sotnikov, O. V. Klymov, Ye. O. Fasol

The prospect of using nickel-based sealing coatings in the hot tract of gas turbine engines

Summary

In work the analysis of the possibility of raising the operating temperature sealing thermal coatings on Nickel-based alloying by rare-earth metals. The literature review indicates that the operating temperature of the thermal sealing to Nickel-based that are easy to work reaches about 900 °C, and its increase is possible by alloying the material of the coatings of rare earth metals (REM). Therefore, there is a positive effect of doping rare-earth metals, especially yttrium, the performance properties of high-temperature Nickel-based alloys. First of all it is known that the introduction of heat-resistant alloy is: 0.01...0.05 % of Y improves thermal stability, retards coagulation γ' the main strengthening phase and formation of a double carbide M_6C unfavorable morphology. The introduction of yttrium promotes the formation on the surface of the protective alloy oxide, $Ni(Cr, Al, Y)_2O_4$ and $(Cr, Y)_2O_3$. Also stated that the microalloying of Hf, La, Ce, Zr, Y, Yb, Th, Er increases the adhesion of the oxide film, and the introduction of lanthanum in the alloy of VKNA type allows to form in the alloys modified structure, which is stabilized by nanometer-sized precipitates of lanthanide Nickel and aluminum and nano-size precipitates of the phases formed by refractory elements. However, it is established that the works devoted to the study of the influence of doping on thermal spray coatings is not sufficient.

The study examines the effect of doping the sealing cover type kPa aristarain ligatures. To determine the distribution of chemical elements carried out microprobe studies. There is a positive effect of alloying yttrium on improvement of dispersion and uniformity of distribution of elements, as evidenced by the fact that the most uniform distribution of elements is observed in the doped coatings with monolateral Y and complex alloys Co-Ni-Cr-Al-Y.

Keywords: sealing coatings, nickel alloy, gas-thermal coating, rare earth metal, microalloying, operating properties.