

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОЦІНКА ТЕРМОЦИКЛІЧНОЇ СТІЙКОСТІ ПЛАЗМОВИХ УЩІЛЬНЮЮЧИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ВУЗЛІВ ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК

**Актуальність роботи.** Одним з раціональних способів підвищення зносостійкості деталей машин є локальний захист ділянок підвищеного зносу елементами зі зносостійких матеріалів. Таку захисну структуру можна забезпечити попереднім нанесенням покриттів за допомогою плазмового напилювання. Це зокрема, стосується плазмового ущільнюючого покриття вузлів газотурбінних установок, які, наприклад, використовуються в складі суднового обладнання. При цьому зазначені вузли неминуче піддаються впливу досить високих температур, зокрема термоудару, що може призвести до руйнування покриття. У зв'язку з цим робота спрямована на пошук рішення актуального науково-практичного завдання – отримання ущільнюючих покриттів, виконаних плазмовим напилюванням, стійких до термоудару та аналіз умов експлуатації ущільнюючих покриттів для оцінювання їх впливу на напилений шар.

**Мета роботи** – визначення термічної стійкості ущільнюючих покриттів, в тому числі при термоциклічних випробуваннях на газодинамічному стенді, та оцінка впливу умов експлуатації на мікроструктуру і фазовий склад напиленого шару.

**Методи дослідження.** Для дослідження мікроструктури використана оптична і растрова електронна мікроскопія. Твердість зразків вимірювали за допомогою твердоміра Віккерса. Використовувалась розроблена установка для визначення стійкості покриття до тепловмінь. Проводився рентгенофазовий аналіз.

**Результати.** Запропоновані ущільнення на основі самофлюсуючого сплаву ПГ-10К-01 з добавками твердих змащень  $C(Ni)$  і  $BN(Ni)$  можуть працювати за температур до 1000...1050 °С, що відповідає умовам в продуктах згоряння палива ДС. У результаті випробувань встановлено, що два варіанти розроблених ущільнень ПГ-10К-01+20 % $C(Ni)$  і ПГ-10К-01+20 % $BN(Ni)$  за корозійно-ерозійною і термічною стійкістю перевершують серійне осередкове (стільникове) ущільнення з серійним наповнювачем УМ-16П.

**Наукова новизна.** Уперше проведено комплексне дослідження та оцінка термоциклічної стійкості на термоудар ущільнюючих покриттів, виконаних плазмовим напиленням вузлів газотурбінних агрегатів. Встановлено, що в структурі яка напилена з цілеспрямованим вибором складових ПГ-10К-01+20 % $C(Ni)$  і ПГ-10К-01+20 % $BN(Ni)$  за корозійно-ерозійною і термічною стійкістю перевершують серійне осередкове (стільникове) ущільнення з наповнювачем УМ-16Пта 20Б.

**Практична цінність.** Показана принципова можливість заміни плазмового напилювання в контрольованій атмосфері плазмовим напиленням спеціально обраними складовими на повітрі, що дає суттєві технічні та технологічні переваги. Запропоновані модернізовані типи ущільнюючих покриттів, які суттєво переважають ті, що застосовувалися до сьогодні.

**Ключові слова:** плазмове напилювання, вузли, ущільнення, дослідження, нові складові, умови використання, термічна стійкість, мікроструктура.

### Вступ

Зношування вважають однією з найважливіших проблем сучасної промисловості. Будь-які деталі схильні до зношування від дії робочого середовища. Цей процес призводить до зміни структури металу, частково геометрії деталей і, в підсумку, виходу їх з ладу. Залежно від виду зношування його швидкість змінюється в дуже широких межах. Одним з найбільш агресивним є зношування, що виникає при дії високої температури, в процесі роботи ущільнюючого покриття вузлів газотурбінних установок.

Плазмове напилювання ущільнюючих покриттів вузлів газотурбінних установок є однією з низки технологій покращення здатності обладнання виконувати протягом визначеного часу певний обсяг напрацювання без створення позаштатних ситуацій.

Плазмове напилення є оптимальним варіантом як відновлення конструкції, так і надання певним деталям нових фізичних якостей, які спроможні надати високі експлуатаційні результати.

Якість плазмового напилення визначається низкою складових, серед яких матеріли, режими ведення про-

цесу напилення, умови експлуатації, складові напиленого шару тощо.

Вказані складові визначають стійкість ущільнюючих покриттів. З параметрів стійкості одним із найвпливовіших є термоциклічна стійкість, що характерна для роботи газотурбінних установок, двигунів та їм подібного обладнання.

Враховуючи вищевказане та розглядаючи стійкість ущільнюючих покриттів вузлів обладнання треба визначити, які матеріали та технології найбільш раціональні при плазмовому напиленні для забезпечення саме термоциклічної стійкості. Це можливо при проведенні комплексних досліджень з використанням сучасного вимірювального обладнання та методичних розробок.

**Мета роботи** – підвищення ефективності процесу плазмового напилення ущільнюючих покриттів на основі, в тому числі, досліджень термоциклічної стійкості на термоудар, впливу умов експлуатації на мікроструктуру і фазовий склад напиленого шару з розробкою нових складових матеріалу напилення.

#### Аналіз публікацій за темою роботи

Збільшення зносостійкості вузлів та деталей може бути досягнуто кількома шляхами. Широко використовуються методи нанесення захисних шарів і у вигляді напилення та наплавлення [1–3].

Процеси плазмового наплавлення, маючи низку технологічних переваг перед іншими видами відновлення і створення робочих шарів виробів, широко використовуються в низці галузей промисловості. Це, зокрема, стосується відновлення та зміцнення відповідальних вузлів суднових двигунів [4–5].

В останній час вже виконано низку досліджень, які скеровані на виявлення напрямків підвищення якості напиленого шару [6–8]. Це стосується вивчення напруженого стану напилених покриттів з розробкою відповідних рекомендацій тощо.

В той же час досягнутий на сьогодні рівень знань щодо технологічного процесу плазмового напилення явно не достатній для подальшого підвищення якості напилених виробів.

Сучасний стан методик вивчення, обладнання для проведення широкого дослідження стану напиленого шару [9–10] дозволяє виявити його нові властивості і на цій основі розробити нові техніко-технологічні рішення і запропонувати їх промисловості.

В представленій роботі основна увага приділяється проблемам розроблення коректних і придатних до використання в технологічних цілях за критеріями надійності, зносостійкості підвищення ресурсу роботи нових матеріалів та умов їх нанесення та використання. Це відповідає ISO 9000:2015, де зазначено, що ефективність будь-якої технології – це співвідношення між досягнутими результатами при розробці і виробництві продукції, що випускається, і використаними ресурсами на її виготовлення [11].

Одним із напрямків вивчення та створення ефективних засобів впливу на технічні та технологічні особливості є дослідження, які пов'язані з термоциклічною стійкістю ущільнюючих покриттів отриманих плазмовим напиленням [12–13].

#### Оцінка термоциклічної стійкості на термоудар

Результати випробувань на термоциклічну стійкість ущільнюючих покриттів у лабораторних умовах показали, що відшарування відбувається по границі підкладка-покриття. Звідси випливає, що необхідно напиляти підшар із порошку ПГ-10К-01 без твердого змащення, що підвищить міцність зчеплення. Крім того, при дослідженні теплопровідності ущільнень виявлено, що наявність у покритті  $ZrO_2$  знижує його теплопровідність.

Зазначені передумови поставили задачу оптимізації пошарового складу ущільнень, напилених на повітрі й у вакуумі. Для вибору перспективного пошарового складу користувалися оцінкою термоциклічної стійкості. Оцінювали термоциклічну стійкість по твердому режимі (термоударі). Для цього ущільнюючі покриття наносили на повітрі і у вакуумі на пластини зі сплаву ЧС-70 розміром  $40 \times 40 \times 3$  мм. Торці пластин шліфували до появи границі «підкладка-покриття» і встановлювали в спеціальний контейнер (по 5 шт.) на відстані 20 мм. Нагрівання пластин з покриттями здійснювали в електричній муфельній печі СМОЛ-1,6,2,5.1/9-114 до  $900^\circ\text{C}$ , охолодження – у проточній воді, при температурі  $20^\circ\text{C}$ . Усі плазмонанілені покриття термооброблювали у вакуумі при температурі  $1070^\circ\text{C}$  протягом двох годин. Пошаровий склад, умови напилення, міцність зчеплення й кількість термоциклів до руйнування ущільнюючих покриттів наведені в таблиці 1.

Плазмове напилення ущільнюючих покриттів виконували на установці УПУ-3Д на режимах: I, A–250...300; U, B–80...108; Q (Ar), л/хв–20...30.

Серія дослідів показали, що ущільнюючі покриття на основі ПГ-10К-01 з добавками твердого змащення мають максимальні оцінки термоциклічної стійкості і показники міцності на зріз при нанесенні підшару із ПГ-10К-01 товщиною 0,1 мм у вакуумі незалежно від складу й умови напилення наступних шарів.

Розподіл вуглецю в ущільнюючих покриттях досліджували на електронно-зондовому мікроаналізаторі «Суперпроб-733» (Японія). Результати представлені на рис. 1.

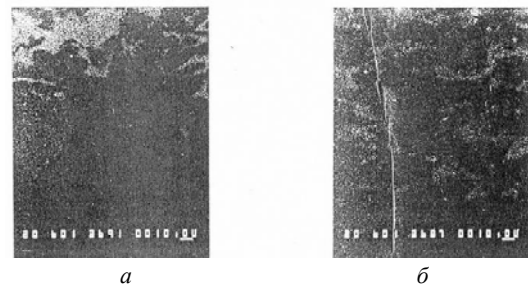


Рис. 1. Розподіл вуглецю в ущільнюючих покриттях ПГ-10К-01+20 %C(Ni),  $\times 600$ :  
а – напилено у вакуумі; б – напилено на повітрі

**Таблиця 1** – Міцність зчеплення та результати випробувань на термоциклічну стійкість ущільнюючих покриттів

Склад покриттів	Товщина, мм	Умови напilenня	Міцність зчеплення на зріз, МПа	Кількість термоциклів до руйнування	Характер руйнування
ПГ-10К-01	0,1	повітря	310	142	повне відшарування
ПГ-10К-01+20 %С(Ni)	1,9	повітря	310	142	
ПГ-10К-01	0,1	вакуум	350	151	часткове відшарування
ПГ-10К-01+20 %С(Ni)	1,9	вакуум	350	151	
ПГ-10К-01	0,1	вакуум	345	147	часткове відшарування
ПГ-10К-01+20 %С(Ni)	1,9	повітря	345	147	
ПГ-10К-01+20 %С(Ni)	2,0	повітря	110	42	повне відшарування
ПГ-10К-01+20 %С(Ni)	2,0	вакуум	150	83	часткове відшарування
ПГ-10К-01	0,1	вакуум	355	161	часткове відшарування
ПГ-10К-01+10 %С(Ni)	1,9	повітря	355	161	
ПГ-10К-01	0,1	повітря	310	37	повне відшарування
ПГ-10К-01+20 %BN(Ni)	1,9	повітря	310	37	
ПГ-10К-01	0,1	вакуум	345	113	часткове відшарування
ПГ-10К-01+20 %BN(Ni)	1,9	вакуум	345	113	
ПГ-10К-01	0,1	вакуум	350	102	часткове відшарування
ПГ-10К-01+20 %BN(Ni)	1,9	повітря	350	102	
ПГ-10К-01	0,1	повітря	305	15	часткове відшарування
ПГ-10-01+20 %ZrO <sub>2</sub> (Ni)	0,4	повітря	305	15	
ПГ-10К-01+20 %BN(Ni)	1,8	повітря	305	15	
ПГ-10К-01	0,1	вакуум	350	145	часткове відшарування
ПГ-10-01+20 %ZrO <sub>2</sub> (Ni)	0,4	повітря	350	145	
ПГ-10К-01+20 %BN(Ni)	1,8	повітря	350	145	

Отримані результати (рис. 1) показують, що при напilenні у вакуумі графіт, плакований нікелем, розподіляється по покриттю нерівномірно. Причина цього явища полягає у величинах швидкості потоку і розміру плями напilenня, що значно більше, ніж при напilenні на повітрі. Розвита поверхня плакованих часток сприяє нерівномірному їхньому розподілу, збільшенню концентрації від центру плями напilenня до периферії.

Результати дослідження розподілу вуглецю в ущільнюючих покриттях дозволяють рекомендувати доводити вміст С(Ni) до 20 %.

#### Термоциклічні випробування на газодинамічному стенді

Корозійні і термоциклічні випробування здійснювали на натуральних зразках-вставках кращих дослідних ущільнюючих покриттях, за даними табл. 2, на газодинамічному стенді. Для цього вставки додатково оброблялися на електроерозійному верстаті з метою заглиблення робочої поверхні для нанесення плазмового ущільнюючого покриття. Підготували дві вставки з осередками і три – без них.

Поглиблення робочої поверхні становило 1,8...2,0 мм. Залишкова глибина осередків близько 1 мм. Обидва типи вставок представлені на рис. 2. Перед напilenням вставки піддавалися знежиренню й піскоструменевій обробці. Залишкові осередки на двох вставках покликані підвищити адгезію покриття, а отже, й стійкість до тепловмінів.

Після напilenня вставки термооброблювали у вакуумі при 1050 °С 1,5 год. Загальний вид вставок з напilenням

ними ущільнюючими покриттями наведений на рис. 3.

Випробуванням піддавали вставки з покриттями, склад яких приведений у табл. 2. Вставки з ущільнюючими покриттями приварювали до касети (рис. 4) Для порівняння встановлена вставка (з отвором) з осередковим ущільненням.

Нагрівання здійснювали високотемпературним газовим потоком продуктів згорання, що імітує роботу ГТУ. При цьому напilenі поверхні розташовувалися під кутом приблизно 45° до напрямку потоку.

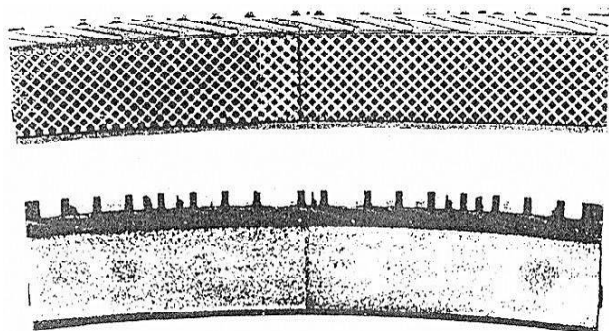
Підвищення температури вставок з 80 °С до 1050 °С відбувалося за 30 °С, витримка – 30 °С, охолодження до 80 °С здійснювали продувкою холодного повітря за 2 хв. Через 1000 циклів проведений огляд деталей. Вставки NN 001\*, 002\*, 0011, 005 витримали випробування без істотних зауважень, а вставка N 004 мала зруйноване покриття.

На вставці N 004 з покриттям ПГ-10К-01 + 10 % С (Ni) спостерігалися часткові відшарування покриттів (рис. 4) у місцях, де товщина перевищувала висоту буртика вставки. В середній частині покриття по-світліло і з'явилися світло-коричневі розводи. Глибока тріщина поперек покриття вставки N005 у самому верху, можливо, пояснюється занадто великою товщиною покриття, що піднімається над буртиком вставки (0,5 мм). У цьому випадку колір покриття не змінився. Не має зауважень вставка N 002\* з покриттям проплавленим електронним променем рядками. Колір покриття не змінився, воно оброблено в рівень з буртиками вставки. Вставка N 001\* мала відшарування у місцях, де над буртиками піднімалося покриття, колір останнього не змінився.

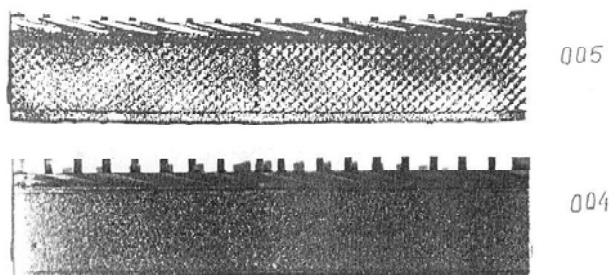
**Таблиця 2** – Склад покриттів, напилених на вставки

Номер вставки	Склад робочого шару товщиною близько 2 мм	Примітки
001*	ПГ-10К-01+10%С(Ni)	гладка поверхня
0011	ПГ-10К-01+20%С(Ni)	осередки **
002*	ПГ-10К-01+20%BN(Ni)	гладка поверхня
004	С(Ni)+10%Si	напилення у вакуумі
005	ПГ-10К-01+20%BN(Ni)	осередки **

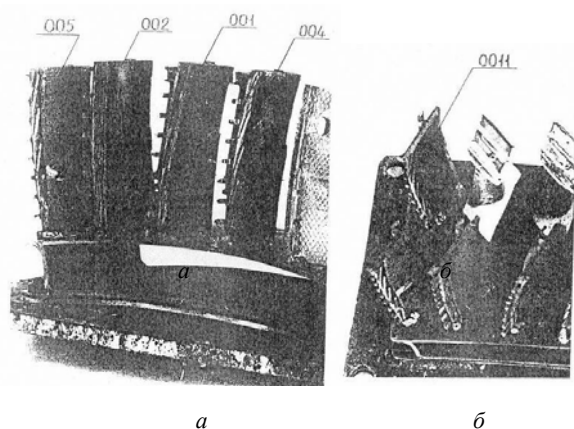
Примітка. \* Вставки N001 і N002 проплавлені електронним променем (рядками). \*\* Глибина осередків у два рази менше, ніж у вихідному ущільненні



**Рис. 2.** Вставки із заглибленою робочою поверхнею для нанесення ущільнюючих покриттів



**Рис. 3.** Вставки NN004, 005 з ущільнюючими покриттями, при плазмовому напиленні



**Рис. 4.** Загальний вид касети зі вставками: а – вид збоку; б – вид зверху

Покриття вставки N 004 зруйнувалося на площі близько 40 %. Це пояснюється низькою міцністю зчеплення, що призвело до здуття і розпушення. Вставка з круглимнаскрізним отвором у верхній частині (див. рис. 4) з наповнювачем УМ-16П, застосовувана на виробництві, по всій поверхні містить дрібні (100...300 мкм) пори, можливо, обумовлені розплавленням або вигоранням і видуванням одного з компонентів.

Після огляду касету зі вставками нагріли до температури 1000 °С. Потім при ізотермічній витримці в паливо подавалося за 1 хв близько 3 см<sup>3</sup> солі, близькою до складу морської води. Таким чином імітувалася робота деталей у максимально наближених до реальних умов. Після випробувань, протягом 38 годин, зроблений контрольний огляд вставок, що показав стійку опірність всіх дослідних покриттів сольовій корозії, які успішно проявили стійкість до теплових змін. Слід зазначити зміну кольору покриттів. Можливо, це пояснюється появою нальоту сольових з'єднань з компонентами палива при високих температурах.

Після контрольного огляду випробування на «прожиг» відновили, потім, після закінчення 200 годин наробітку, випробування продовжили в режимі термоцилювання на зазначеному вище режимі. Сумарна кількість циклів доведена до 2000.

У результаті випробувань встановлено, що два варіанти розроблених ущільнень ПГ-10К-01+20 %С(Ni) і ПГ-10К-01+20 %BN(Ni) за корозійно-ерозійною і термічній стійкістю перевершує серійне осередкове (стільниково-ве) ущільнення з наповнювачем УМ-16П.

З метою оцінювання стійкості до теплових змін плазмових покриттів були проведені дослідження на спеціальній установці. Структурна схема установки наведена на рис. 5.

Параметри зразка, який використовується для визначення стійкості до теплових змін покриттів, наведена на рис. 6.

Нагрівання здійснювали електричним струмом до 1000 °С за 30 секунд, витримка –30 секунд, охолодження до температури навколишнього середовища за 60 секунд. Установка працює таким чином: при подаванні струму на мілівольтметр Ш 4501, лічильник СИ 206 ХЛ14 та реле часу «Інтервал» одночасно подається напруга і на пускач, який включає джерело живлення ВДУ-1201, яке замкнуто через блок баластних реостатів ББР-1200

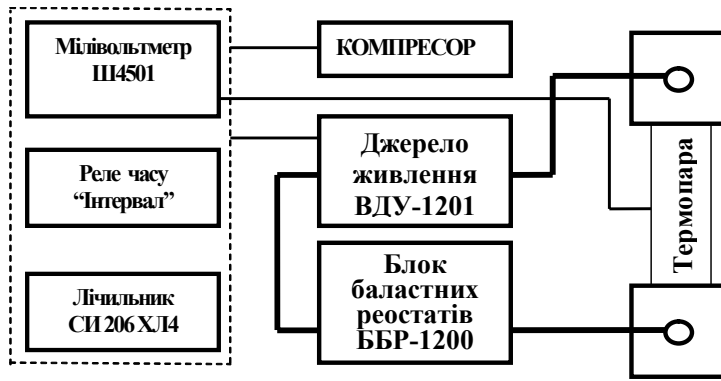


Рис. 5. Структурна схема установки для визначення стійкості покриття до теплозмін

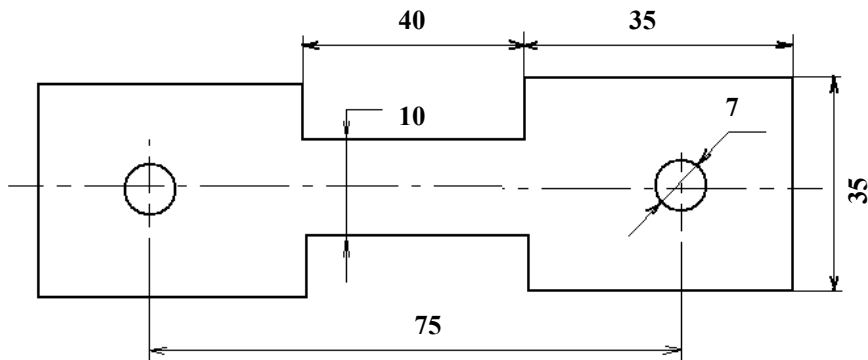


Рис. 6. Зразок для визначення стійкості до теплозмін

на зразок. При досягненні температури зразка  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , яка контролюється за допомогою хромель-алюмелевої термопари та мілівольтметра Ш4501, спрацьовує відсікач та лічильник. Реле часу «Інтервал» вмикає компресор, який стислим повітрям охолоджує зразок; після вимкнення компресору спрацьовує пускач джерела живлення та цикл повторюється.

#### Вплив умов експлуатації на мікроструктуру і фазовий склад

Вміст графіту (С) нітриду бору (BN) у вставках після випробувань, описаних вище, визначали методом кількісного рентгенофазового аналізу на приладі ДРОН-3, що працює в режимі запису дифрактограми. Для усунення небажаного впливу флуоресцентного тла, зйомку зразків робили в монохроматизованому Си-випромінюванні. Як аналітичні відображення нами були обрані Ni(111), BN(002), C(002).

Результати визначення вмісту нітриду бору і графіту представлені в табл. 3.

У результаті встановлено, що після випробувань в ущільненнях знайдено сліди BN на глибині  $0,2\text{...}1,0\text{ мм}$ . Сліди С виявлені на глибині  $0,8\text{...}1,0\text{ мм}$ . Це пояснюється вигоранням твердого змащення в процесі випробувань, чому сприяє пористість, яка досягає 10 %.

Дослідження розподілу С, Ni і Сг на електронному мікроаналізаторі Superproba 733 фірми Jol (Японія) (рис. 7), показали, що поблизу границі підшар – робочий шар у покритті міститься С(Ni). Про це свідчать величини концентрації вуглецю і нікелю.

Дослідження мікроструктури ущільнюючих покриттів проводили на металографічному мікроскопі на шліфах, які не були травлені.

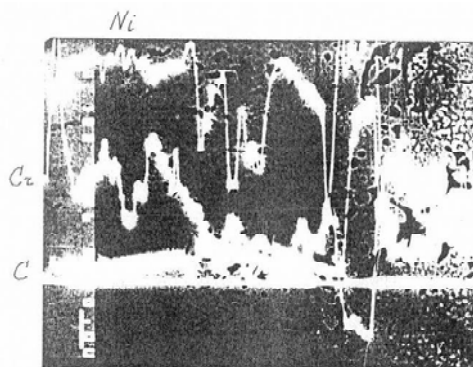
На рис. 8 представлено мікроструктуру ущільнюючих покриттів після корозійних і термоциклічних випробувань.

Відомо, наприклад, що оплавлене покриття із самофлюсуючого сплаву має складну мікроструктуру. До неї входять евтектики різного складу, зміцнюючі кристали і твердий розчин елементів нікелю. Основними легуючими елементами твердого розчину є кремній, хром, залізо.

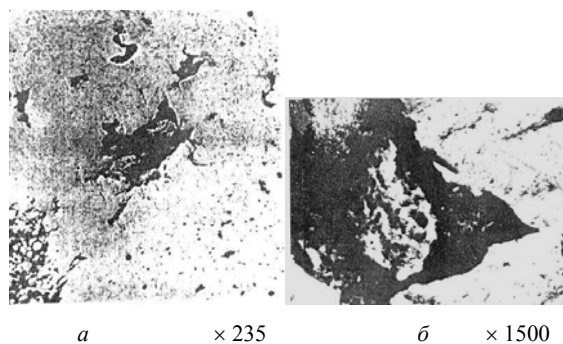
Мікротвердість ділянок твердого розчину елементів у нікелі становить  $2360\text{...}3470\text{ МПа}$ . У цьому дослідженні використовується самофлюсуючий сплав, що на основі кобальту. Як видно з рис. 8а, б мікроструктура ущільнюючих покриттів на основі самофлюсу ПГ-10К-01 являє собою Со-Ni твердий розчин, що містить легуючі елементи і евтектики різного складу, а також боріди, силіциди й ін. зміцнюючі фази. На нетравленому шліфі ідентифікується світла фаза, що являє собою Со-Ni твердий розчин і темні включення. Останні являють собою пористі ділянки. Можливо, це включення твердого змащення, трансформовані (частково газифіковані) у пористі утворення під високо-температурними впливами продуктів згоряння палива ДС (рис. 8а, б). Відсутність твердого змащення в поверхневому шарі ущільнення після випробувань (див. табл. 3) пояснюється цими явищами. Проникнення газів в ущільнення може бути пояснено в основному пористістю покриття (близько 10 %) і навіть дифузєю.

**Таблиця 3** – Результати визначення кількості нітриду бору та графіту у вставках після корозійних та термоциклічних випробувань

Номер зразка	Аналізована фаза	Склад, %		
		поверхневий шар	на глибині 0,2...0,4 мм	на глибині 0,8...1,0 мм
0011	C	не виявлено	не виявлено	сліди
001	C	не виявлено	не виявлено	не виявлено
002	BN	не виявлено	не виявлено	не виявлено
005	BN	не виявлено	сліди < 0,2	сліди < 0,2
штатне ущільнення	BN	не виявлено	неаналізувалося	неаналізувалося



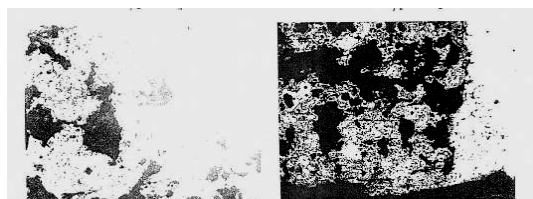
**Рис. 7.** Розподіл C, Ni, та Cr в ущільнюючому покритті ПГ-10К-01+20 %C(Ni)



**Рис. 9.** Мікроструктура ущільнення після випробувань, ПГ-10К-01+20 %C(Ni) (зраз. № 0011)



*a* × 125    *б* × 125



*в* × 125    *г* × 50

**Рис. 8.** Мікроструктура ущільнень після випробувань:  
*a* – ПГ-10К-01+20 %C(Ni) (зраз. № 0011);  
*б* – ПГ-10К-01+20 %BN(Ni) (зраз. №005); *в, г* – УМ-16П (зраз. № 2000)

Мікротвердість основи плазмових ущільнених покриттів до випробувань не має істотних відмінностей у залежності від типу твердого змащення. Після термоциклювання мікротвердість значно зросла, особливо в покритті з ПГ-10К-01+20 %BN(Ni). Підвищилася мікротвердість після термоциклювання й у підкладці з ВХ-4Л. Пористість ущільнень після термоциклювання у продуктах згоряння палива ДС вища, ніж до випробувань.

Мікроструктура штатного ущільнення УМ-16П являє собою три структурні складові: світла, сіра і темна (рис. 9а, б).

Темні ділянки по будівлі подібні попереднім. Світлі ділянки (~ 30 %) мають порівняно низьку, з незначним розкидом значень, мікротвердість. Сірі ділянки (~40 %) мають високу, зі значним розкидом, мікротвердість. Останні, очевидно, містять бориди й інші зміцнюючі фази. Наявність близько 30 % темних ділянок, які можуть бути ідентифіковані як пори, пояснює той факт, що штатне ущільнення в процесі експлуатації фарбується.

Дослідження складу і будівлі пористих утворень в ущільнюючих покриттях має немаловажне значення, тому що вони забезпечують спрацьовуваність у процесі експлуатації.

При проведенні металографічних досліджень висушено припущення про концентрацію в «пористих утвореннях» ущільнюючих покриттів твердого змащення.

Утворення пор в ущільнюючих покриттях відбувається як у процесі їхнього одержання, так і в процесі експлуатації в міру вигорання твердого змащення (С або BN).

З метою більш докладного вивчення структури ущільнюючих утворень були проведені дослідження нетравлених шліфів на растровому електронному мікроскопі РЕМ-100У.

У результаті проведених досліджень методом РЕМ у порах ПГ-10К-01+20% С (Ni) виявлені окремі частки розміром 30...50 мкм (рис. 10, 11).

Судячи з морфології цих часток і порівнюючи з даними досліджень морфології порошоків, можна зробити висновок, що вони являють собою частки С (Ni). Поряд з цими відносно великими частками в порах покриття ПГ-10К-01+20 %C(Ni) знайдені дрібнодисперсні плоскої форми утворення (до 7 мкм) неметалевої природи, що можуть бути віднесені до вільного графіту.

Штатне ущільнення УМ-16П після термоциклювання має значну пористість (рис. 12а). У порах цього ущільнення методом РЕМ знайдені частки неметалічної природи розміром близько 20 мкм, складені з більш дрібних зрослих кристалів, що мають чітке огранювання (рис. 12, 13), що являють собою, очевидно, бориди.

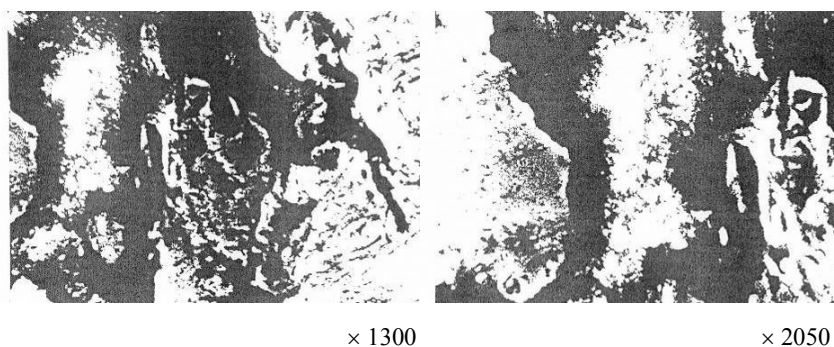
Утворення боридів відзначається як на поверхні металеві фази (рис. 12а), так і на окремих частках, очевидно являючи собою BN, тому що мають лускату будівлю (рис. 12б).

У процесі мікроаналізу на границі наповнювача УМ-16П, нанесеного на вставки з осередками, і підклад-

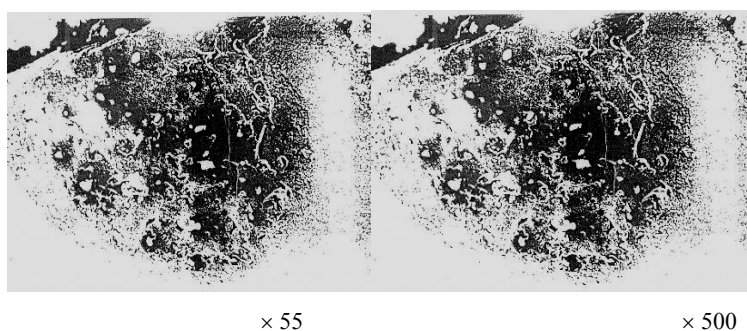
ки спостерігається сітка дрібних тріщин (див. рис. 12а).

Таким чином, проведені дослідження пористих утворень у великих порах ущільнюючих покриттів методом РЕМ дозволяє зробити висновок про наявність в них первинних часток твердого змащення С, С(Ni), BN(Ni), а також утворення в результаті термічного впливу продуктів взаємодії твердого змащення з металевими компонентами покриттів.

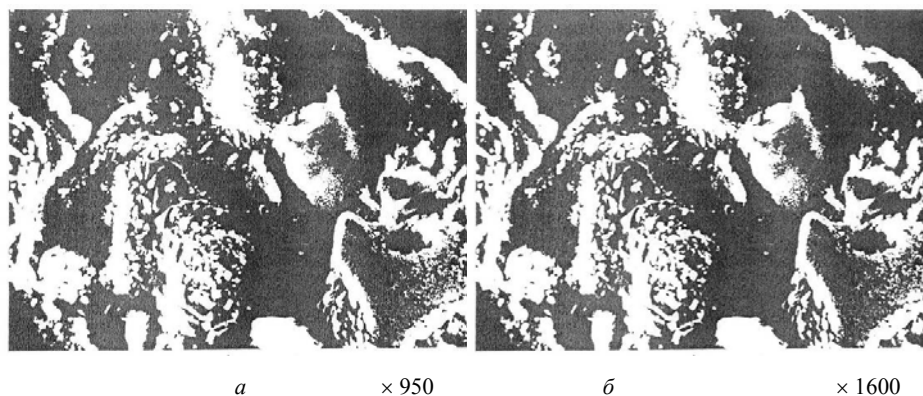
Чутливість методу кількісного рентенофазового аналізу на приладі ДРОН-3 (0,2%) недостатня для виявлення твердого змащення в ущільненнях після на глибині до 1,0 мм.



**Рис. 10.** Мікроструктура ущільнення після випробувань термічного впливу В і BN із металевими компонентами сплаву: а – ПГ-10К-01+20 %C(Ni), б – ПГ-10К-01+20 %C(Ni) (зраз. № 0011)



**Рис. 11.** Мікроструктура ущільнення після випробувань, УМ16П (зраз. № 2000)



**Рис. 12.** Мікроструктура ущільнення після випробувань, УМ-16П (зраз. № 2000)

Проведено мікроаналіз випробуваного ущільнення ПГ-10К-01+20 %С(Ni), напиленого в динамічному вакуумі на установці УПНКА з наступною термообробкою у вакуумі при 1050 °С протягом 1,5 год. У ньому виявлено дві структурні складові – світлу і темну (15...20%). Мікротвердість світлої складової 6581 МПа (середнє значення), розкид значень від 4120 до 9270 МПа. Для порівняння досліджували покриття з ПГ-10К-01, напиленого й термообробленого у вакуумі. В останньому, темних ділянок малого розміру менш 2%. У ПГ-10К-01+С(Ni) зафіксовані темні ділянки великого і малого розмірів. Мікротвердість ПГ-10К-01 становить 8630 МПа (середнє значення), розкид значень від 7660 до 9270 МПа. Більш широкий діапазон розкиду мікротвердості в першому випадку пояснюється наявністю твердого змащення. Наявність великої кількості темних ділянок, навіть у порівнянні зі зразками 0011,005 після термоцикування, пояснюється тим, що при напиленні і термообробці у вакуумі тверде змащення практично не вигорає. Це підтверджується тим, що в покритті з ПГ-10К-01+С(Ni) після напилення і термообробки у вакуумі кількісним рентенофазовим аналізом на приладі ДРОН-3 виявлено 4,8% графіту.

#### Висновки

1. З технологічної і економічної точки зору процес плазмового напилення в контрольованій атмосфері можливо замінити на плазмове напилення на повітрі;

2. Встановлено, що два варіанти розроблених ущільнень ПГ-10К-01+20 %С(Ni) і ПГ-10К-01+20%BN(Ni) за корозійно-ерозійною і термічною стійкістю перевершує серійне осередкове (стільникове) ущільнення з наповнювачем УМ-16Пта 20Б.

3. Задовільна спрацьованість дослідних ущільнень має циклічний характер і забезпечується спочатку пористістю і наявністю твердого змащення, потім лише пористістю. Високі значення термоциклічної стійкості пояснюються великою міцністю зчеплення самофлюючого сплаву ПГ-10К-01 з підкладкою.

4. Запропоновані ущільнення на основі самофлюючого сплаву ПГ-10К-01 з добавками твердих змащень С(Ni) і BN(Ni) можуть працювати у продуктах згоряння палива ДС, при температурах до 1000...1050 °С.

#### Список літератури

1. Possibilities of using welding-on technologies in crane wheel renovation / [Vit'bol J., Kalyb'k L.] // Bulletin of Materials Science. – 2008. – Vol. 31. – № 2. – P. 125–131. <https://doi.org/10.1007/s12034-008-0022-4>

2. Cladding of wear-resistant layers in metallurgy and engineering / [Vit'bol J., Gre'ly M., Val'ko T.] // Materials Science Forum. – 2016. – Vol. 862. – P. 1–48. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.862.41>
3. Trends in Thermal Plasma Technology. Thermal Plasma Torches and Technologies/ [P'fender L. F.] Cambridge International Science Publishing. – 2003. – Vol. 1. – Plasma Torches. Basic Studies and Design. – P. 20–41.
4. Лой С. А. Плазменное напыление защитных покрытий на детали горячего тракта судовых турбин / Лой С. А., Дубовой А. Н. // Збірник наукових праць УДМТУ. – 1999. – № 6 (366). – С. 105–109.
5. Лой С. А. Повышение эффективности плазменного напыления защитных покрытий / Лой С. А., Дубовой А. Н. // Збірник наукових праць УДМТУ. – 1999. – № 2 (362). – С. 68–75.
6. Напряженное состояние напыленного покрытия при испытаниях на термостойкость // [Лебедев В. А., Ермолаев Г. В., Лой С. А., и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. – № 11. – С. 8–12.
7. Напряженное состояние напыленного покрытия при испытаниях на отрыв // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. – № 12. – С. 8–12.
8. Guessasma S. Modeling of the APS Plasma Spray Process Using Artificial Neural Networks: Basis, Requirements and an Example / [Guessasma S., Montavon G., Coddet C.] // Computational Materials Science. – 2004. – Vol. 29 (3). – P. 315–333.
9. Зеленина Е. А. Метод расчета физико-механических характеристик плазменного покрытия на подложке при испытаниях образцов на изгиб / [Зеленина Е. А., Лоскутов С. В., Ершов А. В.] // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2016. – № 2. – С. 107–110.
10. Comparison of Thermophysical and Optical Methods of Temperature Distribution Measurements in Flow of Plasmatron with Interelectrode Inserts / [V. I. Kuzmin and etc.] // Изв. вузов. Физика. – 2007. – Т. 50, № 9. – С. 85–88.
11. ДСТУ ISO 9000:2015 Системы управления качеством. Основные положения и словарь терминов (ISO 9000:2015, IDT).
12. Лебедев В. А. Моделирование стойкости плазменного напыления лопаток газотурбинных двигателей и установок / Лебедев В. А., Лой С. А. // Modern question of production and repair in industry and in transport Materials of the 19<sup>th</sup> International Scientific and Technical Seminar. (February 18-23, Kosice, Slovak Republic). – P. 97–99.
13. Новые возможности технологии плазменного напыления износостойких покрытий / [Григорьев С. Н., Ковалев О. Б., Кузьмин В. И. и др.] // Трение и износ. – 2013. – Т. 34, № 3. – С. 221–226.

Одержано 25.11.2019

**Лебедев В. А., Дубовый А. Н., Лой С. А. Исследования и оценка термоциклической устойчивости плазменных уплотняющих покрытий для узлов газотурбинных установок**

**Актуальность работы.** Одним из рациональных способов повышения износостойкости деталей машин является локальная защита участков повышенного износа элементами из износостойких материалов. Такую защитную структуру можно обеспечить предварительным нанесением покрытий с помощью плазменного напыления. Это, в частности, касается плазменного уплотняющего покрытия узлов газотурбинных установок, которые, например, используются в составе судового оборудования. При этом указанные узлы неизбежно подвергаются воздействию достаточно высоких температур, в частности термоудара, что может привести к разрушению покрытия. В связи с этим работа направлена на поиск решения актуального научно-



практического задания - получение уплотнительных покрытий выполненных плазменным напылением, стойким к термоудару и анализ условий эксплуатации уплотнительных покрытий для оценки их влияния на напыленный слой.

**Цель работы** – определение термической устойчивости уплотнительных покрытий, в том числе при термоциклических испытаниях на газодинамическом стенде, и оценка влияния условий эксплуатации на микроструктуру и фазовый состав напыленного слоя.

**Методы исследования.** Для исследования микроструктуры использована оптическая и растровая электронная микроскопия. Твердость образцов измеряли с помощью твердомера Виккерса. Использовалась разработанная установка для определения устойчивости покрытия к теплосменам. Проводился рентгенофазовый анализ.

**Результаты.** Предложенные уплотнения на основе самофлюсующегося сплава ПГ-10К-01 с добавками твердых смазок С (Ni) и BN (Ni) могут работать при температурах до 1000 ... 1050 °С, что соответствует условиям в продуктах сгорания топлива ДС. В результате испытаний установлено, что два варианта разработанных уплотнений ПГ-10К-01 + 20% С (Ni) и ПГ-10К-01 + 20% BN (Ni) по коррозионно-эрозионной и термической стойкости превосходит серийное (сотовое) уплотнение с серийным наполнителем УМ-16П.

**Научная новизна.** Впервые проведено комплексное исследование и оценка термоциклической устойчивости на термоудар уплотнительных покрытий выполненных плазменным напылением узлов газотурбинных агрегатов. Установлено, структура которая напылена с целенаправленным выбором составляющих ПГ-10К-01 + 20% С (Ni) и ПГ-10К-01 + 20% BN (Ni) по коррозионно-эрозионной и термической стойкости превосходит серийное очаговое (сотовое) уплотнение с наполнителем УМ-16пт 20Б.

**Практическая ценность.** Показана принципиальная возможность замены плазменного напыления в контролируемой атмосфере плазменным напылением специально избранными составляющими на воздухе, что дает существенные технические и технологические преимущества. Предложенные модернизированные типы уплотнительных покрытий существенно превосходят те, которые применялись до настоящего времени.

**Ключевые слова:** плазменное напыление, узлы, уплотнения, исследования, новые составляющие, условия использования, термическая устойчивость, микроструктура.

#### **Lebedev V., Dubovyi O., Loi S. Research and estimation of thermal-cycle firmness of plasma spraying more compact coverages are for knots of gas-turbine**

**Relevance of work.** One of the rational ways to increase the wear resistance of machine parts is to protect the areas of high wear with elements made of wear-resistant materials. Such a protective structure can be provided by pre-coating with a plasma spray. This applies in particular to plasma sealing units of gas turbine units, for example used in shipboard equipment. In this case, these units are inevitably exposed to sufficiently high temperatures, in particular thermal shock, which can lead to the destruction of the coating. In this regard, the work is aimed at finding a solution to the current scientific and practical problem - obtaining sealing coatings made by plasma spraying, heat-resistant and analysis of operating conditions of sealing coatings to assess their impact on the deposited layer.

**The purpose of the work** is to determine the thermal stability of the sealing coatings, including in thermocyclic tests at the gas-dynamic stand, and to evaluate the effect of operating conditions on the microstructure and phase composition of the deposited layer.

**Research methods.** Optical and scanning electron microscopy were used to study the microstructure. The hardness of the specimens was measured using a Vickers hardness tester. The developed installation was used to determine the resistance of the coating to heat changes. X-ray phase analysis was performed.

**Results** The proposed seals based on self-fluxing alloy PG-10K-01 with the addition of solid lubricants C (Ni) and BN (Ni) can operate at temperatures up to 1000 ... 1050 °С, which corresponds to the conditions in the combustion products of DS fuel. As a result of tests it is established that two variants of developed seals PG-10K-01-20% C (Ni) and PG-10K-01-20% BN (Ni) in terms of corrosion - erosion and thermal stability exceed serial mass (cell) seal with serial filler UM-16P.

**Scientific novelty.** For the first time, a comprehensive study and evaluation of thermocyclic resistance to thermal shock of sealing coatings made by plasma spraying of units of gas turbine units were carried out. It is established that in the structure which is sprayed with purposeful choice of components PG-10K-01 + 20% C (Ni) and PG-10K-01 + 20% BN (Ni) in terms of corrosion-erosion and thermal stability exceeds the serial cellular (cellular) seals with filler UM-16Pta 20B.

**Practical value.** The principle of plasma sputtering in a controlled atmosphere can be replaced by a plasma spraying of specially selected components in the air, which gives significant technical and technological advantages. Upgraded types of sealing coatings are proposed that are substantially superior to those used to date.

**Key words:** plasma spraying, nodes, seals, research, new components, conditions of use, thermal stability, microstructure.