

УДК 621.793

doi: 10.32620/aktt.2024.5.05

К. Б. БАЛУШОК, О. Г. СЕЛІВЕРСТОВ, О. М. ПРОКОПЕНКО, С. С. САХНО

Акціонерне товариство «Мотор Січ», Запоріжжя, Україна

ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ВИЯВЛЕННЯ ТРІЩИН ПІД ЧАС КОНТРОЛЮ ЛЮМІ-ОВ НА ЛОПАТКАХ ТУРБІН ПІСЛЯ НАНЕСЕННЯ КОМПЛЕКСНИХ ЖАРОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ

На даний час вдосконалення і збільшення потужності газотурбінних двигунів (ГТД) відбувається за рахунок збільшення температури газів перед турбіною і підвищення ступеня стиснення повітря в компресорі. В авіаційній промисловості для виготовлення робочих лопаток ГТД застосовуються ливарні нікелеві жароміцні сплави, такі як ЖС6У-ВІ, ЖС26-ВІ, ЖС32-ВІ тощо. Незважаючи на їх високі властивості щодо корозійної стійкості та жаростійкості, підвищення ресурсу робочих лопаток ГТД і їхній захист від окиснення та корозійного пошкодження забезпечується за рахунок нанесення покриттів за різними технологіями як на проточну поверхню пера лопаток (жаростійкі та теплозахисні), так і на внутрішні поверхні охолоджуваних каналів (дифузійні). Обрив робочих лопаток турбіни належить до найважчих видів ушкодження ГТД, тому на різних етапах серійного виробництва в тому числі і після нанесення жаростійких покриттів виконують люмінесцентний контроль (ЛЮМІ-ОВ) лопаток для виявлення тріщин, що можуть утворитися під час обробки та призвести до їх обриву під час роботи на двигуні. В роботі проведено оцінку можливості виявлення тріщин на лопатках турбін ГТД з комплексними жаростійкими покриттями ГЦП+СДП-2. Дослідження проводилося на зразках робочих лопаток у вигляді експерименту. Попередньо на випробувальному стенді були проведені втомні випробування зразків до моменту появи тріщин. Потім на профіль пера лопаток було нанесено комплексне жаростійке покриття ГЦП (газоциркуляційне покриття CrAl) + СДП-2 (жаростійкий сплав системи Ni-Cr-Al-Y), поетапно згідно з серійною технологією. Після нанесення кожного покриття для визначення можливості виявлення тріщин виконувався контроль лопаток методом ЛЮМІ-ОВ. По результатом робіт показано, що безпосередньо після нанесення комплексного жаростійкого покриття тріщини на лопатках не виявляються, тому що розповсюджуються тільки в шарі ГЦП і частково переходять у шар СДП-2 без виходу на поверхню. Отримані результати можуть бути підставою для виведення операції люмінесцентного контролю з технологічного процесу, безпосередньо після нанесення комплексних жаростійких покриттів. Так як, це не дозволяє виявити тріщини в матеріалі лопаток і може призводити до зайвих витрат на додаткові технологічні операції.

Ключові слова: покриття; комплексні жаростійкі покриття; іонно-плазмові покриття; лопатки турбіни; люмінесцентний контроль; тріщини.

Вступ

На даний час вдосконалення і збільшення потужності газотурбінних двигунів (ГТД) відбувається за рахунок збільшення температури газів перед турбіною і підвищення ступеня стиснення повітря в компресорі [1].

В авіаційній промисловості для виготовлення робочих лопаток ГТД застосовуються ливарні нікелеві жароміцні сплави, такі як ЖС6У-ВІ, ЖС26-ВІ, ЖС32-ВІ тощо [2].

Незважаючи на високі властивості цих сплавів щодо корозійної стійкості та жаростійкості, підвищення ресурсу робочих лопаток ГТД і їхній захист від окиснення та корозійного пошкодження забезпечується за рахунок нанесення покриттів за різними технологіями як на проточну поверхню пера лопаток

(жаростійкі та теплозахисні), так і на внутрішні поверхні охолоджуваних каналів (жаростійкі дифузійні) [3, 4].

Для захисту від агресивного ерозійного та високотемпературного впливу газового середовища використовують багатокомпонентні жаростійкі з'єднувальні шари (ЖЗШ) і зовнішній теплозахисний керамічний шар на основі оксиду цирконію, стабілізованого оксидом ітрію - $ZrO_2-Y_2O_3$ (YSZ) [5]. Керамічний шар теплозахисного покриття YSZ може бути отримано з шарувато-пористою структурою за технологією газотермічного напилення: повітряно-плазмового (APS) або вакуумно-плазмового (VPS) і зі стовпчасто-пористою структурою в процесі електронно-променевого (EP-PVD) або середньочастотного магнетронного напилення [6, 7].



Creative Commons Attribution
NonCommercial 4.0 International

Зниження активності дифузійних процесів і компенсація різниці у величині теплового розширення жароміцного сплаву та керамічних шарів ТЗП забезпечуються нанесенням багатокomпонентних металокерамічних ЖЗШ системи Ni-Cr-Al-Y-Hf(Re) (покриття ВСДП-3, ВСДП-16 та ін.) за іонно-плазмовою технологією високих енергій (ВПТВЕ) або з використанням технологій газотермічного напилення - APS і VPS [8].

Обрив робочих лопаток турбіни належить до найважчих видів ушкодження ГТД [9], тому на різних етапах серійного виробництва в тому числі і після нанесення жаростійких покриттів виконують люмінесцентний контроль (ЛЮМ1-ОВ) лопаток для виявлення тріщин, що можуть утворитися під час обробки та призвести до їх обриву під час роботи на двигуні.

Постановка задачі та методи дослідження

У процесі серійного виробництва ГТД на АТ «Мотор Січ» широкого застосування набули комплексні жаростійкі покриття на лопатках турбін, що наносяться методом іонно-плазмової технології високих енергій (ВПТВЕ) на проточну поверхню лопаток, та дифузійні, що наносяться на внутрішню поверхню охолоджуваних каналів. Застосування цих покриттів дало змогу значною мірою підвищити ресурс робочих лопаток під час експлуатації двигунів.

Іонно-плазмові покриття значно підвищують властивості з жаростійкості та корозійної стійкості робочих лопаток ГТД за температур не вище 1050-1100°C [9], водночас не знижують їхніх механічних властивостей, такі як багатоциклова втома і тривала міцність.

Метод ВПТВЕ має наступні переваги [10]:

- ефективне іонне очищення виробів перед нанесенням покриттів;
- висока точність осадження покриття за товщиною і складом (3 – 10%);
- широкі технологічні можливості (можливість на одному обладнанні установки МАП-1 або МАП-2) отримувати покриття різних типів (жаростійкі дифузійні, конденсовані та конденсаційно-дифузійні);
- простота технологічного процесу отримання покриттів, простота обладнання та його надійність.

Згідно з технічними умовами контроль ЛЮМ1-ОВ лопаток турбін проводиться перед нанесенням комплексних покриттів, безпосередньо після нанесення і після стендових випробувань лопаток на двигуні.

Контроль ЛЮМ1-ОВ з метою виявлення тріщин безпосередньо після нанесення комплексних

покриттів в окремих випадках ускладнений через наявність фонового світіння поверхні лопаток.

Інтенсивність фонового світіння, здебільшого, зумовлена станом крапельної фази покриття СДП-2, розмір якої не перевищує 10...80 мкм [14]. Як правило, підвищене фонове світіння спричиняють частинки краплинної фази, що окислилися в процесі нанесення та відпалу покриттів, що багато в чому залежить від технічного стану обладнання (підвищене нагрівання в робочу вакуумну камеру, чистоти робочої камери й оснащення, наявність залишків покриття на елементах конструкцій камери і т.д.).

Крім окислення крапельної фази важливим фактором є температура поверхні лопатки в процесі конденсації, що забезпечує якісне зчеплення крапельної фази з поверхнею лопатки. Оптимальним значенням під час конденсації покриттів є співвідношення:

$$I_{\text{вир.}} \geq I_{\text{нас.}} \quad (1)$$

де $I_{\text{вир.}}$ – струм на лопатках під час конденсації покриття;

$I_{\text{нас.}}$ – струм насичення для конкретної партії оброблюваних лопаток, що відповідає напрузі на лопатках 50...60 В [11].

Збільшення щільності покриття можливо наступними методами: за рахунок підвищення напруги на лопатках при напиленні, використання магнетронних систем напилення та ін., що також не буде остаточним рішенням проблеми.

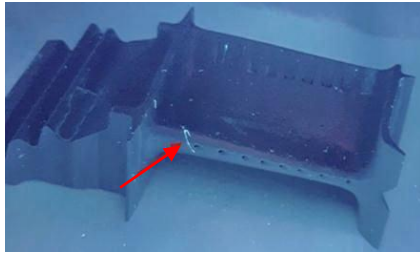
У виробництві для зниження інтенсивності фонового світіння яке перешкоджає виявленню дефектів, іноді доводиться використовувати додаткову абразивну обробку (обдування електрокорундом із частковим зніманням покриття). Іноді така абразивна обробка призводить до значного стоншення покриття яке доводиться потім повністю видаляти механічним способом з подальшим нанесенням нового на всю поверхню лопатки, або місцевого нанесення алюмосилікування (АС-1, АС-2). Такий підхід призводить до додаткових витрат, зокрема існує ймовірність за бракування деякої кількості лопаток через втрату геометричних розмірів під час механічного знімання покриттів.

Метою роботи є оцінка можливості виявлення тріщин на лопатках ГТД після нанесення комплексних покриттів методом ЛЮМ1-ОВ, тобто доцільність проведення контролю.

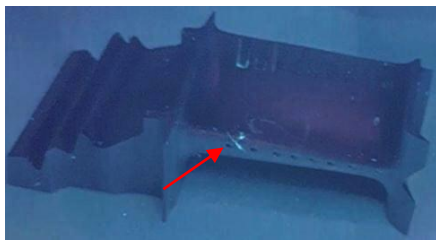
В якості зразків використовувалися лопатки турбіни 1-го ступеня ГТД з жароміцного нікелевого сплаву ЖС26-ВІ.

Попередньо лопатки в кількості 2-х шт. (умов. №1 і умов. №2) пройшли втомні випробування на спеціалізованому стенді до моменту появи трі-

щин. Розташування тріщин на профілі пера зафіксовано під час контролю ЛЮМ1-ОВ (рис. 1, вказано стрілками).



а – лопатка умов. №1



б – лопатка умов. №2

Рис. 1. Зовнішній вигляд лопаток з отриманими тріщинами до нанесення покриття

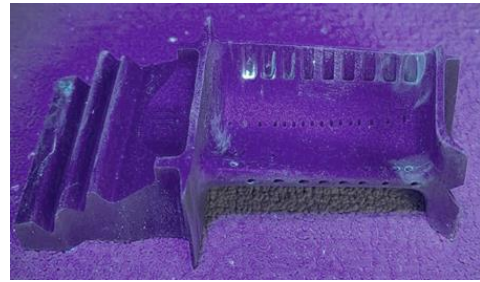
Потім на профіль пера лопаток було нанесено комплексне жаростійке покриття ГЦП (газоциркуляційне покриття CrAl) + СДП-2 (жаростійкий сплав системи Ni-Cr-Al-Y), поетапно відповідно до серійної технології. Після нанесення кожного покриття для визначення можливості виявлення тріщин виконувався контроль лопаток методом ЛЮМ1-ОВ. Згідно з нормативною документацією в серійному виробництві контроль ЛЮМ1-ОВ виконується тільки після нанесення комплексного покриття.

Металографічні дослідження мікрошліфів виконувалося на оптичному металографічному мікроскопі «Axio Observer MAT. D1m» німецької фірми Carl Zeiss, GmbH.

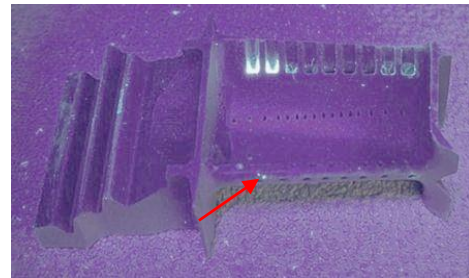
Результати

Після нанесення покриття ГЦП встановлено, що тріщина на лопатці умов. №1 вже не виявляється під час контролю ЛЮМ1-ОВ (рис. 2, а), а на лопатці умов. №2 у місці розташування тріщини присутнє точкове світіння (див. рис. 2, б, червона стрілка).

Після нанесення покриття СДП-2 тріщини на обох лопатках під час контролю ЛЮМ1-ОВ не виявляються (рис. 3). Лопатки після нанесення покриття СДП-2 мають фонове світіння в радіусах переходу полук до пера, зумовлене особливостями поверхні покриття, що описано раніше (див. рис. 3).

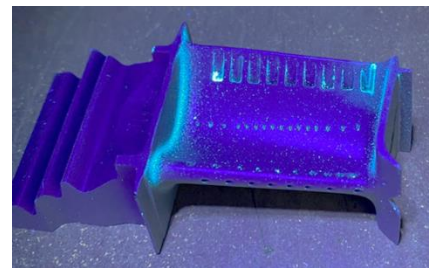


а – лопатка умов. №1

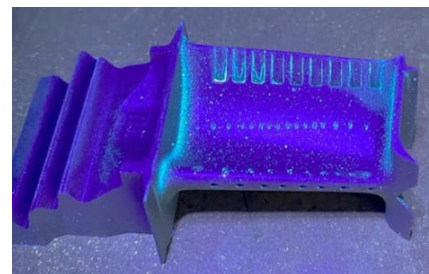


б – лопатка умов. №2

Рис. 2. Зовнішній вигляд лопаток під джерелом УФС після нанесення покриття ГЦП



а – лопатка умов. №1



б – лопатка умов. №2

Рис. 3. Зовнішній вигляд лопаток під джерелом УФС після нанесення покриття ГЦП+СДП-2

Було виконано металографічне дослідження зони тріщини після напилення комплексного покриття ГЦП+СДП-2 однієї з лопаток (умов. №2). Шліфи виготовляли в поздовжньому напрямку пера поперек тріщини згідно зі схемою, показаною на рис. 4.

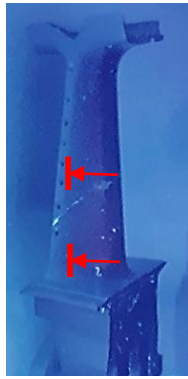


Рис. 4. Перетин, досліджуваний металографічним методом

Під час металографічного дослідження встановлено, що тріщина на вхідній кромці пера лопатки наскрізна, поширюється до внутрішньої порожнини пера (рис. 5, б).

Після нанесення комплексного жаростійкого покриття тріщина спостерігається в шарі ГЦП і частково переходить у шар СДП-2 (див. рис. 5в), але без виходу на поверхню, що і перешкоджає її виявленню під час контролю ЛЮМ1-ОВ. Товщина комплексного покриття ГЦП+СДП-2 на профілі пера становить ~ 80 мкм.

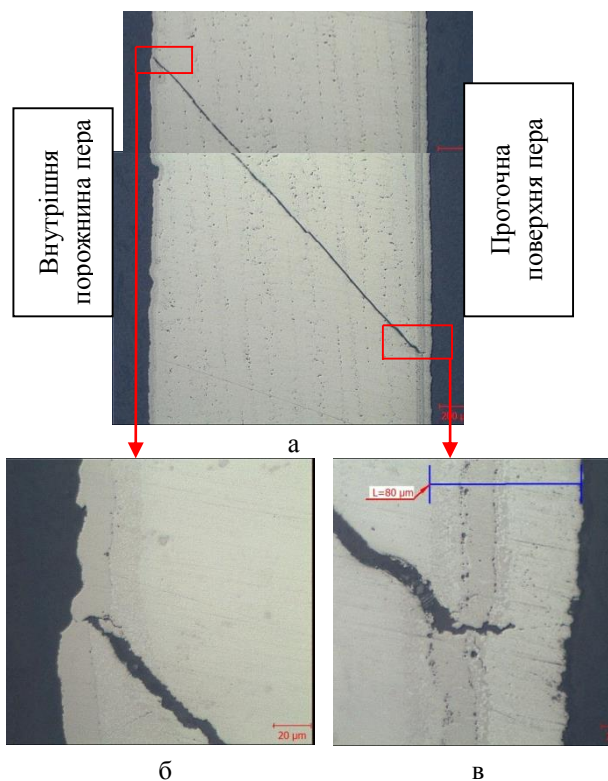


Рис. 5. Тріщина по вхідній кромці пера лопатки (умов. №2):

- а – мікрошліф досліджуваного перерізу,
б – тріщина з боку внутрішньої порожнини пера,
в – тріщина з боку проточної поверхні пера

З вище викладеного слідує, що контроль ЛЮМ1-ОВ лопаток з комплексними жаростійкими покриттями безпосередньо після нанесення проводити недоцільно, оскільки це не дає змоги виявити тріщини в матеріалі лопаток, але може призводити до зайвих витрат на додаткові технологічні операції.

Контроль ЛЮМ1-ОВ необхідно проводити тільки перед нанесенням покриттів, після стендових випробувань лопаток на двигуні та під час ремонту лопаток турбін. Оскільки при стендових випробуваннях під дією високих відцентрових навантажень тріщини, які не виходять на поверхню покриття, імовірно, можуть розвинути далі з виходом на поверхню, що і дасть змогу їх виявити при люмінесцентному контролі.

Ймовірно для забезпечення стабільної якості контролю лопаток з комплексними жаростійкими покриттями та отримання об'єктивних результатів необхіден пошук сучасного некапілярного методу контролю для готових лопаток після напилення та після роботи на двигуні.

Висновки

1. Контроль ЛЮМ1-ОВ робочих лопаток з метою виявлення тріщин безпосередньо після нанесення комплексних жаростійких покриттів в окремих випадках ускладнений, через наявність фонового світіння поверхні, яке властиве поверхні покриттів.

2. Наявність фонового світіння в окремих випадках не дозволяє виявити лінійні дефекти. Тому доводиться іноді виконувати доробку лопаток (обдужування електрокорундом, місцеве зняття покриття з подальшим нанесенням алюмосилікування або повне зняття покриття з подальшим перенапиленням). Такий підхід призводить до додаткових витрат, зокрема існує ймовірність бракування деякої кількості лопаток через втрату геометричних розмірів під час механічного знімання покриттів.

3. Підвищення напруги на лопатках до 50...60 В дає змогу зменшити інтенсивність фонового світіння.

4. Після нанесення комплексного жаростійкого покриття тріщини спостерігаються тільки в шарі ГЦП і частково переходять у шар СДП-2, але без виходу на поверхню профілю пера, що і перешкоджає їх виявленню під час контролю ЛЮМ1-ОВ.

5. Контроль ЛЮМ1-ОВ лопаток з комплексними жаростійкими покриттями не дозволяє виявляти тріщини в основному матеріалі лопаток одразу після напилення.

Внесок авторів: формулювання проблеми – О. М. Прокопенко; огляд та аналіз інформаційних джерел – С. С. Сахно; постановка задачі – О. Г. Селіверстов; розробка плану експерименту –

О. М. Прокопенко, С. С. Сахно; металографічне дослідження – **С. С. Сахно;** оцінка результатів – **К. Б. Балущок, О. Г. Селіверстов;** формулювання висновків – **К. Б. Балущок.**

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Наявність даних

Рукопис немає супутніх даних.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що вони не використовували методи штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Подяка

Автори висловлюють подяку керівництву АТ «Мотор Січ»

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. Нанесение многослойных жаростойких покрытий на лопатки турбины, подверженных эрозионно-коррозионному воздействию [Текст] / В. С. Ефанов, И. А. Петрик, А. Н. Прокопенко, & А. В. Овчинников // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2017. – № 8. – С. 85–89.

2. Андриенко, А. Г. Механические свойства и технологические особенности получения деталей ГТУ с направленной (моно) структурой из жаропрочного коррозионностойкого никелевого сплава [Текст] / А. Г. Андриенко, С. В. Гайдук, & В. В. Кононов // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – 2012. – №2. – С. 81–86.

3. Замковой, В. Е. Защитные покрытия для рабочих лопаток турбины ГТД [Текст] / В. Е. Замковой, В. Г. Малышева, & О. А. Корогод // *Вестник двигателестроения*. – 2006. – №4. – С. 37–43.

4. Жаропрочность литейных никелевых сплавов и защита их от окисления [Текст] / Б. Е. Патон, Г. Б. Стганов, С. Т. Кишкин, и др.; Под ред. Б. Е. Патона. – Киев : Наук. думка, 1987. – 258 с.

5. Жаростойкие покрытия осаждаемые в вакууме [Текст] / Б. А. Мовчан, И. С. Малащенко ; Под ред. Б. Е. Патона. – Киев : Наук. думка, 1983. – 232 с.

6. Mechanical and thermo-physical properties of plasma-sprayed thermal barrier coatings: a literature survey [Text] / P. Planques, V. Vidal, P. Lours, V. Proton, F. Crabos, & et al. // *Oxidation of Metals*. – 2017. No. 88. – P. 133–143. DOI: 10.1007/s11085-016-9693-1.

7. Movchan, B. A. Advanced graded protective coatings, deposited by EB-PVD [Text] / B. A. Movchan, & K. Yu. Yakovchuk // *Materials Science Forum*. – 2007. – Vols. 546–549. – P. 1681–1688. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.546-549.1681.

8. Грешта, В. Л. Применение керамических покрытий для защиты деталей ГТД, работающих в условиях экстремально высоких температур [Текст] / В. Л. Грешта // *Вестник двигателестроения*. – 2015. – №1. – С. 168–171.

9. Налимов, Ю. С. Анализ поврежденных лопаток газотурбинных двигателей [Текст] / Ю. С. Налимов // *Металл и литье Украины*. – 2014. – № 12. – С. 17–22.

10. Снижение шероховатости многослойных жаростойких покрытий на проточных поверхностях лопаток ГТД [Текст] / В. С. Ефанов, А. В. Овчинников, И. А. Петрик, & А. А. Мыленко // *Вестник двигателестроения*. – 2018. – №1. – С. 138–143. DOI: 10.15588/1727-0219-2018-1-19.

11. Методика расчёта скорости нанесения и равномерности жаростойкого покрытия в модернизированной установке МАП-1 [Текст] / В. П. Колесник, Д. В. Слюсарь, А. Н. Прокопенко, В. В. Зиновьев, & В. Ф. Гайдуков // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – №8. – С. 36–40.

References

1. Yefanov, V. S., Petrik, I. A., Prokopenko, A. N., & Ovchinnikov, A. V. Nanesenie mnogoslownykh zharostoikikh pokrytii na lopatki turbiny, podverzhenykh erozionno-korrozionnomu vozddeistviyu [Multi-layer heat-resistant coating deposition on turbine blades exposed to erosion-corrosion]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2017, no. 8, pp. 85–89.

2. Andrienko, A. G., Gaiduk, S. V., Kononov, V. V. Mekhanicheskie svoistva i tekhnologicheskie osobennosti polucheniya detalei GTU s napravlennoi (mono) strukturoi iz zharoprochnogo korroziionnostoikogo nikellevogo splava [Mechanical properties and technological procedure features in manufacture of gas turblne parts with directed (mono) crystallization made of corrosion-resistant nickel-base superalloy]. *Novi materiali i*

tehnologii v metalurgii ta mashinobuduvanni, 2012, no. 2, pp. 81-86.

3. Zamkovoï, V. E., Malysheva, V. G., & Korogod, O. A. Zashchitnye pokrytiya dlya rabochikh lopatok turbiny GTD [Protective coatings for GTD turbine blades]. *Vestnik dvigatelestroeniya*, 2006, no. 4, pp. 37-43.

4. Paton, B. E., Stganov, G. B., & Kishkin, S. T. *Zharoprochnost' liteinykh nikelevykh splavov i zashchita ikh ot okisleniya* [Heat resistance of cast nickel alloys and their protection against oxidation]. Kyiv, Nauk. Dumka Publ., 1987. 258 p.

5. Paton, B. E., Movchan, B. A., & Malashenko, I. S. *Zharostoïkie pokrytiya osazhdaemye v vakuume* [Vacuum deposited heat resistant coatings]. Kyiv, Nauk. Dumka Publ., 1983. 232 p.

6. Planques, P., Vidal, V., Lours, P., Proton, V., Crabos, F., & et al. Mechanical and thermo-physical properties of plasma-sprayed thermal barrier coatings: a literature survey. *Oxidation of Metals*, 2017, no. 88, pp. 133-143. DOI: 10.1007/s11085-016-9693-1

7. Movchan, B. A., & Yakovchuk, K. Yu. Advanced graded protective coatings, deposited by EB-PVD. *Materials Science Forum*, 2007, vols. 546-549, pp. 1681-1688. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.546-549.1681.

8. Greshta, V. L. Primenenie keramicheskikh pokrytii dlya zashchity detalei GTD, rabotayushchikh v usloviyakh ekstremal'no vysokikh temperatur [Application of ceramic coatings for protection of GTE work in conditions of extremely high temperatures]. *Vestnik dvigatelestroeniya*, 2015, no. 1, pp. 168-171.

9. Nalimov, Yu. S. Analiz povrezhdenii lopatok gazoturbinnnykh dvigatelei [Damage analysis of gas turbine engine blades]. *Metall i lit'e Ukrainy*, 2014, no. 12, pp. 17-22.

10. Yefanov, V. S., Ovchinnikov, A. V., Petrik, I. A., & Mylenko, A. A. Snizhenie sherokhovatosti mnog-osloinykh zharostoïkikh pokrytii na protochnykh pov-erkhnostyakh lopatok GTD [Reduction of roughness of multilayer heat sink coatings on flow surfaces of GTE blades]. *Vestnik dvigatelestroeniya*, 2018, no. 1, pp. 138-143. DOI: 10.15588/1727-0219-2018-1-19.

11. Kolesnik, V. P., Slyusar', D. V., Prokopenko, A. N., Zinov'ev, V. V., & Gaidukov, V. F. Metodika rascheta skorosti naneseniya i ravnomernosti zharostoïkogo pokrytiya v modernizirovannoi ustanovke MAP-1 [Methodology for calculation of application rate and uniformity of heat-resistant coating in modernized MAP-1 unit]. *Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2007, no. 8, pp. 36-40.

Надійшла до редакції 10.08.2024, розглянута на редколегії 15.10.2024

EVALUATION OF THE POSSIBILITY OF DETECTING CRACKS DURING THE CONTROL OF LUMINESCENCE ON TURBINE BLADES AFTER APPLICATION OF COMPLEX HEAT-RESISTANT COATINGS

*Konstantin Balushok, Oleksandr Seliverstov,
Oleksandr Prokopenko, Sergii Sakhno*

Currently, gas turbine engines (GTD) are being improved and made more powerful by increasing the temperature of the gases in front of the turbine and increasing the air compression ratio in the compressor. In the aviation industry, nickel heat-resistant alloys such as ЖС6У-ВІ, ЖС26-ВІ, ЖС32-ВІ, etc. are used to manufacture GTD blades. Despite their high properties in terms of corrosion resistance and heat resistance, the service life of GTD blades and their protection against oxidation and corrosion damage is ensured by applying coatings using various technologies both to the flowing surface of the blade blades (heat-resistant and heat-protective) and to the inner surfaces of the cooled channels (diffusion coatings). Failure of turbine blades is one of the most severe types of damage to turbine blades, so at different stages of serial production, including after applying heat-resistant coatings, LUM1-OV inspection of blades is performed to detect cracks that can form during processing and lead to their failure during engine operation. The paper evaluates the possibility of detecting cracks on GTD turbine blades with complex heat-resistant coatings GCP+SDP-2. The study was carried out on samples of working blades in the form of an experiment. First, fatigue tests of the samples were carried out on a test bench until cracks appeared. Then, a complex heat-resistant coating of GCP (CrAl gas circulation coating) + SDP-2 (heat-resistant alloy of the Ni-Cr-Al-Y system) was applied to the blade profile in stages according to the serial technology. After each coating was applied, the blades were inspected by the LUM1-OV method to determine the possibility of crack detection. The results showed that immediately after the application of the complex heat-resistant coating, cracks on the blades were not detected, because they spread only in the GCP layer and partially pass into the SDP-2 layer without reaching the surface. The results obtained can be the basis for removing the luminescent inspection operation from the technological process, immediately after applying

complex heat-resistant coatings. Since this does not allow detecting cracks in the blade material and can lead to unnecessary costs for additional technological operations.

Keywords: coatings; complex heat-resistant coatings; ion-plasma coatings; turbine blades; luminescent control; cracks.

Балушок Костянтин Броніславович – канд. техн. наук, головний інженер АТ «Мотор Січ», Запоріжжя, Україна.

Селіверстов Олександр Георгійович – канд. техн. наук, головний металург АТ «Мотор Січ», Запоріжжя, Україна.

Прокопенко Олександр Миколайович – канд. техн. наук, провідний інженер АТ «Мотор Січ», Запоріжжя, Україна.

Сахно Сергій Сергійович – начальник бюро досліджень УГМет АТ «Мотор Січ», Запоріжжя, Україна.

Konstantin Balushok – Candidate of Science, Chief Engineer at JSC «Motor Sich», Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: motor@motorsich.com, ORCID: 0000-0002-8212-9275.

Oleksandr Seliverstov – Candidate of Science, Chief Metallurgist at JSC «Motor Sich», Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com, ORCID: 0000-0003-3920-5153.

Oleksandr Prokopenko – Candidate of Science, Leading Engineer at JSC «Motor Sich», Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: ogc.ugmet@motorsich.com.

Sergii Sakhno – Head of the Research Bureau UGMet at JSC «Motor Sich», Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com, ORCID: 0000-0003-3388-2663.