

УДК 669.058:669.24

Канд. техн. наук Грешта В. Л.¹, канд. техн. наук Ткач Д. В.¹, Сотніков Є. Г.²
канд. техн. наук Леховіцер З. В.², канд. техн. наук Климов О. В.¹, Фасоль Є. О.¹

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

ОСОБЛИВОСТІ ВИБОРУ ЛІГАТУРИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ УЩІЛЬНЮВАЛЬНИХ ПОКРИТТІВ ДЕТАЛЕЙ ТУРБИНИ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

Мета роботи. Проаналізовано вплив легування на мікроструктуру та фазовий склад ущільнювальних покриттів та запропоновано вдосконалений хімічний склад покриттів, який міг би забезпечити задовільний комплекс фізико-механічних властивостей. Для вирішення поставленої задачі було обрано ущільнювальне покриття на основі нікелю, яке застосовується на авіадвигунобудівному підприємстві України АТ «Мотор Січ».

Наукова новизна. Було розроблено склад ущільнювального покриття із змінними контрольованими на окремих етапах експлуатації двигуна фізико-механічними властивостями, які обумовлені розвитком структурно-фазових перетворень, що супроводжуються появою нових шпінельних оксидних сполук та, як наслідок, покращенням ерозійної стійкості та опору газовій корозії.

Методи дослідження. Проведено аналіз літературних джерел, на основі яких було поставлено практичні задачі щодо вибору складу покриттів типу КНА-82. В роботі використано результати мікроаналізу та досліджень механічних властивостей.

Отримані результати. В роботі проаналізовано можливості покращення властивостей покриття типу КНА-82 із експлуатаційною стійкістю до температур 900–950 °С. Сучасні тенденції з конструювання авіаційних двигунів потребують удосконалення матеріалів ущільнювальних покриттів, які б зберігали вихідні фізико-механічні властивості і не зазнавали деструктивних змін при більш високих температурах на рівні 1100–1200 °С. Підвищення високотемпературної стійкості і, загалом, комплексу фізико-механічних властивостей покриттів типу КНА-82 може забезпечуватись удосконаленням їх хімічного складу при використанні окремих лігатур з рідкісноземельними металами, які б сприяли покращенню термічної стійкості поверхневих оксидних шарів з одночасною реалізацією контрольованих поетапних фазових перетворень, спрямованих на поліпшення ерозійної стійкості та міцності сформованих покриттів. У зв'язку з цим, для вирішення цієї комплексної задачі, в роботі було запропоновано використовувати комбінації лігатур з монокомпонентом ітрієм (Y), подвійною композицією – Ni-Y та зі складною системою Co-Ni-Cr-Al-Y.

Вибір ітрію як складової, що буде наявна в усіх варіантах експериментальних покриттів, обумовлений багатьма факторами, зокрема це достатньо висока розповсюдженість в земній корі, висока температура плавлення, забезпечення рафінуючої дії, завдяки високій хімічній активності, позитивний вплив на морфологію включень і структурну стабільність завдяки горючій здатності, зменшення ліквідаційної неоднорідності та запобігання утворенню ТЩП фаз. Отже, використання трьох лігатур різного складу, що містять ітрії, які повинні забезпечувати формування в структурі різних за природою оксидних та інтерметалідних сполук, і різні стадії перетворень, дозволяє отримати конкретні варіації структури покриттів з певним кількісним співвідношенням структурних складових, яке в кінцевому плані буде визначати функціональність запропонованих покриттів.

Практична цінність. Застосування цього покриття дозволить підвищити коефіцієнт корисної дії двигуна завдяки зменшенню витоку газів при збереженні розміру радіальних зазорів та знизити витрати палива за годину.

Ключові слова: ущільнювальне покриття, нікелевий сплав, рідкісноземельні метали, газотурбінний двигун, жаростійкість, ітрії.

Вступ

Сучасні реалії розвитку авіадвигунобудівної галузі потребують пошуку та реалізації нових конструкторських рішень з підвищення потужності та коефіцієнта корисної дії (ККД) газотурбінних двигунів (ГТД). Відповідні

задачі переважно вирішуються шляхом підвищення робочих температур, зменшення ваги вузлів і агрегатів та зниженням витрат палива.

Одним із основних напрямів удосконалення конструкції двигуна, спрямованих на зниження витрат газиво-

го потоку та раціоналізації паливних витрат, є зменшення радіальних зазорів в роторно-статорній частині двигуна із застосуванням лабіринтних ущільнень. При цьому, зважаючи на умови експлуатації газотурбінних двигунів, що передбачають високоградієнтне термоциклювання та, 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 і заклинюванню елементів конструкції двигуна, що обертається, з іншого. Одним із таких компромісних рішень, по суті, є створення ущільнювальних покриттів, які легко припрацьовуються на початкових етапах експлуатації двигуна з формуванням характерного рельєфу відповідно до контурів роторних деталей двигуна.

Постановка задачі

Основна проблематика запровадження відповідних технологічних розробок полягає у збереженні сформованої геометрії покриттів під дією високотемпературного агресивного газового потоку, який спричиняє руйнування ущільнювального покриття внаслідок дії високотемпературної корозії та механічного ерозійного зношування.

На даний момент на авіадвигунобудівних підприємствах, зокрема «Мотор Січ», широко використовуються ущільнювальні покриття типу КНА-82 із експлуатаційною стійкістю до температур 900–950°C. Проте сучасні тенденції із конструювання авіаційних двигунів потребують удосконалення матеріалів ущільнювальних покриттів, які б зберігали вихідні фізико-механічні властивості та не зазнавали деструктивних змін при більш високих температурах на рівні 1100–1200 °C.

Підвищення високотемпературної стійкості і, загалом, комплексу фізико-механічних властивостей покриттів типу КНА-82 може забезпечуватись удосконаленням їх хімічного складу при використанні окремих лігатур, які б сприяли покращенню термічної стійкості поверхневих оксидних шарів із одночасною реалізацією контрольованих поетапних фазових перетворень, спрямованих на поліпшення ерозійної стійкості та міцності сформованих покриттів.

Огляд літератури

Одним зі способів зниження питомих втрат палива та підвищення ККД установок ГТД є запобігання витoku робочого газу через радіальні зазори між роторними і статорними деталями турбін і компресорів ГТД за рахунок зменшення величини радіальних зазорів. Проте це пов'язано з ризиком торкання деталей внаслідок деформації корпусу та ротора при маневруванні літака та роботі ГТД на нестационарних режимах, при вібрації та інших випадках, які можуть призвести до зношування та несправності деталей, що контактують. Вирішується це питання шляхом розробки та використання матеріалів, що стираються та припрацьовуються під час ек-

сплуатації. Матеріали повинні задовільняти вимогам реальних умов роботи.

Сплави на основі тугоплавких елементів Nb, Mo не задовільняють цим вимогам через недостатній опір окисленню [1]. Хоча в роботі [2] вказана перспективність використання сплавів на основі систем Nb-Al і Nb-Si, які зміцнюються внаслідок утворення з'єднань Nb₃Al та Nb₃Si. Проте отримання цих сплавів порошковою металургією достатньо витратне та трудомістке, та на цьому етапі знаходиться в стадії розробки.

Для створення жаростійких покриттів використовують сплави на основі Ni-Cr-Al. Висока жаростійкість цих сплавів обумовлюється створенням плівки виключно стабільних оксидів Cr₂O₃ і Al₂O₃ [3], тобто такі сплави є стійкими до високотемпературної корозії. В роботі [4] розглянуто покриття на основі сплаву Ni-20% Cr-13% Al-0,5% Y, яке наноситься на сплав ЖС6У. Після напилення в сплаві спостерігається ультрадрібнозерниста структура. Така структура забезпечує формування мікродуплексної структури, яка, в свою чергу має високу пластичність та стабільність при високій температурі. В роботі [5] зазначена актуальність використання рідкісноземельних металів (РЗМ) в жаростійких сплавах. Автори зазначають, що РЗМ є рафінувальними добавками, оскільки внаслідок хімічної активності вони нейтралізують шкідливий вплив домішок кисню та сірки при утворенні з ними тугоплавких хімічних з'єднань. З іншого боку, вони як поверхнево-активні елементи розташовуються на поверхнях поділу фаз (границі зерен, границі блоків, міжфазні границі (γ / γ')- фаз тощо). Також слід зазначити, що рідкісноземельні елементи позитивно впливають на структурну стабільність сплавів, зменшують їх ліквідаційну неоднорідність, попереджують утворення шкідливих структурних складових (ГЦП фази, μ - фази тощо).

Введення РЗМ дозволяє додатково підвищити основні характеристики сплавів:

- довговічність при температурах 1000–1100 °C – в 1,5–2 рази, а для сплавів на основі інтерметалідів – в 2–3 рази. Особливо ефективно визначається вплив РЗМ на довговічність на великих базах випробувань (1000–1500 год) [6];

- жаростійкість при робочих температурах – в 1,5–2 рази (зі зміни питомої маси).

Ітрій має низку технологічних переваг порівняно з іншими РЗМ: високі температури плавлення (1550 °C) і кипіння (3000 °C), що дозволяє вводити його через електродне покриття. Оскільки за спорідненістю до кисню [7] ітрій (Y₂O₃ утворюється при $\Delta G = - 1800$ кДж/моль) перевершує інші РЗМ (La₂O₃ – $\Delta G = - 1705,8$ кДж/моль; CeO₂ - $G = - 1025,5$ кДж/моль), він є також і більш активним модифікатором. Крім поліпшення механічних властивостей сталей і сплавів, легування ітрієм сприяє розкисненню, рафінуванню і зменшенню вмісту неметалічних включень у наплавленому матеріалі [8].

В роботі [9] розглянуто вплив введення лантану на структуру сплаву типу ВКНА-1В і ВКНА-25. Встанов-

лено, що лантан дозволяє сформувати в сплавах модифіковану структуру, яка стабілізована нанорозмірними виділеннями лантанідів нікелю та алюмінію та нанорозмірними виділеннями фаз, що утворені тугоплавкими елементами. При цьому відзначено збільшення довговічності при температурах 1000–1200 °С: в ~1,7 рази – для сплавів типу ВКНВ-1В з 0,5 % Re та в ~3 рази – для сплавів типу ВКНА-25 з 1,2 % Re и Со. Проте дослідження фазового складу сплаву Ni-Al-Cr, яке розглянуто в джерелі [10], показує, що лантаніди Al_2La , Ni_3La можуть сприяти утворенню мікротріщин, і тим самим знецінюють сплав.

Розглядаючи окремо вплив ітрію на властивості сплавів, можна зазначити на прикладі сплаву ЖС6К, що введення в сплав 0,0–0,05 % Y підвищує його термічну стабільність, уповільнює коагуляцію основної зміцнювальної γ' - фази та утворення подвійного карбиду M_6C несприятливої морфології [11]. Введення ітрію пригнічує утворення оксиду NiO, який не має захисних властивостей та сприяє утворенню на поверхні металу захисних оксидів $Ni(Cr, Al, Y)_2O_4$ та $(Cr, Y)_2O_3$ [12]. Термодинамічна активність ітрію дуже велика. Його стандартний електродхімічний потенціал дорівнює –2,37 В. Стационарний електродхімічний потенціал значно зсунутий до менш від'ємних значень. Так, у 0,01 M NaCl (pH=7) він дорівнює 1,29 В; 18 % HF становить відповідно 0,3В. Такий зсув потенціалу в позитивну сторону від його стандартного значення характеризує сильну схильність ітрію до пасивації за рахунок утворення стійких плівок Y_2O_3 . Оксид ітрію Y_2O_3 стабільний, практично не леткий та не зазнає фазових перетворень до 1800 °С. Густина 4,87 г/см³, $t_{пл} = 2417$ °С, $t_{кип} = 4297$ °С [13]. Таким чином завдяки утворенню оксидної плівки підвищується корозійна стійкість та жаростійкість сплавів, які леговані ітрієм.

В роботі [14] відзначено позитивний вплив легування ітрієм та лантаном на жаростійкість сплаву ЖС47. Наведені дані показують, що легування сплаву ЖС47 лантаном і ітрієм дозволяє істотно поліпшити його жаростійкість, оскільки величина питомої зміни маси зразків сплаву без РЗМ значно більше, ніж для сплаву з додаванням цих елементів [14].

Проте в роботі [15] зазначено, що введення ітрію позитивно позначається на жаростійкості тільки при наявності хрому, при цьому якщо вміст хрому менше 13 %, додавання ітрію, навпаки, знижує жаростійкість. Хром підвищує опір сульфідної корозії сплавів Ni-Co-Cr-Al-Y з невисоким вмістом алюмінію та рівномірно розподіляється в γ -твердому розчині. В сплавах з високим вмістом алюмінію підвищення вмісту хрому не призводить до зростання опору корозії.

Окрім властивостей жаростійкості, корозійної стійкості ущільнювальні покриття повинні в процесі експлуатації задовільно припрацьовуватись. В роботі [16] розглянуті ущільнювальні покриття на основі Ni-C та Ni-Cr-Al, які розпилені на підложку BN. Фази в обох покриттях рівномірно розподілені. Покриття мають високу твердість, а в роботі [17] вказано, що чим вища

твердість, тим більша ерозійна стійкість. Отже, використовуючи аналіз літературних даних, слід зазначити, що покриття Ni-Cr-Al характеризується високим коефіцієнтом тертя, має високий коефіцієнт тертя та самозмашувальні властивості.

Трибологічні випробування проведені в роботі [18] показали, що покриття з пари Ni-C нанесені на сплав Ti-6Al-4V, розм'якшується пізніше, ніж основний матеріал, що призводить до руйнування деталі, на відміну від покриття на основі Ni-Cr-Al. Аналогічні випробування проведені на прикладі сплаву системи Co-Ni-Cr-Al-Y, які також наносились на BN, показують, що введення ітрію збільшує твердість, а також сприяє покращенню адгезії покриття з підложкою [19]. Цікавим є те, що завдяки дослідженням [18, 19] можна спрогнозувати стирання ущільнювальних покриттів.

Для покриттів, які експлуатуються при температурах 1100–1200 °С, окрім сплавів на нікелевій основі, можливе було використання жаростійких сплавів на основі можливого використання жаростійких сплавів на основі хрому.

Проте вони характеризуються підвищеною крихкістю при температурах нижче 300–350 °С [20]. Крім того, в процесі тривалих нагрівань при високих температурах жароміцні хромові сплави схильні щодо поглинання азоту, що негативно позначається на їх низькотемпературній пластичності [21]. Цікаві дослідження викладені в роботі [22], які полягають в нанесенні покриттів системи Y-Cr-O на жаростійкі хромові сплави типу ВХ2К. Завдяки таким покриттям намагаються подолати недоліки хромових сплавів, ітрію знижує швидкість випаровування хрому.

Отже, аналіз літературних джерел дозволив встановити, що для підвищення експлуатаційних характеристик сплавів, до яких висувають високі вимоги до жаростійкості, застосовують легування РЗМ металами, зокрема ітрієм. Застосування ітрію дозволяє підвищити жаростійкість покриттів, знижує їх теплопровідність, забезпечує ерозійну стійкість і задовільну припрацьовуваність.

Матеріали дослідження

За базовий матеріал для проведення досліджень було обрано покриття КНА-82, яке на сьогодні успішно застосовується в авіаційних двигунах виробництва АТ «Мотор Січ». У складі цього покриття наявні нікель (основа), кремній, алюміній та тверді змазки (графіт і нітрид бору). Це дозволяє підвищити стійкість матеріалу до сульфідної корозії та забезпечити формування оксидної плівки з високими захисними властивостями та задовільною адгезійною взаємодією з матеріалом.

Для отримання суміші КНА-82 здійснювалося змішування просіяних порошоків нікелю, кремнію та окремо від складу сечовини в змішувачі протягом 6–8 годин. Після чого суміш підлягала відпалюванню при температурі 950 °С упродовж 4 годин. Отриману суміш подрібнювали та просіювали, після чого додавали

ПН75Ю23В. До відпаленої та просіяної суміші додавали порошки нітриду бору, графіту, алюмінію.

Зважаючи на те, що експлуатаційна стійкість покриттів КНА-82 не перевищує 1000 °С, подальше застосування цих покриттів в нових конструкціях розроблюваних перспективних авіаційних двигунів є неефективним внаслідок різкого зниження експлуатаційних характеристик при температурах, вищих за 1100 °С.

Отже, необхідно було визначити систему легування, яка б дозволила підвищити температуру експлуатації ущільнювальних покриттів.

Результати дослідження

У зв'язку з цим, для розв'язання цієї комплексної задачі, в роботі було вирішено використовувати комбінації лігатур з монокомпонентом ітрієм (Y), подвійною композицією Ni-Y та складною системою Co-Ni-Cr-Al-Y.

Вибір ітрію як складової, що буде наявною в усіх варіантах експериментальних покриттів, обумовлений багатьма факторами, зокрема, це достатньо висока розповсюдженість в земній корі, висока температура плавлення, забезпечення рафінувальної дії завдяки високій хімічній активності, позитивний вплив на морфологію включень і структурну стабільність завдяки горючій здатності, зменшення ліквідаційної неоднорідності та запобігання утворенню ГЦП фаз.

Використання ітрію в ущільнювальних покриттях, які повинні відзначатися задовільним опором високотемпературній корозії, зумовлене його високою термодинамічною активністю (електрохімічний потенціал – 2,37 В) та, відповідно, схильністю до пасивації з утворенням стійких оксидних плівок Y_2O_3 .

Оксид ітрію є надзвичайно термостійким, зміцнюється зі зростанням температури, практично не леткий та не зазнає фазових перетворень до 1800 °С. Отже, його утворення на поверхні ущільнювальних покриттів дозволяє суттєво підвищувати їх опір газовій корозії. Утворення твердих оксидних сполук під час експлуатації авіаційного двигуна, в свою чергу, має сприяти вирішенню задачі забезпечення задовільної зносостійкості покриттів вже після формування контурного рельєфу при припрацьовуванні роторно-статорних деталей.

Використання монокомпонентної Y- лігатури дозволяє встановити характер впливу виключно ітрієвої складової покриттів на жаростійкість, припрацьовуваність та ерозійну стійкість при розробці практичних рекомендацій щодо кількісного варіювання ітрію у більш складних композиціях.

Ідея необхідності використання більш складнокомпонентних композицій ітрієвих лігатур обумовлена, знову ж таки, особливостями функціонального призначення ущільнювальних покриттів. Зважаючи на те, що на початковому етапі експлуатації двигуна покриття повинні мати невисоку твердість для більш легкого припрацьовування, а далі поступово зміцнюються після формування геометрії доріжок, що відповідають зовні-

шньому контуру поверхні тертя роторних деталей, було прийняте рішення використовувати такі хімічні склади лігатур, які б могли забезпечувати поетапний розвиток фазових перетворень з утворенням в структурі на різних стадіях спочатку оксидних, а потім і більш термічностабільних інтерметалідних сполук.

Тобто використання моноітрієвої лігатури дає можливість оцінити її додатковий вплив на жаро- та зносостійкість винятково завдяки формуванню стійких плівок та дисперсних частинок Y_2O_3 .

Додавання до складу покриттів подвійної лігатури Ni-Y, ймовірно, при довготривалій високотемпературній експлуатації може супроводжуватися появою в структурі окрім оксидних сполук Y_2O_3 на подальших етапах експлуатації при довготривалому термічному впливі, також і інтерметалідів на основі нікелю. Як наслідок, додаткове твердіння ущільнювальних покриттів завдяки появі нових складнорозчинних інтерметалідних сполук буде відбуватися вже після пропрацьовування контактної поверхні. Використання лігатури саме відповідного складу зумовлене, в свою чергу, прагненням до формування в структурі Ni-Y сполук, які характеризуються високою температурою плавлення на рівні 1500 °С. Також бажано було б за рахунок збільшення вмісту нікелю отримати в структурі інтерметаліди NiAl замість Ni_3Al у зв'язку з їх значно більшою зносостійкістю.

Зважаючи на те, що для забезпечення більш надійного захисту від газової корозії виробів, що експлуатуються при високих температурах, прагнуть сформувати на поверхні складні шпінельні сполуки, які є більш термостійкими порівняно з монокомпонентними оксидами, в роботі було зроблено спробу використання багатокомпонентної ітрієвмісної лігатури Co-Ni-Cr-Al-Y. При цьому, окрім підвищення жаростійкості, також закладалась ідея можливості управління структурою покриттів із реалізацією розвитку процесів виділення вторинних інтерметалідних сполук різної природи внаслідок довготривалого термічного впливу під час експлуатації двигуна.

Не менш важливим фактором вибору саме цього РЗМ у вигляді запропонованих лігатур була його доступність на виробництві. Оскільки для підвищення фізико-механічних властивостей компактних сплавів достатньо вмісту 0,05 %Y, було запропоновано вводити його більшу кількість, що пов'язано зі значною пористістю покриття і, відповідно, більшою площею поверхні. Виходячи з того, що складні схеми введення лігатур до складу покриттів на виробництві застосовувати не бажано (необхідно, щоб технологія їх отримання була простою і зрозумілою для технічного персоналу), було запропоновано вводити до складу покриттів лігатури у відсоткових долях від маси основної шихти, відповідно до цього буде змінюватися вміст ітрію в складі шихти та нанесеному покритті.

Для підвищення жаростійкості покриттів системи Ni-Al-Si доцільно вводити елементи типу Cr, що дозволяє сформувати оксидну плівку з високими захисними

властивостями [23]. Формування оксидів типу Al_2O_3 і Cr_2O_3 має забезпечити високу жаростійкість внаслідок формування щільної плівки на поверхні [24]. Мікролегуювання рідкісноземельними елементами (наприклад, ітрієм) дозволяє підвищити адгезію оксидної плівки.

Оскільки в роботі [25] вказується, що при температурах вище від $1100\text{ }^\circ\text{C}$ можна застосовувати покриття на основі Me-Cr-Al-Y, а досліджені в інших роботах експлуатаційні властивості покриттів на основі Me-Cr-Al-Y показали задовільні результати при температурі порядку $1100\text{ }^\circ\text{C}$, було прийняте рішення, що для підвищення фізико-механічних властивостей покриття в шихту, що готується за серійною технологією, вносити лігатуру, яка містить ітрію. Було досліджено три різні склади лігатури, з різним вмістом ітрію: склад № 1 – Ni-Y; склад № 2 – Y; склад № 3 – Co-Ni-Cr-Al-Y. КНА-82 в подальшому будемо називати склад № 4.

У таблиці 1 представлений вміст ітрію в лігатурі, а також на етапах виготовлення та нанесення покриття.

Таблиця 1 – Склад вихідного матеріалу та вміст ітрію в (% мас.)

№ п/п	Матеріал	Склад
1	Покриття складу №1	КНА-82 + порошок лігатури Ni-Y
2	Покриття складу №2	КНА-82 + чистий ітрію
3	Покриття складу №3	КНА-82 + порошок лігатури, що містить Co-Ni-Cr-Al-Y-Si
4	Покриття складу №4	КНА-82: порошок КНА (90%) і ВКНА (10%) серійна технологія

Список літератури

1. Тугоплавкие сплавы в изделиях авиационной и космической техники / [Г. М. Воронин, С. Т. Кишкин, И. О. Панасюк и др.] // Авиационные материалы. – 1994. – С. 264–273.
2. Коржов В. П. Многослойная структура и высокотемпературная прочность жаропрочных материалов на основе соединений ниобия с алюминием и кремнием, полученных из композитов Nb-Al и Nb-Si / В. П. Коржов, М. И. Карпов, Д. В. Прохоров // Физика и техника высоких давлений. – 2013. – № 23. – С. 99–107.
3. Бунтушкин В. П. Влияние структуры на механические свойства легированного интерметаллида Ni_3Al / В. П. Бунтушкин // Металлы. – 1995. – № 3. – С. 74–80.
4. Афанасьев Н. И. и др. Структура и свойства жаростойких покрытий из сплава Ni-Cr-Al-Y / Н. И. Афанасьев // Изв. вузов. Физика. – 1986. – № 12. – С. 22–25.
5. Каблов Е. Н. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий / Е. Н. Каблов, О. Г. Оспенникова, А. В. Вершков. // Труды ВИАМ. – 2013. – № 2. – С. 58–69.
6. Сидоров В. В. и др. Влияние микролегирования РЗМ на свойства и структурно-фазовые превращения в интерметаллическом сплаве ВКНА-25-ВИ // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 4. – С. 8–13.
7. Рабинович В. А. Краткий химический справочник / В. А. Рабинович, З. Я. Хавин – Л.: Химия, 1978. – 392 с.
8. Савонов Ю. Н. Влияние иттрия на металлургические процессы при сварке сталей аустенитного класса электродами с фтористо-кальциевым покрытием / Ю. Н. Савонов, П. П. Лазебнов, А. Г. Александров // Автоматическая сварка. – 1982. – № 7. – С. 26–28.
9. Сидоров В. В. Влияние лантана на жаростойкость монокристаллов из высокожаропрочного сплава ВЖМ4-ВИ, содержащего рений и рутений / В. В. Сидоров, А. В. Горюнов, Н. А. Колмыкова // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2012. – №3. – С. 23–27.
10. Козлов Э. В. Влияние легирования лантаном на фазовый состав суперсплава на основе Ni-Al-Cr / Э. В. Козлов // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2013. – Т. 18. – № 4–2.
11. Крюков Ш. И. Влияние малых добавок иттрия на структуру и фазовый состав сплава ЖС6К / Ш. И. Крюков, Е. Н. Масалева, А. И. Рыбников // МиТОМ. – 1983. – № 3. – С. 44–47.
12. О механизме влияния иттрия на жаростойкость никель-хромовых сплавов / Агеев Н. В. и др. // ДАН СССР. – 1975. – Т. 221. – № 6. – 1348 с.
13. Томашов Н. Д. Теория коррозии и коррозионностойкие конструкционные сплавы / Н. Д. Томашов, Г. П. Чернова – М.: Металлургия, 1993. – 359 с.
14. Влияние лантана и иттрия на жаростойкость монокристаллов из жаропрочных высокорениевых никелевых сплавов / [В. В. Сидоров, Н. В. Петрушин, Д. Е. Каблов и др.] // Авиационные материалы и технологии. – 2005. – №1. – С. 7–15.

Висновки

Отже, використання трьох різних складів ітрієвмісних лігатур, які повинні забезпечувати формування в структурі різних за природою оксидних та інтерметалідних сполук, і різні стадії перетворень, дозволяє отримати конкретні варіації структури покриттів з певним кількісним співвідношенням структурних складових, яке в кінцевому результаті буде визначати функціональність запропонованих покриттів.

Для формування загальної картини та розробки практичних рекомендацій необхідно провести низку додаткових досліджень спрямованих на визначення фазового складу, вивчення теплофізичних властивостей, встановлення характеру триботехнічної взаємодії, оцінку інших фізико-механічних властивостей досліджуваних покриттів.

15. Альтовский Р. М. Коррозионные свойства иттрия / Р. М. Альтовский. – М. : Атомиздат, 1969. – 354 с.
16. Мигунов В. П. Уплотнительные материалы для проточного тракта ГТД / В. П. Мигунов // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 5. – С. 94–97.
17. Adhesion to Substrate and Friction and Wear Behavior of Ni Alloy-Based Self-Lubricating Composite Coatings Prepared by High Velocity Oxygen Fuel Spraying [J] / WANG Y et al. // Materials Protection. – 2009. – Т. 10. – 22 с.
18. Irissou E. Tribological Characterization of plasma-sprayed CoNiCrAlY-BN abradable coatings / Irissou E., Dadouche A., Lima R. S. // Journal of Thermal Spray Technology. – 2014. – Т. 23. – № 1–2. – С. 252–261.
19. Tribological behaviors of turbofan seal couples from friction heat perspective under high-speed rubbing condition / Gao S. et al. // Friction. – 2016. – Т. 4. – № 2. – С. 176–190.
20. Гончаров В. С., Жаростойкие покрытия на основе иттрия / В. С. Гончаров, Е. В. Васильев // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2013. – № 3 (25).
21. Симс Ч. Жаропрочные сплавы / Симс Ч., Хагель В. – М. : Metallurgia, 1976. – 568 с.
22. Качанов Е. Б. Покрытия для защиты лопаток турбин от сульфидной коррозии / Е. Б. Качанов, Ю. А. Тамарин. // Технология легких сплавов. – 2005. – № 3. – С. 171–180.
23. Абраимов Н. В. Высокотемпературные материалы и покрытия для газовых турбин [Текст] / Н. В. Абраимов. – М. : Машиностроение, 1993. – 336 с.
24. Влияние жаростойкого покрытия на деградацию микроструктуры сплава ЖС6У [Текст] / Н. И. Афанасьев, Л. С. Бушнев, М. К. Касымов и др. // Изв. вузов. Сер. Физика. – 1986. – № 12. – С. 109–111.
25. Abradable Seals for Gas Turbines and Other Rotary Equipment / K. Hajmrle, P. Fiala, A.P. Chilkowich, L.T. Shiembob // ASME Turbo Expo 2004: Power for Land, Sea, and Air. - Volume 4: Turbo Expo 2004. – Vienna, Austria, June 14–17, 2004. – P. 673–682.

Одержано 04.07.2018

Грешга В.Л., Ткач Д.В., Сотников Е.Г., Леховицер З.В., Климов А.В., Фасоль Е.О. Особенности выбора лигатуры для повышения эксплуатационных свойств уплотнительных покрытий деталей турбины газотурбинных двигателей

Цель работы. Анализ влияния легирования на микроструктуру и фазовый состав уплотнительных покрытий, предложено усовершенствованный химический состав покрытий, который мог бы обеспечить удовлетворительный комплекс физико-механических свойств. Для решения поставленной задачи было выбрано уплотнительное покрытие на основе никеля, которое применяется на авиадвигателестроительном предприятии Украины АО «Мотор Сич».

Научная новизна. Был разработан состав уплотнительного покрытия со сменными контролируемыми на отдельных этапах эксплуатации двигателя, физико-механическими свойствами, которые обусловлены развитием структурно-фазовых превращений, сопровождающихся появлением новых шпинельных оксидных соединений и, как следствие, улучшением эрозионной стойкости и сопротивления газовой коррозии.

Методы исследования. Проведен анализ литературных источников, на основе которых были поставлены практические задачи по выбору состава покрытий типа КНА-82.

Полученные результаты. В работе исследованы возможности улучшения свойств покрытия типа КНА-82 с эксплуатационной стойкостью до температур 900–950 °С. Современные тенденции по конструированию авиационных двигателей требуют совершенствования материалов уплотнительных покрытий, которые сохраняли бы выходные физико-механические свойства и не испытывали деструктивных изменений при более высоких температурах на уровне 1100–1200 °С. Повышение высокотемпературной устойчивости и, в общем, комплекса физико-механических свойств покрытий типа КНА-82 может обеспечиваться совершенствованием их химического состава при использовании отдельных лигатур с редкоземельными металлами, которые способствовали бы улучшению термической устойчивости поверхностных оксидных слоев с одновременной реализацией контролируемых поэтапных фазовых превращений, направленных на улучшение эрозионной устойчивости и прочности сформированных покрытий. В связи с этим, для решения этой комплексной задачи, в работе было предложено использовать комбинации лигатур с монокомпонентным иттрием (Y), двойной композицией – Ni-Y и со сложной системой Co-Ni-Cr-Al-Y.

Выбор иттрия как составляющей, которая будет присутствовать во всех вариантах экспериментальных покрытий, обусловлен многими факторами, в частности это достаточно высокая распространенность в земной коре, высокая температура плавления, обеспечение рафинирующего действия, благодаря высокой химической активности, положительное влияние на морфологию включений и структурную стабильность благодаря горофильной способности, уменьшение ликвационной неоднородности и предотвращения образования ТПУ фаз. Таким образом использование трех разных составов лигатур, содержащих иттрий, которые должны обеспечивать формирование в структуре различных по природе оксидных и интерметаллидных соединений, и различные стадии преобразований, позволяет получить конкретные вариации структуры покрытий с определенным количественным соотношением структурных составляющих, которое в конечном плане будет определять функциональность предлагаемых покрытий.

Практическая ценность. Применение данного покрытия позволит повысить коэффициент полезного действия двигателя благодаря уменьшению утечки газов при сохранении размера радиальных зазоров и снизить расход топлива в час.

Ключевые слова: уплотнительное покрытие, никелевый сплав, редкоземельные металлы, газотурбинный двигатель, жаростойкость, иттрий.

Greshta V., Tkach D., Sotnikov Ye., Lehovitser Z., Klimov A., Fasol Ye. Peculiarities of selecting ligatures to improve the operational properties of sealing coatings for the parts of the turbine of gas-turbine engines

Purpose. Analysis of the doping effect on microstructure and phase composition of sealing coatings was carried out and improved chemical composition of coatings was suggested. This composition could provide a sufficient set of physical and mechanical properties. In order to solve the given problem, a nickel-based sealing coating was chosen. It is used at Motor Sich JSC, a Ukrainian enterprise that manufactures aircraft engines.

Academic importance. The composition of the sealing coating with changeable physical and mechanical properties was developed. They can be controlled at certain stages of engine operation and are predetermined by the development of structural and phase transformations accompanied by the appearance of new spinel oxide compounds and, as a result, by improved resistance to erosion and gas corrosion.

Methods. The literature review was done based on which practical problems were set as for selecting the composition of KHA-82 type coating.

Results. Possibilities for improving the properties of KHA-82 type coating with operational durability up to 900–950 °C were studied. Modern trends of designing aircraft engines require improvement of the materials for sealing coatings so that they could preserve initial physical and mechanical properties without any destructive changes at higher temperatures of 1100–1200 °C. Increasing the high-temperature resistance and the overall set of physical and mechanical properties of KHA-82 type coating can be achieved by improving their chemical composition using certain ligatures with rare-earth metals which could increase heat resistance of oxide surface layers with simultaneous controlled step-by-step phase changes aimed at enhancing resistance to erosion and durability of the designed coatings. Thereby, to solve this complex problem, combinations of ligatures with a multi-component yttrium, a double Ni-Y compound and a complex Co-Ni-Cr-Al-Y system were suggested.

The choice of yttrium as a component that will be present in all kinds of experimental coatings is predetermined by lots of factors, such as wide occurrence in the Earth crust, a high melting temperature, a refining effect due to high chemical activity, positive effect on the morphology of inclusions and structural stability due to horophilic capacity, reduction of liquating heterogeneity and preventing the appearance of topologically close-packed phases. So, using 3 different compositions of ligatures containing yttrium ensuring the formation of oxide and intermetallic compounds that are different in their nature, as well as to provide different stages of changes, gives us a possibility to obtain specific variations of the structure of coatings with a certain proportion of structural components which will finally determine the functionality of the suggested coatings.

Practical importance. Application of this coating will give us a possibility to increase the efficiency of the engine due to the decreased leakage of gases while preserving the size of the radial clearances and reduce the fuel consumption per hour.

Key words: sealing coating, nickel base alloy, rare-earth metals, gas-turbine engine, heat resistance, yttrium.
