

PACS numbers: 61.43.Gt, 62.23.Pq, 81.05.Rm, 81.10.Bk, 81.15.Gh, 81.40.Lm, 81.70.Bt

Конструкції електронно-променевих теплозахисних покриттів на лопатках газових турбін, в тому числі з наночастинками боридів у зовнішньому керамічному шарі

Н. І. Гречанюк¹, В. Г. Гречанюк², В. О. Чорновол², І. М. Гречанюк²,
О. В. Маценко²

¹*Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України,
вул. Омеляна Пріцака, 3,
03142 Київ, Україна*

²*Київський національний університет будівництва і архітектури,
просп. Повітрофлотський, 31,
03037 Київ, Україна*

В статті докладно розглядаються конструкції теплозахисних покриттів, які можуть бути реалізовані методом електронно-променевої технології випаровування–конденсації. Проаналізовано наявні конструкції теплозахисних покриттів на лопатках газових турбін різного призначення. Аналіза показала, що теплозахисні покриття забезпечують збільшення температури газу перед входом у проточну частину турбіни чи то підвищення експлуатаційного ресурсу лопаток за незмінної температури газу, що веде до підвищення ККД й економії палива. Встановлено оптимальні параметри для різних типів покриттів, включаючи конструкцію та компонентний склад шарів, що сприяє підвищенню жаротривкості та загального ресурсу роботи покриття. Показано перспективи використання термобар'єрних покриттів з наночастинками боридів у зовнішньому керамічному шарі. Детально описано лабораторні та промислові електронно-променеві устаткування для нанесення покриттів, які забезпечують оптимальні умови для роботи та витоПЛення матеріалів. Особливу увагу зосереджено на новітньому устаткуванні ЛІ-9, яке відрізняється від попередніх використанням електронно-променевих гармат з холодною катодою, що підвищує стабільність і тривалість їхньої роботи. Крім того, в статті описано технічні особливості устаткування, їхні конструкція та можливості використання для нанесення різних типів покриттів. Надано також інформацію щодо системи управління устаткуваннями та принципу роботи новітнього устаткування, яке може застосовуватися для осадження різних типів захисних покриттів, включаючи нові силіцидні покриття мікрошарового типу. Враховуючи цей детальний огляд технологій та устаткувань, стаття демонструє напрям досліджень і розвитку в галузі теплозахисних покриттів

для підвищення надійності й ефективності газових турбін.

The article provides a comprehensive analysis of heat-resistant coating structures, which can be implemented using the electron-beam evaporation-condensation method. The authors are examined available constructions of heat-resistant coatings on blades of various-purpose gas turbines. The analysis reveals that these coatings result in an increase in gas temperature before entering the turbines' flow path or an enhancement of the blades' operational lifespan, while maintaining the gas temperature leading to increased efficiency and fuel savings. Optimal parameters are established for different types of coatings, including the structure and compositional makeup of layers, contributing to improved heat resistance and overall coating durability. The prospects of utilizing thermal-barrier coatings with nanoparticle borides in an external ceramic layer are highlighted. Detailed descriptions of the laboratory and industrial electron-beam facilities for applying coatings are provided, ensuring optimal conditions for material workability and melting. Special attention is directed towards the latest L-9 facility distinguished from its predecessors by employing electron-beam guns with a cold cathode enhancing their stability and operational longevity. Furthermore, the article outlines the technical specifics of these facilities, their construction, and their capabilities for applying various types of coatings. Information regarding the management system of these setups and the operational principle of the cutting-edge facility capable of depositing various protective coatings, including new micro-layered silicide coatings, is also presented. Considering this detailed review of technologies and facilities, the article highlights the direction of research and development in the field of protective heat-resistant coatings, aiming to enhance the reliability and efficiency of gas turbines.

Ключові слова: електронно-променеве обладнання, метод випаровування-конденсації, пароконденсовані композиційні матеріали, теплозахисні покриття, лопатки газових турбін.

Key words: electron-beam equipment, evaporation-condensation method, vapour-condensed composite materials, thermal-barrier coatings, gas-turbine blades.

(Отримано 12 грудня 2023 р.; після доопрацювання — 26 квітня 2024 р.)

1. ВСТУП

Створення ефективних газових турбін, які працюють надійно, є складною проблемою, що виникає в ході розвитку газотурбобудування. Ключовими аспектами цієї складності є робочі та соплові лопатки турбіни, чиї матеріали та конструкція мають важливе значення для допустимої температури газу перед турбіною й, отже, впливають на техніко-економічні характеристики газотурбінних двигунів (ГТД). Нині технологічні виклики, пов'язані із подальшим розвитком конвективного охолодження лопаток і

станом металургії жароміцних стопів, свідчать про необхідність вдосконалення параметрів циклу ГТД. Це вимагає розробки нової системи захисту лопаток газових турбін і переходу від жаротривких багатокомпонентних покриттів до теплозахисних (ТЗП). Спроби створення захисних теплопокриттів для газових турбін були застосовані понад 60 років тому. Але зацікавлення в цих технологіях останнім часом значно зросло, оскільки сучасні ГТД працюють за дуже високих температур, що ставить нові виклики перед матеріалами та технологіями теплозахисту.

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

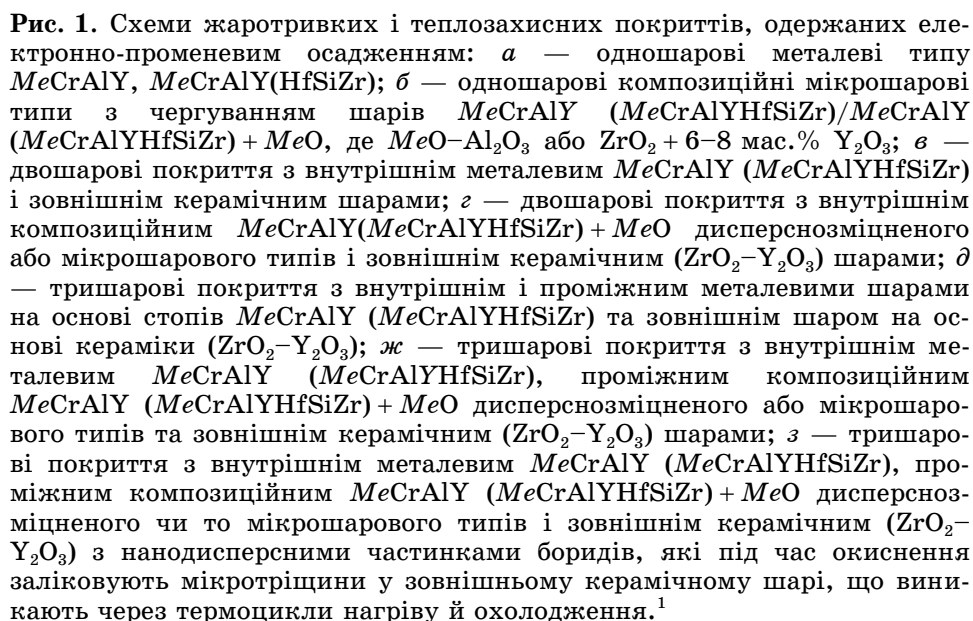
У НВП «Елтехмаш» захисні покриття на лопатки газових турбін наносили шляхом електронно-променевого випаровування стопів $MeCrAlY$ (де Me — $NiCoFe$), $MeCrAlYNbSiZr$ і кераміки на основі ZrO_2 , стабілізованого Y_2O_3 та подальшої конденсації парової фази на поверхні робочих лопаток газових турбін різного призначення [1] (рис. 1).

Проведені дослідження показали, що застосування теплозахисних покриттів завтовшки у 250 мкм з теплопровідністю у $1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ на двох щаблях турбіни дає змогу реалізувати одну з двох можливостей [2–7]: 1) за незмінної робочої температури матеріалу лопаток збільшити температуру газу перед турбіною приблизно на 100°C , що приведе до підвищення ККД й економії палива на понад 13%; 2) не змінюючи температуру газу перед турбіною, збільшити довговічність лопаток приблизно в 4 рази внаслідок пониження їхньої робочої температури.

Загальна товщина одношарових жаротривких покриттів не перевищує 150 мкм, двошарових теплозахисних — 200 мкм, тришарових теплозахисних — 300 мкм. Товщина демпфувального внутрішнього шару з пониженим вмістом Al (3–6% мас.) у тришарових теплозахисних покриттях варіюється від 30 до 50 мкм, проміжного жаротривкого шару становить 50–80 мкм, зовнішнього керамічного — 80–120 мкм. Концентрації Хрому, Алюмінію, Ітрію в жаротривкому 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.

3. РЕЗУЛЬТАТИ Й ОБГОВОРЕННЯ

Додаткове легування стопів $MeCrAlY$ Цирконієм, Гафнієм і Силіцієм уможливило, з одного боку, підвищити жаротривкість одношарових багатокомпонентних і композиційних жаротривких покриттів, а з іншого боку, за використання зазначених стопів в



Ще більше сповільнення дифузійних процесів у покритті відбувається, коли використовується проміжний жаротривкий шар у мікросхаровому варіанті. Оптимальні параметри досягаються за товщини металевого та композиційного шарів, що чергуються, від 0,5 до 1 мкм, а концентрації дисперсних тяжкотопких части-

нок $\text{ZrO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3$, Al_2O_3 у композиційному мікрошарі — від 0,3 до 1% мас.

Під час конструювання теплозахисних покриттів (ТЗП) важливого значення набуває формування бар'єрного мікрошару на межі поділу проміжний жаротривкий шар–зовнішній керамічний шар. Зазвичай шар металокераміки завтовшки від 1 до 5 мкм на основі складних шпінелей з Al_2O_3 , ZrO_2 , Y_2O_3 , CrO_3 і стопу MeCrAlY одержують за допомогою спеціальних технологічних способів. Подібний бар'єрний шар гальмує утворення оксидної (Al_2O_3) плівки на межі поділу проміжний шар–зовнішній шар теплозахисного покриття.

Якщо товщина плівки Al_2O_3 сягає 10–15 мкм, спостерігається відшарування зовнішнього керамічного шару $\text{ZrO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3$.

Двошарові покриття метал/кераміка (рис. 1, е), одержані за двостадійною технологією, широко застосовуються на підприємстві «Зоря–Машпроект» (м. Миколаїв, Україна) та забезпечують ресурс роботи лопаток першого ступеня турбіни газотурбінних агрегатів для перекачування газу до 25000 годин. В даний час проводяться роботи з оптимізації технології нанесення двошарових теплозахисних покриттів з внутрішнім композиційним шаром мікрошарового типу з чергуванням шарів $\text{CoCrAlY--CoCrAlY} + (\text{ZrO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3)$ та зовнішнім керамічним шаром $\text{ZrO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3$. Подібні покриття наносяться за один технологічний цикл і мають забезпечити ресурс до 32000 годин.

Підвищення довговічності ТЗП доцільне за рахунок зміни конструкції покриттів, оскільки немає необхідності вносити якісь зміни в схему технологічного процесу, що пов'язано із значними енергетичними витратами.

Коригування у схемі конструкції ТЗП не обмежено можливостями електронно-променевої технології. У тришарових покриттях (рис. 1, д, ж, з), як уже зазначалося раніше, в якості внутрішнього демпфувального шару використовують стопи MeCrAlY , MeCrAlYSiHfZr із співвідношенням компонентів, що забезпечує високу пластичність (відносне подовження за розриву $\delta = 2,5\%$) і достатню жаротривкість. Цей шар служить для пониження напружень у ТЗП, а також для гальмування та блокування тріщин, що розвиваються з поверхні вглиб основи.

Проміжний шар являє собою композит підвищеної жаротривкості та термостабільності. Третій зовнішній керамічний шар сформовано на основі діоксиду Цирконію, стабілізованого оксидом Ітрію. У зовнішній керамічний шар додатково вводять один або кілька боридів з концентрацією у 5–10% мас., розмір наночастинок яких складає 10–20 нм. Зазначені наночастинки під час окиснення заліковують мікротріщини, що виникають у зовнішньому керамічному шарі.

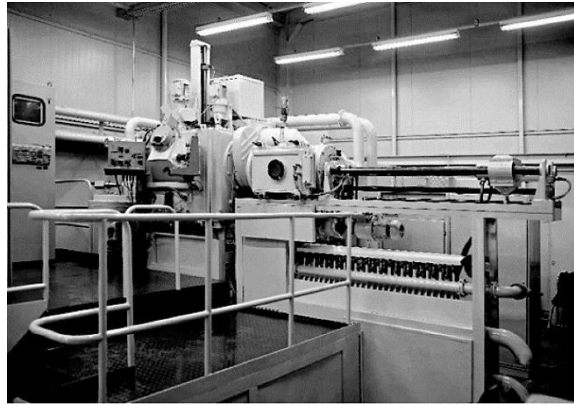


Рис. 2. Зовнішній вигляд універсального лабораторного електронно-променевого устаткування Л-2.²

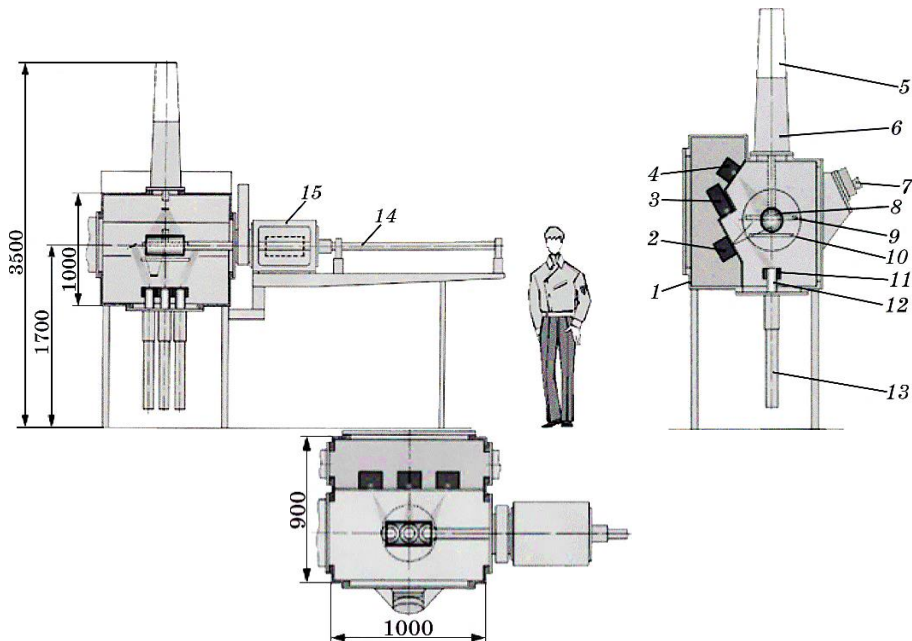


Рис. 3. Схеми технологічних процесів устаткування Л-2: 1 — робоча камера; 2 — електронно-променева (ЕП) гармата для нагрівання виробів знизу; 3 — ЕП-гармата для випаровування матеріалів; 4 — ЕП-гармата для нагрівання виробів зверху; 5 — вертикальний механізм для подачі заготовки для стоплення; 6 — механізм підвіски й обертання виробу; 7 — оглядова система; 8 — габарит циліндричного виробу; 9 — габарит дискового виробу; 10 — заслінка; 11 — тигель; 12 — зливоч; 13 — механізм подачі зливка для випаровування; 14 — горизонтальний механізм подачі виробу; 15 — шлюзова камера.³

Остання модифікація ТЗП — для захисту лопаток першої щаб-
лини турбіни військових двигунів п'ятого покоління. Такі роботи
проводяться для українських підприємств, що працюють у галузі
газотурбобудування (ДП «Івченко-Прогрес» та АТ «Мотор-Січ»,
м. Запоріжжя).

Для нанесення жаротривких і теплозахисних покриттів розро-
блено лабораторне та промислове електронно-променеве облад-
нання. На рисунку 2 показано зовнішній вигляд універсального
лабораторного електронно-променевого устаткування Л-2 для то-
плення та випаровування матеріалів у вакуумі [8]. Схеми техно-
логічних процесів представлено на рис. 3; технічні характери-
стики устаткування наведено у табл. 1.

ТАБЛИЦЯ 1. Технічні характеристики устаткування Л-2.⁴

1	Встановлена потужність, кВт	300
2	Пришвидшувальна напруга, кВ	20
3	Розмір зливків, що випаровуються, мм: — діаметер — довжина	70 400
4	Розмір заготовок, що стоплюються, мм: — діаметер — довжина	80 390
5	Розмір зливків, що витоплюються, мм: — діаметер, перетин — довжина	70 400
6	Розмір поверхні конденсації, мм: — прямокутньої пласкої — круглий плаский (діаметер): — циліндричної — діаметер — довжина	350×350 400 150 350
7	Кількість тиглів, шт.	3
8	Внутрішній діаметер тиглів	70, 74
9	Вантажопідйомність горизонтального штока, кг	30
10	Вантажопідйомність горизонтального штока, кг	50
11	Кількість і номінальна потужність електронних гар- мат, $n \times \text{кВт}$: — для випаровування матеріалів — для нагрівання виробів — для перетоплення	3×60 2×60 (3×60)
12	Ступінь вакууму в робочій камері, Па	$6 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-2}$
13	Витрата охолоджувальної води, м ³ /год	10
14	Площа, займана устаткуванням, м ²	100

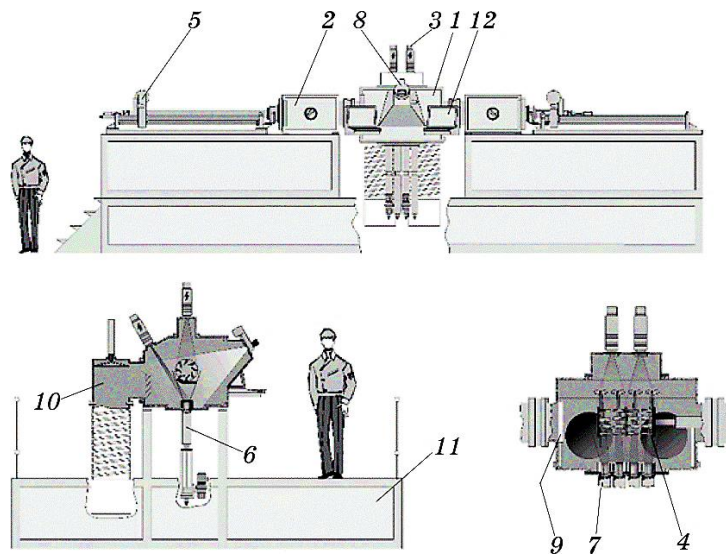


Рис. 4. Загальний вигляд устаткування Л-9 і схема нанесення покриттів: 1 — камера технологічна; 2 — камера шлюзова; 3 — електронна гармата; 4 — касета; 5 — механізм подачі касети (виробу); 6 — механізм подачі зливка; 7 — тигель; 8 — оглядова система; 9 — заслінка; 10 — вакуумна система; 11 — майданчик обслуговування; 12 — пульт керування.⁵

ТАБЛИЦЯ 2. Технічні характеристики устаткування Л-9.⁶

1	Встановлена потужність, кВт	400
2	Пришвиджувальна напруга, кВ	25
3	Розмір злиwkів, що випаровуються, мм: — діаметер — довжина	70 500
4	Розміри касети з напорошуваними лопатками, мм: — діаметер — довжина	250 500
5	Кількість тиглів, шт.	4
6	Вантажопідйомність штока подачі касети, кг	50
7	Кількість і номінальна потужність електронних гармат, $n \times \text{кВт}$	6×60
8	Ступінь вакууму в робочій камері, Па	$6 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-2}$
9	Витрата охолоджувальної води, $\text{м}^3/\text{год}$	15
10	Площа, займана устаткуванням, м^2	140

Устаткування складається з робочої та допоміжної камер для

завантаження та вивантаження виробів, що покриваються. Устаткування оснащено 5 електронно-променевими гарматами із гарячими катодами власної конструкції. Устаткування призначене для:

- перетоплення металів і стопів з метою рафінування й одержання циліндричних зливків;
- одержання спеціальних стопів, включаючи інтерметаліди, наприклад Ni_3Al , Ti_3Al , TiAl тощо;
- осадження корозійностійких, теплозахисних, конструкційних покриттів на плоскі поверхні та поверхні обертання, включаючи лопатки газових турбін;
- осадження особливо твердих зносостійких покриттів із чистих металоподібних сполук та їхніх сумішей, у тому числі покриттів мікрошарового типу;
- синтези під час осадження парових потоків тяжкотопких сполук (карбідів, боридів, силіцидів) та одержання тонких і товстих покриттів;
- одержання дисперснозміцнених мікрошарових і мікропористих матеріалів у вигляді покриттів і масивних заготовок, відокремлюваних від підкладинки;
- одержання покриттів з рівноважних фаз вуглецю.

Для промислового застосування створено універсальне електронно-променеве устаткування Л-9 [9]. Загальний вигляд устаткування та схему нанесення покриттів показано на рис. 4. Технічні характеристики наведено у табл. 2.

Устаткування являє собою блок вакуумних камер з механізмами, пристроями та системами, що забезпечують проведення технологічного процесу нанесення покриттів у вакуумі на різні вироби. До нижнього фланця робочої камери пристикувано блок тиглів, до складу яких входять чотири механізми подачі зливків, що випаровуються. Завантаження зливків матеріалів, що випаровуються, в механізми проводиться зверху через тиглі. Особливістю конструкції устаткування є оснащення її новим джерелом живлення зі стабілізацією пришвидшувальної напруги й електронно-променевими нагрівачами з холодною катодою.

Використання холодної катода з малолегованого стопу на основі алюмінію виключає будь-які його викривлення, що дає можливість одержувати стабільний електронний пучок упродовж 250 годин роботи устаткування без її заміни. З іншого боку, електронно-променеві нагрівачі з холодною катодою здатні стабільно працювати за вакууму у 10 Па, тоді як електронно-променеві нагрівачі з гарячою стрічковою катодою працюють у вакуумі не нижче $5 \cdot 10^{-2}$ Па.

Використання електронно-променевих нагрівачів з холодною катодою передбачає напускання кисню в парову хмару з діоксиду

Цирконію та забезпечує одержання стехіометричного складу зовнішнього шару теплозахисного покриття.

Чотири електронно-променеві гармати з холодною катодою служать для випаровування вихідних матеріалів з тиглів і встановлені таким чином, що кожна електронна гармата, призначена для випаровування зливка з відповідного тигля, може використовуватися також для випаровування матеріалу із сусіднього тигля. Така потреба може виникнути через зміну кількості тиглів або розташування їх за вимогами технологічного процесу. Дві синхронно працюючі заслінки призначено для екранування виробів під час розігріву випаровуваних матеріалів і виробів до стабілізації технологічного режиму. Для нагрівання виробів служать дві такі ж електронні гармати, встановлені зверху технологічної камери. Дві шлюзові камери призначено для перезавантаження виробів, що покриваються.

Роз'єднання об'ємів робочої та шлюзової камер проводиться двома вакуумними закривами. У шлюзових камерах передбачено пристрої йонної очистки виробів перед нанесенням покриттів. Наявність двох допоміжних камер збільшує продуктивність устаткування. Нанесення покриттів на вироби, що подаються по черзі зі шлюзових камер, відбувається без розвакуумування робочої камери, в якій відбуваються осадження покриттів. Механізм горизонтальної подачі служить для переміщення виробів із шлюзових камер у камеру напорошення та назад, а також для обертання виробів. Штоки забезпечено пристроями для зняття сигналів, що надходять з термодатчиків, закріплених на касетах з лопатками. У конструкції устаткування використано джерела окремо для кожної електронної гармати із пришивидшувальною напругою у 30 кВ.

Система управління устаткуванням здійснює:

- контроль технічного стану всіх систем устаткування;
- автоматичну підготовку устаткування для виконання технологічного процесу;
- керування з пульта оператора вузлами устаткування під час проведення процесу;
- обробку, відображення та зберігання в реальному масштабі часу технологічних параметрів і циклограм процесу.

В даний час продовжуються роботи з розробки конструкторської документації на принципово нове промислове електронно-променеве обладнання для осадження захисних покриттів. Устаткування (рис. 5) являє собою блок, що складається з чотирьох вакуумних камер, пов'язаних між собою: власне технологічної камери 1, перехідної камери 5 і двох шлюзових камер 3. У середині технологічної камери 1 встановлено водоохолоджувальні тиглі 11, в яких розміщують зливки 9, 10 матеріалів, що випаро-

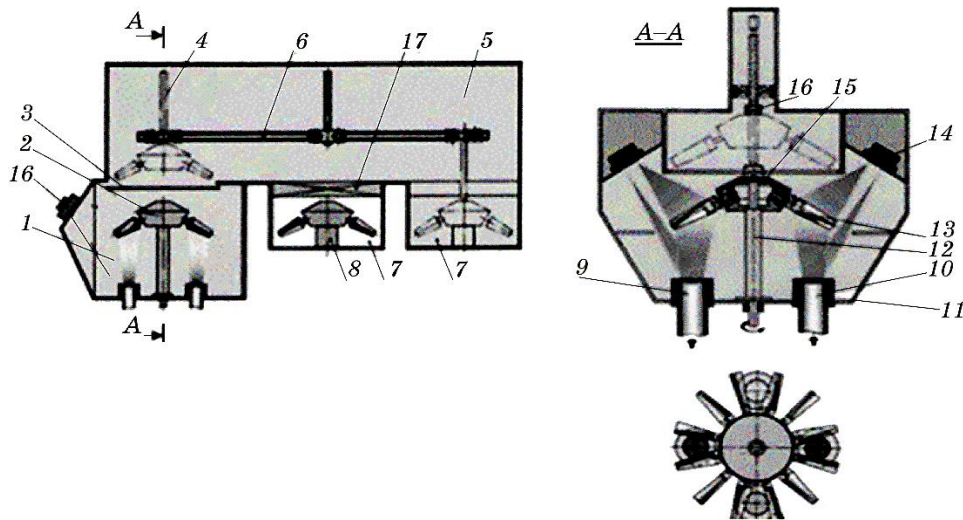


Рис. 5. Схема перспективного електронно-променевого устаткування для нанесення захисних покриттів: 1 — робоча камера; 2 — планетарний механізм обертання виробу (лопаток); 3 — заслінка; 4 — маніпулятор; 5 — перехідна камера; 6 — рейки; 7 — шлюзові камери; 8 — підставка; 9 — керамічний зливоч; 10 — металевий зливоч; 11 — тигель; 12 — обертова опора; 13 — виріб (лопатка); 14 — електронна гармата; 15 — повідний триб; 16 — захоплення; 17 — закрив.⁷

вуються. Промені електронних гармат 14 випаровують матеріал зливків, який у вигляді пари конденсується на виробках 13. Кількість використовуваних тиглів може змінюватися в залежності від необхідного складу та конструкції (дво-, тришарове, мікросхарове) покриття. На цьому устаткуванні можливе осадження всіх типів захисних покриттів, у тому числі нових типів силіцидних покриттів мікросхарового типу.

Слід зазначити, що на підприємстві реалізовано замкнутий цикл осадження покриттів на лопатки турбін, що включає витоплення всіх типів зливків на ніклевій, кобальтовій і залізній основах з використанням зливків кераміки.

4. ВИСНОВКИ

Застосування електронно-променевих устаткувань для нанесення захисних покриттів на лопатки газових турбін показує значний потенціал у поліпшенні ефективності цих двигунів. Згідно з проведеними дослідженнями, устаткування Л-9 з холодними катодами демонструє стабільну роботу впродовж 250 годин без необхідності заміни катод, що є істотним поліпшенням у порів-

нянні з попередніми моделями. Успішне впровадження цих технологій у промисловість свідчить про здатність електронно-променевих устатковань забезпечувати до 30 кВ пришвиджувальної напруги для кожної електронної гармати. Це дає змогу стабільно осаджувати покриття на поверхні лопаток турбін, забезпечуючи їхню захищеність і тривалий термін експлуатації. Уточнені технічні показники, такі як пониження вимог до вакууму на рівень 10 Па для електронно-променевих нагрівачів з холодною катодою порівняно з $5 \cdot 10^{-2}$ Па для гарячих стрічкових катод, вказують на поліпшення ефективності використання нових технологій. Це уможливорює оптимізувати процес нанесення покриттів у вакуумних умовах, забезпечуючи стабільність і якість покриття. Дослідження також показують, що електронно-променеві устаткування дають змогу осаджувати різноманітні захисні покриття, включаючи нові типи силіцидних покриттів мікрошарового типу, що відкриває широкі перспективи для підвищення надійності та терміну служби газотурбінних двигунів. Отже, результати досліджень і практичне впровадження електронно-променевих устатковань для нанесення захисних покриттів на лопатки газових турбін свідчать про їхню велику перспективу у поліпшенні технічних характеристик цих двигунів, зокрема зі збільшенням їхньої ефективності та надійності.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА—REFERENCES

1. V. A. Akrymov, I. M. Hrechaniuk, Yu. O. Smashniuk, V. H. Hrechaniuk, and M. P. Liubarenko, *Promyslova Tekhnolohiia Nanesennya 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], *Sovremennaya Ehlektrometallurgiya*, **4**: 28 (2020) (in Ukrainian); <https://doi.org/10.37434/sem2020.04.05>
2. 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*, **61**: 459 (2022); <https://doi.org/10.1007/s11106-023-00333-0>
3. 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*, **61**: 328 (2022); <https://doi.org/10.1007/s11106-022-00320-x>
4. 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*, **61**: 230 (2022); <https://doi.org/10.1007/s11106-022-00310-z>
5. T. O. Prikhna, I. M. Grechanyuk, M. V. Karpets, M. I. Grechanyuk, G. A. Bagliuk, I. M. Grechanyuk, and V. A. Chornovol, *Powder Metallurgy*

- and *Metal Ceramics*, **61**: 70 (2022); <https://doi.org/10.1007/s11106-022-00296-8>
6. N. I. Grechanyuk, V. G. Grechanyuk, and A. F. Manulyk, *Journal of Material Science and Technology Research*, **8**: 19 (2021); <https://doi.org/10.31875/2410-4701.2021.08.3>
 7. N. I. Grechanyuk, V. G. Grechanyuk, and A. F. Manulyk, *Journal of Material Science and Technology Research*, **8**: 24 (2021); <https://doi.org/10.31875/2410-4701.2021.08.4>
 8. N. I. Grechanyuk, G. A. Baglyuk, P. P. Kucherenko, A. G. Melnik, I. N. Grechanyuk V. G. Grechanyuk, and Y. A. Smashnyuk, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **56**, No. 1: 113 (2017).
 9. N. I. Grechanyuk, P. P. Kucherenko, A. G. Melnik, I. N. Grechanyuk, and Y. A. Smashnyuk, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **55**, Nos. 7–8: 489 (2016); <https://doi.org/10.1007/s11106-016-9831-y>

¹*I. M. Frantsevykh Institute for Problems of Materials Science, N.A.S. of Ukraine, 3, Omeljan Pritsak Str., UA-03142 Kyiv, Ukraine*

²*Kyiv National University of Construction and Architecture, 31, Povitroflotsky Ave., UA-03037 Kyiv, Ukraine*

¹ **Fig. 1.** Schemes of heat-resistant and thermal barrier coatings obtained by electron-beam deposition: *a*—single-layer metallic types like $MeCrAlY$, $MeCrAlY(HfSiZr)$; *б*—single-layer composite microlayered types with alternating layers of $MeCrAlY$ ($MeCrAlYHfSiZr$)/ $MeCrAlY$ ($MeCrAlYHfSiZr$) + MeO , where MeO represents Al_2O_3 or $ZrO_2 + 6-8$ wt.% Y_2O_3 ; *в*—two-layer coatings with internal metallic $MeCrAlY$ ($MeCrAlYHfSiZr$) and external ceramic layer; *г*—two-layer coatings with internal composite $MeCrAlY(MeCrAlYHfSiZr) + MeO$ dispersed-strengthened or microlayered types and external ceramic ($ZrO_2-Y_2O_3$) layers; *д*—three-layer coatings with internal and intermediate metallic layers based on $MeCrAlY$ ($MeCrAlYHfSiZr$) alloys and external ceramic ($ZrO_2-Y_2O_3$) layer; *ж*—three-layer coatings with internal metallic $MeCrAlY$ ($MeCrAlYHfSiZr$), intermediate composite $MeCrAlY$ ($MeCrAlYHfSiZr$) + MeO dispersed-strengthened or microlayered types, and external ceramic ($ZrO_2-Y_2O_3$) layers; *з*—three-layer coating consisting of an internal metallic $MeCrAlY$ ($MeCrAlYHfSiZr$), intermediate composite $MeCrAlY$ ($MeCrAlYHfSiZr$) + MeO dispersed-strengthened or microlayered types, and an external ceramic ($ZrO_2-Y_2O_3$) with nanodispersed boride particles, which, during oxidation, seal microcracks in the external ceramic layer formed during thermal cycles of heating and cooling.

² **Fig. 2.** External view of the universal laboratory electron-beam installation L-2.

³ **Fig. 3.** Schematics of technological processes in the L-2 installation: 1—working chamber; 2—electron-beam (EB) gun for bottom heating of products; 3—EB gun for material evaporation; 4—EB gun for top heating of products; 5—vertical mechanism for feeding the workpiece for melting; 6—suspension and rotation mechanism of the product; 7—inspection system; 8—dimensions of a cylindrical product; 9—dimensions of a disc-shaped product; 10—shutter; 11—crucible; 12—ingot; 13—mechanism for feeding the ingot for evaporation; 14—horizontal mechanism for feeding the product; 15—gate chamber.

⁴ **TABLE 1.** Technical specifications of the L-2 installation.

⁵ **Fig. 4.** General view of the L-9 installation and coating application scheme: 1—technological chamber; 2—gate chamber; 3—electron gun; 4—cassette; 5—cassette (product) feeding mechanism; 6—ingot feeding mechanism; 7—crucible; 8—inspection system; 9—shutter; 10—vacuum system; 11—service platform; 12—control panel.

⁶ **TABLE 2.** Technical specifications of the L-9 installation.

⁷ **Fig. 5.** Diagram of a prospective electron-beam installation for applying protective coatings: 1—working chamber; 2—planetary mechanism for rotating the product (blades); 3—shutter; 4—manipulator; 5—transition chamber; 6—rails; 7—gate chambers; 8—base; 9—ceramic ingot; 10—metal ingot; 11—crucible; 12—rotating support; 13—product (blade); 14—electron gun; 15—drive gear; 16—gripper; 17—gate.