

УДК 621.793.7

Ігор Смирнов¹, д.т.н., проф.; Андрій Чорний¹, к.т.н., доц.; Ігор Селіверстов², к.т.н., доц.; Володимир Лисак¹, Ph.D.; Тимофій Сопленко¹

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна

²Херсонський національний технічний університет, Україна

ЗАЛИШКОВІ НАПРУЖЕННЯ В ПЛАЗМОВИХ УЩІЛЬНЮЮЧИХ ПОКРИТТЯХ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ

Анотація. Розглянуті особливості структури та властивостей ущільнюючих покриттів для авіаційних двигунів. Визначено величину залишкових напружень в плазмовому покритті з порошку нікелевого сплаву при різних способах закріплення основи (пластини з титану). Характер визначених залишкових напружень відповідає напруженням розтягу.

Ключові слова: ущільнюючі покриття, залишкові напруження, плазмове напилення.

Igor Smirnov, Ph.D., Prof.; Andrii Chorny, Ph.D., Assoc. Prof.; Ihor Seliwerstov, Ph.D., Assoc. Prof.; Volodymyr Lysak, Ph.D.; Tymofii Soplenko

RESIDUAL STRESSES OF PLASMA SEALING COATINGS FOR AIRCRAFT ENGINES

Abstract. The peculiarities of the structure and properties of sealing coatings for aircraft engines are considered. The magnitude of the residual stresses in the plasma coating of nickel alloy powder with different methods of fixing the base (titanium plates) was determined. The nature of the residual stresses indicates tensile stress.

Keywords: sealing coating, residual stresses, plasma spaying.

Підвищення надійності та ефективності роботи авіаційних двигунів є завжди актуальним і важливим завданням в сучасному авіабудуванні. У пріоритетній тематиці Міністерства освіти і науки України, особлива увага приділяється технологіям відновлення (ремонт) авіаційної техніки державної авіації: їх вузлів, агрегатів, деталей, комплектуючих.

Одним з елементів авіаційного двигуна, що потребує відновлення та вдосконалення є ущільнюючі покриття, які припрацьовуються під час роботи, в залежності від умов експлуатації. Ущільнюючі покриття проточної частини газотурбінних двигунів в більшості мають композиційну структуру, яка складається з підшару і поверхневого шару, що припрацьовується. На даний час існує багато композицій ущільнюючих покриттів, які застосовується як при виготовленні так і під час ремонту авіаційних двигунів. Найбільш працездатні двошарові покриття, де поверхневий шар як правило складається з жароміцної матриці і наповнювача, який виконує роль твердого мастила. Для захисту металеві основи від високотемпературної корозії та окислення, а також для зниження різниці коефіцієнтів термічного розширення між основою та ущільнюючим шаром застосовують металевий підшар зі

сплаву типу $MeCrAlY$ розроблений швейцарською відомою Sulzer Metco [1]. В окремому випадку можуть бути застосовані сплави на основі нікелю типу ВКНА, який відповідає нікелевому порошку ПН75Ю23В.

Для нанесення таких покриттів застосовують різноманітні методи газотермічного напилення, при цьому перевага гадається атмосферному плазмовому напиленню (APS) та високошвидкісному газополуменовому напиленню (HVOF).

В наслідок термічному розширення та стиску під час роботи авіаційного двигуна, міцність матеріалу покриття не повинна знижуватися в результаті виникнення залишкових напружень та утворення тріщин, а під впливом високотемпературного газового потоку повинна забезпечити ерозійну стійкість покриття.

В зв'язку з цим одним з важливих завдань є дослідження в покриттях залишкових напружень, які суттєво впливають на фізико-механічні властивості системи основа-покриття і являються однією з причин руйнування покриттів.

Мета роботи полягала в визначенні залишкових напружень в матеріалі покриття, який застосовується як підшар в ущільнюючих покриттях для авіаційних двигунів.

Матеріалом для напилення підшару був обраний порошок зі сплаву на основі нікелю марки ВКНА. Даний порошок має високу зносостійкість при температурах 1100-1200°C, жаростійкість, стійкість до механічних пошкоджень і досить широко застосовується на ремонтних підприємствах авіаційних двигунів. Матеріалом основи був титан марки ВТ1-00.

Напилення порошку здійснювали з застосуванням ламінарного плазмотрону, розробленого та виготовленого на кафедрі зварювального виробництва, навчально-наукового інституту матеріалознавства та зварювання ім. Є.О. Патона. Основні технологічні режими напилення наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Струм дуги, А	Напруга, В	Витрати порошку, кг/год	Загальні витрати газу (аргон), л/хв	Дистанція напилення, мм
80-90	30-35	3-4	5-6	100-150

Визначення величини залишкових напружень здійснювали за кривизною пластини (основи), на яку напилювали покриття. Пластину виготовляли розміром 76x10 мм² з листа титану товщиною 0,2 мм.

Під час напилення застосовувались два варіанти закріплення пластини. По першому варіанту пластини була жорстко закріплена з одного боку, по другому – пластину закріплювали з двох боків, причому з одного боку кріплення було не жорстким для компенсації температурних поздовжніх деформацій.

В результаті під впливом залишкових напружень, що виникають в покритті, пластини деформується у вигляді дуги, по радіусу кривизни якої визначали величину залишкових напружень в покритті за формулою:

$$\sigma = \left(\frac{h_o^3 E_o + h_p^3 E_p}{6R h_o (h_o + h_p)} + \frac{E_o (h_o^3 E_o + h_p^3 E_p)}{12R^2 (h_o E_o + h_p E_p)} + \frac{E_o E_p h_p (h_o + h_p)}{2R (h_o E_o + h_p E_p)} \right) \frac{1}{1-\nu^2} \quad (1)$$

де E_p , E_o – модуль поздовжньої пружності покриття і основи; h_p , h_o – товщина покриття і основи; R – радіус кривизни пластинки з покриттям; ν – коефіцієнт Пуассона (в даному випадку коефіцієнт Пуассона для основи і покриття приймається однаковим 0,3).

Радіус кривизни розраховували за довжиною хорди c і висоті сегмента l (величина прогину пластини) за формулою:

$$R = \frac{l}{2} + \frac{c^2}{8l} \quad (2)$$

Результати розрахунків залишкових напружень в покриттях товщиною $0,2 \pm 0,05$ мм наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Варіант	Висота прогину пластини, мм	Довжина хорди, мм	Радіус кривизни, мм	Залишкові напруження, МПа
I	9,3	73	78,5	175
I	1,7	76	411,1	34

Аналіз отриманих результатів свідчить, що величина залишкових напружень в покритті суттєво залежить від способу кріплення основи (пластини). В результаті кріплення пластини з одного боку за першим варіантом, величина залишкових напружень в покритті складає 175 МПа, що приблизно у п'ять разів перевищує значення залишкових напружень при кріпленні пластини за другим варіантом з двох боків. В даному випадку це може бути пояснено релаксацією залишкових напружень в системі основа-покриття при жорсткому закріпленні основи.

Визначені залишкові напруження мають позитивні значення, що відповідає напруженням розтягу. В цілому, напруження розтягу негативно впливають на фізико-механічні характеристики покриття і можуть викликати його розтріскування або відшаровування. Компенсувати такий негативний вплив можливо шляхом додаткової термічної обробки або нанесенням другого робочого шару покриття. Як згадувалось вище робочим шаром може бути композиційне керамічне покриття з різними наповнювачами. Підбором складу такого покриття можна досягнути залишкових напружень стискання і таким чином урівноважити внутрішні напруження в об'ємі всього покриття.

Перелік посилань

1. Wilson, S. (2011) Overview of Sulzer Metco Compressor and Turbine Abradable Technology. 8th International Charles Parsons Turbine Conference, University of Portsmouth, Portsmouth, UK. URL: <https://dokumen.tips/documents/overview-of-sulzer-metco-compressor-and-turbine-abradable-0940-s-of-sulzer-metco.html> [дата звернення 07.05.2024]