

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

ФФТЗ інженерно-фізичний факультет
(повне найменування інституту, факультету)

Фізичне матеріалознавство
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему дослідження жарового стаду і властивостей
циментаційних покриттів, що працюють при
підвищених температурах.

Виконав: студент(ка) VI курсу, групи ІР-218М

Спеціальності 132 матеріалознавство
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Технологічне матеріалознавство

Ташенко М.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник Степанова Л.І.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Овчинников О.В.

(прізвище та ініціали)

Форма № 25

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут, факультет фізико-технічний, інженерно-фізичний
Кафедра фізичне матеріалознавство
Ступінь вищої освіти магістр
Спеціальність прикладне матеріалознавство, 132
(код і найменування)
Освітня програма (спеціалізація) прикладне матеріалознавство
(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

« 12 » грудня 2019 року

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

Тищенко Микола Александрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) дослідження фазового складу і властивостей нанокристалічних покриттів, що працюють при підвищенні температури

керівник проекту (роботи) Степанова Л.П. доцент, к.т.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від « 14 » 12 2019 року № 388

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 15 грудня 2019

3. Вихідні дані до проекту (роботи) лиштові матеріали, покриття, зразки для рентгеноструктурного дослідження.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Літературний огляд. 2. Матеріали і методи дослідження. 2.1. Технологія заготівельного способу одержання покриттів. 2.2. Характеристика лиштових матеріалів. 2.3. Дослідження мікроструктури і хімічного складу. 2.5. Визначення теплостійкості. 2.6. Визначення пористості. 3. Експериментальний розділ. 4. Оцінка якості і навантажувального середовища. 5. Економічна частинка.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Хімічний склад лиштових матеріалів. Схема пістолета для заготівельного покриття. Мікроструктура покриттів. Рентгеноструктурне дослідження фазового складу покриттів. Результати в дослідженні змін в фазовому складі змінюючи масу зразків.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	приймав виконане завдання
1,2,3	Стенякова Л.П.	Л.П. 20.09.19	Л.П. 15.12.19
IV	Нестеров О.В. доц. кафедри ІНС		
V	Кругликова В.В. доцент кафедри ІТБД	В.В. 27.09	В.В. 8.11.19
НОРМО-КОНТРОЛЬ	ТКАЧ Л.В.		Л.В. 13.12.19

7. Дата видачі завдання « 17 » вересня 20 19 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1.	Літературний огляд	вересень	
2.	Матеріали і методи дослідження	жовтень	
3.	Експериментальний розділ	жовтень	
4.	Охорона праці та навколишнього середовища	листопад	
5.	Економічна частинка	грудень	

Студент(ка)

Л.П.
(підпис)

Тимченко М.О.
(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)

Л.П.
(підпис)

Стенякова Л.П.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

ПЗ: 90 сторінок, 22 рисунки, 6 таблиць, 23 джерела.

Об'єкт дослідження – ущільнювальні покриття.

Мета проекту – дослідити зміни у фазовому складі ущільнювальних жароміцних покриттів після обробки при температурі 1100°C.

Умови експлуатації деталей ГТД, роль та способи нанесення ущільнювальних покриттів. Технологія газополуменового способу нанесення покриттів та характеристика шихтових матеріалів. Дослідження фазового складу рентгеноструктурним методом.

Дослідження фазового складу і мікроструктури покриттів після напилення та після термічного впливу при температурі 1100°C. Вплив змін фазового складу на жаростійкість.

Було досліджено зміни фазового складу в покриттях, вплив оксидів, шпінелей та інтерметалідів на жаростійкість. Також були досліджені правила техніки безпеки при роботі з дифрактометром, при випробуваннях на жаростійкість та виготовленні зразків. Були проаналізовані правила виробничої санітарії, правила роботи з ПК, а також правила пожежної безпеки та організацію сил цивільного захисту.

УЩІЛЬНЮВАЛЬНІ ПОКРИТТЯ. ЖАРОСТІЙКІСТЬ. ДИФРАКТОМЕТР. ФАЗОВИЙ СКЛАД. РАДІАЛЬНИЙ ЗАЗОР. ЛІГАТУРА. ІНТЕРМЕТАЛІДИ.

ЗМІСТ

Вступ.....	6
1. Літературний огляд.....	7
1.1 Умови експлуатації деталей газотурбінних двигунів (ГТД).....	7
1.2 Роль ущільнювальних покриттів в підвищенні експлуатаційної надійності деталей ГТД, вимоги до ущільнювальних покриттів.....	8
1.3 Вимоги до матеріалів газотурбінних установок.....	11
1.4 Види палив.....	13
1.5 Способи нанесення покриттів.....	15
1.6 Матеріали для виготовлення гарячих частин ГТУ.....	19
1.7 Висновки.....	21
2. Матеріали і методи дослідження.....	22
2.1 Технологія газополуменевого способу одержання покриттів.....	22
2.2 Характеристика шихтових матеріалів та їх хімічний склад	24
2.3 Дослідження мікроструктури і хімічного складу.....	25
2.4 Рентгеноструктурний метод визначення фазового складу.....	27
2.5 Визначення жаростійкості.....	30
2.6 Визначення пористості.....	31
3. Експериментальний розділ.....	33
3.1 Дослідження фазового складу і мікроструктури покриттів у вихідному стані після напилення.....	33
3.2 Дослідження змін у фазовому складі покриттів після випробувань при температурі 1100°C	42
3.3 Вплив змін фазового складу на жаростійкість покриттів.....	50
3.4 Висновки.....	52
4. Охорона праці та навколишнього середовища.....	53
5. Економічна частина.....	66
ВИСНОВКИ.....	73
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	75

ВСТУП

Термічне наплавлення – це сукупність процесів, в котрих тепло використовується для розтоплення вихідних матеріалів; в той же час їм надається кінетична енергія потоком технологічного газу для переносу рідких частинок до підготовленої поверхні. Коли гарячі та володіючі високою енергією частинки прилипають до поверхні деталі яка покривається, вони швидко твердіють. По мірі того як все нові краплі стикаються з поверхнею деталі, товщина покриття наростає. Теплова енергія для наплавлення може бути створена хімічно (при згоранні палива в кисні або на повітрі), або шляхом електричного нагрівання промислових газів.

Ущільнювальні покриття широко застосовуються для зменшення радіального зазору між ротором і статором, що приводить до підвищення температури газу, а отже і збільшення коефіцієнту корисної дії авіадвигуна. При цьому до них пред'являється ряд вимог, з одного боку вони повинні забезпечувати високу адгезію і ерозійну стійкість матеріалу ущільнювача з матеріалом основи в умовах підвищених температур, а з другого боку - низьку роботу зрізування, що забезпечить мінімальні зазори і дозволить суттєво знизити швидкість процесу зносу торцевої поверхні лопатки.

Властивості і працездатність покриттів істотно залежать від залишкових напружень, які утворюються в процесі їх отримання, а також значною мірою від структурних чинників. Утворення в покритті певної структури з наявністю тугоплавких інтерметалідів і нітридів може значною мірою підвищити температурні режими і ерозійну стійкість працюючих деталей.

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Умови експлуатації деталей газотурбінних двигунів (ГТД)

Головною особливістю таких установок є тривала експлуатація обладнання, яка сягає 100 тис. год. Більшість новітніх авіадвигунів за термін служби зазнає велику кількість порівняно швидких пусків, працює на змінних режимах, що обумовлює спеціальні вимоги до матеріалу деталей. Для виготовлення деталей ГТУ, що працюють при підвищених температурах (жарових труб камер згорання та інших деталей, турбінних лопаток, дисків турбін, елементів регенераторів, деталей кріплення, лопаток останніх ступеней компресорів з великими ступенями тиску), застосовуються жароміцні сплави, при виборі котрих необхідно враховувати специфіку напруженого стану та особливості експлуатації турбін різного призначення. До параметрів, зв'язаних з умовами експлуатації, що впливають на вибір матеріалу, варто віднести робочу температуру деталей, ступінь її нерівномірності, вид і склад палива, ступінь маневреності установки. Вибір температури газу визначається застосуванням двигуна як базової, пікової чи резервної [1].

При роботі на складові частини двигуна діють статичні і температурні навантаження. До статичних навантажень, відносять відцентрові сили, які виникають при обертанні ротора, і сили, що виникають при обтіканні газом і через наявність різниці тиску газів всередині і ззовні компресора або турбіни. Температура експлуатації може перевищувати 1000°C, що разом із агресивною дією середовища, високими навантаженнями ставить жорсткі вимоги до показників жароміцності, корозійної стійкості та температурного коефіцієнта лінійного розширення.

Основні деталі двигуна, піддаються дії таких навантажень: статичного відцентрованими силами, через обертання ротора двигуна; газодинамічне,

статичне і змінне навантаження за рахунок руху газу в газоповітряному тракті двигуна; термічні, статичні і змінні навантаження внаслідок дії на деталі камери згорання та турбіни високотемпературного газового потоку [2].

Рівень статичних напружень визначається частотою обертання ротора і рівнем тиску в камерах установки. Жарові труби камер згорання – штамповані зварні конструкції з жаростійких сплавів на нікелевій основі. Статичні напруження в цьому конструктивному елементі низькі, на міцність жарових труб впливають, переважно, температурні напруження. Рівень температурних напружень визначається градієнтом температур за товщиною стінки. Турбінні лопатки та диски турбін крім дії високих температур, зазнають дію навантажень відцентрових сил, циклічних та газодинамічних сил. Внаслідок великої товщини лопаток та дисків виникають значні градієнти температур [3].

До уваги слід приймати наявність корозійного впливу середовища. Вигорання легувальних елементів в поверхневих шарах під дією високих температур та ВТК зумовлюють суттєве зниження строку служби деталей (в 2-3 рази).

1.2 Роль ущільнювальних покриттів в підвищенні експлуатаційної надійності деталей ГТД, вимоги до ущільнювальних покриттів

Ущільнювальні покриття застосовують для підвищення ККД газотурбінних двигунів. Важливість покриттів, що припрацьовуються, полягає в тому, щоб скоротити витік газів через зазор між лопаткою і статичною частиною турбіни (статором). Завдяки різниці в твердості і пористості ущільнювального покриття при першому запуску лопатки прорізають в покритті доріжки, по яким і продовжують оберти. Таким чином, зазор між пером лопатки і статичною частиною турбіни мінімізується. Ущільнювальні покриття наносять методом атмосферного плазмового напилення зі

спеціально розроблених для цього матеріалів. Основні складові покриття - керамічні матеріали, летуча фаза, що створює пористість в процесі напилення і розділова речовина, яка полегшує прироблюваність. В процесі напилення точно контролюють товщину, пористість і щільність одержуваного покриття. Ущільнювальні покриття широко використовуються в світовій практиці і забезпечують більше 1% приросту продуктивності авіадвигуна, що в світовому масштабі означає економію близько 100 мільйонів тон палива на рік. Із всіх методів підвищення ККД двигуна, таких як підвищення температури газу, використання теплоти відхідних газів, проміжне охолодження повітря в компресорі, використання ущільнювальних покриттів є найбільш оптимальним через його порівняно простоту та технологічність. Застосування ущільнювальних покриттів приводить до підвищення температури газу, а отже і збільшення коефіцієнту корисної дії авіадвигуна. При цьому до них пред'являється ряд вимог: вони повинні забезпечувати високу адгезію і ерозійну стійкість матеріалу ущільнювача з матеріалом основи в умовах підвищених температур, достатню міцність, низький опір стиранню поверхні, жаростійкість, низьку роботу зрізування, що забезпечить мінімальні зазори і дозволить суттєво зменшити знос торцевої поверхні лопатки [4].

Виявлено, що ущільнювальні покриття схильні до зношування при високих температурах. Доведено, що подібний дефект був присутній у 10% ущільнювальних вставок турбореактивних двигунів, що відпрацювали ресурс до першого ремонту, і в 25 % вставок, що відпрацювали міжремонтний ресурс. Підвищення температури газу в турбіні призвело до необхідності розробки теплозахисних покриттів на лопатки авіаційного двигуна, оскільки жаростійкість матеріалів, що застосовуються для їх виготовлення, не може бути забезпечена в процесі гарантованого терміну служби деталей турбіни.

Властивості і працездатність покриттів істотно залежать від залишкових напружень, які виникають в процесі їх отримання, а також значною мірою від структурних чинників. Утворення в покритті певної структури з наявністю тугоплавких інтерметалідів і нітридів може значною мірою підвищити

температурні режими і ерозійну стійкість працюючих деталей. Тому визначення міри впливу хімічного складу лігатури на наявність фазових складових в структурі покриттів необхідно приділяти особливу увагу.

На АО «Мотор Сич» застосовують ущільнювальні покриття на основі модифікованої нікель-кремнієвої губки (КНА-82) і твердого змащення (графіт + BN). Застосування такого матеріалу при температурах порядку 1150 °C не є доцільним, через неможливість збереження стабільної величини зазору в процесі експлуатації, тому актуальна розробка ущільнювального покриття, яке могло б успішно використовуватися в умовах підвищених температур.

У зв'язку з тим, що розвиток техніки поступово приводить до підвищення температури експлуатації деталей ГТД, постає необхідність в створенні нових покриттів, які б відповідали новим вимогам експлуатації, гарантували високу працездатність двигуна та сприяли підвищенню його ККД.

Величина радіальних зазорів лабіринтних ущільнень між елементами ротора і статора газотурбінного агрегату суттєво впливає на його ККД і економічність [17].

Величина цього зазору при складанні агрегату повинна бути такою, щоб зробити неможливим процес дотику поверхонь ротора і статора при експлуатації та можливість руйнування роторної частини ущільнення, що приводить до виходу з ладу всього агрегату. З урахуванням того, що величина оптимального зазору повинна складати міліметри на діаметрі ротора більше метра, виникає необхідність використовувати на поверхні статорної частини істотно менш міцний матеріал, ніж на роторі. Однак, закріплення на поверхні статора ущільнень, виготовлених з металокерамічного прокату, спечених вставок або стільникових елементів, є трудомісткою технологічною операцією, яка не дозволяє належним чином мінімізувати ці зазори. Найбільш ефективним технологічним прийомом є нанесення на поверхню лабіринтного ущільнення статора спеціальних ущільнювальних покриттів, стійких до

впливу високотемпературних (від 1150 до 1300°C) газових потоків і разом з тим, що володіють малою міцністю на врізання при випадкових дотиках з ротором як на етапі підробітки, так і на етапі експлуатації агрегату [6].

Отже, до покриттів пред'являється ряд суперечливих вимог, оскільки з одного боку вони повинні забезпечувати високу адгезію і ерозійну стійкість матеріалу ущільнювача з матеріалом основи в умовах підвищених температур, а з другого боку - низьку роботу зрізування, що забезпечить мінімальні зазори і дозволить суттєво зменшити зношування торцевої поверхні лопатки. Крім того актуальним залишається забезпечення високої жароміцності і жаростійкості цих покриттів.

1.3 Вимоги до матеріалів газотурбінних установок

Аналіз напруженого стану деталей ГТУ і умов їх експлуатації дозволяє встановити комплекс вимог до матеріалів цих деталей. Найкраща працездатність навантажених деталей забезпечується за умови високих показників границі плинності, тривалої міцності і високої деформаційної спроможності (пластичності) матеріалу. Проте, таке сполучення не може бути досягнуто. У кожному випадку встановлюється мінімально припустимий рівень пластичності, що гарантує надійну роботу деталі в машині. Вимоги до основних елементів газової турбіни - висока жароміцність та жаростійкість. Для забезпечення надійної роботи полотна диска матеріал повинний протистояти дії теплових навантажень, мати визначену термостійкість. Значення його границь тривалої міцності і повзучості повинні бути такими, щоб не допустити руйнування диска і появи надмірної деформації. При тривалому терміні служби диски потребують стабільності структури і забезпечення достатнього рівня властивостей у всьому інтервалі робочих температур. При виборі матеріалу враховують технологічність і вартість [7].

Вибір матеріалу робочих лопаток роблять за характеристиками границі тривалої міцності при робочій температурі металу, це повинно забезпечувати необхідний запас міцності відносно максимального розтягуючого зусилля. У охолоджуваних лопатках не вдається істотно знизити температуру кромки, тому, крім жароміцності, висувається вимога високої жаростійкості в продуктах згорання палива при температурі, що дорівнює температурі газу. Ця ж вимога висувається до матеріалу неохолоджуваних лопаток. Для забезпечення високої міцності замкової частини потрібно, щоб при високій тривалій міцності матеріал мав високу тривалу пластичність, що дозволяє попередити крихке руйнування. Матеріал направляючих лопаток повинен мати високу жароміцність, термостійкість, тривалу міцність, опір повзучості, забезпечувати працездатність при навантаженнях впродовж усього терміну служби при температурах, що іноді істотно перевищують середню температуру газу (при нерівномірності теплового потоку).

До матеріалу камер згорання висуваються наступні вимоги: висока жаростійкість, термостійкість, зварюваність і технологічна пластичність, висока теплопровідність і низький коефіцієнт лінійного розширення, високий рівень границі плинності і опір повзучості, щоб термічні напруження, не призводили до значних пластичних деформацій. Матеріал не повинен окрихчуватися в процесі експлуатації, та не бути чутливим до надрізу, як у вихідному стані так і після витримки при температурі експлуатації. Висока теплопровідність забезпечується застосуванням нікелевих сплавів із жаростійкими покриттями [1].

Для з'єднання між собою різноманітних деталей турбін, що працюють при високих температурах, застосовують болти і шпильки, що виготовляються з високоміцних і жароміцних сплавів. У деяких конструкціях диски турбін з'єднуються між собою стяжними болтами, спрямовуючі апарати кріпляться до статора за допомогою болтів. Деталі кріплення в процесі експлуатації зазнають дію змінних температур і навантажень. Для забезпечення працездатності деталей кріплення їх матеріал повинний мати:

- релаксаційну стійкість (для зберігання необхідного натягу в з'єднанні);
- структурну стабільність під час експлуатації;
- тривалу міцність;
- малу чутливість до надрізу і високу тривалу пластичність, що попереджують руйнування за різьбленням;
- опір вібраційним навантаженням.

Головною вимогою до матеріалів регенераторів є висока технологічність, що забезпечує можливість прокатування листів і тонкостінних труб, зварюваність і штамповність. Матеріали регенераторів повинні мати високу корозійну стійкість в умовах робочих і спокійних режимів у середовищі повітря і продуктів згорання палива. Метал регенератора повинен бути термостійким, у тому числі й у зварних з'єднаннях. На лопатки осьових і відцентрових компресорів діють значні вібраційні навантаження. Основною вимогою до них є висока стійкість до втоми матеріалу і його спроможність до демпфування коливань. У хромистих сталей логарифмічний декремент коливань при високих температурах, підвищеному рівні вібраційних і розтягувальних напружень є максимальним. Для лопаток І ступені компресора при роботі в холодних умовах потрібна низька температура переходу від в'язкого до крихкого руйнування [1].

1.4 Види палив

В якості палива стаціонарних ГТУ використовують гази що відрізняються вмістом H_2S , CO_2 , H_2 , $CmHn$, C_3H_8 , C_2H_6 , CH_4 : природний газ різних родовищ, штучний (з антрацита, підземної газифікації, напівкокований, доменний, коксовий очищений) та супутний, отриманий із родовищ нафти.

Для стаціонарних, ГТУ застосовують різні палива, в яких присутній високий рівень домішок, які негативно впливають на опір матеріалів корозії. Окрім основних компонентів, паливо містить в своєму складі домішки, що містяться в ґрунтових водах, які інколи потрапляють в резервуари для зберігання палива. Солі морської води, що містяться в бризках, разом із повітрям засмоктуються до компресору судових ГТУ, пісок потрапляє з повітрям при піщаних бурях. Вплив негативних домішок на працездатність є одним з факторів, що визначають ресурс газової турбіни, тому при виборі матеріалів слід враховувати на якому паливі працює турбіна, в яких умовах оточуючого середовища. Найбільш агресивно процеси корозії відбуваються при використанні важких видів палива, що містять V, S та в присутності солей морської води ($\text{NaCl} + \text{Na}_2\text{SO}_4$). Експериментальним шляхом виявлено, що процес пришвидшення корозійних руйнувань відповідає тим деталям, на яких існує осад та смолисті продукти згорання. Одним з компонентів таких нашарувань виступає сульфат натрію з відносно низькою температурою плавлення 884°C . Дослідженнями встановлено, що сульфідна корозія вражає високотемпературні деталі, за умови їх роботи в певному температурному інтервалі, найчастіше – $650\text{--}950^\circ\text{C}$. При перевищенні вказаної температури сульфідна корозія є менш імовірною, що пов'язано із випаровуванням сульфата натрію [1].

З метою прогнозування поведінки сплавів в умовах експлуатації, якщо існує можливість проходження процесів ВТК, проводяться дослідження зразків на спеціальних стендах (установках) або в лабораторних печах. Подібні дослідження дозволяють з певною ймовірністю оцінювати здатність сплавів до опору корозії, але отримані показники значною мірою залежать від умов випробування. Склад солей, товщина шару розплаву, температура, швидкість потоку повітря, при використанні стендів, впливають на результати. Тому, при виборі оптимального варіанту матеріалу для виготовлення деталі, слід використовувати показники корозійної стійкості сплавів, що враховують умови експлуатації, та отримані за однаковою методикою [1].

1.5 Способи нанесення покриттів

Плазмове напилення

Плазма генерується шляхом передачі енергії газу до тих пір, доки рівень енергії не стане достатнім для іонізації газу, що дозволить іонам і електронам діяти незалежно один від одного. Стан плазми досягається, коли в електричному полі струми можуть бути усталеними, доки вільні електрони переміщуються через іонізований газ. Як тільки притік енергії припиняється, електрони та іони рекомбінують, вивільняючи теплову і світлову енергію.

Плазмо-дугове напилення постійного струму – це найгнучкіший із процесів термічного напилення у відношенні матеріалів, які можна напиляти, з причини використання інертних газів, більшої швидкості газу і виключно високої його температури.

Пістолет для плазмо-дугового напилення постійного струму об'єднує в собі виставлений по осі катод (зазвичай з вольфраму, покритого 1 – 2% торію) і анод-форсунку (зазвичай із безкисневої високопровідної міді). Зазвичай кінець із торірованого вольфраму працює поблизу точки плавлення, завдяки високим щільностям струму електронів, який локально нагріває кінець катода. Охолоджуваний водою мідний анод/форсунка обмежує і стабілізує дугу, а також пришвидшує нагріті газу, що розширюються. Катоди, які не мають безпосередньо водяного охолодження, витримують високу температуру дуги завдяки високій теплопровідності і високій точці плавлення вольфраму. Пістолети для плазмо-дугового напилення постійного струму мають підсилене водяне охолодження для запобігання розплавлення і зведення до мінімуму ерозії катода і форсунки [4].

Газ, що формує плазму, подається в пістолет позаду. Зазвичай газу входять в дугову камеру через газове кільце (газовий інжектор), яке надає газу обертання або формує його у вигляді вихрового потоку. Цей вихровий потік стабілізує дугу на кінці катода в області низького тиску вихору і обертає

з'єднувач дуги або основу дуги на аноді. Це називається вихровою стабілізацією. Обертання з'єднувача дуги на аноді зводить до мінімуму ерозію аноду під дією дуги. Гази дуги нагріваються, проходячи навколо дуги і через неї. Нагріті газы розширюються в радіальному і осьовому напрямках, прискорюючись при розширенні і виході із форсунки. В залежності від співвідношення тисків між областю дуги (зверху по потоку) і виходом із форсунки (знизу по потоку), газы (плазмовий струмінь) розширюються або на дозвуковій або із надзвуковою швидкістю. В багатьох конструкціях пістолету використовується сопло що звужується. В других конструкціях плазму навмисне сповільнюють до дозвукових швидкостей, щоб збільшити час затримки.

При плазмовому напиленні покриттів, гарячий газовий струмінь розширюється, захоплює в себе частинки порошку, нагріває ці частинки і розганяє їх в напрямку субстрату. Високий ступінь розплавленості частинок і відносно висока швидкість частинок в плазмі дозволяють отримати більш високі щільності покриття і міцності його зчеплення, ніж у більшості покриттів. Пористість плазменно напилених покриттів низька – за цим показником (який перевищує 99%) вони можуть досягати рівня покриттів, нанесених високошвидкісним напиленням в кисневому паливі та детонаційною гарматою, звичайно, в залежності від властивостей матеріалів, типу та конфігурації гармати. Оскільки пористість являється функцією характеристик і порошку і гармати, вона може змінюватись в діапазоні від 40 до 1%, як того вимагає конкретне застосування [4].

Міцність зчеплення покриттів плазмового напилення перевищує 34 МПа. Сильне зчеплення крапель з субстратом досягається завдяки високій швидкості частинок і їх деформації при падінні. Струмінь інертного плазмового газу сприяє малому вмісту оксидів в покритті. Однак, взаємодія турбулентного плазмового струменю з оточуючим середовищем призводить до захоплення струменем повітря, яке окислює поверхні частинок/крапель в

польоті, приводячи до утворення оксидних фаз, які залучаються у включення між пластинками [4].

Газополуменеве напилення – є одним з найбільш доступних методів газотермічного напилення. Такий варіант напилення являє собою розплавлення металу на малі краплини і нанесення їх на підготовлену поверхню, де вони формують суцільне покриття. Металевий порошок сформований в дріт подається в полум'я ацетилен-кисневого або пропан-кисневого пальника, розплавляється і під дією потоку газів переноситься на підготовлену поверхню, де охолоджуючись, формує покриття. Даний метод може застосовуватися як в ручному, так і в автоматичному режимі.

За допомогою даного методу наносяться зносостійкі і корозійностійкі покриття із залізних, нікелевих, мідних та алюмінієвих сплавів. Крім цього, газополуменеве напилення застосовується для відновлення геометрії деталей насосно-компресорного устаткування, деталей електродвигунів обладнання нестандартної конфігурації.

Газополуменевий процес напилення дає щільність від 85 до 98%, в залежності від матеріалу покриття і конкретної технології. При менших температурах і швидкості потоку покриття отримується в тій же мірі менш щільним. Також можуть оброблятися різанням або шліфуванням.

Вакуумне іонно-плазмове напилення

Нанесення декоративно-захисних покриттів за допомогою вакуумних іонно-плазмових (вакуумно-дугового і магнетронного) методів напилення широко застосовується завдяки екологічній чистоті виробництва і високій якості одержуваних декоративно-захисних плівок. Факторами, що стримують подальше поширення цих методів є: досить висока вартість обладнання, висока необхідна культура виробництва, жорсткі вимоги до якості і чистоти поверхні заготовок.

За допомогою вакуумних методів нанесення захисно-декоративних покриттів можливо формувати плівки з різних металів і їх з'єднань: титану, цирконію, алюмінію, срібла, хрому, нікелю, ніобію, танталу, нержавіючої

сталі, нітриду титану (TiN_x), нітриду цирконію (ZrN_x), оксиду титану (TiO_x), оксиду цирконію (ZrO_x), оксиду алюмінію (Al_2O_3), оксікарбіда титану (TiC_xO_y), оксікарбіда цирконію (ZrC_xO_y), карбонітриду титану (Ti_xNyC_z), карбонітриду цирконію (Zr_xNyC_z) і т.д.

Шляхом застосування різного поєднання реактивних газів (азоту, ацетилену, кисню, вуглекислого газу) можна отримати практично будь-який відтінок кольору.

Декоративно-захисні покриття наносяться за допомогою вакуумного методу на вироби з міді, латуні, мельхіору, нейзильберу, стали, алюмінієвих сплавів, томпаку, пластмас, скла, кераміки, і т.д. Для виправлення недоліків шорсткості і фактури поверхні заготовок, отримання необхідних механічних та корозійних властивостей поверхні виробів необхідно наносити на деякі матеріали додатково бар'єрні (замикаючі) шари. Як бар'єрних шарів застосовуються гальванічні (хром, мідь-хром), лакофарбові матеріали (наприклад, при напиленні на пластмаси). Іноді на декоративні покриття наносяться захисні плівки (наприклад, лакові при напиленні на пластик).

Якість декоративно-захисних покриттів цілком і повністю визначається якістю поверхні заготовок (шорсткість, фактура і т. д.), Якістю підготовки поверхні заготовок (наявність забруднень, наявність окисних плівок, ступенем активації поверхні іонним травленням), культурою виробництва.

Вакуумне іонно-плазмового напилення є фінішною операцією. Не допускається подальша механічна обробка деталей, їх пайка, зварювання.

Собівартість нанесення декоративно-захисних покриттів залежить від характерного габариту, форми і матеріалу деталей; вимог, що пред'являються до покриття; річним обсягом деталей.

1.6 Матеріали для виготовлення гарячих частин ГТУ

Найбільш розповсюдженою групою матеріалів при виготовленні дисків, лопаток, компресорів ГТД є феритні сталі. Для виготовлення дисків ГТУ використовуються сталі 15X12ВНФ, 20X12ВНМФ. Завдяки високій демпфуючій здатності для лопаток компресорів застосовують сталі 20X13, 14X17Н2, 13X14Н2ВФР, 13X11Н2В2МФ. Для виготовлення лопаток компресорів з підвищеною корозійною стійкістю – сталь 08X17Н6Т. Іншою групою сталей, що переважно використовуються у вузлах камер згорання та турбіни, є аустенітні сталі. За Б. Гецовим [7] аустенітні сталі, що використовують в газотурбобудуванні, поділяють на три основні групи.

Першу групу складають незміцнені сталі, нестабілізовані або стабілізовані титаном (ніобієм), із твердорозчинним зміцненням: 08X18Н9, 20X23Н18, 12X18Н10Т, 09X14Н19В2БР1, 10X16Н13М2Б. Ці сталі характеризуються низькою границею плинності. Сталі цієї групи призначені для виготовлення регенераторів та корпусних деталей. Ці сталі мають високу жаростійкість при температурах до 600-650°C в продуктах згорання палива та на повітрі, що не містять солей морської води. Мають високу технологічність (виготовляють труби, лист), високий рівень термостійкості в умовах багаторазових запусків [1].

До другої групи відносять сталі із інтерметалідним дисперсійним зміцненням (за рахунок частинок Ni_3Ti , $Ni_3(Al,Ti)$): 10X11Н20ТЗР, Х12Н22ТЗМР, А-286, 08X15Н24В4Т, ХН35ВТ, ЭИ612К, ХН35ВТЮР [1].

Третю групу складають сталі з карбідним дисперсійним зміцненням (37X12Н8Г8МФБ, 31X19Н9МВБТ, ЭИ434). 37X12Н8Г8МФБ – для дисків авіаційних та суднових двигунів. Недолік – схильна до корозійного розтріскування. 31X19Н9МВБТ – для дисків, лопаток стаціонарних турбін. Можливим є виготовлення деталей деформацією або литвом. Завдяки відсутності поліморфних перетворень до температур експлуатації та високому

рівню жароміцності в газотурбобудуванні широко використовуються сплави на основі нікелю. До складу таких сплавів обов'язково входять хром, алюміній, титан, що забезпечують достатній рівень жаростійкості і жароміцності за рахунок виділення інтерметалідної γ' -фази ($\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$). Рівень жароміцності сплаву залежить від кількості зміцнювальної фази [1].

Для виготовлення дисків ГТУ з різним строком експлуатації призначені жароміцні деформовні сплави на основі нікелю: ХН77ТЮР (ЭИ437Б), ЭИ607А, ХН70ВМЮТ, ХН73МБТЮ (ЭИ698), Nimonic 80А, Nimonic 90, IN706. Для робочих лопаток високотемпературних турбін використовують сплави ХН80ТБЮ, ЭИ607А, ХН70ВМЮТ, Nimonic 80А, ЖС32, ЖС26. Для лопаток ГТУ з обмеженим строком експлуатації використовують ХН70ВМТЮФ, ХН55ВМТФКЮ, ХН62МВКЮ, ЭИ929, ХН56ВМКЮ, ЭП220, ЖС6КП. Сплави ХН70ВМТЮФ та М-252 також використовують для лопаток суднових та стаціонарних турбін з тривалим строком експлуатації. ХН65ВМТЮ – для лопаток стаціонарних турбін. Для лопаток з температурою експлуатації до 1000°C розроблені ливарні сплави ЖС6К, ЖС6У, ВЖЛ12У, IN 100, IN 792, MAR-M-200. Для робочих лопаток перших ступеней стаціонарних турбін використовують ливарні сплави типу IN 738, IN 738LC, ЧС70ВИ. Для спрямовуючих лопаток з підвищеним рівнем стійкості до ВТК при обмеженій тривалості експлуатації використовують сплави ВЖЛ8, ЖС3. Для тривалого використання – СНЛ-1, ЭП539Л, ЭИ893Л, ЖС6К (у випадку додаткового захисту поверхні). Для виготовлення крильчаток та невеликих дисків з лопатками застосовують ливарні сплави типу Німокаст, ЖС3Д (ливарна модифікація ХН70ВМТЮ) [1].

Дані матеріали не здатні витримувати необхідні температури експлуатації, тому необхідно використовувати покриття.

1.7 Висновки

Ущільнювальні жаростійкі покриття підвищують ККД авіадвигуна, але через постійне зростання температури в робочому середовищі двигуна, уже існуючі покриття не підходять для використання. Через це з'явилась необхідність розробки нових покриттів, які були б працездатними при більш високих температурах. Для того, щоб дослідити нові покриття на предмет фазового складу та параметру жаростійкості, необхідно провести випробування, сутність яких наведена в наступному розділі.

2 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

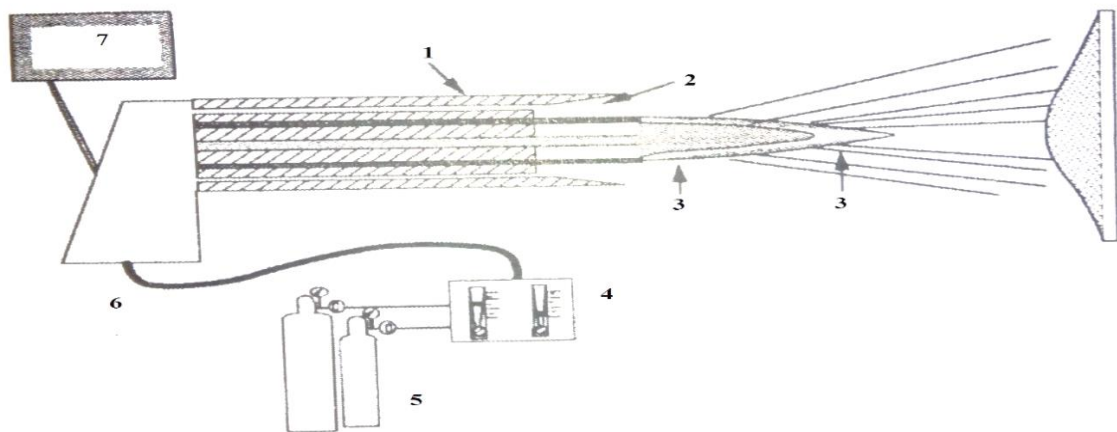
2.1 Технологія газополуменового способу одержання покриттів

При газополуменовому напиленні для генерації тепла використовується хімічна енергія згорання горючих газів. Частіше за все застосовують ацетилен-кисневі пальники, в яких ацетилен як горючий газ, при згоранні в атмосфері кисню генерує дуже високі температури. Порошок, дріт або пруток вводиться вздовж осі в форсунку позаду і подається в полум'я на виході форсунки. Вихідний матеріал розплавляється і вихідний матеріал і частинки/краплі розганяються в напрямку поверхні субстрату потоком газу що розширюється і потоком повітря.

В звичайних пальниках для полуменового напилення, струмінь палива згорає в кисні перед пальником, ззовні форсунки. Пальник даного способу напилення складається із газорозподільчих проходів крізь форсунку і змішувальних діафрагм на кінці форсунки. Форсунки використовуються для формування потоку необхідної форми. В пальниках з подачею дроту або прутка, до конструкції додаються повітряні ковпачки, що створює концентрований струмінь повітря для розпилення розплавленого кінчика дроту або прутка. Дріт чи пруток подається механічно через центр форсунки в зону нагрівання. Вагомий плюс дроту і прутка перед порошком полягає в тому, що тут досягається більш високий ступінь розплавлення, через це покриття є більш щільнішими. Крім того повітря, що розпилює, дозволяє отримати дрібніші краплі, що, в свою чергу, дає більш тонке і гладке покриття. Швидкості газових струменів зазвичай не перевищують 100 м/с, що дає швидкість частинок перед падінням на поверхню в межах 80 м/с. При зовнішньому згоранні температурі потоку як правило вище 2600°C; вони залежать від температури згорання паливно-кисневої суміші, а також від змішування газів горіння з оточуючим повітрям. При регулюванні співвідношення паливо/кисень, відхиляючи його в будь-яку сторону від

стехіометричного значення, отримаємо полум'я з нижчою температурою. Причина, через яку необхідне подібне регулювання: необхідність змінити полум'я на окисне, або відновлювальне – як це диктує вихідний матеріал і режим роботи. В більшості випадків напилення металів, полум'я регулюється в сторону відновлення (більш збагачена суміш), щоб звести до мінімуму окислення [4].

Установка складається з наступних елементів. Подача порошку в такі пальники виготовляється одним з двох способів: транспортуєчими газами або під дією гравітації. Пристрої які працюють на дроті або прутку, використовують вбудовані в пальник повітряні турбіни, які приводять в рух приводні ролики, які витягують вихідний матеріал і виштовхують його через форсунку. На рисунку 2.1 зображено типову схему пістолета для газополуменевого напилення.



1-форсунка; 2-обмежувальне повітря; 3-полум'я горіння; 4-контроль витрат; 5-кисень і ацетилен; 6-регулятори тиску; 7-подача порошку

Рисунок 2.1 – Схема пістолета для газополуменевого напилення

Компоненти. Основними компонентами типової конструкції установки для напилення є: джерело газу, джерело повітря, шланги для газу, газові регулятори для кисню, палива і повітря, витратометр для контролю потоку

газу, запобіжні затвори на пістолеті і регулятори, пістолет для даного варіанту наплення який складається із корпусу пальника, форсунки і системи подачі вихідного матеріалу

2.2 Характеристика шихтових матеріалів та їх хімічний склад

За базовий матеріал для проведення досліджень обираємо покриття КНА-82, яке на сьогоднішній день успішно застосовується в авіаційних агрегатах які виготовлені на ПАТ «МОТОР СІЧ». У складі цього покриття присутні нікель (основа), кремній, алюміній та тверді мастила (графіт і нітрид бору). Це дозволяє збільшити стійкість матеріалу до сульфідної корозії та гарантувати утворення оксидної плівки яка має високі захисні властивості і задовільну адгезійну взаємодію з матеріалом.

Для отримання суміші КНА-82 здійснювалось змішування просіяних порошків нікелю (~ 98 %), кремнію (~ 2 %) та окремо від складу 10 % мочевины в змішувачі з ексцентричною віссю протягом 6...8 годин. Після цього суміш підлягала відпалюванню при температурі 950 °С впродовж 4 годин. Отриману суміш подрібнювали і просіювали, після чого додавали до неї 10 % ПН75Ю23В ТУ 14-1-1790-76 (Ni основа, 24,3% Al, 3% Cr, 1,2% W, 1,08% Mo, 1% Co, 0,4% Ti) та 5 % мочевины (окремо від складу). До відпаленої та просіяної суміші додавали порошки нітриду бору 16%, графіту 2%, алюмінію 1 %. Остаточний склад шихти містив 15,0...19,0 % нітриду бору, 1,5...2,0 % графіту, 1,0...3,0 % алюмінію, 1,4...2,5 % кремнію, основа нікель. Розмір часток отриманої суміші складав 100-160 мкм.

Зважаючи на те, що експлуатаційна стійкість покриттів КНА-82 не перевищує 1000°C, подальше застосування цих покриттів в нових конструкціях розроблюваних перспективних авіаційних двигунів є неефективним внаслідок різкого зниження експлуатаційних характеристик

при температурах, вищих за 1100 °С. Отже, необхідно було визначити систему легування, яка б дозволила підвищити температуру експлуатації ущільнювальних покриттів.

Для підвищення жаростійкості покриттів системи Ni-Al-Si доцільно вводити елементи типу Cr, що дозволяє отримати окисну плівку з високими захисними властивостями [8]. Формування оксидів типу Al_2O_3 і Cr_2O_3 має забезпечити високу жаростійкість внаслідок формування щільної плівки на поверхні [9]. Мікролегування рідкоземельними елементами (наприклад, ітрієм) дозволяє підвищити адгезію оксидної плівки.

Для підвищення фізико-механічних властивостей покриття, в шихту, що готується за серійною технологією, вносити лігатуру, яка містить ітрій. Було досліджено три різні склади лігатури, з різним вмістом ітрію: склад №1 - Ni-Y; склад №2 - Y; склад №3 - Co-Ni-Cr-Al-Y. КНА-82 – склад №4.

2.3 Дослідження мікроструктури і хімічного складу

Растровий електронний мікроскоп (РЕМ) призначається для дослідження і аналізу характеристик мікроструктури сплавів. Він дозволяє отримувати зображення мікрорельєфу поверхні зразків з високою роздільною здатністю і великою різкістю при великих збільшеннях, а також проводити аналіз хімічного складу дослідженої ділянки зразка з використанням рентгенівського мікроаналізатора. Електрони з вольфрамового катода, розігрітого до 2430 °С, набирають швидкість в електронному полі, створеному різницею потенціалів (до 50 кВ) між катодом і анодом. За допомогою конденсорних лінз і та об'єктивної лінзи пучок електронів формується у вузький зонд розміром 0,1-3 мкм. Змінюючи струм у лінзах, здійснюють регулювання інтенсивності та фокусування зонда на поверхні зразка за рахунок взаємодії магнітного поля лінз з пучком електронів. Синхронно зі

скануванням зонда на екрані електроннопроменевої трубки (ЕПТ) формується зображення.

При взаємодії первинних електронів із зразком відбуваються такі процеси: відбиття електронів внаслідок пружного розсіяння, поглинання електронів, поява вторинних електронів та утворення характеристичного рентгенівського випромінювання. Відбиті електрони – це пружнорозсіяні електрони з такою ж довжиною хвилі, як і у первинних, бо зміна траєкторії їх розповсюдження у зразку відбувається із незначною втратою енергії. Слабозв'язані електрони, після непружної взаємодії з первинними електронами, емітують із зовнішніх оболонок атомів зразка, тому їх називають вторинними електронами. При взаємодії первинних електронів із електронами внутрішніх оболонок атомів зразка також виникає характеристичне рентгенівське випромінювання. Енергія рентгенівських квантів, а саме довжина хвилі, є характеристикою хімічного елемента. Вторинна електронна емісія виникає поблизу місця падіння зонда від усіх точок складного рельєфу. За допомогою детектора, встановленого біля зразка, сигнали від електронів, що виходять з поверхні зразка, перетворюються в електричні імпульси. Після проходження через підсилювач, вони передаються в модулятор електроннопроменевої трубки. Сканування електронного зонда по поверхні об'єкта і променю на екрані ЕПТ здійснюється синхронно від генератора сканування і тому кожній точці на зразку відповідає точка на екрані ЕПТ. При переміщенні зонда, у відповідності зі зміною поверхневих особливостей зразка (частинки інших фаз, рельєф поверхні і т. інше), змінюється кількість розсіяних електронів і відповідно змінюється яскравість точки на екрані ЕПТ, тобто виникає контраст і створюється зображення поверхні зразка. В РЕМі використовують два види контрасту: контраст від хімічного складу, що залежить від атомного номеру елементів, і топографічний контраст, який визначається рельєфом поверхні зразка. Контраст від хімічного складу виникає тому, що ділянки з великим атомним номером будуть більш яскравішими, бо кількість розсіяних електронів пропорційна атомному номеру

елемента. Топографічний контраст, на відміну від попереднього, пов'язаний з розташуванням рельєфної поверхні під різними кутами до напрямку падіння зонда. Більша кількість електронів буде реєструватися від тих ділянок рельєфу, що мають більший кут між нормаллю до поверхні ділянки (в точці падіння первинного пучка) і його напрямком. Враження об'ємності структури поверхні пояснюється великою глибиною зображення РЕМа [10].

2.4 Рентгеноструктурний метод визначення фазового складу

Фазовий рентгеноструктурний аналіз базується на тому положенні, що кожна фаза з певним типом і розміром кристалічної комірки дає на рентгенограмі свою систему дифракційних ліній. Якщо сплав складається із декількох фаз, то на рентгенограмі будуть присутніми лінії всіх фаз. Деякі з них можуть збігатися по кутам відбиття, внаслідок чого інтенсивність таких ліній значно збільшується. Метою якісного фазового аналізу є знаходження всіх фаз у складі зразка та їх ідентифікація. Кожну фазу ідентифікують, порівнюючи знайдені міжплощинні відстані d_{hkl} з довідковими даними [11]. Визначення об'ємного вмісту фаз можливе тільки при використанні спеціальних методів кількісного аналізу. Чутливість фазового аналізу обумовлюється мінімальною кількістю визначеної фази при використанні певного методу і може коливатися в широкому діапазоні (від десятих до декількох процентів за масою). Вона залежить від таких факторів: здатності атомів речовини розсіювати рентгенівські промені; наявності структурних напружень і дефектів у ґратці; значень коефіцієнтів поглинання кожної фази і всієї суміші фаз; типу та симетрії ґратки; наявності фону на рентгенограмі. Чутливість обраного методу можна значно підвищити раціональним вибором випромінювання, режимом і геометрією зйомки, а також способом приготування зразка [10].

Кожна фаза сплаву має кристалічну ґратку певного типу з відповідним розміром елементарної комірки. Всі сукупності паралельних площин у цій ґратці характеризуються дійсними чи фіктивними міжплощинними відстанями d_{HKL}/n , що є типовими тільки для даної речовини (при цьому d_{HKL} - дійсна відстань, а n – порядок відбиття). Порівняння цих відстаней з табличними дозволяє з'ясувати, яка речовина (або фаза) входить до складу дослідницького зразка. Дані про міжплощинні відстані різних фаз беремо з таблиць в порядку зменшення величин d_{HKL}/n , які позначаються через d_{HKL} . Отже будь-яке значення d_{HKL} можна вважати як міжплощинну відстань для серії паралельних площин, які беруть участь у створенні дифракційного максимуму з індексами HKL. Безпосередньо величина d_{HKL} визначається з формули Вульфа- Бреґа, а саме:

$$d_{\text{HKL}} = \frac{d_{\text{hkl}}}{n} = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}$$

де λ – довжина хвилі;

θ - кут відбиття дифракційних променів.

Оскільки λ (довжина хвилі характеристичного випромінювання при зйомці дифрактограми) є величиною відомою, то задача по визначенню сукупності міжплощинних відстаней зводиться до знаходження кутів відбиття θ для дифракційних ліній α -випромінювання з причини їх більшої інтенсивності порівняно із β -лініями. В роботі використано монохроматизацію дифракційних променів, для цього встановлено монохроматор після зразка, зйомка в мідному випромінюванні. Якщо у зразку присутні декілька фаз, то дифракційні лінії різних фаз можуть співпадати за місцем розташування на рентгенограмі (кути θ); у цьому випадку необхідно проводити більш ретельний аналіз інтенсивностей дифракційних ліній [10].

Набір міжплощинних відстаней дає можливість визначити речовину, використовуючи довідники [11].

Устрій дифрактометра

Іонізаційні установки використовуються як для генерації рентгенівських променів, так і для виміру їх інтенсивності. Для цього їм надають спеціальні лічильники та відповідну електронну частину. Найбільш важливими частинами рентгенівських установок, окрім рентгенівської трубки, є високовольтний трансформатор, трансформатори нагрівання катодів трубок та кенотронів і пульт керування. На пульті розміщують ручки регулювання високої напруги, струму розжарення волоску катода трубки та відповідні вимірювальні прилади. В залежності від конструкції рентгенівські установки мають різні високовольтні схеми. Високовольтна обмотка трансформатора підімкнута в такий спосіб, що за час одного півперіоду заряджається один з конденсаторів, а за час другого півперіоду – інший (кожний до максимальної напруги, яку забезпечує високовольтний трансформатор). Оскільки обидва конденсатори з'єднані послідовно, між анодом і катодом трубки маємо подвійну напругу. Прискорююча напруга регулюється з пульту керування за допомогою автотрансформатора (на схемі він відсутній), якого увімкнено у первинну обмотку високовольтного трансформатора з діапазоном регулювання 20...50 кВ. Сила струму крізь трубку (звичайно до 30 мА) контролюється міліамперметром, який увімкнено в анодну мережу. Отримані рентгенівські промені фокусуються на зразку, котрий попередньо встановлюють в центрі гоніометра ГУР-5. Гоніометр призначено для синхронного повороту лічильника і зразка навколо вертикальної осі із заданою швидкістю, причому кут повороту лічильника удвічі більше за кут повороту зразка. Дифраговані кристалічною ґраткою рентгенівські промені попадають до лічильника. Рентгенівські кванти у лічильнику перетворюються в імпульси напруги, які підсилюються та реєструються в електронних блоках установки. Швидкість рахування складає 5.104 імп/с. Кількість імпульсів за секунду реєструється електронним приладом.

2.5 Визначення жаростійкості

Під жаростійкістю розуміють здатність ущільнювального матеріалу опиратися окисленню або іншій зміні хімічного складу при підвищених температурах в присутності газового середовища (в роботі – в повітрі).

Жаростійкість матеріалів, які експлуатуються в гарячій зоні турбіни та компресора ГТД, є одним з показників, який впливає на їх надійність та працездатність.

Характерною особливістю ущільнювальних матеріалів проточного тракту ГТД являється їх сильно розвинена поверхня внаслідок високої пористості. Площа поверхні даних матеріалів кількісному визначенню практично не піддається. Через це існуючі методи оцінки жаростійкості до цих матеріалів не застосовуються. Методика розповсюджується на ущільнювальні матеріали і покриття і встановлює метод їх випробування на жаростійкість. Методика заснована на визначенні відносної зміни маси зразка при взаємодії його з температурним полем на певному відрізку часу в повітрі [12].

Дослідження проводять в електричних печах опору в повітряному середовищі в фарфорових тиглях. Діапазон створення температури в печі, °С 20 – 1100. Температура в печі визначається термопарою ХА, 0 – 1100. Зважування зразків проводять на аналітичних вагах типу ВЛА-200 з похибкою не більше ± 1 мг [7].

В якості зразка використовується навіска не менше 10 гр. із шматочків ущільнювального матеріалу без підкладки, розміром не менше 5х5мм і товщиною не менше 2 мм. Дослідження припиняють якщо є присутність візуально видимого відшарування оксидної плівки.

Порядок проведення випробувань полягає в наступному:

В п'ять фарфорових тиглів поміщають зразки, перед цим зваживши їх на аналітичних вагах. Всі п'ять тиглів завантажують в піч, розігріту до заданої температури. Через кожні 20 годин витримки в печі вивантажують 1 тигель і

охолоджують на повітрі. Цикл випробувань повинен проходити протягом 100 годин без перерв. Після охолодження зразок-навіску зважують.

Визначають жаростійкість (відносну зміну маси) кожного зразка визначають за формулою:

$$Ж = \frac{M_n - M_k}{M_n} \cdot 100\%,$$

де M_n – маса зразка до випробувань, г

M_k – маса зразка після випробувань, г.

Випробування на жаростійкість дозволяє дати порівняльну оцінку ущільнювальних матеріалів для виявлення найбільш жаростійких при однакових умовах випробування [7].

2.6 Визначення пористості

Пористість зразків визначали таким чином: попередню масу зразка вимірювали на аналітичних вагах на повітрі з похибкою не більше 0,01 %. Поверхневі пори зразка закривали покриттям зразків плівкою парафіну [13].

Після закриття пор зразок зважували на повітрі та у воді з похибкою не більше 0,01%. Зразок та вода мали температуру 15...30 °С. Температуру води вимірювали з похибкою не більше 0,5 °С. Після зважування у воді з поверхні зразка фільтрувальним папером вбирали вологу і після цього знову проводили зважування на повітрі.

Для визначення об'єму зразка використовували пікнометр, заповнений очищеною водою. Спершу зважували на лабораторних вагах зразок і окремо пікнометр, наповнений водою до верхнього отвору пробки і термостатований при температурі 20 °С. Потім зразок розташовували в пікнометрі з водою,

термостатували при температурі 20 °С і видаляли повітря шляхом струшування. Рівень води в пікнометрі доводили до верхнього отвору пробки. Пікнометр із зразком зважували. Точність обчислень встановлюється до другого десяткового знаку. Загальну пористість зразка (П) обчислювали у відсотках до десяткового знаку [13].

Для проведення випробувань на жаростійкість, спеціально підготовлені зразки перед випробуванням очистили від жиру та зважили на аналітичних вагах. Зразки покриттів різних складів витримували в повітряній атмосфері печі при температурі 1100°С із витримкою протягом 50 і 100 годин. Після випробувань зразки зважували, що дозволило отримати відносні показники жаростійкості на підставі порівняльної оцінки зміни маси (приросту) до і після випробувань.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ РОЗДІЛ

3.1 Дослідження фазового складу і мікроструктури покриттів у вихідному стані після напилення

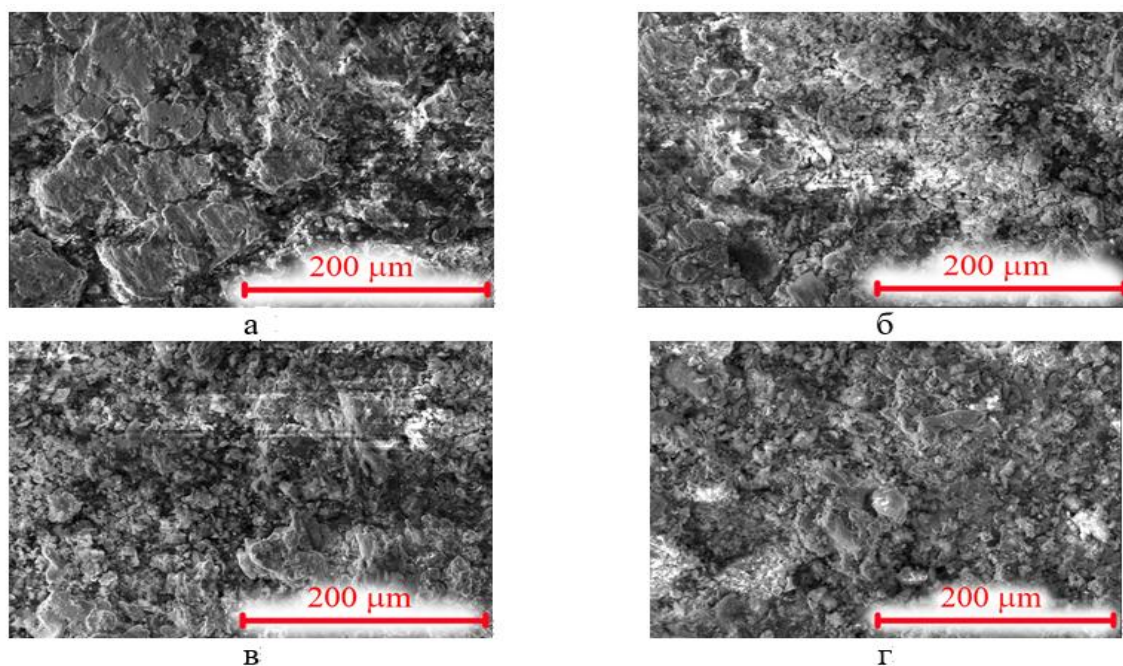
На спеціально підготовлені зразки покриття наносилось газополуменевим методом. Попередньо на матеріал деталі наносився жаростійкий підшар, який являє собою нікелевий сплав, що містить компоненти (Al і Cr). Це забезпечує як високу адгезійну міцність ущільнювального покриття з матеріалом основи, так і опір високотемпературній корозії. Зовнішній вигляд зразків після напилення наведено на рисунку 3.1.



Рисунок 3.1 – Зовнішній вигляд напилених зразків

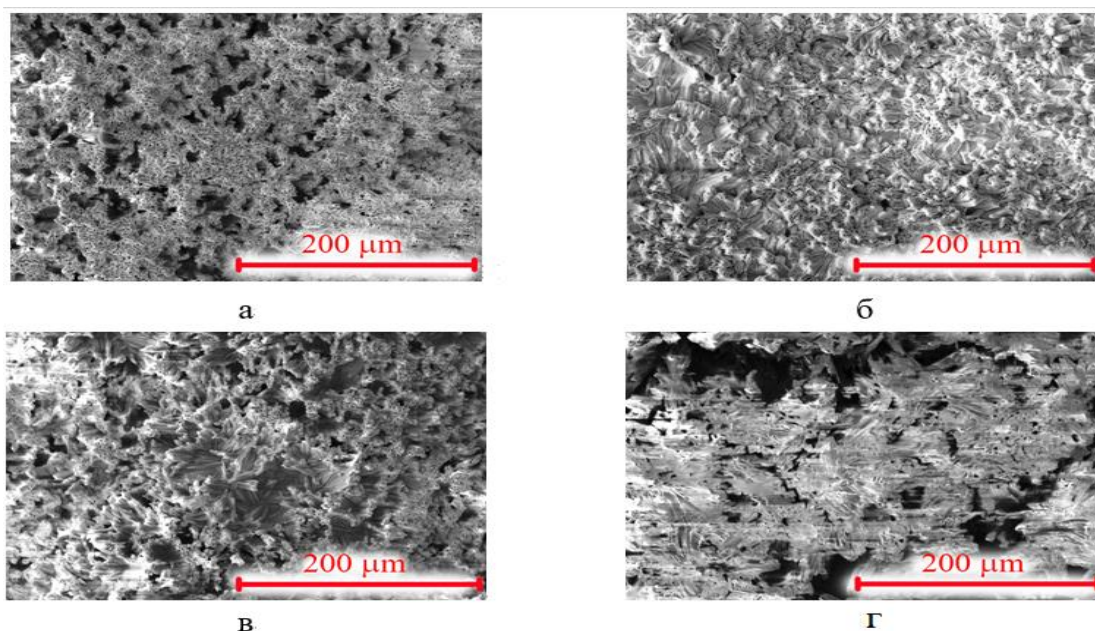
Після формування покриттів для отримання необхідної геометрії та проведення подальших спеціальних експериментальних досліджень зразки підлягають механічній обробці. Оскільки ущільнювальні матеріали працюють в умовах дії високої температури в газовому середовищі необхідно було також дослідити поведінку матеріалу при довготривалому температурному впливі, тому отримані покриття піддавались термічній обробці при температурі 1100°C протягом 50 і 100 годин.

На рисунках 3.2 та 3.3 зображено мікроструктуру напилених покриттів до та після випробувань на жаростійкість (x165).



а – склад №1 (КНА-82+Ni-Y); б – склад №2 (КНА-82+Y); в – склад №3 (КНА-82+ Co-Ni-Cr-Al-Y); г – склад №4 (КНА-82)

Рисунок 3.2 – Мікроструктура покриттів після газополуменового напилення



а – склад №1 (КНА-82+Ni-Y); б – склад №2 (КНА-82+Y); в – склад №3 (КНА-82+ Co-Ni-Cr-Al-Y); г – склад №4 (КНА-82)

Рисунок 3.3 – Мікроструктура покриттів після термічного впливу при температурі 1100°C впродовж 100 годин

Як видно з рисунків 3.2, 3.3 мікроструктура покриття після напилення характеризується наявністю крупних частинок грубої форми з нерівномірно розташованими порами. Мікроструктура покриття після термічної обробки характеризувалась задовільною дисперсністю та рівномірним розташуванням частинок твердої фази. На поверхні були сформовані достатньо щільні оксидні плівки. Найбільш рівномірне розташування частинок і пор невеликого розміру спостерігається в структурі покриття складів №2 і №3.

Було встановлено, що, в результаті досліджень фазового складу матеріалів у вихідному стані вже під час нанесення, в покриттях всіх складів формувались інтерметалідні та оксидні фази, які повинні сприяти підвищенню опору газовій корозії та зносостійкості покриттів.

У складі покриття базового складу КНА-82 (склад №4), як і в складах №1-3 у вихідному стані виявлені наступні фази: Ni, BN, NiAl, Ni₂Si. Основними фазами в покритті КНА-82+Y (№2) є NiAl, Ni₂Si, а також у невеликій кількості Y і Y₂O₃. Введення в склад №1 лігатури Ni-Y порівняно із чистим Y привело до утворення фази Ni₅Y з досить інтенсивними лініями.

Найскладнішим за фазовим складом є покриття складу №3 (КНА-82+Co-Ni-Cr-Al-Y). У вихідному стані в покритті виявлено наступні фази: Ni, α-Co, BN, Co₂Al₅, CoCr₂, Ni₂Si, NiAl і Ni₃Al.

Після проведеної термообробки (при t=1100°C) у процесі витримки 50 і 100 годин суттєво змінився фазовий склад, інтенсивність ліній Ni і BN зменшилась, що свідчило про зниження їх вмісту в покриттях. При окисленні цих фаз з'являлись оксиди нікелю NiO, бору B₂O₃ та ітрію Y₂O₃. Утворювались також шпінельні сполуки NiCr₂O₄ і CoAl₂O₄, які позитивно впливають на стійкість покриттів до газової корозії.

Дослідження мікроструктури дозволяє отримати лише попередні дані щодо зовнішньої будови структури частинок та характеру їх розподілу в об'ємі. При цьому вони не дають можливість сформувати загальну картину щодо фізико-хімічної природи твердої складової і оцінити її роль у формуванні

необхідного комплексу механічних та експлуатаційних властивостей розроблених покриттів.

Для отримання комплексного уявлення щодо внутрішньої будови і визначення її впливу на фізико-механічні властивості покриттів були проведені рентгеноструктурні дослідження їх фазового складу.

Попереднє вивчення фазового складу свідчило про те, що покриття є багатофазними, причому дифракційні лінії деяких фаз мають незначну інтенсивність, оскільки не завжди присутні в достатній кількості (за масою). У зв'язку із цим було проведено послідовне вивчення усіх вихідних складових матеріалів, що надалі було використано при komponуванні складу покриттів.

У чистому вигляді був досліджений нітрид бору BN, на дифрактограмі якого виявлені всі лінії гексагональної модифікації цієї хімічної сполуки з параметрами $a=0,25040$ нм, $c=0,66612$ нм (рис. 3.4).

У вихідному порошку ітрію крім ліній безпосередньо Y, у невеликій кількості присутні чотири найбільш сильні лінії оксиду ітрію Y_2O_3 , що свідчить про його часткове окислення (рис. 3.5). У порошку лігатури Ni-Y, який додавався до складу №1, крім нікелю, як основної фази, і ітрію у досить великій кількості присутня фаза Ni_5Y .

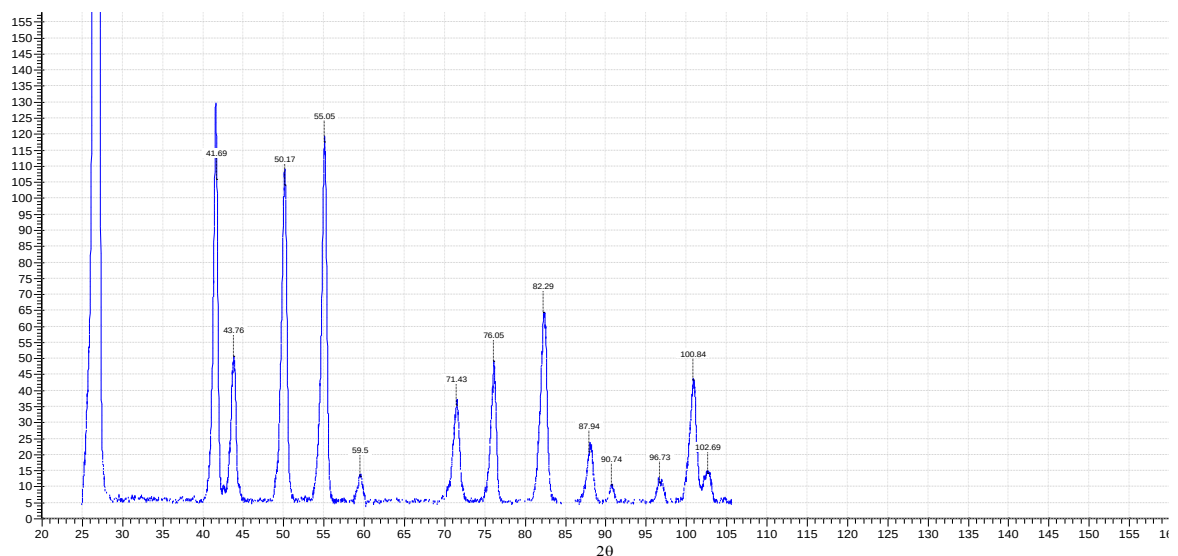


Рисунок 3.4 – Дифрактограма нітриду бору

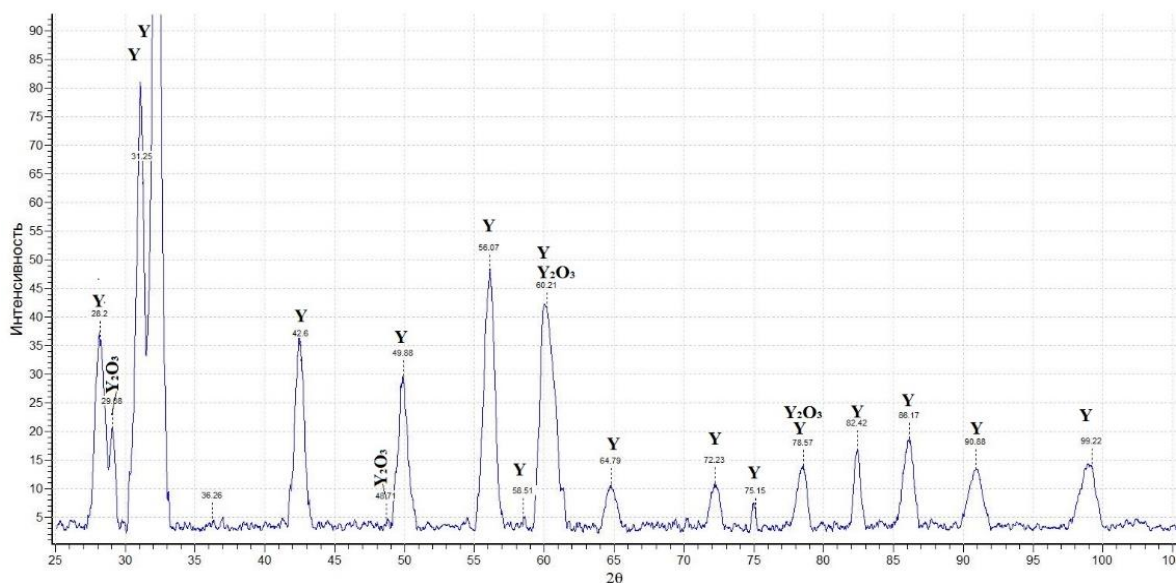


Рисунок 3.5 – Дифрактограма ітрію (у вигляді порошку)

Наявність цієї фази підтверджується аналізом діаграми стану Ni-Y. На дифрактограмі (рис. 3.6) цій фазі відповідають лінії досить значної інтенсивності. Спостерігається також кілька ліній оксиду ітрію Y_2O_3 , що свідчить про незначний вміст цієї фази. Отримані відомості використані в подальшому при аналізі досліджуваних покриттів №1, №2 і №3.

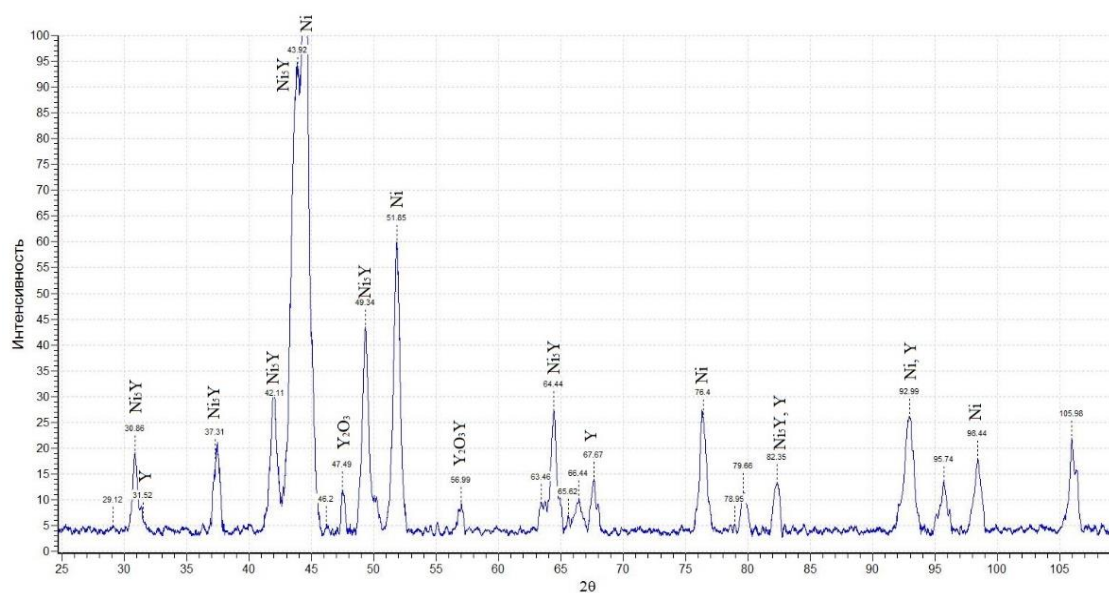


Рисунок 3.6 – Дифрактограма лігатури Ni-Y

У вихідному порошку ВКНА (ПХН75Ю23В) основною фазою є нікель, а також присутні лінії NiAl , масова частка цієї фази менша (рис. 3.7). В покритті на основі ВКНА (рис. 3.8) визначені наступні фази: основна – Ni , у меншій кількості NiAl і Ni_3Al , лінії останньої фази мають меншу інтенсивність.

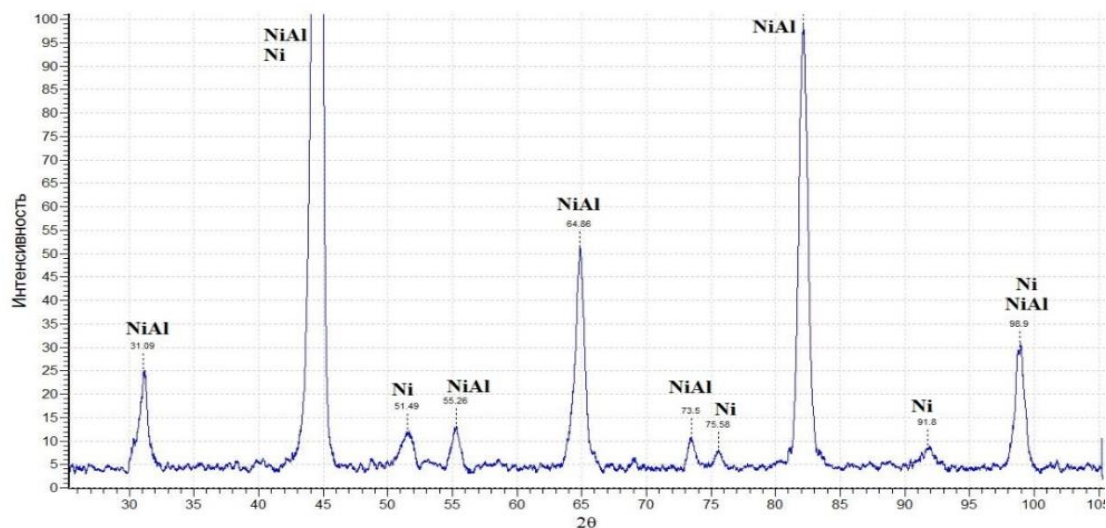


Рисунок 3.7 – Дифрактограма порошку ВКНА

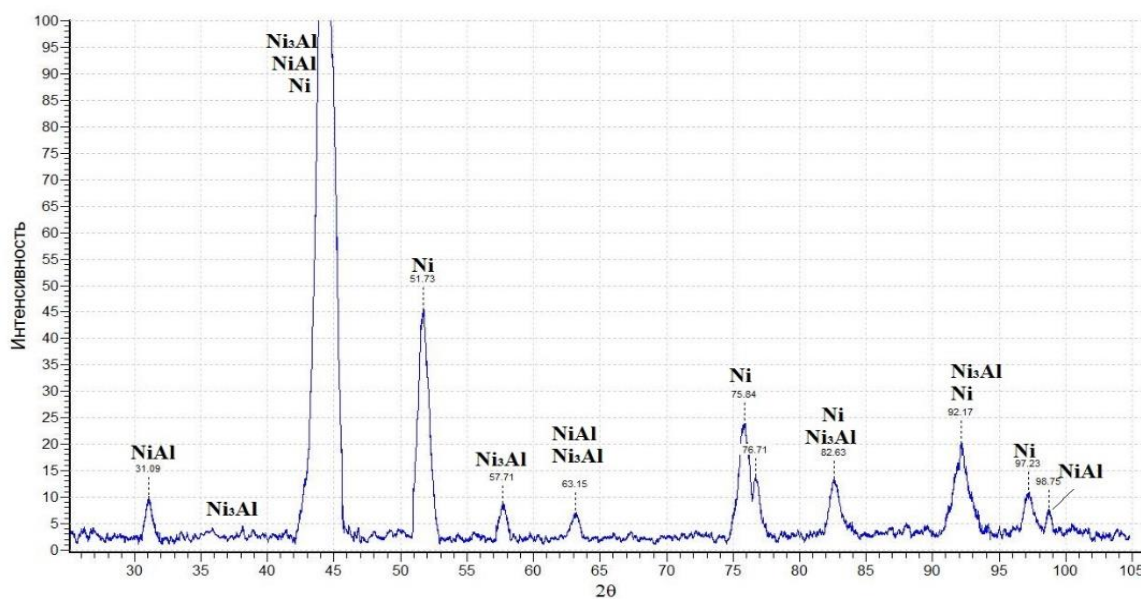


Рисунок 3.8 – Дифрактограма покриття ВКНА після напилення

У всіх досліджуваних покриттях різного складу використовували наступні порошки: КНА (нікелевий порошок (основа), кристалічний кремній (2,0...2,5%), графіт (2%), нітрид бору (16%), алюмінієвий порошок (1%) з додаванням карбаміду й натрієвого рідкого скла як зв'язувального) і ВКНА (порошок ПХН70Ю30). Вказані порошки були основою КНА-82 і складів покриттів №1, 2, 3. Ущільнювальне покриття КНА-82 застосовується в авіаційних двигунах ПАТ «МОТОР СІЧ» з більш низькою температурою газу в турбінах. Результати проведеного дослідження з вивчення фазового складу всіх покриттів наведені в таблиці 3.1. У покритті базового складу КНА-82, як і в складах №1-3 у вихідному стані виявлені наступні фази: Ni, BN, NiAl, Ni₂Si (рис. 3.9).

Таблиця 3.1 – Фазовий склад покриттів у вихідному стані та твердість покриття

Покриття	У вихідному стані	Твердість HB
ВКНА	Ni, NiAl, Ni ₃ Al	-
КНА	Ni, BN, NiAl, Ni ₂ Si, Al ₂ O ₃	-
Склад №1 (КНА-82+Ni-Y)	Ni, BN, NiAl, Ni ₂ Si, Y, Y ₂ O ₃ , Ni ₅ Y	17
Склад №2 (КНА-82+Y)	Ni, BN, NiAl, Ni ₂ Si, Y, Y ₂ O ₃	17,4
Склад №3 (КНА-82+Co-Ni-Cr-Al-Y)	Ni, BN, α-Co, Co ₂ Al ₅ , CoCr ₂ , Ni ₂ Si, NiAl, Ni ₃ Al	17,2

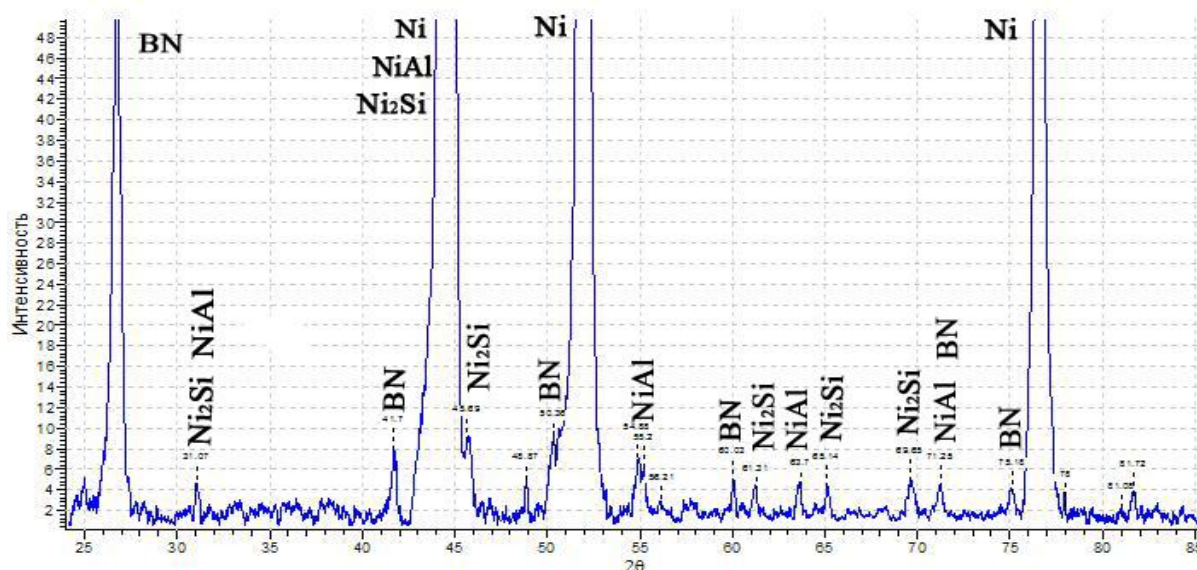


Рисунок 3.9 – Дифрактограма покриття складу №4 (КНА-82)

У покритті складу №1 (КНА-82 з додаванням порошку сплаву Ni-Y) у вихідному стані присутні фази: Ni, BN, NiAl, Ni₂Si, Y, Y₂O₃, Ni₅Y (рис. 3.10). Лінії Ni значної інтенсивності, це основна фаза в покритті.

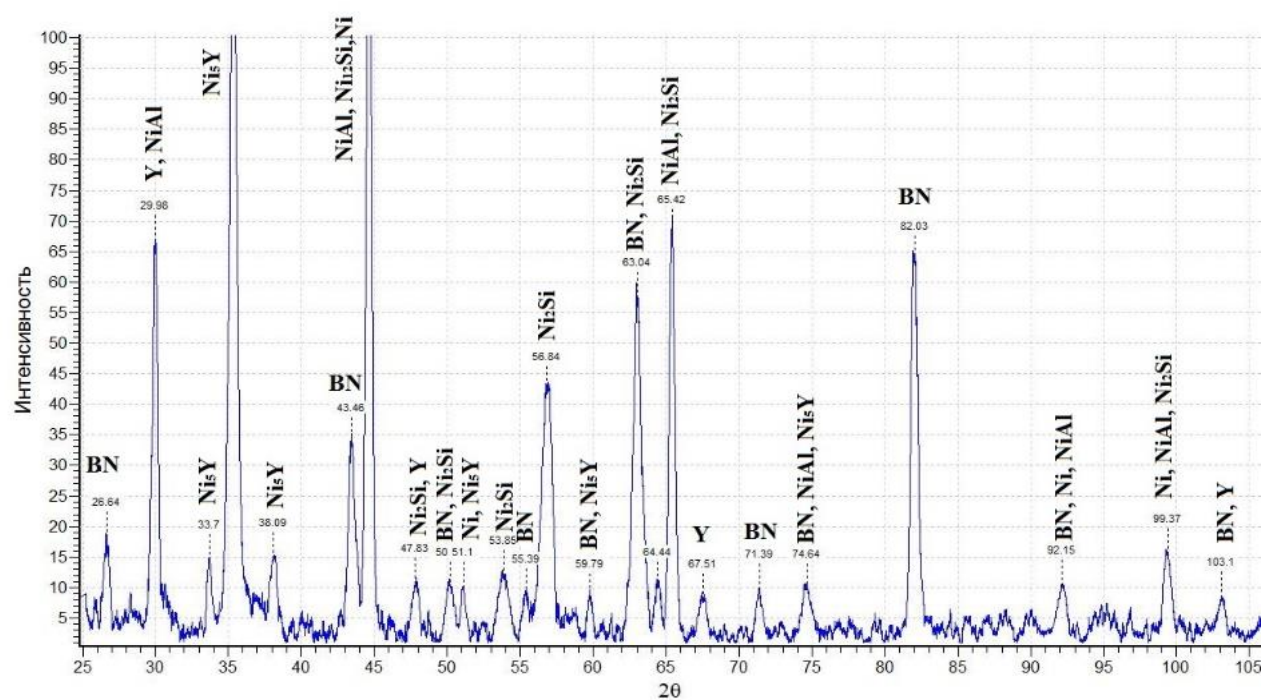


Рисунок 3.10 – Дифрактограма покриття складу № 1 (КНА-82+Ni-Y)

На дифрактограмі спостерігаються лінії нітриду бору. Виявлені також фази NiAl , Ni_2Si , у невеликій кількості Y і Y_2O_3 . Використання порошку лігатури Ni з Y привело до утворення фази Ni_5Y . Наявність фази Ni_5Y з температурою плавлення на рівні 1490°C у складі покриттів може позитивно позначитись на експлуатаційній стійкості лабіринтних ущільнень. Присутність інтерметалідних сполук відповідного складу повинна одночасно підвищувати як триботехнічні характеристики покриттів, так і їх опір ерозійному зносу під впливом розігрітого газового потоку.

Практично аналогічну картину за складом фаз виявлено в покритті складу №2 (рис. 3.11). Проте інтерметалідної фази Ni_5Y не було виявлено.

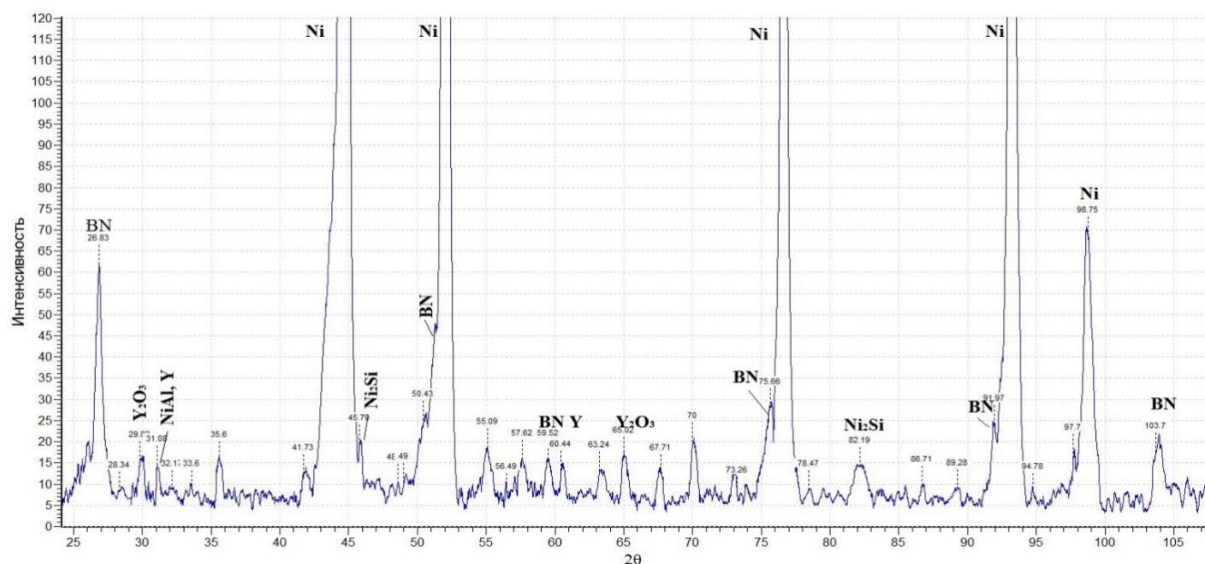


Рисунок 3.11 - Дифрактограма покриття складу №2 (KHA82+Y)

Найбільш складним за фазовим складом є покриття №3. Додання до KHA-82 порошку лігатури, що містить Co , Ni , Cr , Al , Y у значній кількості, суттєво ускладнило ідентифікацію фаз у цьому покритті. У вихідному стані (рис. 3.12) в покритті ідентифікуються наступні фази: Ni , $\alpha\text{-Co}$, BN , Co_2Al_5 , CoCr_2 , Ni_2Si , NiAl і Ni_3Al . Основною фазою є нікель, низькотемпературна модифікація $\alpha\text{-Co}$ і BN у незначній кількості. Виявлені інтерметаліди Co_2Al_5 ,

CoCr_2 , Ni_2Si , Ni_3Al . Найбільш сильні лінії $\alpha\text{-Co}$ збігаються з лініями Ni , як і в покриттях іншого складу присутня фаза Ni_2Si .

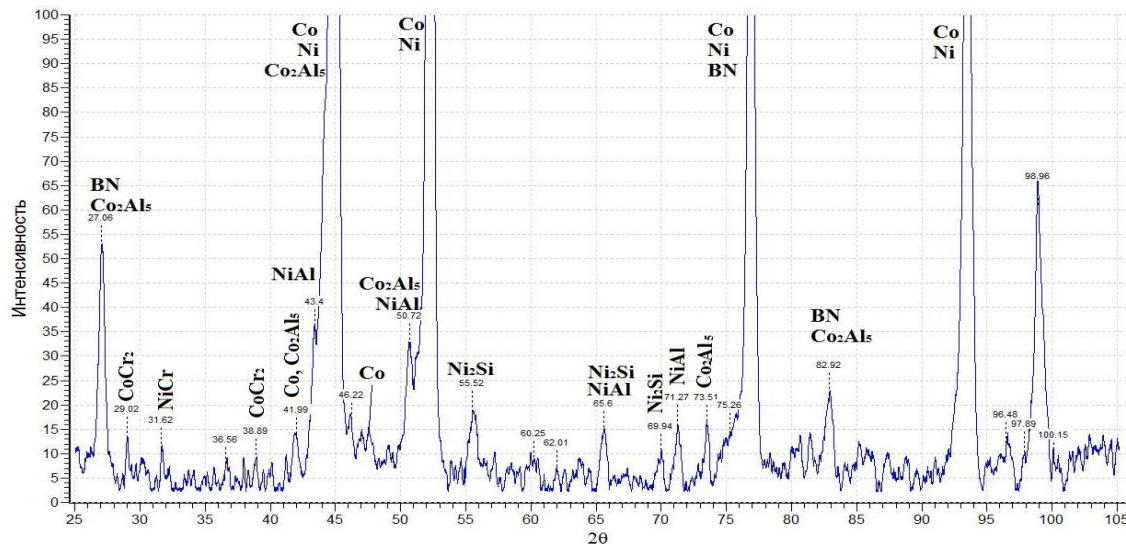


Рисунок 3.12 – Дифрактограма покриття складу №3 (KHA82+Co-Ni-Cr-Al-Y)

Виявлені інтерметаліди мають високі температури плавлення: Co_2Al_5 – 1180 °C, CoCr_2 – 1283 °C, Ni_2Si – 1255 °C, Ni_3Al – 1385 °C. Ці інтерметаліди мають складні кристалічні ґратки, які не відносяться до кубічної сингонії, і тому містять велику кількість ліній, найчастіше слабких за інтенсивністю, що призводило до певних труднощів при ідентифікації тієї або іншої фази.

Інтерметаліди на основі Ni і Co є одними з фаз, які спостерігаються в матеріалах, що застосовуються в турбінах ГТД, призначених для тривалої експлуатації в умовах високих температур [14]. Показано, що зносостійкість фази NiAl в 5 разів вища за зносостійкість фази Ni_3Al , тому її присутність повинно позитивно впливати на опір зношуванню.

Отже, в результаті досліджень фазового складу покриттів у вихідному стані було встановлено, що основними фазами в покритті KHA-82+Ni-Y є NiAl , Ni_2Si , а також у невеликій кількості Y і Y_2O_3 . Введення в склад лігатури Ni з Y порівняно із чистим Y привело до утворення фази Ni_5Y з досить

інтенсивними лініями. Враховуючи, що ущільнювальне покриття повинне зберігати свої експлуатаційні характеристики в умовах температур порядку 1100 °C і вище, були проведені випробування при температурах 1100 °C, час витримки 50 і 100 годин. Для визначення фазового складу під дією високих температур, було проведено рентгеноструктурний аналіз фазового складу після випробувань в середовищі повітря при температурі 1100 °C.

3.2 Дослідження змін у фазовому складі покриттів після випробувань при температурі 1100 °C

Після обробки при високих температурах у процесі витримки 50 і 100 годин суттєво змінюється фазовий склад, інтенсивність ліній Ni і BN зменшується, що свідчить про зниження їх вмісту в покриттях (рис. 3.13, 3.14).

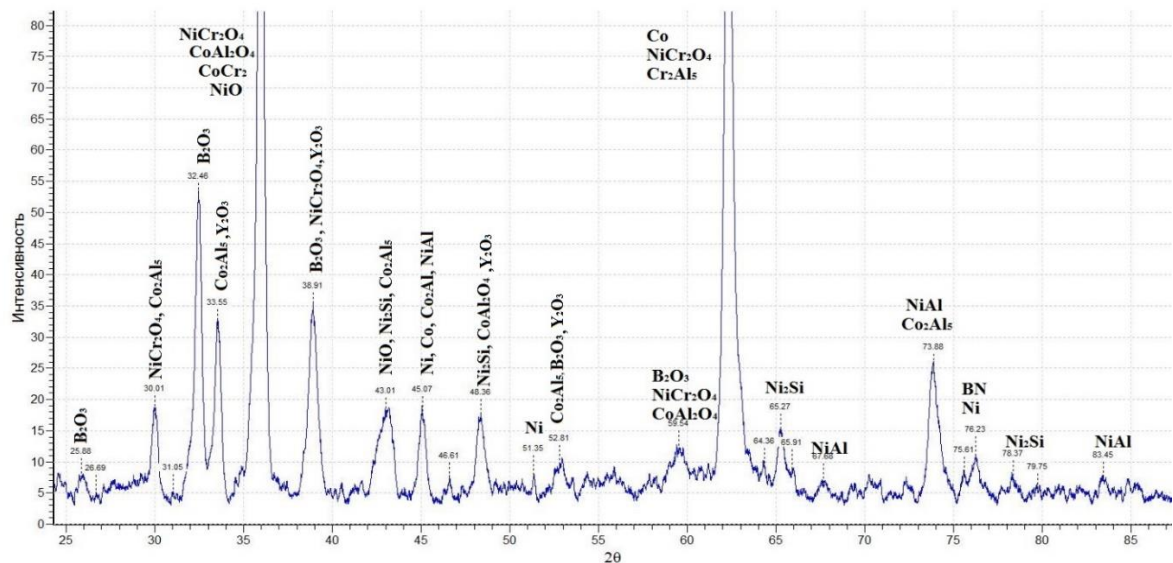


Рисунок 3.13 – Дифрактограма покриття складу №1 (КНА-82+Ni-Y) після високотемпературної витримки 50 годин

При окисленні цих фаз з'являються оксиди нікелю NiO і бору B_2O_3 . Відповідно до літературних джерел [15] оксид нікелю утворюється, вже при температурі $500\text{ }^\circ\text{C}$ і є термічно стійкою фазою до $1682\text{ }^\circ\text{C}$. Плівка оксиду нікелю захищає метал від подальшого окислення.

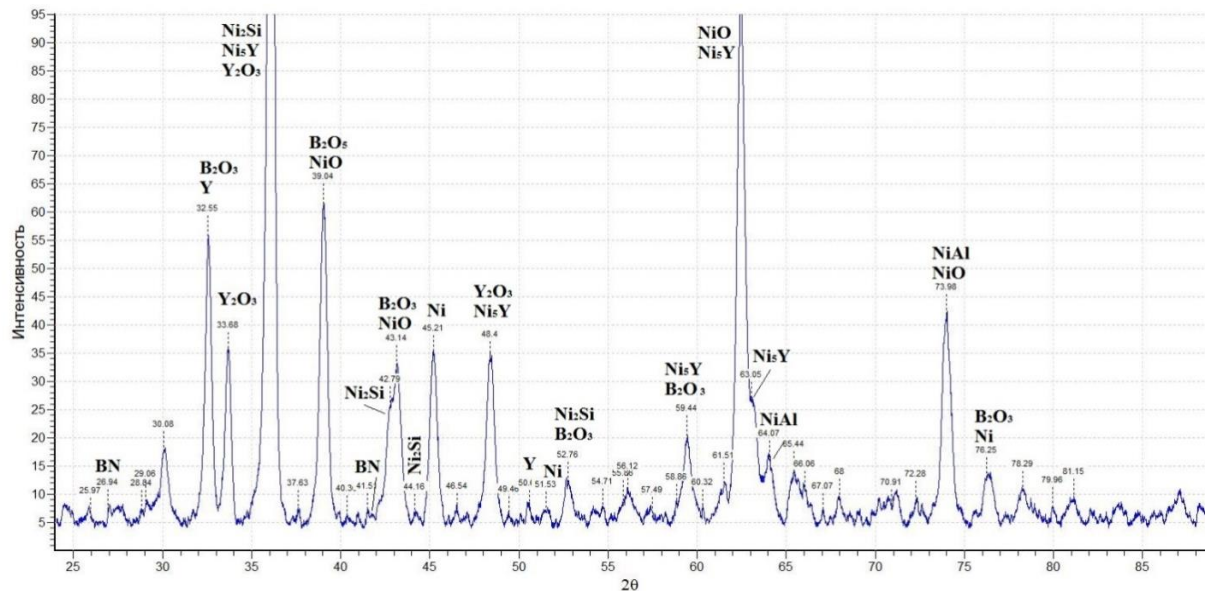


Рисунок 3.14 - Дифрактограма покриття складу №1 (КНА-82+Ni-Y) після високотемпературної витримки 100 годин

Ітрій на повітрі покривається оксидною плівкою при $t=425\text{ }^\circ\text{C}$; інтенсивне окислення відбувається при $t=750\text{ }^\circ\text{C}$ [15]. Нітрид бору інтенсивно окислюється при температурі $700\text{ }^\circ\text{C}$ і витримці 60 годин з утворенням оксиду бору B_2O_3 ; при цьому при температурі $1000\text{ }^\circ\text{C}$ відбувається інтенсивне окислення з виділенням азоту. Таким чином, можливість утворення фаз NiO , Y_2O_3 і B_2O_3 підтверджується джерелами [15,16].

Як доводить порівняльний аналіз (див. рис. 3.13, 3.14) після витримки 50 і 100 годин процес окислення нітриду бору не вичерпується до кінця при 50 годинах випробувань, інтенсивність ліній нітриду бору слабшає при більш тривалій витримці (100 годин), коли його стає ще менше. На дифрактограмах (див. рис. 3.14) виявлена фаза оксиду ітрію Y_2O_3 у кількості, що перевищує

вміст цієї фази у вихідному стані, при цьому лінії ітрію слабшають вже при витримці 50 годин, тобто окислення ітрію відбувається більш прискорено, ніж окислення нікелю й нітриду бору. Після обробки при високих температурах фази Ni_2Si , NiAl , Ni_5Y зберігаються в покритті в невеликій кількості, як і у вихідному стані. Виявлені лінії фази із сильними лініями, яким відповідають міжплощинні відстані з $d_{\text{HKL}}=0,296$; 0,249 і 0,230 нм, ідентифікувати дану фазу не вдалося.

Аналогічну картину за складом фаз виявлено в покритті складу №2 (рис. 3.15, 3.16). Необхідно зазначити, що у покритті із чистим ітрієм фазу Ni_5Y не вдалося виявити навіть після довготривалих випробувань при високій температурі. У покритті складу №2 при випробуванні на термостійкість при 1100 °C (50 і 100 годин) виявлена фаза $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, що є стійким оксидом ($t_{\text{пл}}=2043$ °C)

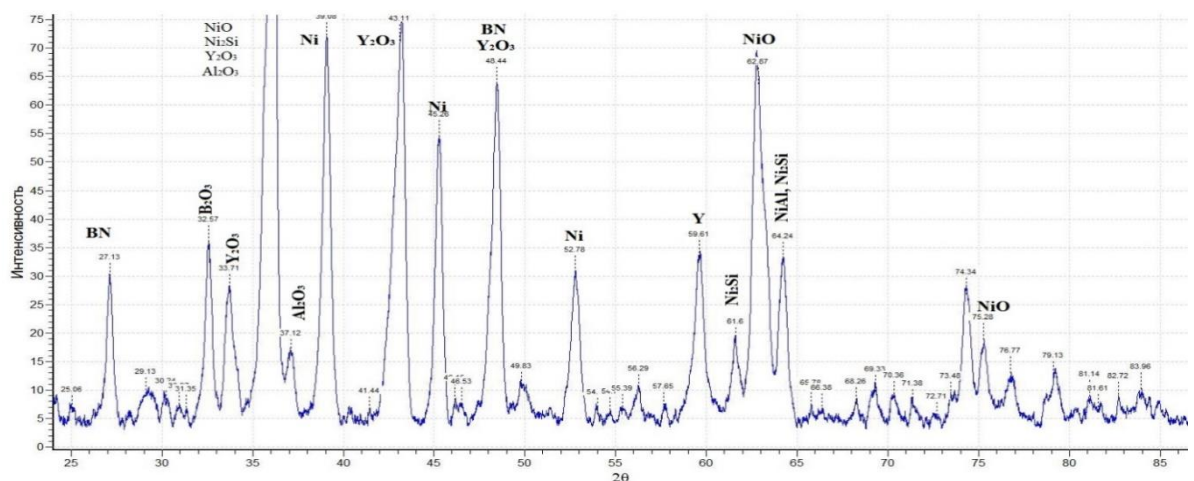


Рисунок 3.15 - Дифрактограма покриття складу №2 (KHA82+Y) після високотемпературної витримки 50 год

Оксид алюмінію $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ модифікації корунду має складну ромбодричну ґратку із двошаровим щільним пакуванням з іонів кисню, в октадричних порожнинах в ґратці розміщені атоми алюмінію. Збільшення тривалості витримки до 100 годин приводить до істотного зменшення вмісту

Ni і нітриду бору. Зберігаються фази Ni_2Si і NiAl , остання в невеликій кількості.

Плівка оксиду Al_2O_3 , яка утворюється в процесі окислення, має високу щільність і гарно захищає поверхню покриття від подальшого негативного впливу корозійного середовища при підвищенні температури.

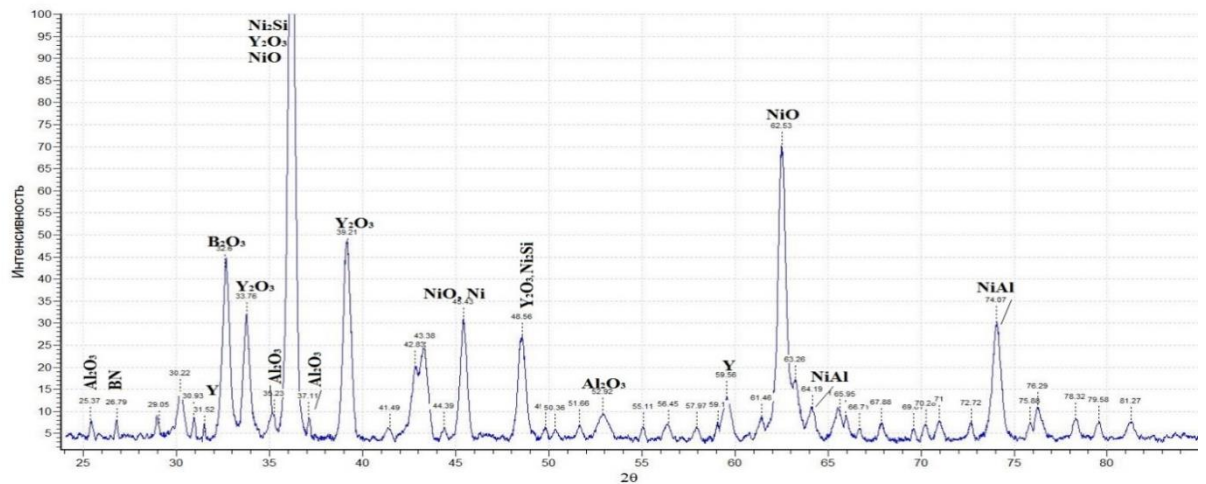


Рисунок 3.16 - Дифрактограма покриття складу №2 (КНА82+Y) після високотемпературної витримки 100 год

При довготривалій витримці адгезія оксидних плівок із матеріалом покриття зменшується, що може привести до їх руйнування. Введення ітрію дозволяє підвищити адгезію із покриттям, формування оксидів Y_2O_3 підвищує захисні властивості оксидної плівки. Показано [8], що наявність ітрію в покритті приводить до зниження активності кисню, а плівка Y_2O_3 виконує роль бар'єру при окисленні. Оксиди Y_2O_3 і Al_2O_3 мають поступову зміну температурного коефіцієнта лінійного розширення по товщині – від значень для оксидів на поверхні до значень матриці і запобігає розтріскуванню [6].

Дифрактограми покриття №3 після випробувань при температурі 1100 °C показані на рисунку 3.17, 3.18

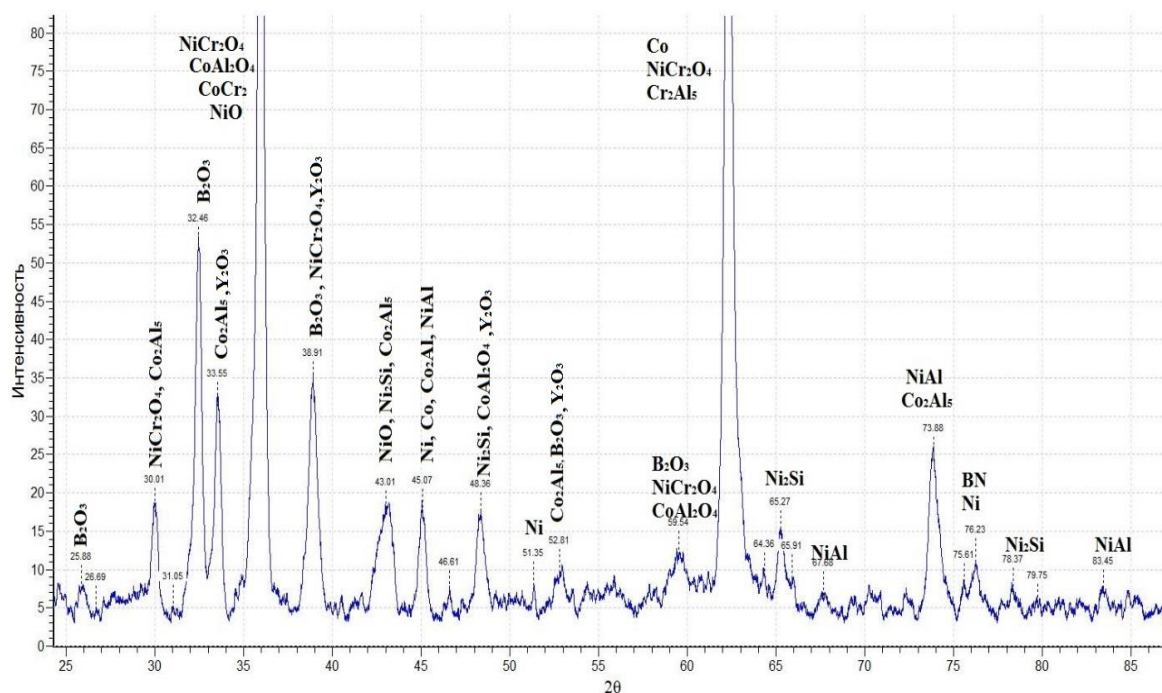


Рисунок 3.17 – Дифрактограма покриття складу №3 (КНА-82+Co-Ni-Cr-Al-Y) після високотемпературної витримки 50 годин

Фазовий склад при витримці 50 і 100 годин однаковий, проте змінюється кількісне співвідношення фаз. Інтенсивності ліній нікелю й кобальту, зменшуються особливо при витримці 100 годин, значно слабшають лінії фази нітриду бору вже при витримці 50 годин, виявлена фаза B_2O_3 .

Кількість фази NiO порівняно з її вмістом в покриттях складів №1 і №2 зменшилась. При збільшенні вмісту хрому до 19 %, кількість подвійного оксиду $NiO \cdot Cr_2O_3 (NiCr_2O_4)$ збільшується за рахунок зменшення фази NiO. Фази Co_2Al_5 , $CoCr_2$, Ni_2Si , які виявлені при дослідженні покриття №3 у вихідному стані, зберігаються і після витримки при температурі 1100 °C.

У покритті №3 окрім оксиду Y_2O_3 присутні також подвійні оксиди на основі кобальту й алюмінію $CoO \cdot Al_2O_3 (CoAl_2O_4)$, а також $NiCr_2O_4$, які утворюються в процесі витримки при 1100 °C. Ймовірність утворення шпінелі при високотемпературному випробуванні була перевірена на чистій системі ВКНА з більшим вмістом алюмінію (до 30 %). При витримці 50 годин крім фаз

подвійного оксиду – шпінелі $\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (CoAl_2O_4). Наявність високотемпературних складних оксидів (шпінелей) в покритті має забезпечувати задовільні теплозахисні властивості.

Структура покриттів виглядає як спечений матеріал із наявністю певної кількості пор. У вихідному стані після напилення присутні такі фази: Ni, BN, Ni_2Si , Y, Ni_5Y , CoCr_2 , Co_2Al_5 та оксид ітрію Y_2O_3 . Після випробувань при температурі 1100°C впродовж 50 та 100 годин спостерігалися значні зміни в структурі і фазовому складі

Фазовий склад покриття після витримки при високих температурах суттєво змінюється як в якісному, так і в кількісному співвідношенні фаз. З'являються нові фази, а вміст чистих металів зменшується за рахунок окислення.

В таблиці 3.2 наведено результати в дослідженні змін в фазовому складі покриттів після витримки при температурі 1100°C

Під впливом температури відбувся перерозподіл розмірів та форм пор в покритті. Порівняно із вихідним станом спостерігалось зменшення інтенсивності ліній Ni і BN на дифрактограмах, що свідчило про зниження їх вмісту в покриттях. Це відбулося внаслідок їх окислення, тому з'явилися оксиди бору B_2O_3 , нікелю NiO, алюмінію Al_2O_3 , та ітрію Y_2O_3 . Виявлено також у структурі шпінелі CoAl_2O_4 та NiCr_2O_4 у покритті з підвищеним вмістом Cr та Co [17].

На дифрактограмах виявлена фаза оксиду ітрію Y_2O_3 у кількості, що перевищує вміст цієї фази у вихідному стані, при цьому лінії ітрію слабшають вже при витримці 50 годин, тобто окислення ітрію відбувається більш прискорено, ніж окислення нікелю й нітриду бору. Після витримки при високих температурах фази Ni_2Si , NiAl, Ni_5Y зберігаються в покритті в невеликій кількості, як і у вихідному стані.

Таблиця 3.2 – Результати в дослідженні змін в фазовому складі покриттів після випробувань при температурі 1100°C

Покриття	У вихідному стані	Після високотемпературних випробувань	
		1100 °C, 50 год	1100 °C, 100 год
ВКНА	Ni, NiAl, Ni ₃ Al	Ni, NiO, NiAl, Ni ₃ Al, α -Al ₂ O ₃ , NiAl ₂ O ₄	
КНА	Ni, BN, NiAl, Ni ₂ Si, Al ₂ O ₃	Ni, BN, NiO, Ni ₂ Si, Al ₂ O ₃ , B ₂ O ₃	Ni, BN, NiO, Ni ₂ Si, α -Al ₂ O ₃ , B ₂ O ₃
Склад №1 (КНА-82+Ni-Y)	Ni, BN, NiAl, Ni ₂ Si, Y, Y ₂ O ₃ , Ni ₅ Y	Ni, BN, NiO, Ni ₂ Si, NiAl, B ₂ O ₃ , Ni ₅ Y, Y ₂ O ₃ , Y,	Ni, BN, NiO, Ni ₂ Si, NiAl, B ₂ O ₃ , Ni ₅ Y, Y ₂ O ₃ , Y
Склад №2 (КНА-82+Y)	Ni, BN, NiAl, Ni ₂ Si, Y, Y ₂ O ₃	Ni, BN, NiO, Ni ₂ Si, NiAl, B ₂ O ₃ , α -Al ₂ O ₃ , Y ₂ O ₃ , Y	Ni, BN, NiO, Ni ₂ Si, NiAl, B ₂ O ₃ , α -Al ₂ O ₃ , Y ₂ O ₃ , Y
Склад №3 (КНА-82+Co-Ni-Cr-Al-Y)	Ni, BN, α -Co, Co ₂ Al ₅ , CoCr ₂ , Ni ₂ Si, NiAl, Ni ₃ Al	Ni, BN, α -Co, Co ₂ Al ₅ , CoCr ₂ , Ni ₂ Si, NiAl, NiO, B ₂ O ₃ , Y ₂ O ₃ , NiCr ₂ O ₄ , CoAl ₂ O ₄ , Y ₂ O ₃	Ni, BN, α -Co, Co ₂ Al ₅ , CoCr ₂ , Ni ₂ Si, NiAl, NiO, B ₂ O ₃ , Y ₂ O ₃ , NiCr ₂ O ₄ , CoAl ₂ O ₄ , Y ₂ O ₃

Виявлено, що інтерметаліди Ni₂Si, NiAl, Ni₃Al, які присутні в покриттях складів №1, 2, 3 зберігаються й після витримки при високих температурах, а також фази Co₂Al₅ і CoCr₂ у покритті №3. Оксид Al₂O₃ у покритті №2 є термостабільним і при температурі 1100 °C, що в подальшому буде позитивно впливати на жаростійкість даного покриття. В процесі випробувань при високій температурі у всіх зразках відбувається істотне окислення нікелю, а також нітриду бору з утворенням оксидів NiO і B₂O₃. [12].

3.3 Вплив змін фазового складу на жаростійкість покриттів

На рисунку 3.20 зображено зміну маси зразків покриттів різних складів після випробувань на жаростійкість

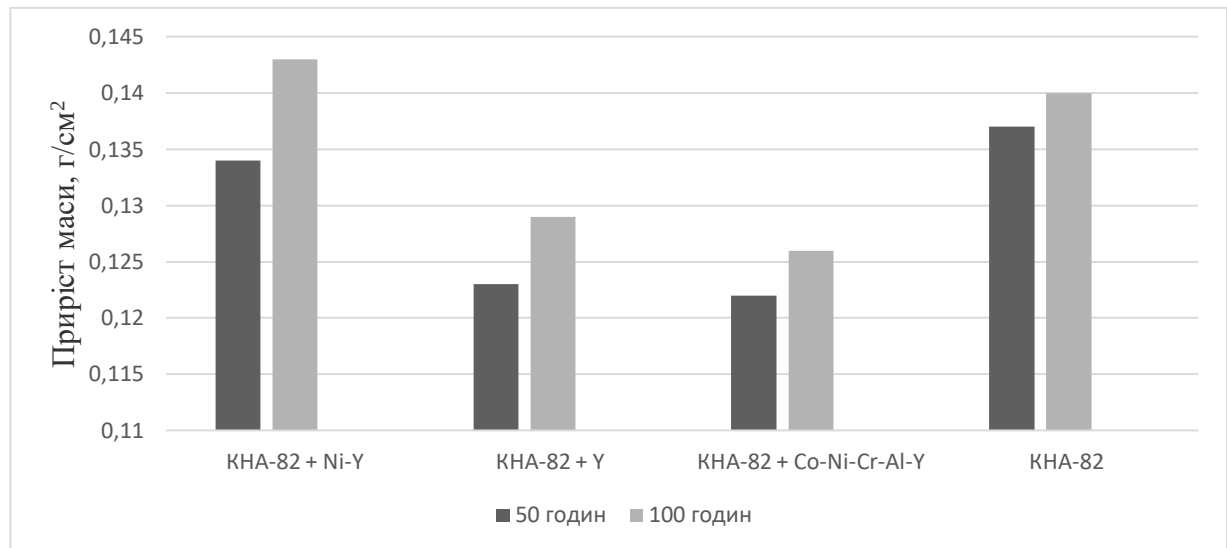


Рисунок 3.20 – Зміни маси зразків покриттів різних складів після випробувань на жаростійкість

Як видно з рисунку 3.20, приріст маси базового покриття KHA-82 та покриття складу №1 (KHA-82+Ni-Y) мають найбільший приріст маси, що приводить до зменшення жаростійкості. Покриття складу №3 (KHA-82 +Co-Ni-Cr-Al-Y) має найнижчий приріст маси, що пояснюється утворенням інтерметалідів та шпінелей які не дають покриттю окислюватися. Отже, покриття складу №3 має найвищі показники жаростійкості.

Виявлено, що інтерметаліди Ni_2Si , NiAl , Ni_3Al , які присутні в покриттях складів №1, 2, 3 зберігаються й після випробувань при високих температурах, а також фази Co_2Al_5 і CoCr_2 у покритті №3. Оксид Al_2O_3 у покритті №2 є термостабільним і при температурі 1100°C , що в подальшому буде позитивно впливати на жаростійкість даного покриття.

Виявлено фази хімічної сполуки Ni_5Y , як у вихідному стані, так і після випробувань при підвищених температурах утворюється тільки при одержанні лігатури нікелю з ітрієм, що, ймовірно, пов'язано з тим, що розчинність ітрію в твердому розчині незначна (0,2 ат.%) і тому починають формуватись хімічні сполуки.

В процесі випробувань при високих температурах у всіх покриттях відбувається істотне окислення нікелю, а також нітриду бору з утворенням оксидів NiO і B_2O_3 . В покритті №3 з більшим вмістом Co і Cr після випробувань при високій температурі спостерігалось виділення оксидів CoAl_2O_4 і NiCr_2O_4 , які позитивно впливають на стійкість покриттів до газової корозії

За результатами дослідження жаростійкості встановлено, що найкращі показники виявлено як раз у покритті із підвищеним вмістом Co , Cr та Al . Завдяки присутності у структурі дисперсних термостійких частинок шпінелей, оксиду Y_2O_3 та Al_2O_3 , а також інтерметалідів [17].

3.4 Висновки

1 Завдяки додаванню Y спостерігається подрібнення частинок інтерметалідних та оксидних фаз в структурі покриттів після випробувань при високій температурі, та більш рівномірний їх розподіл порівняно із базовим складом.

2 В покриттях після газополуменового напилення виявлені такі фази: Ni , BN , Ni_2Si , NiAl , а в покритті складу №3 додатково присутні фази CoCr_2 , Co_2Al_5 з підвищеним вмістом Co і Cr .

3 Після випробувань при температурі 1100°C впродовж 50 та 100 годин спостерігалися значні зміни в структурі і фазовому складі. Кількість чистих Ni і Co та нітриду бору BN значно зменшилась, що пояснюється утворенням

оксидів Y_2O_3 , NiO , B_2O_5 . Окислення Y відбувається більш прискорено ніж Ni і нітриду бору.

4 Виявлено, що інтерметаліди Ni_2Si , $NiAl$, які присутні в покриттях складів №1, 2, 3 також фази Co_2Al_5 і $CoCr_2$ у покритті №3 зберігаються й після високотемпературних випробувань. Наявність високотемпературних складних оксидів (шпінелей $CoAl_2O_4$ і $NiCr_2O_4$) а також інтерметалідів до складу яких входить Co в покритті складу №3 має забезпечувати задовільні опір високотемпературному зношуванню та корозії.

5 Приріст маси базового покриття КНА-82 та складу №1 (КНА-82 + $Ni-Y$) мають найбільший приріст маси. Найнижчий приріст маси має покриття КНА-82 + $Co-Ni-Cr-Al-Y$ що повинно позитивно впливати на підвищення жаростійкості.

6 Поява твердих інтерметалідів і поверхонь поділу між оксидами буде гальмувати переміщення дислокацій і сприятиме підвищенню опору зносу від ерозії та підвищенню жаростійкості.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

В розділі надані основні заходи з охорони праці при дослідженні фазового складу і властивостей ущільнювальних покриттів.

4.1 Аналіз потенційних небезпек

а) Небезпеки які пов'язані з невідповідністю до вимог НПАОП 0.00-7.11-12 «Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцем охорони праці працівників». А саме: формування робочих зон, що може бути пов'язано з відсутністю або непрацездатністю захисних пристроїв.

б) Можливість ураження електричним струмом при виконанні досліджень внаслідок порушень правил з електробезпеки, несправності електроспоживачів, відсутності групових або індивідуальних засобів захисту.

в) Можливість отримання механічних травм при підготовці зразків для подальшого нанесення покриттів, дослідження мікроструктури зразків з використанням абразивного інструменту.

г) Небезпеки які пов'язані з підготовкою дослідних робіт для жаростійких випробувань зокрема забезпечення дослідників спеціальними захисними засобами для захисту від підвищених температур.

д) Негативний вплив іонізуючих випромінювань при дослідженні фазового складу матеріалів, що пов'язано з наявністю жорсткого рентгенівського випромінювання.

е) Невідповідність вимогам ДБН В.2.5-28-2006 «Природне та штучне освітлення» що призводить до зниження працездатності.

є) Небезпеки які пов'язані з обробкою результатів досліджень з використанням ПК внаслідок підвищеної інтенсивності та напруженості праці.

ж) Небезпеки які пов'язані з умовами праці у надзвичайних ситуаціях.

4.2 Заходи забезпечення безпеки

а) Згідно вимог НПАОП 0.00-7.11-12 передбачено:

- На підприємстві повинні бути створені для кожного працівника здорові і безпечні умови праці.

Працівники мають бути проінформовані та проінструктовані щодо дій, необхідних у разі виникнення на підприємстві аварійних ситуацій, пов'язаних з прямою загрозою для їх життя і здоров'я, та про вжиті або такі, що мають бути вжитими, запобіжні і захисні заходи.

Роботодавець забезпечує повну і вичерпну інформацію працівників та їх уповноважених представників з питань охорони праці про можливі небезпечні ситуації, про вжиті заходи для їх запобігання або їх ліквідації та про дії працівників у аварійних ситуаціях.

Для дотримання необхідного виконання цих заходів роботодавець призначає відповідальних осіб, забезпечує їх підготовку і спорядження відповідно до небезпечності виробництва, масштабів і специфіки підприємства [Ошибка! Источник ссылки не найден.].

Виробничі приміщення повинні бути просторими і високими для раціонального планування робочих зон та місці відповідно до СНиП 2.09.04-87 «Административные и бытовые здания».

б) Для виключення можливості отримання травм від електроприладів передбачено:

- Всі співробітники лабораторії повинні пройти навчання та перевірку знань з електробезпеки.

- Усе технічне обладнання повинно бути заземлено з опором заземлюючого контуру 4 – 10 Ом (ПУЕ-2015). Обов'язковим є щоденна

перевірка щільності заземлювачів, не рідше як 2 рази на рік перевірка контактів та електричних з'єднань, ремонт обладнання проводять особи які мають кваліфікаційну групу не менше 3. Передбачається використання тільки подвійної ізоляції провідників (ПТБЕ).

- Що стосується частин які перебувають під струмом - на недоступній висоті (до 1000В – не менше 3,5 м; більше 1000В – не менше 6 м). Усі неізольовані струмопровідні лінії повинні бути надійно огорожені, відкриття можливо тільки за допомогою спеціальних пристроїв.

в) Для виключення механічних травм при підготовці зразків передбачено:

- При необхідності проведення токарної, фрезерної, шліфувальної роботи, необхідно працювати відповідно до інструкцій з експлуатації та техніки безпеки при використанні відповідного обладнання. Відносно безпеки виконавців обов'язковим є використання індивідуальних засобів захисту: окуляри (ГОСТ 12.4.013-85), спецодяг (ГОСТ 12.4.049-78) та спецвзуття (ГОСТ 28507-99).

- При установці абразивного круга необхідно між фланцями і кругом встановити прокладки з картону або другого еластичного матеріалу товщиною 0,5 – 1мм.

- Перед початком роботи круг, встановлений на станок повинен бути перевірений на ходу при робочому числі обертів.

- Роботу можна починати тільки впевнившись в тому, що круг не має биття, а биття шпінделя шліфувального станка не перевищую 0,03 мм.

- Захисний екран повинен бути заблокований з пусковим механізмом який виключає можливість пуску станка при піднятому екрані.

- На підприємствах де застосовується абразивний інструмент повинні бути інструкції:

По установці і експлуатації абразивного інструменту;

По випробуванні кругів на міцність.

- Для підтримки виробів які подають до шліфувального круга вручну, повинні застосовуватися підручники або пристосування які їх замінюють. Підручники повинні переміщатись, що дозволяє встановлювати їх встановлювати в необхідному положенні по мірі стирання круга.

- Заходи захисту при використанні абразивного інструменту: абразивні кола повинні мати штамп про випробування на експлуатаційну надійність. Кожний верстат повинен мати табличку зі значенням допустимої колової швидкості, що дає змогу використовувати тільки ті абразивні кола, допустима колова швидкість яких в межах зазначених на табличці.

г) Для запобігання негативних наслідків при проведенні випробувань на жаростійкість передбачено:

- Для запобігання теплового випромінення та термічних опіків передбачено використання індивідуальних засобів захисту, спецодягу (ГОСТ 12.4.139-84)

- Завантаження та вивантаження зразків в піч проводити тільки за допомогою спеціального інструменту.

- З огляду на високий ступінь небезпеки при використанні електричних печей опору, всі співробітники повинні пройти інструктаж з електробезпеки.

д) При дослідженні структури рентгеноструктурним методом найбільшу небезпеку представляє негативний вплив жорсткого рентгенівського випромінювання на клітинному рівні, що може призвести до зниження імунітету.

Найбезпечнішим є застосування новітнього обладнання, конструкція якого виключає більшість негативних чинників які шкідливі для людини.

Дифрактометр ДРОН-1 має потужне джерело іонізуючих випромінювань, що негативно впливає на організм людини при зовнішньому опромінюванні. В свою чергу зовнішнє опромінювання – це дія на організм іонізуючих випромінювань від зовнішніх відносно нього джерел випромінювання. Під дією іонізуючих випромінювань в організмі людини відбувається іонізація молекул і атомів тканин, порушується хімічна структура

сполук, утворюються сполуки, не властиві живій клітині, що в свою чергу призводить до її відмирання. Зміни фізичних і біологічних процесів в організмі залежно від дози опромінювання.

Для попередження шкідливої дії іонізуючих випромінювань необхідно усувати всяку можливість опромінювання дозами, які перевищують гранично допустимі. Ступінь ураження радіоактивними речовинами організму людини залежить від ряду чинників: виду випромінювань (альфа-, бета-, гамма-промені і т.д.); кількості ізотопу, його властивостей (енергії частинок в період піврозпаду та ін.); шляхів попадання в організм людини та його індивідуальної чутливості.

В разі відключення подачі охолоджувальної води, можливе загорання внаслідок високої температури в системі дифрактометра.

Шкідливий вплив рентгенівського випромінювання полягає у зміні клітинної структури внутрішніх органів людини. В якості захисту використовується наступне: захист часом, захист відстанню та використання екрануючих пристроїв які не пропускають рентгенівські промені.

Для безпечних умов праці на дифрактометрі ДРОН-1 необхідно закрити місця можливого розсіювання рентгенівських променів захисними екрануючими пристроями які містять свинець . При встановленні камер з люмінісцентними екранами для візуального спостереження за юстировкою зразка необхідно користуватись захисним склом яке містить в своєму складі свинець. Для гарантування безпеки рук оператора від опромінення при юстировці гоніометра необхідно застосовувати довгі торцеві ключі. При використанні іонізаційного методу реєстрації гоніометр під час роботи має бути закритий ширмою або іншим захисним пристроєм, що забезпечує зменшення інтенсивності розсіяного випромінювання до припустимих величин. При випадковому попаданні в сферу дії іонізуючого випромінювання необхідно негайно відключити аварійну установку від електромережі та повідомити про це відповідального за радіаційну безпеку в університеті та керівника.

4.3 Заходи забезпечення виробничої санітарії та гігієни праці

Е) Освітлення в приміщенні повинно відповідати вимогам ДБН В.2.5-28-2006 «Природне та штучне освітлення»

- Освітленість від системи загального освітлення повинна складати не менше 200 лк при розрядних лампах і 100 лк при лампах розжарювання. Створювати освітленість більше 750 лк при розрядних лампах і 300 лк при лампах накаливання дозволяється тільки за наявності обґрунтування;

- Освітленість від світильників загального освітлення в системі комбінованого підвищувати на один ступінь за шкалою освітленості.

- При суміщеному освітленні для приміщень громадських будинків з боковим освітленням при розрахунковому значенні КПО (коефіцієнт природного освітлення), яке дорівнює або менше 80 % від нормованого значення, освітленість від загального штучного освітлення слід підвищувати на один ступінь за шкалою освітленості.

Штучне освітлення може бути представлене двома системами - загальне та комбіноване. Робоче освітлення передбачають для всіх приміщень будинків, а також ділянок відкритих просторів, призначених для роботи, проходу людей та руху транспорту. Для приміщень, які мають зони з різними рівнями природного освітлення та різними режимами роботи, повинно бути створене регулювання освітленням таких зон. За необхідністю частина світильників аварійного або основного освітлення може бути використана для чергового освітлення. Нормовані характеристики освітлення в приміщеннях і зовні будинків може забезпечуватись як світильниками робочого освітлення, так і спільним з ним освітленням світильниками безпеки і (або) евакуаційного освітлення [19].

Для освітлення приміщень слід використовувати, як правило, найбільш економічні розрядні лампи. Використання ламп накаливання для загального освітлення допускається тільки при неможливості або техніко-економічної

недоцільності використання розрядних ламп. Для місцевого освітлення, крім розрядних джерел світла, рекомендовано встановлювати звичайні лампи накаливання, в тому числі галогенні. Використання ксенонових ламп у приміщеннях не дозволяється [20].

Нормою освітлення для приміщень дослідницької лабораторії є 300лк.

Розрахунок освітленості приміщення дослідницької лабораторії

1. Визначаємо сумарний світловий потік освітлювальної установки Φ_{Σ}

$$\Phi_{\Sigma} = \frac{E_n \cdot A \cdot K_z \cdot Z}{\eta}$$

де E_n – рівень нормованого загального освітлення, лк;

A – довжина приміщення, м;

B – ширина приміщення, м;

K_z – коефіцієнт запасу;

Z – коефіцієнт нерівномірності освітлення;

η – коефіцієнт використання світлового потоку.

$$\Phi_{\Sigma} = \frac{300 \cdot 8 \cdot 5 \cdot 1,1}{0,62} = 31935 \text{ лм}$$

2. Вибір світильника та відповідної лампи

Обираємо світильник типу ЛПП та лампу ЛХБ ($\Phi_{\text{л}}=2840\text{лм}$).

3. Розрахунок кількості світильників та ламп

$$N_{\text{св}} = \Phi_{\Sigma} / \Phi_{\text{л}}$$

$$N_{\text{св}} = 11,24 = 12 \text{ штук}$$

4. За умови встановлення двох ламп в один світильник отримуємо 6 світильників по 2 лампи.

5. Перевірка емпіричним методом

На рисунку 4.1 зображено схему розташування світильників

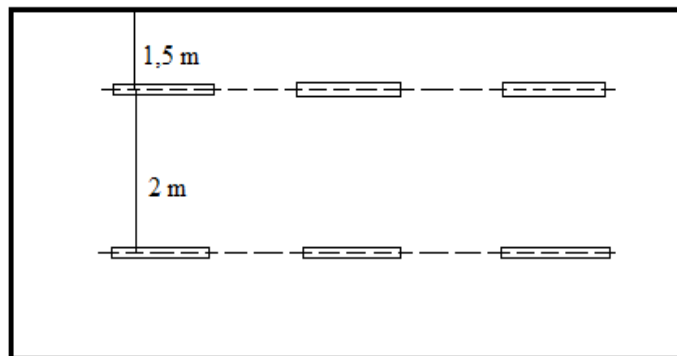


Рисунок 4.1 – Схема розташування світильників

6. Чисельна перевірка типу світильника і кількості стандартних ламп

$$E_p = (-10\% \dots +20\%) \cdot E_n$$

Розраховуємо загальну розрахункову освітленість

$$E_p = \frac{\Phi_{\lambda} \cdot N_{\lambda} \cdot \eta}{A \cdot B \cdot K_{\lambda} \cdot z}$$

$$E_p = \frac{2840 \cdot 12 \cdot 0,62}{8 \cdot 5 \cdot 1,5 \cdot 1,1} = 320 \text{ лк}$$

Загальна розрахункова освітленість становить 320 лк, що потрапляє в інтервал $E_p = 270 \leq 320 \leq 360$ лк. Отже, рівень освітленості задовільний.

є) Небезпеки які пов'язані з обробкою результатів з використанням ПК зокрема ушкодження кістково-м'язового апарату внаслідок довготривалої роботи в однотипній позі.

Відповідно до СанП 2.2.2.542-96 «гігієнічні вимоги для персональних електророзрахункових машин».

Режим праці та відпочинку повинен організовуватися від виду категорії трудової діяльності яка поділяється на 3 групи:

- Робота зі зчитувальною інформацією за попереднім запитом по сумарному числу опрацьованих знаків. Гранична кількість 60 тисяч знаків.
- Сумарна кількість набору знаків при безперервній роботі не більше 20 тисяч знаків. При роботі з запланованим відпочинком (15 хв/год) не більше 40 тисяч знаків.
- Сумарний час безпосередньої роботи з комп'ютером в режимі діалогу при безперервній роботі не більше 4 годин, а при роботі з перервами не більше 6 годин.

Заходи щодо забезпечення виробничої санітарії та гігієни праці:

- Параметри мікроклімату і чистоти повітря у приміщенні обладнаному ПК з ВДТ визначені для певної категорії фізичних осіб згідно вимог ДСН 3.3.6-042-99 «Санітарні вимоги мікроклімату виробничих приміщень».
- Захист користувачів ПК від шуму, згідно ДБН В.1.1-31:2013 «Захист територій будинків і споруд від шуму».
- Захист користувачів ПК від вібрації, згідно ДСН 3.3.6.039-99 «Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації».
- Вимоги до режиму праці й відпочинку при роботі з ПК, згідно ДСанПІН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми праці з візуальними дисплейними терміналами ЕОМ».

4.4 Заходи з пожежної безпеки та забезпечення безпеки в разі виникнення надзвичайних ситуацій

«Заходи з пожежної безпеки» розробляється відповідно до вимог НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні».

Розробку заходів з пожежної безпеки починають з аналізу речовин і матеріалів, що використовуються при роботі на об'єкті, з метою визначення класу можливої пожежі (А, В, С, D, F, E) згідно ДСТУ EN 2:2014 «Класифікація пожеж (EN 2:1992, EN 2:1992/A1:2004, IDT)» та категорії його пожежної небезпеки, відповідно до вимог ДСТУ Б В.1.1-36:2016 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою» та СНиП 2.09.02-85 «Производственные здания». Тобто указати до якої категорії виробництва з пожежної небезпеки (А, Б, В, Г, Д) належить об'єкт (дослідницька лабораторія, конструкторське бюро, дільниця, підстанція, цех, тощо).

Відповідно до категорії виробництва з пожежної небезпеки і вимог ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги», указати ступінь вогнестійкості приміщення об'єкта (дослідницької лабораторії, конструкторського бюро, дільниці, підстанції, цеху, тощо). Показати наявність засобів виявлення загорянь і пожеж згідно вимог ДБН В.2.5-56:2014:

- автоматичних сигналізаторів про пожежу;
- системи пожежної сигналізації;

З огляду на пожежну небезпеку, передбачити первинні засоби пожежогасіння (вогнегасники різних видів), відповідно до вимог «Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників», зареєстрованих в МЮ України 23.02.2018 р. за № 225/31677.

Виробничі приміщення можуть бути обладнані стаціонарними установками автоматичного пожежогасіння.

Комплекс протипожежних заходів для приміщення (лабораторії, офісу, тощо) обладнаного ПК з ВДТ розроблений згідно вимог НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні».

Виходячи з аналізу матеріалів та речовин, які використовуються при роботі у приміщенні (лабораторії, офісу, тощо) обладнаному ПК з ВДТ:

- відповідно до вимог ДСТУ Б В.1.1-36:2016 воно відноситься до категорії «Д» з пожежної небезпеки – простір у приміщенні, у якому перебувають горючі тверді речовини та матеріали.

Оскільки приміщення (лабораторії, офісу, тощо) обладнане ПК з ВДТ належить до виробництв категорії «Д» з пожежної небезпеки, тому згідно вимог ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги» воно має II ступінь вогнестійкості.

Згідно вимог ДБН В.2.5-56:2014 в приміщенні (лабораторії, офісу, тощо) обладнаному ПК з ВДТ встановлена система пожежної й охоронної сигналізації «Сигнал-ВК6». Яка забезпечує реєстрацію диму і теплових ознак пожежі і місця виникнення пожежі з точністю до місця розміщення датчика.

Оскільки приміщення (лабораторії, офісу, тощо) яке обладнане ПК з ВДТ має площу 39 м², тому відповідно до вимог п. 5 розділу VI «Вибір типу та необхідної кількості вогнегасників», «Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників», зареєстрованих в МЮ України 23.02.2018 р. за № 225/31677 для гасіння електроприладів які знаходяться під напругою, передбачені вуглекислотні вогнегасники типу ВВК-3,5 у кількості 2 штук (з розрахунку один вогнегасник с величиною заряду вогнегасної речовини 3 кг. і більше, на 20 м² площі приміщення).

Забезпечення безпекою в разі виникнення надзвичайних ситуацій

Система управління цивільного захисту в залежності від прогнозованої або реальної надзвичайної ситуації може функціонувати в наступних режимах:

- Режим повсякденного функціонування – встановлюється при нормальних виробничо-промислової, радіаційної, сейсмічної, гідрологічної, техногенної, пожежної обстановках та при відсутності епідемій.

- Режим підвищеної готовності – встановлюється у разі виникнення загрози НС (надзвичайної ситуації) для окремих територій.

- Режим НС – встановлюється на певний період часу в тимчасовому, або в повному обсязі у разі виникнення НС будь-якого характеру на окремих територіях.

- Режим надзвичайного стану – встановлюється на території усієї країни або на окремих територіях на котрих введений особливий правовий статус.

Для практичної реалізації заходів безпеки для населення яке забезпечується чинним законодавством України передбачено:

- Централізоване керівництво – централізовані органи виконавчої влади;
- Забезпечення цивільного захисту на відповідних територіях – місцеві державні адміністрації;

- На об'єктах господарювання де чисельність працюючих більше 3000 осіб створені окремі підрозділи цивільного захисту; при чисельності 200 – 3000 чоловік призначаються посадові особи; до 200 осіб залучаються позаштатні фахівці; в учбових закладах при чисельності студентів більше 500 осіб – створюються штаби цивільного захисту де працюють посадові особи.

Сили цивільного захисту:

- Оперативно-рятувальна служба – складається з органів управління центрального підпорядкування, аварійно-рятувальних підрозділів спеціального призначення.

- Аварійно-рятувальна служба – поділяється на державні, регіональні, комунальні та об'єктові. В залежності від специфіки виконуваних робіт поділяється на спеціалізовані та неспеціалізовані.

- Підрозділи цивільного захисту – формують для виконання великих обсягів робіт з ліквідації наслідків НС, а також для проведення відновлювальних робіт для яких необхідно залучення великої кількості виконавців і техніки. Поділяються на об'єктові та територіальні.

- Спеціалізовані служби цивільного захисту - об'єктові та територіальні та призначаються для проведення спеціальних робіт які потребують знання та досвіду кваліфікованих фахівців та наявність майна спеціального призначення.

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

5.1 Тенденції розвитку світового ринку технологій

Ущільнювальні покриття використовують для зменшення радіального зазору між ротором і статором, що призводить до підвищення температури газу, а отже і збільшення коефіцієнту корисної дії авіадвигуна. При цьому до них пред'являється ряд вимог, з одного боку вони повинні забезпечувати високу адгезію і ерозійну стійкість матеріалу ущільнювача з матеріалом основи в умовах підвищених температур, а з другого боку - низьку роботу зрізування, що забезпечить мінімальні зазори і дозволить суттєво зменшити зношування торцевої поверхні лопатки.

Покриття отримані з використанням спеціальної технології з варіацією шихтових матеріалів. Ущільнювальні покриття КНА-82 успішно застосовувалося в авіаційних двигунах ВАТ «Мотор Січ» з більш низькою температурою газу в турбіні, тому в шихту, що готують за серійною технологією, вносили лігатуру, що містить ітрій. Лігатура була представлена трьома складами с різною комбінацією і вмістом ітрію: №1- КНА-82 + порошок сплаву Ni-Y ; №2 - КНА-82 + чистий ітрій, №3 – КНА-82+ (Co-Ni-Cr-Al-Y)

Ущільнювальні покриття широко використовуються в світовій практиці будування двигунів і дають більше 1% приросту їх продуктивності, що в світовому масштабі означає економію близько 100 мільйонів тон палива на рік. Із всіх методів підвищення ККД двигуна, таких як підвищення температури газу, використання теплоти відхідних газів, проміжне охолодження повітря в компресорі, використання ущільнювальних покриттів є найбільш оптимальним через його порівняно простоту та технологічність.

У зв'язку з тим, що розвиток техніки поступово приводить до підвищення температури експлуатації деталей ГТД, постає необхідність в створенні нових покриттів, які б відповідали новим вимогам експлуатації,

забезпечували нормальну працездатність двигуна та сприяли підвищенню його ККД.

Розробкою ущільнювальних покриттів почали займатися ще в 50-х роках XX століття. А саме французька аерокосмічна дослідницька організація Office National d'Etudes et de Recherches Aerospatiale (ONERA) із металевих волокон товщиною 15 мкм, отримані шляхом осадження із розчинів на вуглецеві нитки нікелю, кобальту, міді та інших металів, з наступним їх подальшим пресуванням і спіканням, були отримані ущільнювальні матеріали з пористістю 60-80%.

Такі матеріали почали застосовувати в лабіринтних ущільненнях на двигунах Societe Turbomeca, а також на двигуні Larzac. В Радянському союзі розробкою ущільнювальних покриттів та методики їх нанесення займався інститут ВІАМ, випробувавши працездатність покриттів на вітчизняних двигунах.

Зараз же світовими лідерами як використання ущільнювальних покриттів, так і авіабудування є четвірка світових виробників, а саме: американський Boeing, європейський Airbus, канадський Bombardier та бразильський Embraer.

5.2 Техніко-економічні розрахунки

5.2.1. Характеристика продукції

В таблиці 5.1 наведено техніко-економічні характеристики покриття

Таблиця 5.1 – Техніко-економічні характеристики зміцнення покриття статора

Найменування виробу,	Базовий виріб	Новий виріб
1. Ущільнювальне покриття	КНА-82	КНА-82 + (Co-Ni-Cr-Al-Y)
2. Технологія нанесення	Газополуменевий метод	Газополуменевий метод
3. Програма випуску, шт	500	500

Вартість сировини та основних матеріалів розраховується на основі технічно обґрунтованих норм використання на виробництво одиниці виробу, цін відповідних видів матеріальних ресурсів. При цьому враховуються транспортно-заготівельні витрати. Сума витрат на сировину та матеріали зменшується на величину зворотних відходів, які створюються в процесі виробництва.

Вартість сировини та основних матеріалів наведена в таблиці 5.2

Таблиця 5.2 – Вартість основних матеріалів газополуменевому методі нанесення ущільнювальних покриттів

Найменування сировини та основних матеріалів	Норма викорис тання	Ціна, Грн	Вартість, грн
Порошок КНА-82+(Co-Ni-Cr-Al-Y)	7 кг	320 грн/кг	2240
Кисень	15 л	3 грн/л	45
Ацетилен	15 л	20 грн/л	300
Разом	-	-	2585

Вартість купівельних комплектуючих виробів розраховується на основі норм використання й цін, з урахуванням транспортно – заготівельних витрат.

Основна заробітна плата основних виробничих робітників на одиницю виробу розраховується на основі трудомісткості виготовлення та часових тарифних ставок.

Розрахунок основної заробітної плати на одиницю продукції наведений в таблиці 5.3

Таблиця 5.3- Заробітна плата на одиницю продукції (розцінка)

Найменування операції	Норма часу, годин	Розряд робіт	Часова тарифна ставка, грн.	Заробітна плата на одиницю продукції (розцінка), грн.
Формування стрижнів	1	V	65	65
Нанесення покриття	2	V	65	130
Усього				195

Додаткова заробітна плата виробничих робітників виплачується за кількість та якість виконаної роботи. Вона вміщує надбавки і доплати, премії за виробничі результати, оплату чергових та додаткових відпусток та інше. Додаткова заробітна плата складає 40% від основної, та розраховується за формулою

$$ЗД = ЗО \cdot \frac{K_d}{100}, \text{ грн}$$

де K_d – процент додаткової заробітної плати.

$$ЗД = 195 \cdot \frac{40}{100} = 78 \text{ грн}$$

Відрахування на соціальні заходи являють собою форму перерозподілу доходу на фінансування суспільних потреб, розраховуються згідно діючого законодавства і складають 22% від фонду оплати праці. Відрахування на соціальні заходи розраховуються за формулою

$$ВС = (ЗО + ЗД + ПП) \cdot \frac{K_{вс}}{100}, \text{ грн}$$

де ПП – премії з прибутку, грн;

$K_{вс}$ - % відрахування на соціальні заходи.

$$ВС = (195 + 78 + 50) \cdot \frac{22}{100} = 71,06 \text{ грн}$$

Загальновиробничі витрати вміщують витрати на утримання та експлуатацію обладнання, цехові витрати і послуги виробничого характеру.

Витрати на утримання та експлуатацію обладнання вміщують витрати на технічне обслуговування машин і механізмів, витрати на поточний ремонт обладнання, цехового транспорту та інструментів, знос малоцінних і швидкозношуваних приладів, заробітну плату допоміжного персоналу та інші. Цехові витрати вміщують витрати, пов'язані з поточним ремонтом та амортизацією будівель цеху, заробітну плату керівників і спеціалістів цеху, витрати на охорону праці та техніку безпеки в цеху та інші.

Загальновиробничі витрати складають в середньому 400% до основної заробітної плати та розраховуються за формулою

$$ЗВВ = ЗО \cdot \frac{\alpha}{100}, \text{ грн}$$

де α - % загально виробничих витрат.

$$ЗВВ = 195 \cdot \frac{400}{100} = 780 \text{ грн}$$

Вищенаведені затрати формують виробничу собівартість.

Адміністративні витрати вміщують затрати, пов'язані з утриманням адміністративно - управлінського персоналу підприємства, а також утриманням та експлуатацією основних засобів виробництва, охорону праці та техніку безпеки персоналу та інші. Адміністративні витрати становлять близько 200% від основної заробітної плати основних виробничих робітників та розраховуються за формулою

$$АВ = ЗО \cdot \frac{\beta}{100}, \text{ грн}$$

де β - % адміністративних витрат.

$$AB = 195 \cdot \frac{200}{100} = 390 \text{ грн}$$

Витрати на збут складаються з витрат, які пов'язані з реалізацією продукції і вміщують витрати на тару та тарні матеріали, транспортування готової продукції, рекламу, витрати на маркетингові дослідження та інші. Витрати на збут складають 2% від виробничої собівартості і розраховуються за формулою

$$BЗ = C_v \cdot \frac{\gamma}{100}, \text{ грн}$$

де C_v – собівартість виробнича, грн;

γ - % витрат на збут .

$$BЗ = 1174,06 \cdot \frac{2}{100} = 23,48 \text{ грн}$$

Прибуток складає 30% від повної собівартості і розраховується за формулою

$$П = C \cdot \frac{P}{100}, \text{ грн}$$

де P – рентабельність виробу, %.

$$П = 3342,54 \cdot \frac{30}{100} = 1002,76 \text{ грн}$$

Податок на додану вартість згідно законодавства становить 20% від оптової ціни і розраховується за формулою

$$ПДВ = Ц \cdot \frac{H_{\text{пдв}}}{100}, \text{ грн}$$

де $H_{\text{пдв}}$ – норматив податку на додану вартість, %.

$$ПДВ = 4345 \cdot \frac{20}{100} = 869 \text{ грн}$$

Ціна продажу виробу розраховується за формулою

$$Ц_{\text{пр}} = Ц + ПДВ, \text{ грн}$$

$$Ц_{\text{пр}} = 4345,3 + 869 = 5214,3 \text{ грн}$$

Калькуляція собівартості і ціни продукції наведена в таблиці 5.4

Таблиця 5.4 – Калькуляція собівартості і ціни виробу

Статті витрат	Сума для базового покриття, грн	Сума для нового покриття, грн
Сировина і основні матеріали	2095	2585
Основна заробітна плата основних виробничих робітників	195	195
Додаткова заробітна плата основних виробничих робітників	78	78
Відрахування на соціальні заходи з заробітної плати основних виробничих робітників	71,06	71,06
Загальновиробничі витрати	780	780
Собівартість виробнича	1174,06	1174,06
Адміністративні витрати	390	390

Продовження таблиці 5.4

Витрати на збут	23,48	23,48
Собівартість повна	2852,54	3342,54
Прибуток	855,76	1002,76
Ціна оптова	3708	4345
Податок на додану вартість	741,66	869
Ціна продажу	4449,96	5214,3

Економічна ефективність інноваційного проекту розраховується за показником економії експлуатаційних витрат

$$E = \frac{C_n}{K} - C_b;$$

Де C_b – собівартість базового виробу

C_n – собівартість нового виробу

K – коефіцієнт експлуатаційного ресурсу

$$E = \frac{3342,54}{1,5} - 2852,54 = 624,18 \text{ грн.}$$

В ході економічних розрахунків було визначено повну собівартість покриття статору яка становить 3342,54 грн., прибуток в розмірі 1002 грн., оптову ціну в розмірі 4345,3 грн., податок на додану вартість та ціну продажу які становлять 869 та 5214,3 грн. відповідно.

Отже, видно, що впровадження більш коштовного, але при цьому і більш довговічного матеріалу є економічно доцільним.

ВИСНОВКИ

1. Використання ущільнювальних жаростійких покриттів є досить ефективним методом підвищення ККД авіадвигуна, але через постійне підвищення робочих температур в двигуні, уже існуючі покриття не підходять для використання. Через це з'явилась необхідність розробки нових покриттів, які були б працездатними при більш високих температурах.

2. Після дослідження фазового складу всіх покриттів було виявлено, що завдяки введенню Y спостерігається подрібнення частинок інтерметалідних та оксидних фаз в структурі покриттів після випробування при високих температурах, та більш рівномірний їх розподіл порівняно із базовим складом.

3. В покриттях після газополуменового напилення виявлені такі фази: Ni, BN, Ni₂Si, NiAl, а в покритті складу №3 додатково присутні фази CoCr₂, Co₂Al₅ з підвищеним вмістом Co і Cr.

4. Після випробувань при температурі 1100°C впродовж 50 та 100 годин спостерігалися значні зміни в структурі і фазовому складі. Кількість чистих Ni і Co та нітриду бору BN значно зменшилась, що пояснюється утворенням оксидів Y₂O₃, NiO, B₂O₅. Окислення Y відбувається більш прискорено ніж Ni і нітриду бору.

5. Виявлено, що інтерметаліди Ni₂Si, NiAl, які присутні в покриттях складів №1, 2, 3 також фази Co₂Al₅ і CoCr₂ у покритті №3 зберігаються й після обробки при високій температурі. Наявність подвійних оксидів (шпінелей CoAl₂O₄ і NiCr₂O₄) а також інтерметалідів до складу яких входить Co в покритті складу №3 має забезпечувати задовільні опір зносу при підвищених температурах та корозії.

6. Приріст маси базового покриття КНА-82 та складу №1 (КНА-82 + Ni-Y) мають найбільший приріст маси. Найнижчий приріст маси має покриття КНА-82 + Co-Ni-Cr-Al-Y що повинно позитивно впливати на підвищення жаростійкості.

7. Поява твердих інтерметалідів і поверхонь поділу між оксидами буде гальмувати переміщення дислокацій і сприятиме підвищенню опору зносу від ерозії та підвищенню жаростійкості.

8. Також були досліджені правила техніки безпеки при роботі з дифрактометром, при випробуваннях на жаростійкість та виготовленні зразків. Були проаналізовані правила виробничої санітарії, правила роботи з ПК, а також правила пожежної безпеки та організацію сил цивільного захисту.

9. Після проведення економічних розрахунків було визначено економічний ефект від впровадження у виробництво нових матеріалів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. О.В. Сазонова, В.Л. Грешта. Конспект лекцій з дисципліни “Функціональне призначення матеріалів газотурбінних установок в енергетиці” для студентів спеціальності 8.090101 “Прикладне матеріалознавство” усіх форм навчання. Запоріжжя: ЗНТУ, 2003. – 64с.
2. А.Г. Братухина. Современные технологии в производстве газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 1997. –416с.
3. Геворкян А. Технология авиадвигателестроения. М.: Машиностроение, 1966. – 174с.
4. Девіс Дж. Р. Руководство по технологии термического напыления. Лондон, 2004. 456 с.
5. Барвинок, В.А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий: Монография. М.: Машиностроение, 1990. – 384 с.
6. *Срабатываемые, износостойкие и теплозащитные покрытия для деталей газового тракта турбины, компрессора и камеры сгорания ГТД.* [Текст] / Барвинок В. А. И.Л. Шитарев, В.И. Богданович и др. Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета – Вип. №3.(19). - 2009. – С. 11-28
7. Гецов Л.Б. Детали газовых турбин: Материалы и прочность. – Л.:Машиностроение, 1982. – 296с.
8. Абраимов Н.В. Высокотемпературные материалы и покрытия для газовых турбин [Текст] / Н.В. Абраимов. - М.: Машиностроение, 1993. 336 с.
9. Влияние жаростойкого покрытия на деградацию микроструктуры сплава ЖС6У.1986. [Текст] / Н. И. Афанасьев, Л.С. Бушнев, М.К. Касымов и др. // Изв. Вузов. Сер. Физика.- 1986. - №12. С.109-111.

10. В. Ю. Ольшанецкий, Л.П. Степанова, О.А.Глотка. Методичні вказівки та завдання до лабораторних і контрольних робіт та курсової роботи з дисципліни “Методи структурного аналізу матеріалів” для студентів спеціальності 132 “Матеріалознавство” денної і заочної форми навчання. Запоріжжя: ЗНТУ, 2017. - 86 с.
11. Миркин Л.И. Рентгеноструктурный контроль машиностроительных материалов. Справочник. Москва: Машиностроение, 1979. 134 с.
12. СТП 1-595-14-149. Методика испытаний уплотнительных материалов проточного тракта ГТД. – Запоріжжя: АО «Мотор Сич», 1985. С.4
13. ГОСТ 18898-89 - «Способи визначення пористості».
14. Уманский А. П. Влияние состава покрытий на основе интерметаллидов никеля на механизмы их изнашивания в условиях высокотемпературных трибоиспытаний. Москва, 2012. 127 с.
15. Кнунянц И.Л. Химическая энциклопедия. Советская энциклопедия, 1990. Т.2. 671 с.
16. Войтович Р.Ф. Окисление нитридов и карбидов. К.: Наукова думка, 1981. 192 с.
17. Степанова Л.П., Тищенко М.О. Особливості визначення фазового складу ущільнювальних покриттів, що використовуються при підвищених температурах. *Тезиси доповідей XIV міжнародної науково-технічної конференції «Нові сталі та сплави і методи їх оброблення для підвищення надійності та довговічності виробів»*. 08-10 жовтня 2019 р. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка». 2019. С.21-23
18. Степанова Л.П., Тищенко М.О. Дослідження змін у фазовому складі ущільнювальних покриттів після випробувань при температурі 1100°C. Тиждень науки-2019. Інженерно-фізичний факультет. Тези доповідей науково-практичної конференції, Запоріжжя, 15–19 квітня 2019р.

19. Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників [На заміну наказу МНС України від 26.12.2011 №1350; чинний від 2012-03-16] : НПАОП 0.00-7.11-12. – На заміну наказу МНС України від 26.12.2011 №1350; чинний від 2012-03-06. – К.: МНС України, 2012. – (Нормативно-правовий акт охорони праці)

20. Гігієнічна класифікація за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу. [На заміну ГН 3.3.5-8.6.6.1-2002; чинний від 2014-05-30]. К.: МОЗ України, 2014. 37с.

21. СТП 15-96 Пояснювальні записки до курсових та дипломних проектів (робіт). – Запоріжжя: ЗДТУ, 1996. – 36 с.

22. СТП 2070848 10-89. Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы физических величин. Запорожье: ЗМИ, 1989. – 64 с.

23. Матеріалознавство. Російсько-українсько-англійський термінологічний словник. Дяченко С.С., Гладкий І.П., Замора М.Ф., Кафтанов С.В. Київ: ІЗМН, 1997. 296 с.