

### ТЕПЛОЗАХИСНІ ПОКРИТТЯ ДЛЯ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

*Гречанюк К. І., Богомол Ю. І.*

*Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
Берестейський проспект, 37, Київ, 03056*

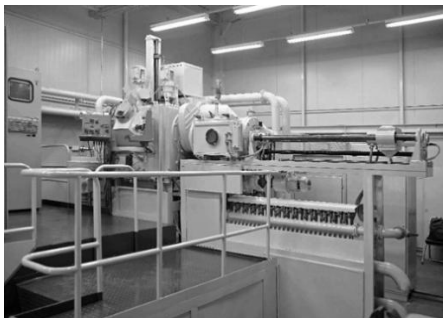
***Анотація.** У статті розглянуто типи теплозахисних покриттів для газових турбін з метою підвищення ефективності та тривалості їх роботи. Встановлено оптимальні параметри для різних типів покриттів, включаючи конструкцію та компонентний склад шарів. Показано, що при конструюванні теплозахисних покриттів (ТЗП) важливого значення набуває формування бар'єрного мікрошару на межі розділу проміжній жаростійкий шар – зовнішній керамічний шар.*

***Ключові слова:** теплозахисні покриття, електронно-променеве обладнання, композиційні матеріали.*

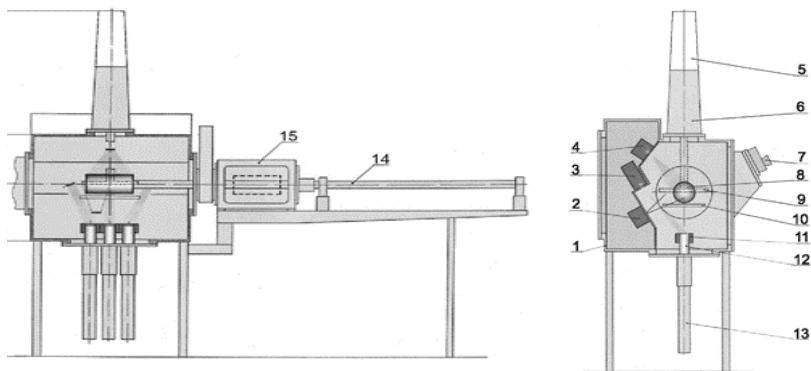
Створення ефективних і надійно працюючих газових турбін є складною проблемою, що виникає в ході розвитку газотурбобудування. Ключовими аспектами цієї складності є робочі та соплові лопатки турбіни, матеріали та конструкція яких має важливе значення для допустимої температури газу перед турбіною, що впливає на техніко-економічні характеристики газотурбінних двигунів (ГТД). На сьогодні технологічні виклики пов'язані із подальшим розвитком конвективного охолодження лопаток та станом металургії жароміцних сплавів, що свідчать про необхідність вдосконалення параметрів циклу ГТД. Для вирішення цих питань необхідні розробки нової системи захисту лопаток газових турбін та переходу від жаростійких багатокомпонентних покриттів до теплозахисних (ТЗП).

У НВП «Елтехмаш» захисні покриття на лопатки газових турбін наносили шляхом електронно-променевого випаровування сплавів  $\text{MeCrAlY}$ ,  $\text{MeCrAlYHfSiZr}$  (де Me – Ni, Co, Fe) кераміки на основі  $\text{ZrO}_2$ , стабілізованої  $\text{Y}_2\text{O}_3$  та подальшої конденсації парової фази на поверхні робочих лопаток газових турбін різного призначення [1].

Для нанесення жаростійких та теплозахисних покриттів розроблено лабораторне та промислове електронно-променеве обладнання. На рис. 1 показано зовнішній вигляд універсальної лабораторної електронно-променевої установки Л-2 для плавки та випаровування матеріалів у вакуумі [2]. Схеми технологічних процесів представлені на рис. 2.



**Рис. 1. Зовнішній вигляд універсальної лабораторної електронно-променевої установки Л-2**



**Рис. 2. Схеми технологічних процесів установки Л-2:**

- 1 – робоча камера; 2 – електронно-променева (ЕП) гармата для нагрівання виробів знизу; 3 – ЕП гармата для випаровування матеріалів;
- 4 – ЕП гармата для нагрівання виробів зверху; 5 – вертикальний механізм для подачі заготовки для сплавлення; 6 – механізм підвіски та обертання виробу;
- 7 – оглядова система; 8 – габарит циліндричного виробу;
- 9 – габарит дискового виробу; 10 – заслонка; 11 – тигель; 12 – зливоч;
- 13 – механізм подачі зливка для випаровування;
- 14 – горизонтальний механізм подачі виробу; 15 – шлюзова камера

На установці Л-2 можна отримувати різні типи теплозахисних покриттів: одношарові металеві типу  $\text{MeCrAlY}$ ,  $\text{MeCrAlY}(\text{HfSiZr})$ ; одношарові композиційні мікрошарові типи з чергуванням шарів  $\text{MeCrAlY}(\text{MeCrAlYHfSiZr}) / \text{MeCrAlY}(\text{MeCrAlYHfSiZr}) + \text{MeO}$  де  $\text{MeO} - \text{Al}_2\text{O}_3$  або  $\text{ZrO}_2 + 6...8 \text{ мас } \% \text{ Y}_2\text{O}_3$ ; двошарові покриття з внутрішнім металевим  $\text{MeCrAlY}(\text{MeCrAlYHfSiZr})$  та зовнішнім керамічним шаром; двошарові покриття з внутрішнім композиційним  $\text{MeCrAlY}(\text{MeCrAlYHfSiZr}) + \text{MeO}$  дисперснозміцненого або мікрошарового типів та зовнішнім керамічним  $(\text{ZrO}_2 - \text{Y}_2\text{O}_3)$  шаром; тришарові покриття з внутрішнім та проміжним металевими шарами на основі сплавів  $\text{MeCrAlY}(\text{MeCrAlYHfSiZr})$  та зовнішнім шаром на основі кераміки  $(\text{ZrO}_2 - \text{Y}_2\text{O}_3)$ ; тришарові покриття з внутрішнім металевим  $\text{MeCrAlY}(\text{MeCrAlYHfSiZr})$ , проміжним композиційним  $\text{MeCrAlY}(\text{MeCrAlYHfSiZr}) + \text{MeO}$  дисперснозміцненого або мікрошарового типів та зовнішнім керамічним  $(\text{ZrO}_2 - \text{Y}_2\text{O}_3)$  шарами; тришарові покриття з внутрішнім металевим  $\text{MeCrAlY}(\text{MeCrAlYHfSiZr})$ , проміжним композиційним  $\text{MeCrAlY}(\text{MeCrAlYHfSiZr}) + \text{MeO}$  дисперснозміцненого або мікрошарового типів і зовнішнім керамічним  $(\text{ZrO}_2 - \text{Y}_2\text{O}_3)$  шаром з елементами дисперсних частинок боридів, які при окисненні заліковують мікротріщини у зовнішньому керамічному шарі, що виникають при термоциклах нагріву та охолодження.

Проведені дослідження показали, що застосування теплозахисних покриттів товщиною 250 мкм з теплопровідністю  $1 \text{ Вт/м}^2\text{К}$  на двох ступенях турбіни дозволяє реалізувати одну з двох можливостей [3–5]:

- при незмінній робочій температурі матеріалу лопаток збільшити температуру газу перед турбіною приблизно на  $100^\circ\text{C}$ , що приведе до підвищення ККД та економії палива більш як на 13 %;

- не змінюючи температуру газу перед турбіною, збільшити довговічність лопаток приблизно в 4 рази внаслідок зниження їхньої робочої температури.

Загальна товщина одношарових жаростійких покриттів не перевищує 150 мкм, двошарових теплозахисних – 200 мкм, тришарових теплозахисних – 300 мкм. Товщина демпфуючого внутрішнього шару зі зниженим вмістом Al (3–6 % мас.) у тришарових теплозахисних покриттях коливається від 30 до 50 мкм, проміжного жаростійкого шару становить 50–80 мкм, зовнішнього керамічного – 80–120 мкм. Концентрації хрому, алюмінію, ітрію в жаростійкому шарі складають, відповідно, 18–24 % мас, 10–130 % мас, 0,4–1,8 % мас, а цирконію, гафнію, силіцію становлять від 0,05 до 0,2 % мас.

Додаткове легування сплавів  $\text{MeCrAlY}$  цирконієм, гафнієм та силіцієм дозволило, з одного боку, підвищити жаростійкість одношарових багатокомпонентних та композиційних жаростійких покриттів, а з

іншого боку, при використанні зазначених сплавів в якості матеріалів для внутрішнього демпфуючого та проміжного жаростійкого шару, уповільнити дифузійні процеси на межі основа – демпфуючий шар, проміжний жаростійкий шар – зовнішній керамічний шар і тим самим підвищити ресурс роботи покриття.

Ще більше сповільнення дифузійних процесів у покритті відзначається, коли використовується проміжний жаростійкий шар у мікрошаровому варіанті. Оптимальні параметри досягаються при товщині металевого та композиційного шарів, які чергуються, від 0,5 до 1 мкм і концентрації дисперсних тугоплавких частинок ( $ZrO_2 - Y_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ) у композиційному мікрошарі від 0,3 до 1 % мас.

При конструюванні теплозахисних покриттів (ТЗП) важливого значення набуває формування бар'єрного мікрошару на межі розділу проміжний жаростійкий шар – зовнішній керамічний шар. Зазвичай шар металокераміки товщиною від 1 до 5 мкм на основі складних шпінелів з  $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$ ,  $Y_2O_3$ ,  $CrO_3$  і сплаву  $MeCrAlY$  отримують за допомогою спеціальних технологічних прийомів. Подібний бар'єрний шар гальмує утворення оксидної плівки ( $Al_2O_3$ ) на межі розділу проміжний – зовнішній шар теплозахисного покриття. Якщо товщина плівки  $Al_2O_3$  досягає 10–15 мкм спостерігається відшарування зовнішнього керамічного шару  $ZrO_2 - Y_2O_3$ .

У тришарових покриттях в якості внутрішнього демпфуючого шару використовують сплави  $MeCrAlY$ ,  $MeCrAlYSiHfZr$  із співвідношенням компонентів, що забезпечують високу пластичність (відносно подовження при розриві  $\delta = 2,5$  %) і достатню жаростійкість. Цей шар служить для зниження напружень у ТЗП, а також для гальмування та блокування тріщин, що розвиваються з поверхні в глибину основи.

Проміжний шар являє собою композит підвищеної жаростійкості та термостабільності. Третій зовнішній керамічний шар сформований на основі діоксиду цирконію, стабілізованого оксидом ітрію. У зовнішній керамічний шар можуть додатково вводити один або кілька тугоплавких боридів, які заліковують мікротріщини, що виникають у зовнішньому керамічному шарі. Остання модифікація ТЗП призначена для захисту лопаток першого ступеня турбіни військових двигунів п'ятого покоління.

### Список використаних джерел

1. Акрмов В. А., Нречаниук І. М., Смахніук Ю. О., Нречаниук В. Н. and Liubarenko M. P. Promyslova Tekhnolohiia Nanesennia Dvosharovykh Plazmovykh Teplozakhysnykh Pokryttiv na Soplovi Lopatky Hazovykh Turbin

[Industrial technology of applying two-layer plasma heat-protective coatings on the nozzle blades of gas turbines] (Sovremennaia elektrometallurhiya, № 4. – P. 28–31 (2020).

2. N. I. Grechanyuk, G. A. Baglyuk, P. P. Kucherenko, A. G. Melnik, I. N. Grechanyuk V. G. Grechanyuk, and Y. A. Smashnyuk, Laboratory Electron-Beam Multipurpose Installation L-2 for Producing Alloys, Composites, Coatings, and Powders, Powder Metallurgy and Metal Ceramics, No. 56 (1): 113 (2017).

3. I. M. Grechanyuk, M. I. Grechanyuk, G. A. Bagliuk, V. G. Grechanyuk, O. V. Khomenko, O. V. Dudnik, and V. I. Gots, Powder Metallurgy and Metal Ceramics, No. 61: 459 (2022).

4. M. I. Grechanyuk, I. M. Grechanyuk, Y. N. Yevterev, V. G. Grechanyuk, T. O. Prikhna, G. A. Bagliuk, V. I. Gots, O. V. Khomenko, O.V. Dudnik, and O. V. Matsenko, Powder Metallurgy and Metal Ceramics.

5. T. O. Prikhna, I. M. Grechanyuk, M. V. Karpets, M. I. Grechanyuk, G. A. Bagliuk, V. G. Grechanyuk, and O. V Khomenko, Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 2022, No. 61: 230 (2022).