

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра прикладного матеріалознавства і технології конструкційних матеріалів

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

зі спеціальності 132 «Матеріалознавство»

Тема роботи: Вибір матеріалу, маршрутної технології виготовлення і
зміцнювальної обробки лопатки газотурбінного двигуна

Виконав студент:

Колесніченко Данило Сергійович

Залікова книжка № 20510039

Підпис _____

Керівник:

д.т.н., проф. Гапонова Оксана

Петрівна

Підпис _____

Захищено з оцінкою

оцінка, дата

Секретар ЕК

Підпис _____ Марченко К. С.

Суми 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУК И УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра прикладного матеріалознавства і технології конструкційних матеріалів
Спеціальність 132 «Матеріалознавство»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Гарант Освітньої програми
«Прикладне матеріалознавство»
Харченко Н. А.

« ____ » _____ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА**

Студенту Колесніченко Данило Сергійович, група МТ-01/1

1. Тема випускної роботи: Вибір матеріалу, маршрутної технології виготовлення і зміцнювальної обробки лопатки газотурбінного двигуна»

2. Вихідні дані: креслення деталі та вимоги до неї вказані на кресленні (додаток А)

3. Перелік обов'язкового графічного матеріалу

- 1) Креслення деталі.
- 2) Графік термічної обробки деталі.

4. Етапи виконання випускної роботи:

№	Етапи і розділи проектування	Тижні			
		1	2	3	4
1	Розділ 1. Характеристика та умови експлуатації виробів, вимоги до матеріалів				
2	Розділ 2. Огляд літератури				
3	Розділ 3. Характеристика матеріалів деталі				
4	Розділ 4. Розроблення маршрутної технології виготовлення деталі				
5	Розділ 5. Розрахунково-експериментальна частина				

5. Дата видачі завдання _____ 2024 р.

Керівник

Зав. каф. ПМ і ТКМ, д.т.н., проф.

О.П. Гапонова

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра містить 63 сторінки, зокрема 10 таблиць, 22 рисунків, список із 25 використаних джерел на 3 сторінках.

Лопатки авіаційних газотурбінних двигунів є одним з найбільш напружених елементів та представляють максимальну потенційну небезпеку з точки зору вторинних руйнувань елементів конструкції. Причинами руйнування лопатки можуть бути: конструктивні, технологічні, експлуатаційні, та інші фактори. Виконання зростаючих потреб до надійності лопатки може бути досягнуто завдяки розробці оптимальної конструкції, вдосконалення технології виготовлення, та максимальному використанню можливостей матеріалу.

Мета роботи – вибір оптимальної марки сплаву й розробка перспективної маршрутної технології виготовлення та зміцнення лопатки газотурбінного двигуна.

Завдання:

- аналіз умов роботи деталі;
- аналіз літературних джерел щодо перспективних методів виготовлення та зміцнення лопаток авіаційних газотурбінних двигунів;
- вибір матеріалу деталі;
- розробка технологічного процесу виготовлення деталі;
- вибір обладнання для проведення термічної обробки;
- складання рекомендацій для впровадження технологічного процесу у виробництво.

Методи досліджень: металографічні дослідження структури сплаву, вимірювання твердості.

Ключові слова: ЛОПАТКА, ГТД, ЖАРОМІЦНІСТЬ, СПЛАВ, НІКЕЛЬ, ТВЕРДІСТЬ, ТЕМПЕРАТУРА, ТЕРМІЧНА ОБРОБКА, ГАРТУВАННЯ, СТАРІННЯ, ІОННЕ АЗОТУВАННЯ

ЗМІСТ

ВСТУП4

РОЗДІЛ 1 ХАРАКТЕРИСТИКА ТА УМОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВИРОБІВ,
ВИМОГИ ДО МАТЕРІАЛІВ5

1.1 Призначення і вимоги до газових турбін5

1.2 Причини виходу з ладу деталі «лопатка газотурбінного двигуна»12

Висновки до розділу 115

РОЗДІЛ 2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ17

2.1 Матеріали, що використовуються для виготовлення деталей турбін17

2.2 Способи зміцнення деталі «лопатка газотурбінного двигуна»20

2.2.1 Легування та термічна обробка20

2.2.2 Нанесення покриття методом катодно-іонного бомбардування22

Висновок до розділу 224

РОЗДІЛ 3 ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРІАЛІВ ДЕТАЛІ26

3.1 Вибір матеріалу деталі «лопатка газотурбінного двигуна»26

3.2 Опис впливу легуючих елементів на властивості матеріалу28

Висновки до розділу 332

РОЗДІЛ 4 РОЗРОБЛЕННЯ МАРШРУТНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ
ДЕТАЛІ33

4.1 Маршрутна технологія виготовлення і термічної обробки деталі33

4.2 Призначення режиму термічної обробки деталі36

4.3 Контроль якості лопатки газотурбінного двигуна39

4.4 Технологія іонного азотування деталей40

4.5 Формування структури під час іонного азотування нікелевого сплаву43

Висновки до розділу 446

РОЗДІЛ 5 РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА48

5.1 Вибір основного і допоміжного обладнання для деталі48

5.2 Розрахунок обладнання термічної дільниці53

Висновки до розділу 555

ВИСНОВКИ57

СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ59

ВСТУП

Конкурентоспроможність та економічна ефективність авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД) визначається рівнем їх надійності. Лопатки є одним з найбільш напружених елементів та представляють максимальну потенційну небезпеку з точки зору вторинних руйнувань елементів конструкції. Причинами руйнування лопатки можуть бути: конструктивні, технологічні, експлуатаційні, та інші фактори [1]. Заданий рівень надійності повинен забезпечуватися в продовж всього часу експлуатації двигуна. Виконання зростаючих потреб до надійності лопатки може бути досягнуто завдяки розробці оптимальної конструкції, вдосконалення технології виготовлення, та максимальному використанню максимальних можливостей матеріалу[1, 2].

Мета роботи – вибір оптимальної марки сплаву й розробка перспективної маршрутної технології виготовлення та зміцнення лопатки газотурбінного двигуна.

Завдання:

- аналіз умов роботи деталі;
- аналіз літературних джерел щодо перспективних методів виготовлення та зміцнення лопаток авіаційних газотурбінних двигунів;
- вибір матеріалу деталі;
- розробка технологічного процесу виготовлення деталі;
- вибір обладнання для проведення термічної обробки;
- складання рекомендацій для впровадження технологічного процесу у виробництво.

Методи досліджень: металографічні дослідження структури сплаву, вимірювання твердості і мікротвердості.

Об'єкт дослідження: твердість та структура матеріалу деталі лопатки після зміцнення методом гартування, старіння, та іонного азотування.

Предмет дослідження: деталь лопатка газотурбінного двигуна виготовлена зі сплаву ХН70ВМТЮ зі зміцненням методом гартування та іонного азотування.

РОЗДІЛ 1

ХАРАКТЕРИСТИКА ТА УМОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВИРОБІВ, ВИМОГИ ДО МАТЕРІАЛІВ

1.1 Призначення і вимоги до газових турбін

Газова турбіна (рис. 1.1) являє собою лопаточну машину, в якій потенційна енергія стисненого і підігрітого газу перетворюється на механічну роботу на валу турбіни за допомогою обертового ротора, забезпеченого лопатками. Це перетворення має місце в компресорі, і з цієї точки зору турбіна, як гідравлічна машина, являє собою зворотний компресор і навпаки [1].

Потужність, економічність і надійність роботи газотурбінного двигуна в значній мірі визначається досконалістю конструкції і робочого процесу турбіни. Тому до турбін ставиться ряд вимог, основними з яких є [1]:

1. Газова турбіна повинна мати велику довговічність і надійність, що забезпечується: високою якістю застосовуваних матеріалів і ретельним контролем за станом основних елементів турбіни в експлуатації; застосуванням спеціальної системи охолодження, що забезпечує відвід тепла від самих навантажених вузлів турбіни; точним виконанням вимог інструкцій з льотної та технічної експлуатації двигуна.

2. Газова турбіна повинна мати високий коефіцієнт корисної дії (ККД). Зі збільшенням ККД турбіни, збільшується робота розширення газу, яка перетворюється в механічну роботу і використовується для обертання компресора, несучого, рульового гвинтів та допоміжних агрегатів. Це призводить до зменшення питомої витрати палива і питомої маси двигуна. Збільшення ККД турбіни досягається: оптимальним вибором числа ступенів турбіни компресора і вільної турбіни; зменшенням втрат на тертя і запобіганням зриву потоку шляхом ретельної обробки профілів лопаток; зменшенням втрат на перетікання робочого газу по радіальних зазорах [1].

3. Газова турбіна повинна розвивати велику потужність при мінімальній масі і габаритах. Потужність турбін сучасного ГТД досягає 10000 л. с. (7350 кВт) і більше. Маса турбін становить 25-35% маси всього двигуна. Збільшення потужності турбін забезпечується: збільшенням температури газів перед турбіною що досягає для сучасних ГТД 1600 К; застосуванням спеціальних жароміцних і жаростійких матеріалів для виготовлення основних високонавантажених вузлів турбін; оптимізацією робочого процесу розширення газу в турбіні.

4. Газова турбіна повинна володіти хорошою технологічністю конструкції, що забезпечує простоту технічного обслуговування та експлуатації [1].

Конструктивні схеми турбін і їх основні елементи

Конструктивно турбіни розрізняються [2]:

- за напрямком течії газу: осьові і радіальні турбіни;
- за числом ступенів турбіни: одноступеневі і багатоступеневі;
- за характером перетворення енергії в робочому колесі: активні та реактивні;
- залежно від конструкції лопаток: з охолоджуваними і неохолоджуваними лопатками;
- за числом роторів: на одно, двох- трьохвальні;
- залежно від числа і розташування опор: на консольні та із задньою опорою;
- за конструкцією: з роз'ємними і нероз'ємними роторами.

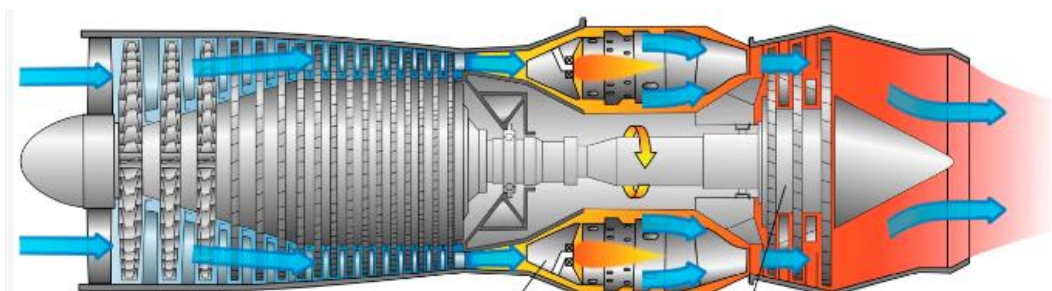


Рисунок 1.1 – Схема роботи газотурбінного двигуна [2].

У ГТД, за рідкісним винятком, застосовуються осьові турбіни. Газ в осьовій турбіні рухається по проточній частині паралельно осі обертання ротора. У радіальній турбіні газ рухається не тільки в осьовому напрямку (це необхідно для забезпечення витрати газу через турбіну), але і в радіальному напрямку - перпендикулярно осі обертання ротора турбіни [1-2].

Радіальні турбіни можуть бути, в свою чергу, доцентровими (газ рухається до центру ступені) і відцентровими (газ рухається від центру ступені).

Відцентрові турбіни зустрічаються дуже рідко, тому на практиці радіальними турбінами називають доцентрові радіальні турбіни.

Доцентрові радіальні турбіни застосовуються, в основному, для малих об'ємних витрат газу. Це турбонасоси, турбостартери, електрогенератори [2].

Робочі лопатки, кріплення та осьова фіксація

Робочі лопатки (рис. 1.2, 1.3) турбіни мають такі самі конструктивні елементи, як і лопатки компресора, замок і профільну частину (перо), але геометричні форми та пропорції їх інші [1-3].

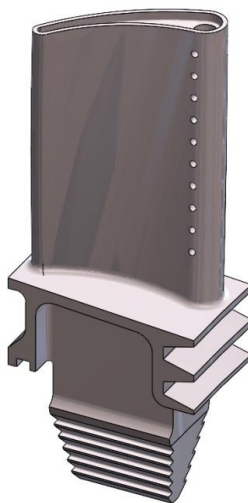


Рисунок 1.2 – Лопатка газотурбінного двигуна.

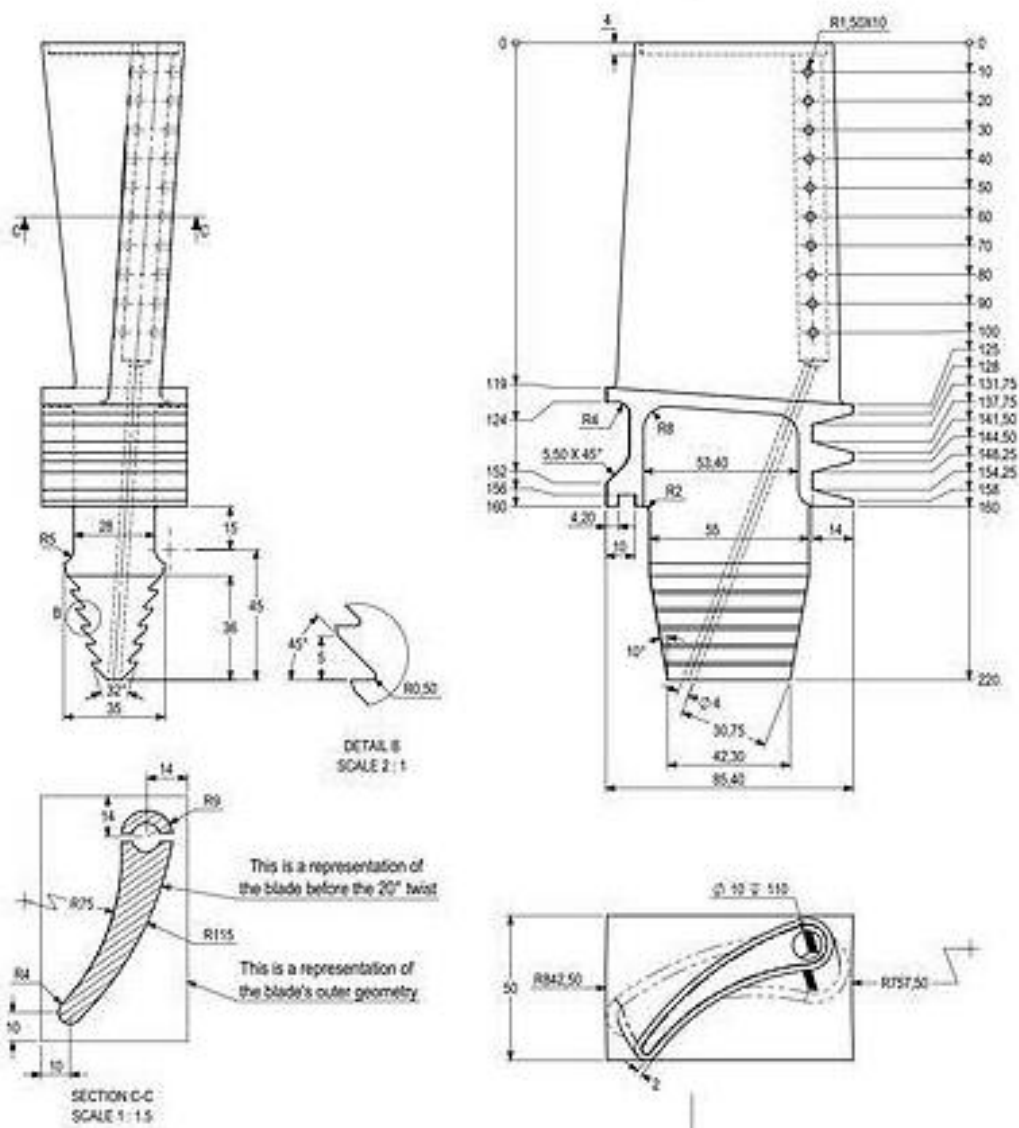


Рисунок 1.3 – Креслення лопатки газотурбінного двигуна [3]

Робочі лопатки, що охолоджуються, дозволяють збільшувати робочу температуру газу перед турбіною або застосовувати для виготовлення лопаток менш дефіцитні матеріали. Охолодження в основному здійснюється повітрям, що відбирається з компресора [3].

В даний час застосовують в основному два типи робочих лопаток, що охолоджуються: каркасні і складові. Каркасна лопатка (рис. 1.4, г, д) складається з несучого стрижня-каркаса і тонкостінної оболонки, що покриває його. Між каркасом та оболонкою є канали для проходу повітря, що охолоджує.

Складові лопатки (рис. 1.4, в, е) виконуються із двох окремих частин. Кожну частину виготовляють окремо, а потім на поверхнях, що стикуються, вифрезерують канали. Після з'єднання обох частин усередині лопатки утворюються порожнини для проходу охолоджуючого повітря [3].

Крім того, можливе охолодження робочих лопаток за допомогою захисної плівки (загороджувальне охолодження). Такий спосіб ґрунтується на принципі створення захисного шару охолоджувача між гарячим газом та поверхнею лопатки. У цьому випадку в стінках лопаток є ряд щілин, якими охолоджувач вдується в прикордонний шар газу у лопатки.

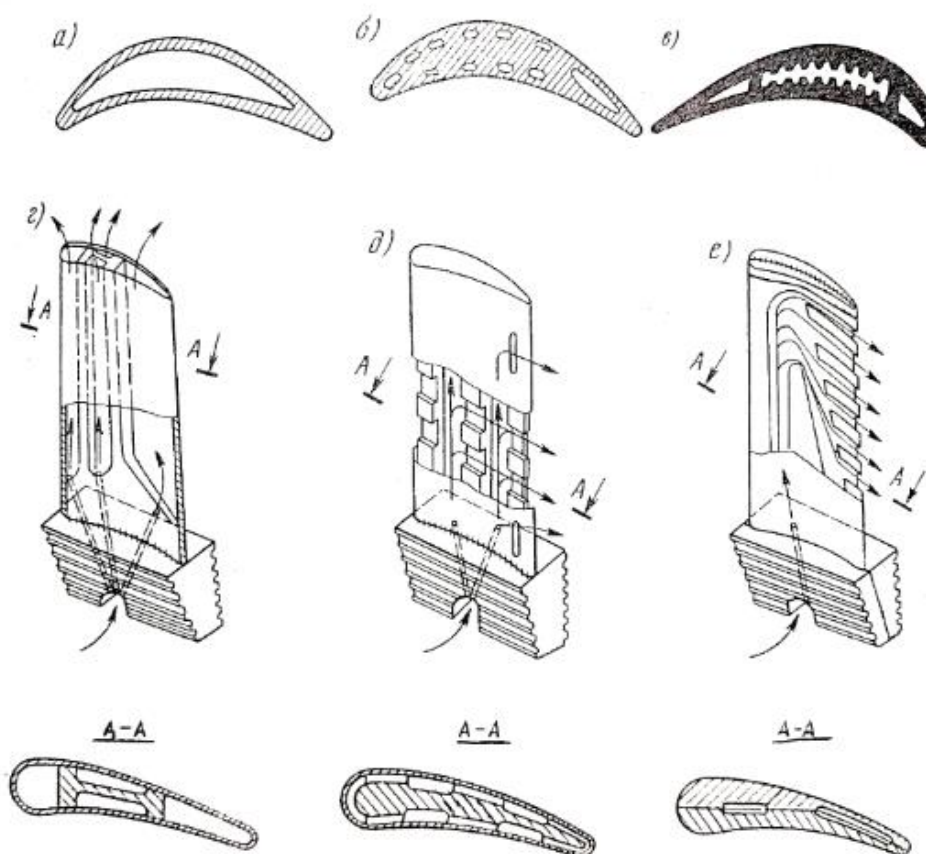


Рисунок 1.4 – Робочі лопатки, що охолоджуються (поперечні перерізи) [3]

Другим варіантом загороджувального охолодження є пористе, або, як його називають, охолодження «випотівання». Лопатку виготовляють спіканням із порошку жароміцного матеріалу таким чином, що її стінки виявляються досить пористими. Охолоджувач (вода або інша рідина з високою

температурою кипіння), що просочується (під тиском) через пори на поверхню, випаровується, відбираючи тепло від стінок. При цьому над поверхнею лопатки утворюється шар пари, що захищає стінку від гарячих газів.

Охолодження лопаток шляхом відведення тепла в обід диска є найпростішим способом, проте ефективність його залежить від типу замка кріплення лопатки та теплопровідності матеріалу лопатки [1-3].

Типи кріплення робочих лопаток

Штифтовий і циліндричний замки (рис. 1.5, а, б) лопаток ГТД в даний час не знаходять застосування, так як вони збільшують вагу конструкції і значно послаблюють обід диска, хоча сприяють хорошему відводу тепла від лопатки в диск [4].

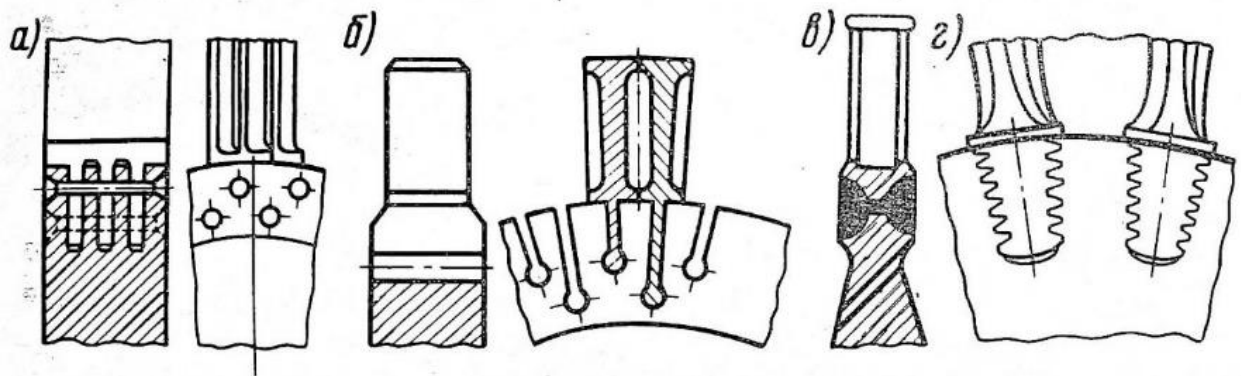


Рисунок 1.5 – Типи кріплення робочих лопаток [4]

Кріплення лопаток за допомогою зварювання (рис. 1.5, в) також не поширене, оскільки не допускає заміни лопаток в умовах експлуатації і вимагає складного обладнання для організації процесу зварювання (паяння).

На сучасних турбінах ГТД для кріплення лопаток до дисків застосовуються «ялинкові» замки (рис. 1.5, г).

Переваги застосування «ялинкових» замків:

- мала вага;
- можливість розміщення великої кількості лопаток;

- свобода температурного розширення найбільш нагрітої частини диска біля обода, завдяки чому температурні напруги в лопатці усуваються, а в обід диску зменшуються;

- вільна посадка лопатки в диску має місце лише за невеликої величини відцентрової сили. Вже на малій швидкості обертання лопатка самовстановлюється в замку так, що напруга вигину від відцентрових сил виявляється мінімальною;

- можливість гасіння коливань лопатки;
- можливість охолодження замка продуванням повітря через зазори;
- легка заміна ушкоджених лопаток.

Недоліки застосування «ялинкових» замків:

- погане відведення тепла від лопатки в диск;
- велика концентрація напруг, що може призводити до появи втомних тріщин;
- необхідний високий ступінь точності обробки.

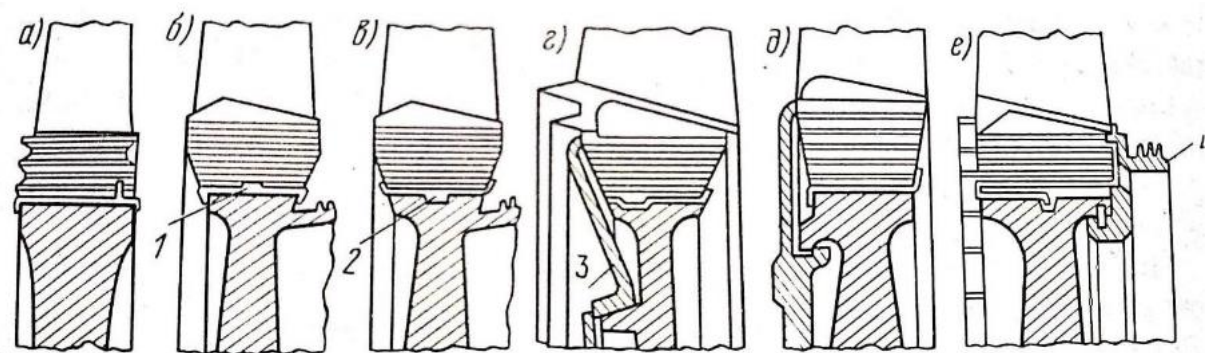


Рисунок 1.6 – Способи осьової фіксації робочих лопаток. [5]

Осьова фіксація лопаток в пазу обода здійснюється легкознімними фіксуючими пластинками з виступами 1, 2 (рис. 1.6). Як фіксуючий упор застосовують спеціальні пази в хвостовику лопатки (рис. 1.6, а, б) або диска (рис. 1.6, в, г, е), дефлектори (рис. 1.6, г, д) і кільця, що встановлюються на обід, з лабіринтною нарізкою (рис. 1.6, е). Крім упору в дефлектор або лабіринтне кільце, обов'язково використовують пластинчастий замок, вусики якого відгинають на диск або замок [5].

1.2 Причини виходу з ладу деталі «лопатка газотурбінного двигуна»

Робочі лопатки турбіни сучасних ГТД, працюючи в умовах складної спільної дії статичних, термоциклічних та динамічних навантажень, зазнають неізотермічного навантаження при досягненні екстремальних температур у циклі навантаження. Це сприяє появі в матеріалі великих зон, охоплених циклічними пластичними деформаціями, в яких вихідні деформаційні та міцнісні властивості матеріалу зазнають значних змін. Цим багато в чому пояснюються ушкодження, що переходять у тріщини та руйнування коліс та лопаток турбіни [5]. Основними причинами виходу з ладу є:

- високий рівень температурних навантажень;
- високий рівень вібраційних навантажень;
- високий рівень ізотермічних та неізотермічних навантажень;
- високий рівень динамічних навантажень;
- тривалі статичні навантаження.

Під впливом підвищених термічних напруг і підвищених температур, порівняно з номінальними значеннями, в певних умовах виникають такі термічні ушкодження: перегрів матеріалу елементів конструкції; обгорання пера лопатки; витяжка робочих лопаток турбіни; тріщини повзучості; підвищений ступінь окислення; розтріскування та прогар кромки лопаток (рис. 1.7).

Ушкодження від дії вібраційних навантажень зустрічаються на всіх типах ГТД, що експлуатуються в різних країнах світу. Ці пошкодження пов'язані з підвищеним рівнем змінної напруги, що виникають в деталях при їх коливаннях, з якістю виготовлення та режимом навантаження. Режим навантаження впливає як на межу втоми, так і на термоциклічну довговічність.

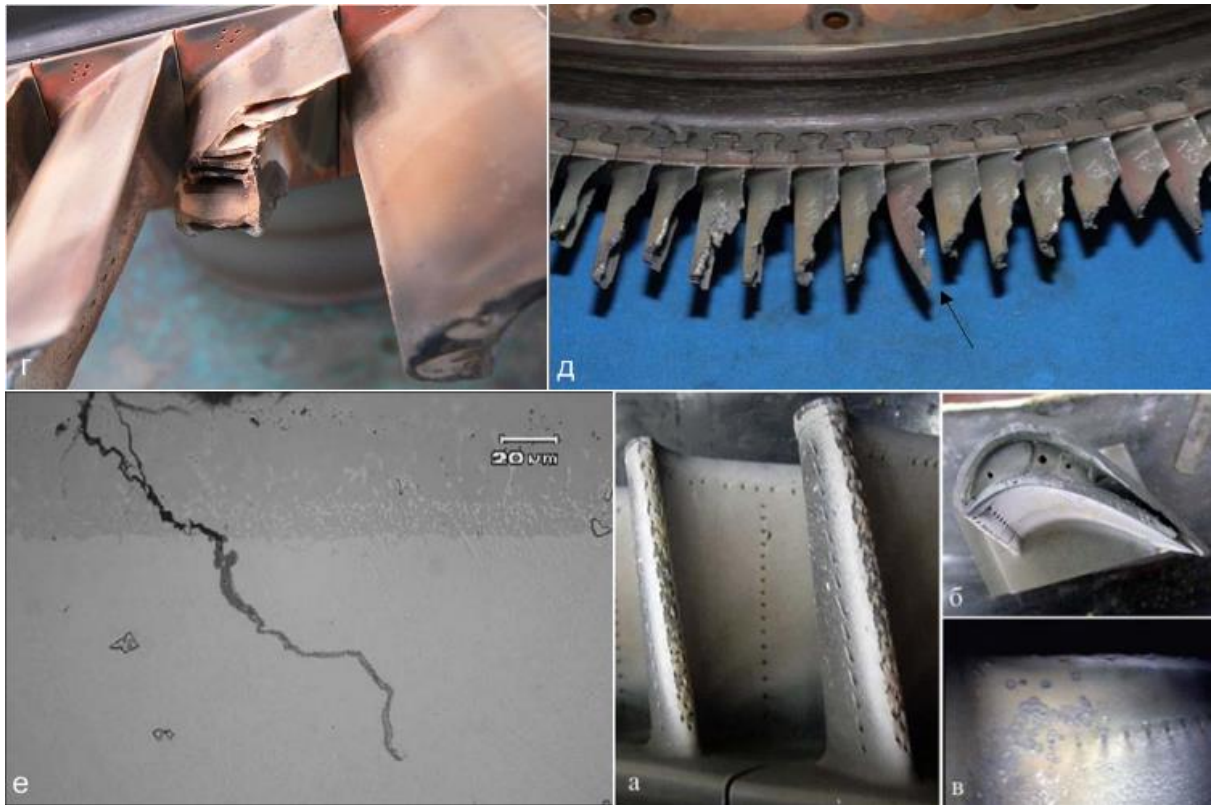


Рисунок 1.7 – Типові пошкодження елементів конструкції турбіни:

а – ерозійне зношування передніх крамок лопаток турбіни вулканічним попелом; б – наріст вулканічного попелу на торці робочої лопатки турбіни; в – утворення термальних бульбашок та закупорка отворів для проходу охолоджуючого повітря; г – обрив робочої лопатки турбіни внаслідок зростання втомної тріщини до критичного значення; д – обгоряння робочих лопаток ТНД; е – тріщина повзучості та окислення матеріалу робочої лопатки ТНД [5].

Ізотермічні та неізотермічні режими навантаження надають суттєвий вплив на виникнення ушкоджень малоциклічної втоми. Малоциклічне неізотермічне навантаження деталей гарячої частини ГТД характеризується суттєвою нестаціонарністю. Ця нестаціонарність проявляється у зміні навантаження (розмаху напруг або деформацій), різниці температур, тривалості циклу та деформаціях повзучості, що розвиваються [3-4].

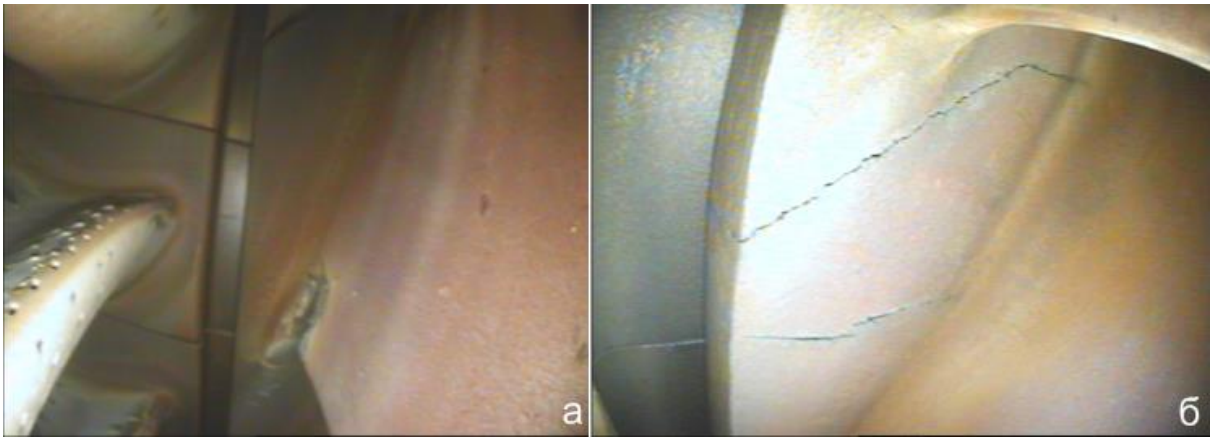


Рисунок 1.8 – Ушкодження лопаток двигуна CFM56-5B: а – руйнування захисного покриття; б – втомні тріщини на внутрішній бандажній полиці [5].

Під дією підвищених динамічних навантажень за наявності концентраторів напружень, погіршення фізико-механічних властивостей матеріалу та температурного стану виникають втомні ушкодження робочих лопаток турбіни та лопаток (рис. 1.8, б).

В результаті такого впливу виникають тріщини втоми в пазах замкової частини лопаток. Під час експлуатації за певних умов можливе розтріскування захисного покриття та створення умов для прискорення корозії (рис. 1.8, а) [5].

Під впливом тривалих статичних навантажень разом із підвищеними температурами накопичується деформація гарячих статично навантажених елементів авіадвигунів, якими можна зробити висновки про вироблення ресурсу (рис. 1.9).

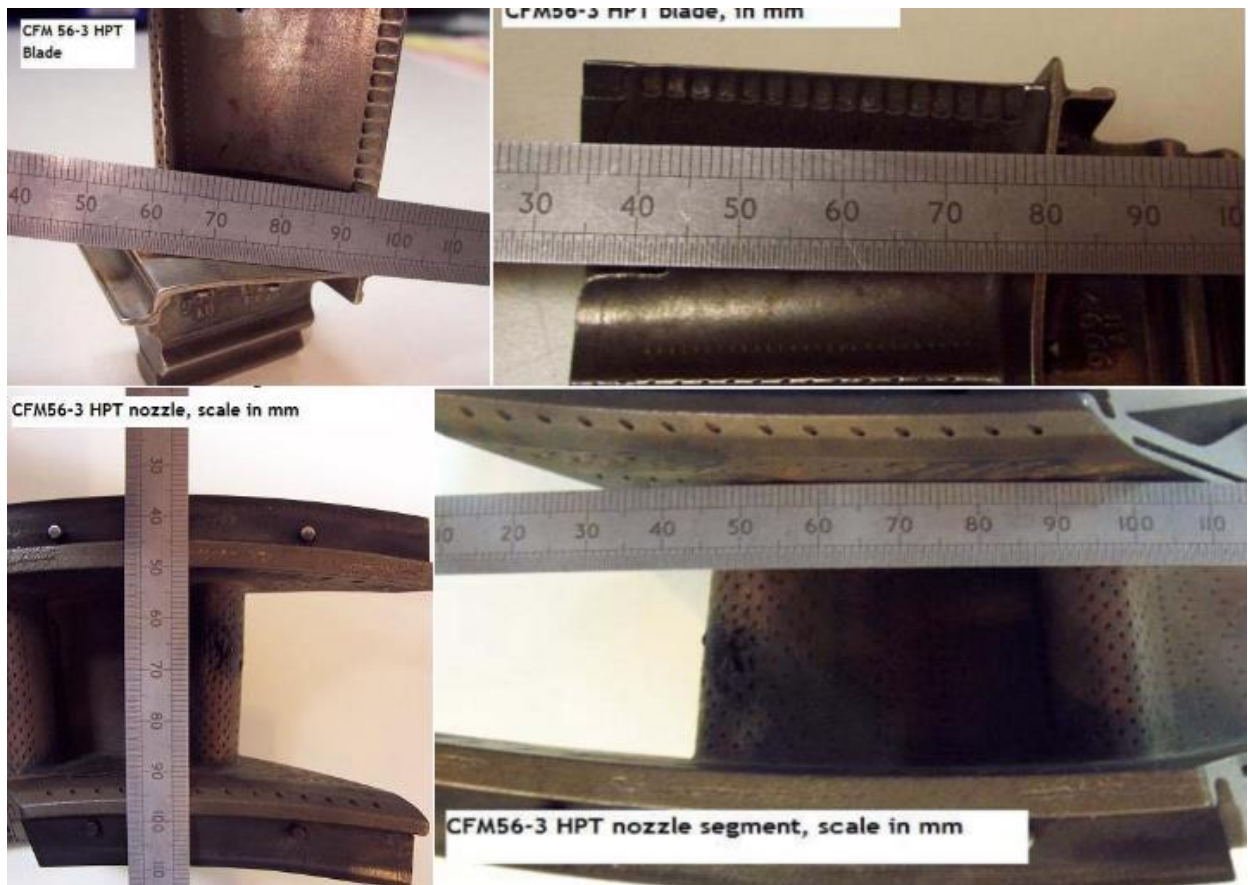


Рисунок 1.9 – Процедура контролю лопаток щодо наявності залишкової деформації [5].

Висновки до розділу 1

Конкурентоспроможність та економічна ефективність авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД) визначається рівнем їх надійності. Лопатки є одним з найбільш напружених елементів та представляють максимальну потенційну небезпеку з точки зору вторинних руйнувань елементів конструкції. Причинами руйнування лопатки можуть бути: конструктивні, технологічні, експлуатаційні, та інші фактори.

Робочі лопатки турбіни сучасних ГТД, працюючи в умовах складної спільної дії статичних, термоциклічних та динамічних навантажень, зазнають неізотермічного навантаження при досягненні екстремальних температур у циклі навантаження. Це сприяє появі в матеріалі великих зон, охоплених циклічними пластичними деформаціями, в яких вихідні деформаційні та міцнісні властивості матеріалу зазнають значних змін. Цим багато в чому

пояснюються ушкодження, що переходять у тріщини та руйнування лопаток турбіни.

Основними причинами виходу з ладу лопаток турбін є:

- високий рівень температурних навантажень;
- високий рівень вібраційних навантажень;
- високий рівень ізотермічних та неізотермічних навантажень;
- високий рівень динамічних навантажень;
- тривалі статичні навантаження.

РОЗДІЛ 2

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

2.1 Матеріали, що використовуються для виготовлення деталей турбін

В 1960-х роках у вітчизняному двигунобудівництві широке застосування для дисків турбін отримали сплави на нікелевої основі EI437БУ-ВД і EI698ВД. Ці диски вироблялися традиційним методом деформації із злитків (двигуни Д-30, Д-30КУ / КП, НК-8 та інші). Внаслідок значного (до 80%) вмісту нікелю, вартість цих сплавів досить висока [6].

За кордоном в цей період найбільшого поширення отримав сплав IN718. Максимальна температура застосування для згаданих сплавів становить 600-650°C.

Наступним поколінням вітчизняних дискових сплавів стали високоміцні нікелеві сплави EP742ID, ЭИ-617, EK79У, EK151ID, EP962.

Для вирішення даної проблеми розроблено унікальну технологію одержання заготовок для дисків методом металургії гранул (порошкової металургії). Можливість реалізації високих властивостей матеріалу в поєднанні з істотною економією матеріалу за рахунок зниження ваги заготовки (до 35% в порівнянні з вагою традиційної заготовки) привела до широкого використання гранульних (порошкових) сплавів для дисків турбін.

Успішно експлуатуються диски з EP741НП в турбінах двигунів РД-33 і ПС-90А, а зі сплаву з найбільш високими характеристиками - EP962П - виготовленні диски для експериментального двигуна АЛ-41Ф [6].

За кордоном застосовуються гранульовані сплави IN100, RENE95, MERL 76 (двигуни V2500, PW2000), які можна віднести до сплавів першого покоління.

Сплав R88DT (використовуваний в ТГД двигуна GE90) можна віднести до сплавів 2 покоління. R88DT володіє вищим (ніж у сплавів першого

покоління), опором повзучості (приблизно на 30-50 °С), більш високими короткочасними міцністю і тріщиностійкістю [6].

Для лиття соплових і робочих лопаток застосовуються нікелеві сплави ЖС-6К, ЖС-6Ф, ЖС-6УВІ, ЭИ617, ЭИ617-ВІ. Величезний прогрес в параметрах лопаток турбіни досягнутий з впровадженням в практику сплавів з направленою кристалізацією і монокристалічних сплавів. Основна ідея сплаву з направленою кристалізацією полягає у ліквідації меж між зернами, перпендикулярних напрямку відцентрових сил. Тобто виключення можливостей для повзучості і руйнування по межах зерен. Монокристалічна деталь взагалі не має меж зерен, тому вона має оптимальні характеристики міцності [4-6].

Металеві покриття (що складаються з декількох компонентів) захищають основний метал лопатки від окислення і корозії і є головним засобом забезпечення працездатності лопаток в агресивному робочому середовищі.

Теплозахисні (керамічні) покриття (ТЗП) забезпечують зменшення теплового потоку в деталі за рахунок зменшеної теплопровідності захисного шару [6].

В даний час корпуса турбін виготовляють зі сплавів ЕП609, ЕП648-ВІ, ЕІ437Б, ЕП718-ІД. Для нанесення на вставки застосовуються керамічні матеріали ущільнювачів типу NiCr + ZrO.

Забезпечення міцності та надійності, під якою розуміється запобігання руйнування конструкції або недопустимої деформації елементів конструкції, є однією з головних задач проектування, виробництва та експлуатаційного обслуговування двигуна та дисків в цілому [7].

Основною кількісною характеристикою надійності є вірогідність безвідмовної роботи двигуна в проміжку заданого ресурсу. Оскільки на стадії проектування двигуна безпосередньо визначити ці характеристики важко, для оцінки міцнісної надійності користуються коефіцієнтами запасу міцності.

Найбільш напруженими конструктивними елементами газової турбіни є диски, робочі лопатки та соплові апарати. Вони виготовляються із жароміцних хромонікелевих сплавів які наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Матеріал деталей турбін [2]

	Деталь	Матеріал
Турбіна високого тиску		
1.	Робочі лопатки	ЖС-26-НК, ЭИ-617
2.	Диск	ЭП-742-ИД
3.	Обертовий дифлектор	ЭИ-698
4.	Соплові лопатки	ЖС6К-ВИ
Турбіна низького тиску		
1.	Робочі лопатки	ЖС-26-НК, ЭИ-617
2.	Диск	ЭП-741П
3.	Вал	ЭП-741П
4.	Соплові лопатки	ЖС6К-ВИ

Умови роботи конструкційних матеріалів для виготовлення робочих лопаток характеризуються чіткими експлуатаційними факторами, до яких в першу чергу слід віднести високі рівні напруження та температур, їх циклічність та тривалість, наявність хімічних активних робочих середовищ та ін. Під час виконання польотного завдання відбувається багаторазова зміна функціональних параметрів двигуна, кожні декілька секунд відбувається еволюція літального апарату. Змінюються його швидкість число Маха (M), тангаж, рискання, висота польоту (H) та змінюється число обертів двигуна (n), витрата повітря (G_p) та палива ($G_{пал}$), температура газу після компресора (T_k) та перед турбіною (T^*r) [3-5].

Одним із завдань проектування двигуна є забезпечення гарантії того, що за час експлуатації не настане жодне з граничних станів його елементів, тобто

не порушать умови їх нормального функціонування. Вирішення цього завдання – визначення раціональних характеристик міцності при заданих показниках надійності. З теорії міцності при об'ємному напруженому стані коефіцієнт запасу міцності знаходить за умовою [6]:

$$K = \sigma_B / \sigma_{\max} > [K] \quad (2.1)$$

де σ_B – границя міцності для даного матеріалу;

σ_{\max} – максимальне напруження деталі;

$[K]$ – мінімальне допустиме значення коефіцієнта запасу міцності.

Мінімальне допустиме значення коефіцієнта запасу міцності на основі накопиченого досвіду конструкції та експлуатації дорівнює $k=1,35\dots 1,5$ [6].

При визначенні запасу міцності виникають труднощі у встановленні величини граничних напружень, з якими порівнюються розрахункові. Такі параметри міцності, як межа міцності (тривалої міцності) при фіксованій температурі або межа витривалості даного матеріалу у виробі є випадковими величинами в зв'язку з існуванням допусків на хімічний склад матеріалу і технологію його одержання, неоднорідністю температурного режиму різних плавок і зовнішніх кліматичних умов, відхиленням умов термічної обробки сортаменту й ін [6].

2.2 Способи зміцнення деталі «лопатка газотурбінного двигуна»

2.2.1 Легування та термічна обробка

Чистий нікель має низьку тривалу міцність близько 40 МПа при 800 °С за 100 годин та малу стійкість газовій корозії при високих температурах.

Необхідні властивості досягаються шляхом комплексного легування, в результаті якого утворюються багатофазні сплави, які відповідають вимогам сучасного машинобудування. Хімічні елементи, які необхідні для легування жароміцних сплавів поділяються на три групи.

До першої групи належать елементи, які зміцнюють твердий розчин на основі нікелю. Це хром, кобальт, молібден, вольфрам, ванадій, гафній. Окрім зміцнення твердого розчину хром активно захищає сплав від окислення; молібден, вольфрам, ванадій утворюють разом з хромом різні карбідні фази типу $Me_{23}C_6$, Me_6C [4].

До другої групи елементів відносяться алюміній, титан, ніобій і тантал. Ці елементи, окрім зміцнення твердого розчину, утворюють з нікелем інтерметалідну сполуку складного типу: $(Ni, Co)_3(Al, Ti, Nb, Ta)$. Окрім інтерметалідної фази, карбідоутворюючі елементи цієї групи утворюють карбіди типу MeC . Алюміній як і хром, утворює захисну оксидну плівку, яка підвищує жаростійкість сплаву [4].

До третьої групи можна віднести вуглець, бор, цирконій і елементи із групи лантаноїдів – лантан, церій, неодим і інші, які вводять в кількості десятих і сотих часток відсотка. Основною метою ведення цих елементів є утворення фаз проникнення, зміцнення границь зерен за рахунок сегрегації по границям зерен, утворення спеціальних фаз, рафінування металу від шкідливих речовин, вплив на кінетику фазових перетворень, зміну морфологій фаз, які виділяються [4].

Елементи першої групи впливають на зміцнення жароміцних сплавів через зміну електронної структури твердого розчину. Це призводить, в свою чергу, до пониження енергії дефектів упаковки та дифузійної рухомості атомів, виникнення локальних викривлень електронної структури поблизу розчинених атомів [4].

Жароміцність сплавів перебуває в прямій залежності від кількості зміцнювальної фази. Чим більша об'ємна частка цієї фази, тим вища робоча температура сплаву. В зв'язку з тим, що найбільший вплив на розчинність титану, алюмінію, танталу, ніобію виявляє хром, для збільшення їхньої кількості вміст хрому в сплавах зменшується. Це призводить до підвищення робочої температури сплавів. Композиції жароміцних сплавів уже не базуються на системі Ni-Cr, а є комплексно легованими системами, в яких

вміст хрому знаходиться на рівні двох легуючих елементів (Al, Mo, W, Ti, Nb, Co). Об'ємна частка зміцнювальної γ -фази в таких сплавах доходить до 60 %. Жароміцність загартованого сплаву та короткочасна міцність – низька.

Для отримання високої жароміцності сплав піддають старінню при температурах 700-750 °С з охолодженням на повітрі, також операцію гартування проводять шляхом охолодження металу після високотемпературного нагріву в атмосфері спокійного повітря. Максимальну міцність сплав отримує після старіння при 700 °С.

Старіння при більш низьких температурах сильно уповільнює процес розпаду твердого розчину, старіння при більш високих температурах супроводжується меншим зміцненням через збільшення розчинності титану і алюмінію і відповідного зменшення кількості виділення γ -фази. Крім цього, при високотемпературному старінні (800 – 870 °С) пришвидшується процес розвитку і росту η – фази Ni_3Ti з гексагональною ґраткою [7].

На властивості металу значно впливає температура гартування. Для температур 600-800 °С найбільша тривала міцність сплаву спостерігається при температурі гартування 1080 °С. Для більш низьких температур (500-600 °С) найкращі властивості забезпечує гартування з 1000 °С. В процесі роботи або тривалого ізотермічного старіння властивості сплаву при температурах 700-750 °С зберігаються досить довгий час на високому рівні, яке забезпечується великою кількістю γ -фази (10-12 % по масі) і малою схильністю до росту її розмірів внаслідок однотипності решіток зміцнювальної фази і твердого розчину і відносно низької дифузійної рухливості атомів алюмінію і титану.

2.2.2 Нанесення покриття методом катодно-іонного бомбардування

Для нікелевих сплавів одним із методів підвищення механічних властивостей є поверхневе зміцнення. Для сплаву ХН70ВМТЮ плазмова обробка поверхні, іонно-плазмове азотування поверхні підвищує корозійну стійкість, жароміцність в 1,5 – 2 рази, що дає змогу робити газотурбінні двигуни потужнішими. Максимальну товщину та мікротвердість мають шари,

отримані після плазмового азотування. Це пояснюється тим, що ефекти плазмової обробки досягаються як тепловою, так і механічною дією плазми.

Вакуумно-дугове нанесення покриттів (катодно-дугове осадження) – це фізичний метод нанесення покриттів (тонких плівок) в вакуумі, шляхом конденсації на підкладку (виріб, деталь) матеріалу з плазмових потоків, що генеруються на катоді-мішені в катодній плямі вакуумної дуги потужнострумowego низьковольтного розряду, що розвивається виключно в парах матеріалу електрода [8]. Метод використовується для нанесення металевих, керамічних і композитних плівок на різні вироби.

Метод також відомий під назвами: катодно-дугове осадження (англ. Arc-PVD), метод КІБ – катодно-іонного бомбардування або, по-іншому, метод конденсації речовини з плазмової фази у вакуумі з іонним бомбардуванням поверхні (останнє – оригінальна авторська назва творців методу) [8].

Метод катодно-іонного бомбардування (КІБ) заснований на генерації речовини катодною плямою вакуумної дуги потужнострумowego низьковольтного розряду, що розвивається виключно в парах матеріалу електрода. Подача в вакуумний простір реагуючих газів (азоту, метану тощо) в умовах іонного бомбардування призводить до конденсації покриття на поверхні деталі завдяки протіканню плазмохімічних реакцій.

Всі процеси випаровування, утворення сполук, іонного бомбардування і конденсації покриттів відбуваються у вакуумній камері, металевий корпус якої служить анодом. Катод виготовляють з тугоплавкого матеріалу, що підлягає випаровуванню. Особливість методу КІБ полягає у прискоренні іонів речовини шляхом створення негативного заряду (щодо корпусу камери) на деталі. Характерна особливість методу КІБ – це висока хімічна активність матеріалу що випаровується, обумовлена утворенням конденсату при електродуговому випаровуванні матеріалу катода, за рахунок якого конденсат перетворюється у високо іонізований потік низькотемпературної плазми. На рисунку 2.1 представлена установка «Булат-6Т» [9].



Рисунок 2.1 – Вакуумно-плазмова установка «Булат-6Т».

Найбільше поширення як покриття набули нітрид і карбід титану (TiN, TiC). Можна нанести будь-які інші нітриди або карбіди чи їх комплекси. Покриття наносять на спеціальних установках, що мають різну конструкцію, але однаковий принцип роботи, заснований на випаровуванні твердих речовин, для реалізації якого установки забезпечені спеціальними генераторами з холодним катодом. Випарник призначений для створення потоку плазми з матеріалу катода.

Висновок до розділу 2

Характерною особливістю жароміцних сплавів на основі нікелю є сильна хімічна взаємодія рідких компонентів, що призводить до розвитку значної ліквідації при кристалізації. Наслідком ліквідації є пониження пластичності литого металу та анізотропія механічних властивостей прокату та поковок.

Термічна обробка жароміцних сплавів на нікелевій основі складається з гартування (іноді подвійного гартування від різних температур) та старіння, яке проводять в одну або дві стадії: низько- та високотемпературні. Метою такої складної термічної обробки є забезпечення найбільш оптимального сполучення кількості і морфології зміцнюючих фаз в сплавах і, відповідно, сприятливе сполучення характеристик жароміцності і пластичності.

Для нікелевих сплавів одним із методів підвищення механічних властивостей є поверхневе зміцнення. Для сплаву ХН70ВМТЮ плазмова

обробка поверхні, іонно-плазмове азотування поверхні підвищує корозійну стійкість, жароміцність в 1,5 – 2 рази, що дає змогу робити газотурбінні двигуни потужнішими.

Найбільше поширення як покриття набули нітрид і карбід титану (TiN, TiC). Можна нанести будь-які інші нітриди або карбіди чи їх комплекси. Покриття наносять на спеціальних установках, що мають різну конструкцію, але однаковий принцип роботи, заснований на випаровуванні твердих речовин, для реалізації якої установки забезпечені спеціальними генераторами з холодним катодом.

Максимальну товщину та мікротвердість мають шари, отримані після плазмового азотування. Це пояснюється тим, що ефекти плазмової обробки досягаються як тепловою, так і механічною дією плазми.

РОЗДІЛ 3

ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРІАЛІВ ДЕТАЛІ

3.1 Вибір матеріалу деталі «лопатка газотурбінного двигуна»

Робочі лопатки сучасних газотурбін перебувають в умовах високих температур, дії відцентрових сил і газодинамічного навантаження. Тому вони все частіше виготовляються з жароміцних монокристалічних сплавів з високими показниками міцності. Крім того, сучасні лопатки мають складну систему охолоджуючих каналів і отворів для виходу охолоджуючого повітря.

В сучасних двигунах жароміцні сплави складають 40-50 % маси. Чим більша температура газу при вході в турбіну, тим більш підвищується продуктивність двигуна. З підвищенням температури газу зменшується витрати палива та повітря на одиницю потужності. Це привело до того, що є сталі та сплави, які розраховані на різні температури та різний термін дії [10].

Жароміцними називають сталі та сплави, які здатні працювати при високих температурах впродовж певного часу, при цьому витримуючи значні механічні навантаження, при достатній жаростійкості.

В основі жароміцних сплавів лежить нікель та залізо. Сплавами на основі нікелю називають матеріали, які містять не менше 55 % нікелю [10].

Надійність роботи металу оцінюється не тільки міцністю, та пластичністю, яку він зберігає до кінця терміну дії. Тому другою важливою характеристикою є запас пластичності, який визначається експериментально.

Гарними показниками для цих сплавів є δ (відносне видовження після розриву) та ψ (відносне звуження після розриву) при випробуваннях на тривалу міцність, якщо значення складають 10 та 10 % відповідно [10].

Не зважаючи на те, що жароміцні сплави не мають температурного порога крихкості, або він є нижче робочої температури, наявність різних концентраторів напружень в реальних конструкціях неодмінно ставить

питання про низьку чутливість сплавів до наявності надрізів або тріщин. З цією метою значення КСУ (ударна в'язкість) має бути якомога вищою [9].

Враховуючи умови роботи і технічні вимоги, для виготовлення деталі «лопатка газотурбінного двигуна» ми обираємо сплав ХН70ВМТЮ (ЭИ617) – це жароміцний сплав на нікелевій основі, який застосовується для виготовлення гарячекатаних прутків, робочих та соплових лопаток газових турбін [10].

Максимальна температура експлуатації, що рекомендується, протягом тривалого часу +850 °С. Температура початку інтенсивного окалиноутворення у повітряному середовищі +1000 °С. Хімічний склад та механічні властивості наведений у таблицях 3.1 – 3.3.

Таблиця 3.1

Хімічний склад сплаву ХН70ВМТЮ [10]

Хімічний елемент	Fe	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Ce	Mo	W	V	Ti	Al	B
Вміст, %	до 5	до 0,12	до 0,7	до 0,5	61,5-76,4	до 0,02	до 0,02	13-16	до 0,02	2-4	5-7	0,1-0,5	1,8-2,3	1,8-2,3	до 0,02

Таблиця 3.2

Механічні властивості сплаву ХН70ВМТЮ [10]

Сортамент	σ_b , МПа	δ , %	Ψ , %	НВ, при T= 20 °С
Пруток, T=800 °С	≥ 670	≥ 3	≥ 8	299-341

Таблиця 3.3

Механічні властивості при випробування на тривалу міцність для сплаву ХН70ВМТЮ [10]

Температура випробування, °С	Межа тривалої міцності, МПа	Тривалість випробування, г
850	200	≥ 60

3. 2 Опис впливу легуючих елементів на властивості матеріалу

Сплав ХН70ВМТЮ (ЭИ617) – це жароміцний сплав на нікелевій основі, який застосовується для виготовлення гарячекатаних прутків, робочих та соплових лопаток газових турбін [2].

Жаростійкість сталі обумовлена досить великою кількістю хрому (до 16 % мас.). Наявність вольфраму гарантує жароміцність та зменшує дифузію у сплаві. Сплав має високу стійкість до сульфідної корозії та термічну стійкість від окиснення [2].

Такий важливий легувальний елемент, як *вольфрам*, віднесений до карбідоутворювальних елементів, проте він в повній мірі може бути віднесений і до інших груп легувальних елементів, так як він не має переважного розподілу в якій-небудь одній фазі.

Механізм зміцнення заснований на внесенні спотворень в кристалічну ґратку нікелю при утворенні твердого розчину, що перешкоджають переміщенню рухомих дислокацій, а також зниженні швидкості дифузії легуючих елементів в γ -твердому розчині [11].

Твердорозчинне зміцнення зберігається аж до високих температур. Однак вище області високотемпературної повзучості, зміцнення γ' -фази залежить від способу дифузії легувального елемента в твердому розчині.

Тому легувальні елементи, повільно дифундують та уповільнюють швидкість дифузії інших елементів, є найбільш ефективними зміцнювачами. Виявлення однозначної закономірності впливу даних елементів на властивості нікелевих жароміцних сплавів ускладнене тим, що вони беруть участь відразу в декількох механізмах зміцнення: крім аустенітної матриці, вони розчиняються в інтерметалідних фазах і утворюють карбіди різного складу.

Хром в жароміцних сплавах на основі нікелю підвищує жароміцність і корозійну стійкість за рахунок утворення на поверхні сплаву стійких оксидів типу Cr_2O_3 [11].

Зниження тривалої міцності зі збільшенням концентрації Cr пов'язано з тим, що з підвищенням ступеня легування γ -твердого розчину розчинність в

ньому хрому зменшується і надлишок його може виділятися у вигляді фаз несприятливої морфології (фази типу σ -, μ -фази, карбіди типу $M_{23}C_6$ і M_6C).

Крім того, Cr зменшує кількість γ' -фази, що виділяється при розпаді пересиченого γ -твердого розчину погіршує її термостабільність і більш, ніж інші елементи, розширює інтервал кристалізації жароміцних сплавів [11,12].

Молибден розчиняється переважно в γ -твердому розчині, підвищує термостабільність γ' -фази і перешкоджає її коагуляції, сповільнюючи дифузію алюмінію в γ -твердому розчині.

Наявність в сплаві молибдену також підвищує стійкість до сульфідної корозії, проте при цьому знижується жаростійкість через утворення оксидів. Крім того, молибден знижує температуру солідусу сплаву. У зв'язку з цим в сучасних сплавах на основі нікелю молибден визнається менш ефективним зміцнювачем, ніж, наприклад, вольфрам і реній.

Вольфрам є одним з найбільш ефективних зміцнювачів нікелевих жароміцних сплавів. Він помітно підвищує температуру солідусу сплавів, в значних кількостях входить і до складу γ -твердого розчину, і до складу γ' -фази, сповільнюючи дифузійні процеси і підвищуючи таким чином термостабільність γ' -фази [12].

Основною небезпекою при надмірному легуванні вольфрамом також як і при легуванні молибденом, є схильність до виділення карбідних фаз, що призводять до знеміцнення сплавів.

При цьому вольфрам втілюється в γ' -фазу, внаслідок чого розчинення і коагуляція часток γ' -фази протікають надзвичайно повільно, відповідно і менш інтенсивно відбувається знеміцнення сплаву. Крім того, реній в значно підвищує опір окисленню і газової корозії [12].

Механізм зміцнення розчинно-дисперсійними елементами обумовлений виділенням частинок γ' -фази, що перешкоджають переміщенню рухомих дислокацій на основі когерентних до аустенітної матриці інтерметалідних сполук типу Ni_3Al , Ni_3Ti , при старінні перенасиченого γ -

твердого розчину цих елементів в нікелі. Жароміцність сплаву безпосередньо залежить від кількості γ' -фази (рисунок 3.1).

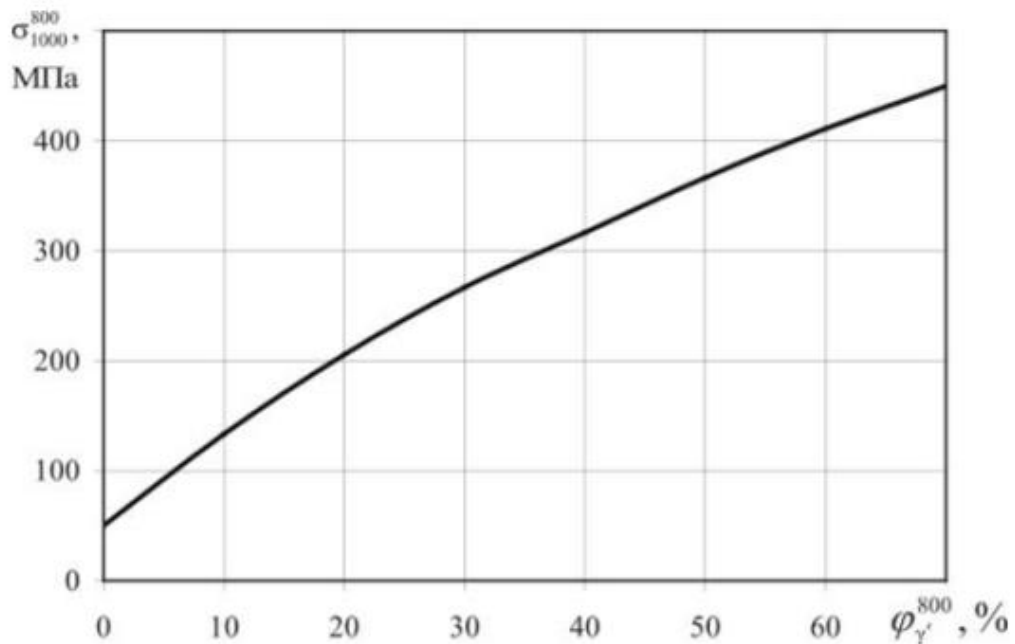


Рисунок 3.1 – Залежність 1000-годинної жароміцності нікелевих жароміцних сплавів від об'ємної частки γ' -фази при температурі 800°C [11].

Алюміній і титан є основними γ' -утворювальними елементами в нікелевих жароміцних сплавах. Вони позитивно впливають на температуру сольвусу жароміцних сплавів, підвищуючи її значення. Титан, крім того сприяє підвищенню температури солідусу сплаву.

Алюміній є також елементом, що забезпечує ефективний захист нікелевих жароміцних сплавів від високотемпературної газової корозії [11].

Збільшення довговічності сплавів при високій температурі досягається не за рахунок підвищення сумарного вмісту цих елементів.

Навпаки, їх концентрація (при загальному збільшенні кількості γ' -фази і γ' -утворювальних елементів в сплавах) має тенденцію до деякого зниження, особливо титану (рисунок 3.2).

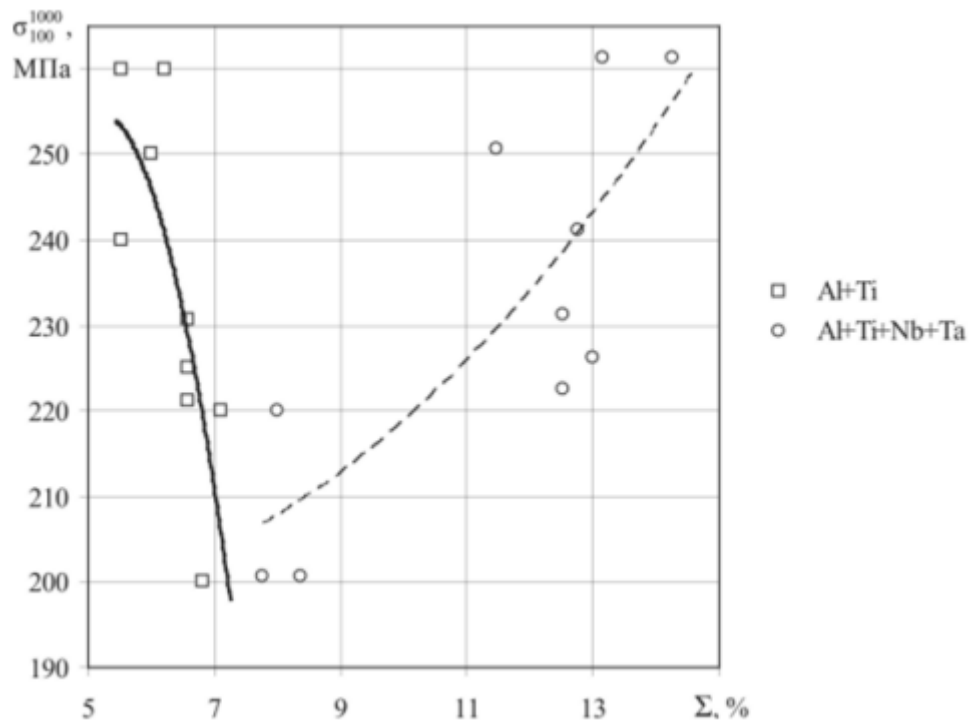


Рисунок 3.2 – Залежність жароміцності нікелевих сплавів від сумарного вмісту γ' -утворювальних легувальних елементів [11].

Наступну залежність можна пояснити тим, що при досягнутому рівні легування ефективними зміцнювачами є γ' -утворювальні елементи, такі як ніобій і тантал, оскільки вони інтенсивніше стабілізують γ' -фазу і карбіди, забезпечують більш широкі можливості для досягнення оптимального параметра невідповідності ґраток на міжфазних γ/γ' -границях, що призводить до збільшення термостабільності і жароміцних сплавів в цілому [12].

Зміцнення міжфазних та міжзерених границь в жароміцних сплавах забезпечується в першу чергу мікролегуванням. Оскільки обсяг граничних просторів малий у порівнянні з об'ємом сплаву (хоча саме вони в значній мірі визначають працездатність матеріалу), достатнім виявляється введення мікродобавок, які, розташовуючись в приграничних обсягах, вдосконалюють границі зерен і фаз, значно покращують експлуатаційні характеристики жароміцних сплавів. Для сплавів тих чи інших конкретних складів вказується різна величина ефекту мікролегування, проте у всіх випадках він є позитивним [12-14].

Висновки до розділу 3

В третьому розділі було розглянуто хімічний склад і фізико-механічні властивості обраної марки сплав ХН70ВМТЮ (ЭИ-617) для виготовлення лопатки газотурбінного двигуна.

Виходячи з умов завдання і технічних вимог виготовлення лопатки газотурбінного двигуна можна обрати жароміцний сплав на основі нікелю ХН70ВМТЮ.

Обрана марка сплаву ХН70ВМТЮ застосовується для виготовлення гарячекатаних прутків, робочих та соплових лопаток газових турбін.

Використання нікелевих сплавів в авіації мають багато переваг перед сталевими. Нікелеві сплави забезпечують високі механічні властивості, придатні для використання в зонах з високою температурою та навантаженням. Склад відповідає таким вимогам: стійкість до корозії, термостійкість і низька вартість.

Розглянутий вплив легуючих елементів на механізм зміцнення, заснований на внесенні спотворень в кристалічну ґратку нікелю при утворенні твердого розчину, що перешкоджають переміщенню рухомих дислокацій, а також зниженні швидкості дифузії легуючих елементів в γ -твердому розчині.

Пояснена важливість мікролегування при зміцненні міжфазних та міжзерених границь в жароміцних сплавах.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБЛЕННЯ МАРШРУТНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛІ

4.1 Маршрутна технологія виготовлення і термічної обробки деталі

Для отримання деталей на виробництві проєктують технологічний процес, який є поєднанням технічних, економічних і деяких організаційних завдань, що вирішуються при виготовленні тієї чи іншої деталі.

При розробці технологічного процесу потрібно враховувати всі вимоги до деталі, розробити креслення і технічні умови виготовлення, при мінімальних затратах і невисокій собівартості [13].

При розробці технологічного процесу розроблюють маршрутну технологію виготовлення деталі. Вона повинна містити в собі:

- послідовність технологічних операцій (від початку до кінця);
- обладнання для проведення вказаних операцій.

Маршрутна технологія виготовлення деталі лопатки газотурбінного двигуна зазначена у таблиці 4.1.

Етапи отримання деталі

Маршрутна технологія складається з таких етапів:

- Етап 1. Виготовлення воскової моделі лопатки, збирання «куща» та отримання оболонкової форми;
- Етап 2. Вакуумне індукційне плавлення сплаву та заливка «куща»;
- Етап 3. Відрізка лопаток від куща;
- Етап 4. Високоточне формування методом пластичної деформації;
- Етап 5. Вакумна термічна обробка;
- Етап 6. Чистова механічна обробка;
- Етап 7. Нанесення ерозійно-стійкого покриття.

Таблиця 4.1

Маршрутна технологія виготовлення лопатки газотурбінного двигуна

№ операц.	Найменування операції	№ переходу	Найменування переходів	Дільниця, основне обладнання	Допоміжне обладнання
1	2	3	4	5	6
Етап 1. Виготовлення ливарної форми					
1.	Формувальна	1	Виготовлення «восковок» лопатки	Спеціальна ливарна машина	Ливарна форма
		2	Складання ливарного «куща»	Складальна ділянка	-
		3	Отримання оболонкової форми	Спеціальне обладнання	-
Етап 2. Отримання заготовки лопатки методом високоточного лиття					
2.	Плавильно-залівальна	1	Підготовка шихти жароміцного сплаву	Підготовча ділянка	-
		2	Індукційна плавка у вакуумній печі	Спеціальна вакуумна плавильно-розливна установка	-
		3	Заливка сплаву в «кущ»	Спеціальна вакуумна плавильно-розливна установка	-
Етап 3. Обрубувальна					
3.1	Очисна	1	Очищення ливарного куща	Спеціальна вібраційна установка	-
3.2	Відрізна	1	Відрізка лопаток від «куща»	Спеціальна електроерозійна дротяна установка	Завантажувальний маніпулятор
3.3	Контроль	1	Контроль фізико-механічних властивостей, контроль геометричних параметрів	Високоточна автоматизована вимірювальна станція	Завантажувальний маніпулятор

№ операц.	Найменування операції	№ переходу	Найменування переходів	Дільниця, основне обладнання	Допоміжне обладнання
1	2	3	4	5	6
Етап 4. Високоточне формування лопатки					
4.1	Пластична деформація	1	Поліпшення геометрії лопатки шляхом обтиснення у порожнині штамп	Автоматизований гідравлічний прес	Завантажувальний маніпулятор, спеціальна прес форма
4.2	Контроль	1	Контроль фізико-механічних властивостей, контроль геометричних параметрів	Високоточна автоматизована вимірювальна станція	Завантажувальний маніпулятор
Етап 5. Термічна обробка лопаток					
5.1	Вакуумне гартування	1	Нагрівання деталей 1150° С, час витримки 3 години, охолодження масло	Спеціальна вакумна піч для гартування	Спеціальний загартований пристрій
5.2	Вакуумне старіння	1	Нагрівання деталей 800° С, час витримки 20 годин, повітря	Спеціальна вакумна піч для відпуску	Спеціальний пристрій
5.3	Контроль	1	Контроль фізико-механічних властивостей, контроль геометричних параметрів	Високоточна автоматизована вимірювальна станція	Завантажувальний маніпулятор
Етап 6. Механічна обробка					
6.1	Шліфувально-полірувальна	1	Шліфування та полірування замкової частини лопатки	Спеціальний роботизований шліфувально-полірувальний верстат	Завантажувальний маніпулятор
6.2	Шліфувально-полірувальна	1	Шліфування та полірування проточної частини лопатки	Спеціальний роботизований шліфувально-полірувальний верстат	Завантажувальний маніпулятор
6.3	Свердлильна	1	Свердління отворів	Спеціальний роботизований	Завантажувальний маніпулятор

№ операц.	Найменування операції	№ переходу	Найменування переходів	Дільниця, основне обладнання	Допоміжне обладнання
1	2	3	4	5	6
				свердильний верстат	
6.4	Заточувально-полірувальна	1	Шліфування та полірування робочої кромки лопатки	Спеціальний роботизований шліфувально-полірувальний верстат	Завантажувальний маніпулятор
6.5	Контроль	1	Контроль геометричних параметрів	Високоточна автоматизована вимірювальна станція	Завантажувальний маніпулятор
Етап 7. Нанесення ерозійно-стійкого покриття					
7.1	Підготовча	1	Очищення поверхні лопаток	Спеціальна установка	Завантажувальний маніпулятор
7.2	Іонно-плазмове зміцнення лопатки	1	Іонно-плазмове азотування, 550° С	Спеціальна вакуумна установка	Завантажувальний маніпулятор
7.3	Контроль та маркування лопатки	1	Контроль фізико-механічних властивостей, контроль геометричних параметрів, маркування лазерне	Високоточна автоматизована вимірювальна станція	Завантажувальний маніпулятор

4.2 Призначення режиму термічної обробки деталі

Якість, експлуатаційна надійність промислових виробів – машин, механізмів, приладів та ін. – знаходиться в безпосередній залежності від відповідних властивостей їх елементів – деталей, з'єднань і вузлів.

Конструкційні властивості останніх пов'язані, в свою чергу, з властивостями матеріалу [14].

Для сучасного машинобудування та інших галузей металообробки характерні високі вимоги до властивостей матеріалів, обумовлені зростаючою інтенсивністю навантаження машин при одночасній тенденції зменшення маси. Цим високим вимогам не можуть відповідати незміцнені термічною обробкою матеріали [14].

Головна мета термічної обробки виробів (заготовок, деталей, вузлів), що надходить в термічний цех або дільницю полягає в отриманні необхідних властивостей матеріалів.

Якість термічної обробки визначають наступні основні критерії:

- забезпечення необхідних властивостей матеріалів;
- зведення до мінімуму побічних явищ – зміна інших параметрів деталей і виробів;
- забезпечення високих техніко-економічних показників термічної обробки.

Пропонований варіант термічної обробки деталі зі сплаву ХН70ВМТЮ складається з наступних операцій:

1. Гартування при температурі 1100-1150 °С, витримка 3 години, охолодження – масло індустриальне. Структура – багатокомпонентний твердий розчин на основі нікелю, зміцнений дисперсними частинками інтерметалідної фази на основі $Ni_3(Al, Ti)$. Твердість 33-35 HRC.

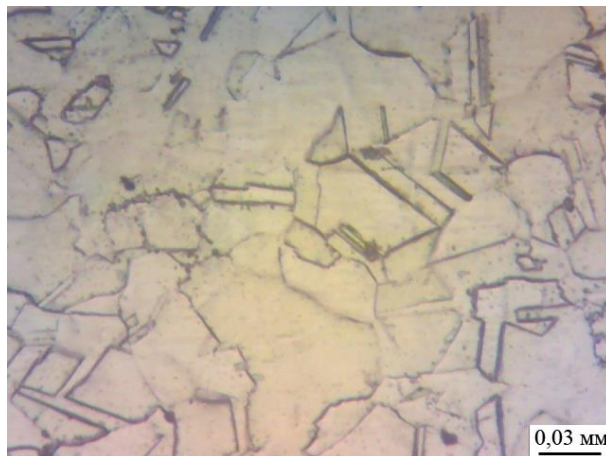


Рисунок 4.1 – Структура сплаву ХН70ВМТЮ після гартування.

2. Старіння при температурі 800-850 °С, витримка - 20 год., охолодження – повітря. В результаті старіння всередині кристалічної структури проходить розпад пересиченого твердого розчину, що підвищує міцність сплаву.

Твердість сплаву ХН70ВМТЮ після гартування + старіння становить 33-35 HRC.

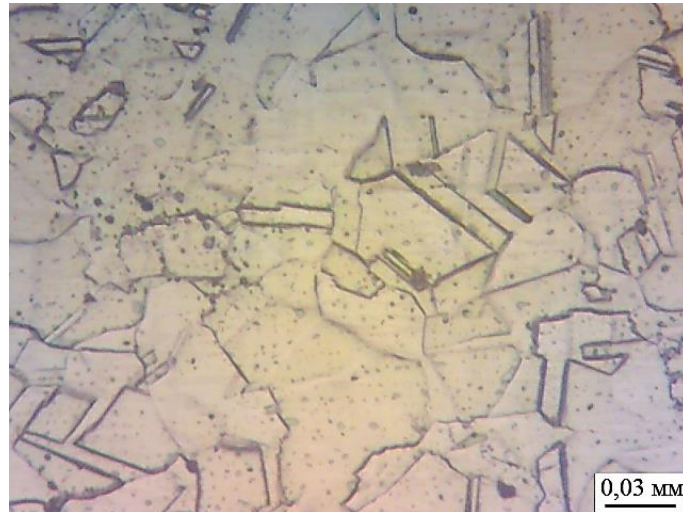


Рисунок 4.2 – Структура сплаву ХН70ВМТЮ після гартування і старіння

3. Іонно-плазмове азотування лопатки газотурбінного двигуна при температурі 550 °С впродовж 30 секунд, товщина шару 7,5-8 мкм, твердість азотованого шару 68-70 HRC (HV 1100-1000).

Не зважаючи на те, що мікроструктура поверхневої зони сплаву після іонного азотування наближена до загартованої, тобто має в своєму складі значно менше зміцнюючих фаз, її мікротвердість майже в 2 рази вища. Це можна пояснити саме утворенням твердого розчину азоту та кисню в нікелі та впливом дії плазми.

Графік режиму термічної обробки лопатки газотурбінного двигуна зі сплаву ХН70ВМТЮ представлений на рисунку 4.3.

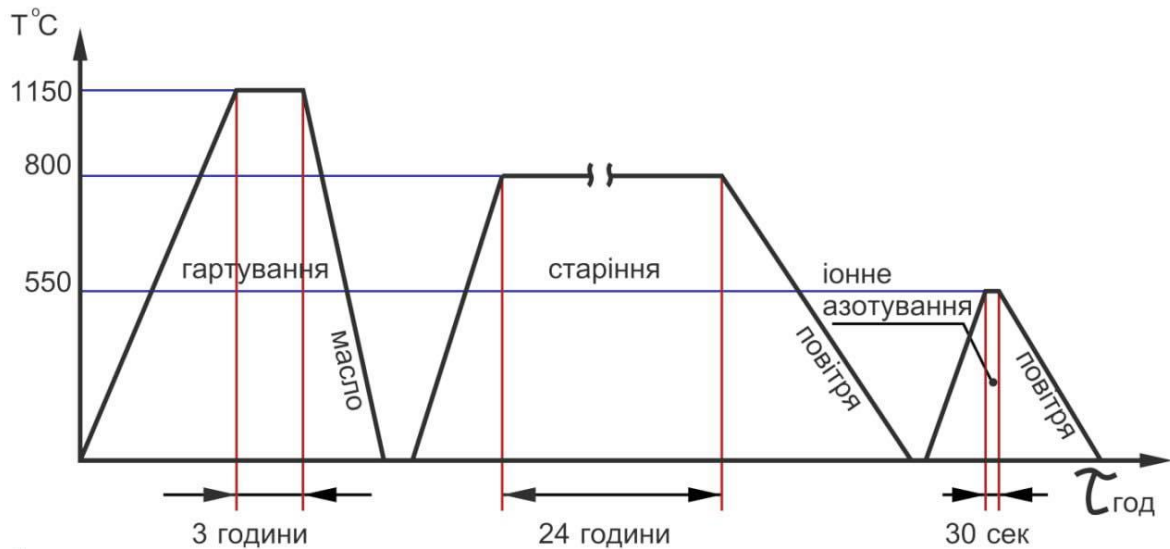


Рисунок 4.3 – Графік режиму термічної обробки лопатки газотурбінного двигуна

4.3 Контроль якості лопатки газотурбінного двигуна

Якість обробки лопатки газотурбінного двигуна багаторазово контролюється. Проміжний контроль запобігає потраплянню бракованих деталей на наступні операції обробки і допомагає керувати процесом виготовлення лопаток. Контроль лопатки газотурбінного двигуна є трудомісткою роботою, тому що у лопатки газотурбінного двигуна в цілому контролюється близько 10 різних показників якості і має поверхні з високою точністю розмірів, форми і взаємного розташування [14].

Тому контроль якості лопатки газотурбінного двигуна повинен виконуватися із застосуванням автоматичних пристроїв. В якості таких пристроїв можуть бути індикаторні з налаштуванням для одночасного вимірювання різних розмірів і відхилень, а також пневматичні, електроконтактні і електронні пристрої [14].

Високоточний автоматизований вимір та контроль геометричних та фізичних параметрів деталі проводять з використанням лазерних, оптичних та тактильних технологій.

4.4 Технологія іонного азотування деталей

Згідно з технологічним процесом роботу установки «Булат-6Т» можна розділити на три режими: а) прогрівання виробів; б) очищення; в) напилення.

На першій стадії йде прогрівання виробу і камери до робочої температури. Режим прогрівання призначений для запобігання конденсації і видалення пари води з поверхні стінок камери, а також їх очищення у процесі відкачування.

Прогрівання здійснюється гарячою водою, циркулюючою по трубах, приварених до стінок камери. Вода нагрівається індукційним нагрівачем, що є трансформатором, короткозамкнена вторинна обмотка якого виконана з трубки з неіржавіючої сталі. Вода, проходячи по витках короткозамкненої обмотки, нагрівається до температури 80 °С і надходить до системи прогрівання камери [16].

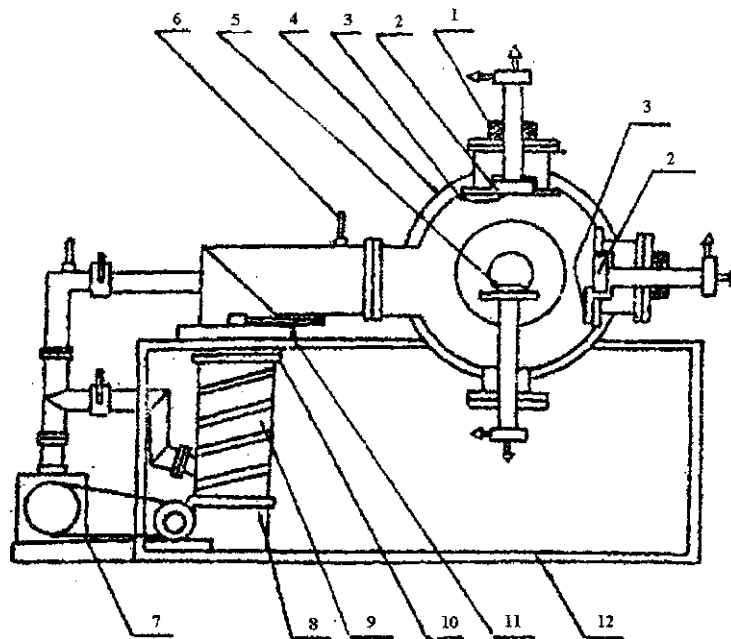


Рисунок 4.4 – Схема вакуумно-плазмової установки для нанесення покриттів «Булат-6Т»: 1 – утримувач; 2 – катод; 3 – запалювальний електрод; 4 – камера-анод; 5 – підкладка; 6 – манометричні датчики; 7 – форвакуумний насос; 8 – нагрівач; 9 – високо вакуумний насос; 10 – водяна пастка; 11 – азотна пастка; 12 – рама.

Основними вузлами установки, схема якої наведена далі (рис. 4.4), камера-анод, підкладка, запалювальний електрод, система для напуску легуючого газу (на схемі не показана). Камера відкачується вакуумною системою, що містить форвакуумний і високовакуумний насоси, водяну та азотну пастки, нагрівач, манометричні датчики. Установка забезпечена системою водяного охолодження. «Булат-6Т» має три катоди, причому подовжні осі двох з них у горизонтальній площині установки, а вісь третього – вертикально (на схемі показано два катоди – вертикальний і горизонтальний).

На другій стадії здійснюють іонне травлення поверхні (режим очищення), що підлягає покриттю. Для цього її бомбардують іонами катодів, що розпилюються, прискореними до енергії 1-2 кеВ.

Реалізується це таким чином: до підкладки прикладають високий негативний потенціал, а за допомогою запалювального електрода між катодом і камерою збуджують дугу.

Іони матеріалу катода, що утворюються при дуговому розряді, прискорюють високим негативним потенціалом у напрямі підкладки, бомбардують її і таким чином очищають поверхню від забруднень, окисних плівок і частково розпилюють її.

Процес регулюється як за енергією підлітаючих частинок (змінюючи величини прискорювального потенціалу), так і за інтенсивністю бомбардуючого пучка (струмом дуги) [16].

У режимі іонного травлення (бомбардування) електрична схема установки забезпечує збудження і стабільне горіння дуги, стабілізацію катодної плями на робочій поверхні катода, подачу високого негативного потенціалу на підкладку.

У процесі очищення необхідно повертати вироби для забезпечення рівномірного очищення всієї поверхні, після закінчення процесу вимикається високовольтний випрямляч [17].

Технологічний процес очищення виробу проводиться при тиску у робочому обсязі $3 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-3}$ мм. рт. ст.

Третя стадія – це режим напилення – процес конденсації покриття. Відрізняється він від першої стадії тим, що на підкладку подається низький негативний потенціал (до 200 В).

Прискорювальні іони набувають тепер дуже помірної кінетичної енергії, якої не вистачає для руйнування поверхні мішені-підкладки, але виявляється достатньо для збудження атомних зв'язків поверхні, що забезпечує хорошу адгезію прилеглих до неї частинок.

На третій стадії процесу в робочу камеру установки з певною швидкістю натікання подається реакційний газ (отримання нітридних покриттів – азот), який іонізується і вступає в плазмохімічну реакцію з металевими іонами електрода, утворюючи на поверхні підкладки (деталі) тугоплавке покриття, основні фізико-механічні властивості якого визначаються хімічним складом катода і реакційного газу, температурою підкладки і меншою мірою – енергією і щільністю іонного потоку [17].

Для забезпечення надійного адгезійного зв'язку між покриттям і підкладкою (зміцнюваною деталлю) остання перед установкою у робочу камеру повинна бути ретельно знежирена, для чого, окрім механічного очищення, використовують промивання в авіаційному бензині, хімічному ацетоні та етиловому спирті.

Крім того, при нанесенні покриття необхідно підтримувати строго певний температурний режим підкладки, який контролюється за допомогою інфрачервоного пірометра.

Встановлено, що при нанесенні покриттів оптимальна температура підкладки знаходиться в інтервалі 400-650 °С (в залежності від матеріалу). Товщина покриттів задається часом осадження, який становить від 20 до 60 секунд [16].

У режимі напилення схема повинна забезпечити збудження і стабільне горіння електричної дуги між катодом і анодом; забезпечити рівномірність покриття по всій поверхні; високі фізико-механічні властивості покриття [19].

Вакуум в установці повинен підтримуватися під час всього

технологічного процесу $1 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-3}$ мм. рт. ст.

Перед нанесенням покриття методом КІБ проводилася стандартна термообробка: гартування і старіння.

Таблиця 4.2

Розподіл мікротвердості після іонного азотування

Номер заміру	Відстань від поверхні, мкм	Мікротвердість H_{μ} , кгс/мм ²	Тип поверхні
1	3	1100	шар TiN
2	5	1100	
3	8	1000	
4	100	350	Основний метал
5	140	350	
6	240	350	

4.5 Формування структури під час іонного азотування нікелевого сплаву

З результатів експерименту видно, що в досліджуваному сплаві на основі нікелю можна створити тонкий азотований шар шляхом іонного азотування. Азотовані шари, отримані при різних температурах і протягом різного часу, мають подібну морфологію (рис. 4.5).

Відповідно до теорії твердої дифузії [20], зростання азотованого шару має збільшуватися з температурою, а при постійній температурі має бути лінійна залежність від часу. Однак при плазмовому азотуванні було виявлено, що найтовщий азотований шар отримано при 450 °С, вище якої товщина шару зменшується (рис. 4.6). Більш тонкий шар, отриманий при більш високих температурах, був, очевидно, зумовлений швидким переходом від режиму швидкого росту до режиму повільного росту (рис. 4.6) [21].

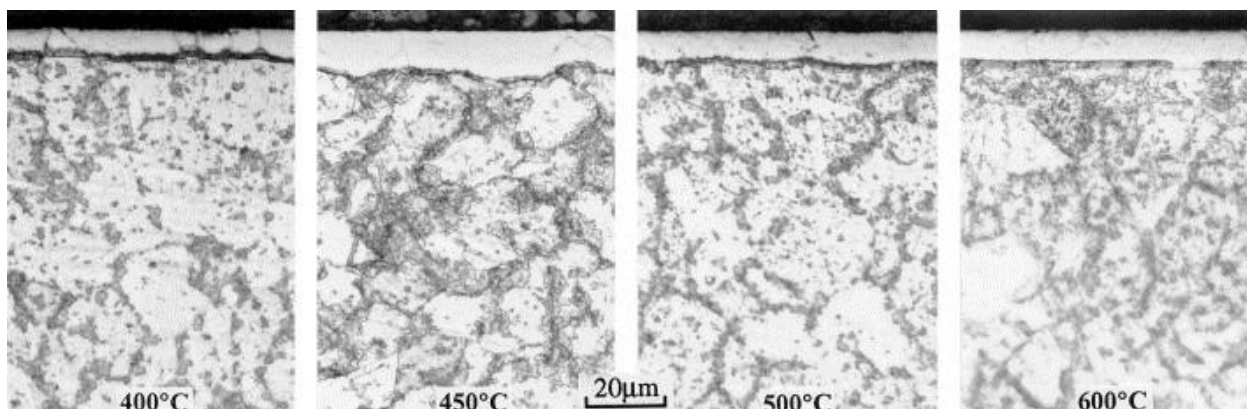


Рисунок 4.5 – Оптичні мікрофотографії, що демонструють морфологію азотованих шарів на нікелевому сплаві при різних температурах протягом 12 годин.

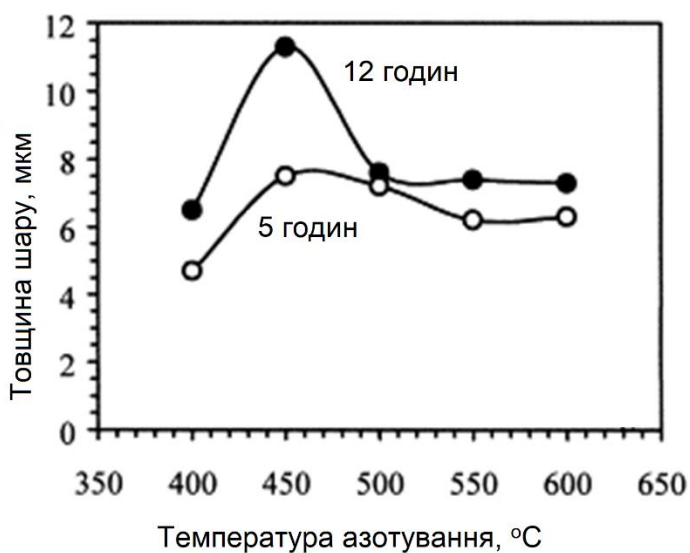


Рисунок 4.6 – Товщина азотованого шару як функція температури обробки, що демонструє відхилення в кінетиці азотування.

Для подальшого дослідження природи азотованого шару були підготовлені та досліджені конічні зрізи (під кутом 45 град). На рисунку 4.7 показано такі розрізи зразків, азотованих при 450 і 600 °C протягом 12 год. Можна чітко побачити, що поверх «білого» азотованого шару існує «темна» зовнішня плівка. Товщина плівки зростала зі збільшенням температури та часу.

Під час металографічних досліджень поперечного перерізу зразка, азотованого при 600 °C протягом 24 годин також можна спостерігати «темну» зовнішню плівку. Зовнішня плівка має конічну топографію, подібну до тієї, що

спостерігається в низьколегованих сталях, азотованих плазмою при відносно високих температурах і протягом тривалого часу [22].

На рис. 4.8 зображено мікрофотографію, зроблену скануючим електронним мікроскопом, яка демонструє морфологію азотованої поверхні (при 600 °С), яка щільно заповнена конусами різного розміру. Конічний рельєф також спостерігав Різк [23] на плазмово азотованому Inconel 625. Таке явище утворення конуса виникає внаслідок ефектів розпилення та повторного осадження тліючого розряду.

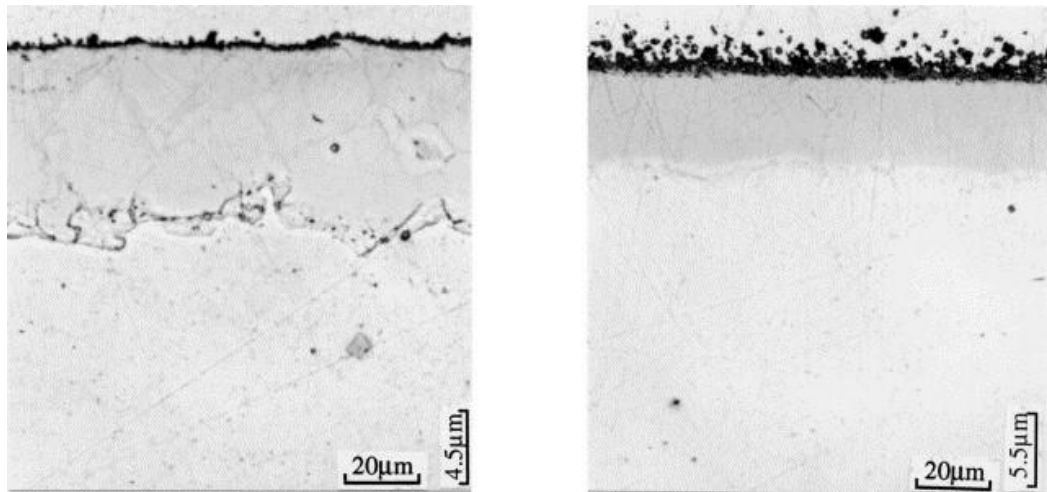


Рисунок 4.7 – Конічні зрізи шліфа, що показують «темну» поверхневу плівку, утворену на зразку, азотованого при (a) 450 °С і (b) 600 °С протягом 12 годин.



Рисунок 4.8 – SEM мікрофотографії поверхні, азотованої при 600 °С протягом 12 годин, що демонструє особливість будови поверхні.

Висновки до розділу 4

У розділі представлена сучасна технологія виготовлення лопаток газотурбінного двигуна, розроблена для умов масового виробництва. В даний час у газотурбінному двигуні використовують до 2000 штук лопаток. Економічно вигідне лише масове виробництво лопаток.

Основне завдання виробництва виготовити весь асортимент лопаток із постійними: вагою, геометричною точністю та фізико-механічними властивостями.

Для досягнення цього завдання на виробництві використовують передові технології:

- високоточне вакуумне лиття жароміцного сплаву з спрямованою кристалізацією (отримання монокристалу) по моделі, що виплавляється;
- високоточне формування методом пластичної деформації;
- вакуумна термічна обробка деталі лопатка;
- механічне роботизоване шліфування та полірування на 5-ти координатних спеціалізованих верстатах з корекцією та контролем геометрії поверхні лопатки в процесі обробки.
- нанесення стійких покриттів: іонно-плазмове магнетронне напилення.
- високоточний автоматизований вимір та контроль геометричних та фізичних параметрів деталі з використанням лазерних, оптичних та тактильних технологій.

Запропонований варіант термічної обробки деталі «лопатка газотурбінного двигуна» зі сплаву ХН70ВМТЮ складається з наступних операцій:

1. Гартування при температурі 1100-1150 °С, витримка 3 години, охолодження – масло індустріальне. Структура - багатокомпонентний твердий розчин на основі нікеля, зміцнений дисперсними частинками інтерметалідної фази на основі $Ni_3(Al, Ti)$.

2. Старіння при температурі 800-850 °С, витримка - 20 год., охолодження – повітря. В результаті старіння всередині кристалічної структури проходить розпад пересиченого твердого розчину, що підвищує міцність металу.

Твердість сплаву ХН70ВМТЮ після гартування + старіння становить 33-35 HRC.

3. Іонно-плазмове азотування лопатки газотурбінного двигуна при температурі 550 °С впродовж 30 секунд, товщина шару 7,5-8 мкм, твердість азотованого шару 68-70 HRC (HV 1100-1000).

Для дослідження природи азотованого шару були підготовлені та досліджені конічні зрізи (під кутом 45 град), азотування проводили при температурах 450 °С та 600 °С. Було виявлено, що найтовщий азотований шар отримано при 450 °С, вище цієї температури товщина шару зменшується. Під час металографічних досліджень поперечного перерізу зразка, азотованого при 600 °С можна спостерігати «темну» зовнішню плівку.

З результатів експерименту видно, що в досліджуваному сплаві на основі нікелю можна створити тонкий азотований шар шляхом іонного азотування. Азотовані шари, отримані при різних температурах і протягом різного часу, мають подібну морфологію.

Не зважаючи на те, що мікроструктура поверхневої зони сплаву після іонного азотування наближена до загартованої, тобто має в своєму складі значно менше зміцнюючих фаз, її мікротвердість майже в 2 рази вища. Це можна пояснити саме утворенням твердого розчину азоту та кисню в нікелі та впливом дії плазми.

РОЗДІЛ 5

РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

5.1 Вибір основного і допоміжного обладнання для деталі

Економічна доцільність впровадження нового технологічного процесу пов'язана з правильним вибором обладнання та енергії для нагріву внаслідок значної питомої ваги амортизації та вартості палива в структурі собівартості термічної обробки.

Вибір обладнання повинен орієнтуватися на використання найбільш потужних печей і їх максимальне завантаження, щоб виключити роботу печей в холосту [24].

При правильному виборі обладнання зменшується як собівартість термічної обробки, так і питомі капітальні вкладення, що веде до мінімізації витрат.

Для проведення гартування деталі «лопатка» обираємо печі типу А/ВОК1300-1288 - двокамерна вакуумна піч для гартування в маслі (табл. 5.1-5.2).

Таблиця 5.1

Робочі характеристики А/ВОК1300-1288

Електроживлення	3 фази 380В ($\pm 10\%$); 50Гц
Охолоджувальна	Тиск на вході 0,05 ~ 0,2 МПа
	Температура $\leq 35^{\circ}\text{C}$
	Значення рН 6 ~ 9
	М'яка вода без піску чи включень
Робоче середовище	Температура навколишнього середовища: $0^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$
	Вологість довкілля $\leq 95\%$ (25°C)

Висота нижче 2000м

Основними компонентами корпусу двокамерної вакуумної печі для гартування є нагрівальна камера, камера, що охолоджує, ізольовані двері, повітроохолоджувач, масляний басейн і т.д.

Оскільки корпус печі розділений на нагрівальну камеру і камеру для охолодження, для автоматичної роботи використовується завантажувальна машина печі, завантажувальна машина печі має суворі граничні вимоги, заготовка переноситься між нагрівальною камерою і холодильною камерою через завантажувальну машину печі для завершення всього процесу термообробки.

У процесі нагрівання заготовки слід включити перемішування олії для скидання газу в олію в потрібний час, штампування слід проводити перед загартуванням для зниження рівня загартованого масла, під час загартування слід включити перемішування олії для підвищення конвекції та ефекту загартування [24].

Адаптивність потужності двокамерної вакуумної печі для гартування в олію відносно широка. Для печей тієї ж специфікації (вантажопідйомності) собівартість виробництва печі для гартування в масло відносно низька.



Рисунок 5.1 – Двокамерна вакуумна піч для гартування в маслі А/ВОК1300-1288.

Гартувальне масло має невелике забруднення під час використання і може повторно використовуватися протягом тривалого часу, протягом усього робочого періоду. Також корпус печі знаходиться в стані негативного тиску, тому він має більшу швидкість охолодження під час гартування, що може підвищити ефективність виробництва [25].

Таблиця 5.2

Технічні параметри А/ВОК1300-1288

Модель	А/VOQ1300-322	А/ВОК1300-644	А/ВОК1300-966	А/ВОК1300-1288
Потужність нагріву	70кВт	100кВт	180кВт	220кВт
Розмір камери (мм)	300x200x200	600x400x400	900x600x600	1200x800x800
Вантажопідйомність	100кг	200кг	500кг	1000кг
Тип камери	Горизонтальний тип, подвійні камери			
Завантаження зразка	Фронтальне завантаження			
Макс. Темп.	1300°C			
Робоча температура	PT-1250°C			
Темп. зростання	0-20°C/хв			
Рівномірність темпу	±5°C (1000°C, порожня піч, температурний тест 5 балів)			
Тимчасова точність	±1°C (вакуум, порожній, 1200°C)			
Максимальний вакуум	4×10 грн. ·Pa (холодний стан, очищення, сушіння, порожня піч)			
Робочий вакуум	5 Па			
Швидкість підвищення тиску	≤ 0.67Pa (порожньо, очищення, після сушіння)			
Тиск охолоджуючого газу	≤ 2бар			
Режим керування	Автоматичний / ручний захист блокування ПЛК			
Колір обладнання	Індивідуальний (постачальник надає кольорову картку)			

Для проведення старіння обираємо вакуумну піч ERSTEVAK VAN-191148/10.

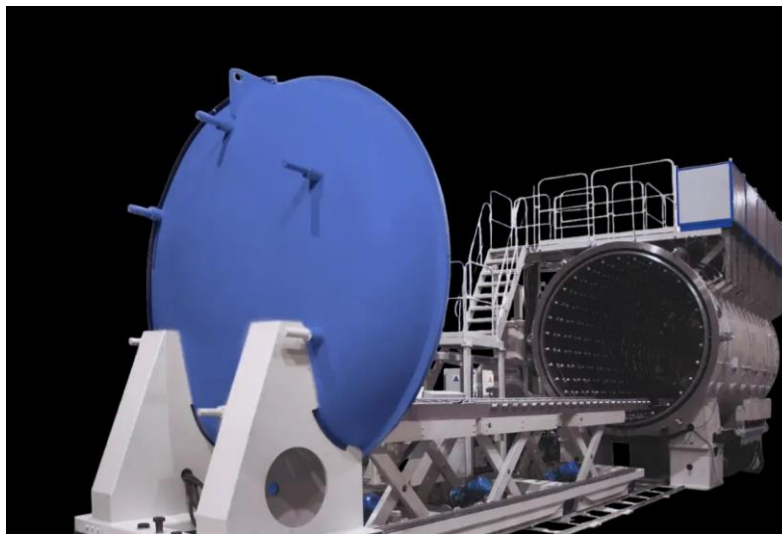


Рисунок 5.2 - Вакуумна піч ERSTEVAK VAN-191148/10.

Таблиця 5.3

Технічні параметри ERSTEVAK VAN-191148/10

1.	Максимальна температура, °С	1000
2.	Рівномірність розподілу температури, ± °С	±5
3.	Робочий газ	Аргон/Азот
4.	Встановлена потужність, кВт	900
5.	Максимальний розмір садка, мм	4800x1930x1140
6.	Вага садки разом із оснащенням, кг	до 3000
7.	Кількість зон регулювання температури печі (min)	6
8.	Блок управління та регулятор температури	ПЛК
9.	Потужність камери нагрівання, кВт	700
10.	Середовище у робочому просторі печі в холодному стані – вакуум, мм рт.ст.	$5 \cdot 10^{-5}$
11.	Середовище у робочому просторі печі при робочій температурі – вакуум, мм рт.ст.	$5 \cdot 10^{-5}$
12.	Величина натікання, мкм рт.ст./с	5

Принцип дії вакуумних печей для термообробки ґрунтується на проведенні всіх робочих процесів в умовах розрідженого середовища. Після розміщення матеріалів усередину корпусу він повністю закривається. Далі система відкачування створює в робочому просторі безповітряне середовище, відкачуючи гази і молекули кисню [25].

Нагрівач дозволяє нагріти сировину до максимальних температур або розпочати плавлення металів (залежно від температур плавлення останніх). При цьому матеріал самого тигля не піддається корозії завдяки вогнетривкому виконанню. Після завершення циклу камера відкривається, оброблену сировину виймають [25].

Відразу можна розпочинати обробку наступної партії матеріалів. Принцип роботи пристрою не залежить від конкретного процесу, який проходитиме на підприємстві, і типовий для всіх виробничих циклів [25]:

- відпуск металів;
- нітроцементация;
- гартування сплавів під газом;
- відпал та паяння;
- карбонітрування та плазмове нітрування;
- спікання порошків чи кераміки.

Усі перелічені варіанти термообробки можна проводити у вакуумних печах. Максимальна робоча температура печі залежить від її типу:

- шахтні печі витримують нагрів до +2500 градусів;
- пристрої з камерним та елеваторним завантаженням витримують +2000 градусів;
- не менше +2000 градусів та максимально низький тиск забезпечує вакуумна піч з ковпаковим завантаженням.

В результаті обробки матеріали набувають наступних властивостей:

- надійність матеріалу та стійкість до механічних впливів;
- виріб із заданими габаритами, рівною та чистою поверхнею без вад;

- на виході сировина не містить шкідливих та агресивних газів, домішок, бруду та пилу;
- однорідність матеріалу.

Завантаження деталей на спеціальній підвісі.

Для очищення деталей від олії після гартування встановлюємо спеціальну мийну машину конвеєрного типу.

5.2 Розрахунок обладнання термічної дільниці

Для розрахунку потреби основного обладнання складаємо таблицю середньої продуктивності обраних печей на окремих операціях.

Таблиця 5.4

Середня продуктивність печей на окремих операціях в кг/г

Тип печі	Операція термічної обробки	Середня продуктивність, кг/г
A/ВOK1300-1288	Гартування	100
ERSTEVAK VAN-191148/10.	Старіння	300

Припускаємо (призначаємо з розрахунку високого коефіцієнта завантаження печей при термообробці), що програма з виробництва лопаток $0,3 \text{ кг} \times 600 \text{ шт.}$ (кількість лопаток даного типу на двигуні) $\times 1000 \text{ шт.}$ (кількість двигунів) = 180000 кг.

Існує два методи розрахунку обладнання [25]:

- 1) за укрупненими показниками, такий розрахунок застосовується в проєктних завданнях, тобто, цей метод задовольняє меті нашого завдання;
- 2) за нормами часу для кожної деталі програми, розрахунок обладнання більш точний.

Розрахунок за першим методом полягає в тому, що кількість потрібного устаткування визначається виходячи з продуктивності прийнятого обладнання – годинної і питомої. Так як продуктивність печей залежить від тієї операції,

яка на ній виконується, то в проектних завданнях спочатку складаємо відомість розподілу деталей програми за операціями.

Потім виробляємо визначення заборгованості печі, тобто кількість годин роботи печі, які потрібні для обробки однієї групи (садки) деталі по програмі. Розрахунок необхідної кількості обладнання за укрупненими показниками виробляємо, користуючись відомостями з таблиці.

При гартуванні в печі А/ВОК1300-1288 з продуктивністю 1000 кг/год і програмою по колінчастим лапатам 180000 кг в рік заборгованість складе:

$$\frac{180000}{100} = 1800 \text{годин} \quad (5.1)$$

Отже, заборгованість даної печі 180 годин. Далі визначаємо необхідну кількість печей А/ВОК1300-1288 для гартування при двозмінній роботі протягом року близько 3200 годин:

$$\frac{1800}{3200} = 0.56 \text{печі} \quad (5.2)$$

Отже, розрахункова кількість печей А/ВОК1300-1288 становитиме одна одиниця при коефіцієнті завантаження:

$$\frac{0,56 \times 100}{1} = 56\% \quad (5.3)$$

що задовольняє вимоги за інтенсивністю завантаження печі.

Далі проводимо розрахунок обладнання для операції старіння лопаток печі ERSTEVAK VAN-191148/10 з продуктивністю 300 кг/год і програмою 180000 кг в рік заборгованість печі становить:

$$\frac{180000}{300} = 600 \text{годин} \quad (5.4)$$

Необхідна кількість печей на операції гартування, виходячи з заборгованості печі дорівнює 600 години. Визначаємо необхідну кількість

печей ERSTEVAK VAN-191148/10 для гартування при двозмінній роботі протягом року ~ 3200 годин. Отримаємо:

$$\frac{600}{3200} = 0,18 \text{печі} \quad (5.5)$$

Приймаємо, що кількість печей на цій операції дорівнює одному, з коефіцієнтом завантаження:

$$\frac{0,18 \times 100}{1} = 18\% \quad (5.6)$$

Недозавантаження печей компенсується виробництвом лопаток інших типів. Отже, для проектування ділянки термічної обробки лопаток двигуна необхідно мати:

- для гартування – 1 піч А/ВОК1300-1288;
- для старення – 1 піч ERSTEVAK VAN-191148/10;
- для очищення деталей від масла – спеціальна мийна машина;
- прилади контролю – високоточна автоматизована вимірювальна станція для контролю геометричних та фізичних параметрів деталі з використанням лазерних, оптичних та тактильних технологій.
- завантаження деталей у пристосування здійснюється роботизованими маніпуляторами – 5 шт.;
- для транспортування і завантаження пристроїв з деталями в піч – візки 10 шт.

Висновки до розділу 5

Економічна доцільність впровадження нового технологічного процесу пов'язана з правильним вибором обладнання та енергії для нагріву внаслідок значної питомої ваги амортизації та вартості палива в структурі собівартості термічної обробки.

Вибір обладнання повинен орієнтуватися на використання найбільш потужних печей і їх максимальне завантаження, щоб виключити роботу печей в холосту [24].

У цьому розділі був проведений вибір і розрахунок кількості обладнання термічної ділянки. Вибір обладнання проводився виходячі з річної програми 150000 кг деталей в рік і двозмінній роботі підприємства.

Виконано розрахунок кількості основного, допоміжного та контрольного обладнання. Для проектування ділянки термічної обробки лопаток двигуна необхідно мати:

- для гартування – 1 піч A/ВOK1300-1288;
- для старення – 1 піч ERSTEVAK VAN-191148/10;
- для очищення деталей від масла – спеціальна мийна машина;
- прилади контролю – високоточна автоматизована вимірювальна станція для контролю геометричних та фізичних параметрів деталі з використанням лазерних, оптичних та тактильних технологій.
- завантаження деталей у пристосування здійснюється роботизованими маніпуляторами – 5 шт.;
- для транспортування і завантаження пристроїв з деталями в піч – візки 10 шт.

ВИСНОВКИ

Проведено аналіз умов роботи деталі: робочі лопатки турбіни сучасних ГТД, працюючи в умовах складної спільної дії статичних, термоциклічних та динамічних навантажень.

Основними причинами виходу з ладу лопаток турбін є: високий рівень температурних навантажень; високий рівень вібраційних навантажень; високий рівень ізотермічних та неізотермічних навантажень; високий рівень динамічних навантажень; тривалі статичні навантаження.

Склад жароміцних сплавів на нікелевій основі забезпечує стійкість до корозії, термостійкість і високі механічні властивості. Для нікелевих сплавів одним із методів підвищення механічних властивостей є поверхнєве зміцнення: іонно азотування поверхні підвищує корозійну стійкість.

В третьому розділі розглянули хімічний склад і фізико-механічні властивості обраної марки сплав ХН70ВМТЮ і вплив легуючих елементів.

У четвертому розділі представлена сучасна технологія виготовлення лопаток газотурбінного двигуна, розроблена для умов масового виробництва:

- високоточне вакуумне лиття жароміцного сплаву з спрямованою кристалізацією (отримання монокристалу) по моделі, що виплавляється;
- високоточне формування методом пластичної деформації;
- вакуумна термічна обробка деталі лопатка;
- механічне роботизоване шліфування та полірування на 5-ти координатних спеціалізованих верстатах з корекцією та контролем геометрії поверхні лопатки.
- нанесення ерозійних стійких покриттів, у тому числі іонна імплантація.
- високоточний автоматизований вимір та контроль геометричних та фізичних параметрів деталі з використанням лазерних технологій.

Запропонований варіант термічної обробки деталі «лопатка газотурбінного двигуна» зі сплаву ХН70ВМТЮ складається з наступних операцій:

1. Гартування при температурі 1100-1150 °С, витримка 3 години, охолодження – масло індустріальне. Структура - багатокомпонентний твердий розчин на основі нікеля, зміцнений дисперсними частинками інтерметалідної фази на основі $Ni_3(Al, Ti)$.

2. Старіння при температурі 800-850 °С, витримка - 20 год., охолодження – повітря. В результаті старіння всередині кристалічної структури проходить розпад пересиченого твердого розчину, що підвищує міцність металу. Твердість сплаву ХН70ВМТЮ після гартування + старіння становить 33-35 HRC.

3. Іонно-плазмове азотування лопатки газотурбінного двигуна при температурі 550 °С впродовж 30 секунд, товщина шару 7,5-8 мкм, твердість азотованого шару 68-70 HRC (HV 1100-1000).

Для дослідження природи азотованого шару були підготовлені та досліджені конічні зрізи (під кутом 45 град), азотування проводили при температурах 450 °С та 600 °С. Було виявлено, що найтовщий азотований шар отримано при 450 °С, вище цієї температури товщина шару зменшується.

Виконано розрахунок кількості основного, допоміжного та контрольного обладнання. Для проектування ділянки термічної обробки лопаток двигуна необхідно мати:

- для гартування – 1 пічь А/ВОК1300-1288;
- для старення – 1 пічь ERSTEVAK VAN-191148/10;
- для очищення деталей від масла – спеціальна мийна машина;
- прилади контролю – високоточна автоматизована вимірювальна станція для контролю геометричних та фізичних параметрів деталі з використанням лазерних, оптичних та тактильних технологій.
- завантаження деталей у пристосування здійснюється роботизованими маніпуляторами – 5 шт.;
- для транспортування і завантаження пристроїв з деталями в піч – візки 10 шт.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кулик, М.С. Конструкція, міцність та надійність газотурбінних установок і компресорів / Тамаргазін О.А. Київ: НАУ, 2009. 477 с.
2. Терещенко, Ю.М. Газотурбінні двигуни літальних апаратів, Київ: Вища школа, 2000. 319 с.
3. Іноземцев, А.А. Газотурбінні двигуни / Сандрацький В.Л. П.: ВАТ «Авіадвигун», 2006.1024 с.
4. Нашимов, Ю.С. Анализ поврежденных лопаток газотурбинных двигателей. Институт проблем прочности им Г.С. Писаренко НАН Украины, г. Киев. 2005. 114 с.
5. Трощенко, В.П. Несущая способность рабочих лопаток ГТО при вибрационных напряжениях / Матвеев В.В., Грязнов Б.А./ – Киев. Наук. Думка, 1981 – 314с.
6. Мاسягін В. І., Конструкція та міцність авіаційних двигунів :курс лекцій / В. І. Масыгін, В. В. Самулеєв, Н. М. Отрешко.– Х.: ХУПС, 2014.– 464 с.
7. Берлизова, Т.Ю. Термоупругое состояние охлаждаемой монокристаллической лопатки ГТД с учетом ориентации кристаллографических осей // Сучасні проблеми машинобудування: Тези доп. конф. мол. вчених та спеціалістів. Харків: ІПМаш НАН України. 2014. С. 3.
8. Берлизова, Т.Ю. Проблемы использования новых материалов для лопаточного аппарата турбомашин // Вісник НТУ «ХП». Сер. Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування: зб. наук. пр. Харків: НТУ «ХП», 2016. № 9(1181). С. 44 – 49.
9. Ведь, В. Е. Жаростойкое покрытие для лопаток турбин ГТУ / Гусев Ю.А., Гусева Н.И., Кахраи Камбиз / Авиационно–космическая техника и технология. 2012. №9(96). С. 127 – 131.
10. Іноземцев, А.А. Газотурбінні двигуни. П.: ВАТ «Авіадвигун», 2006.1024 с.

11. Шулов, В.А. Модификация поверхности деталей из жаропрочных сталей сильноточными импульсными электронными пучками. /В.А. Шулов, А.Г. Пайкин, А.Б. Белов // Физика и химия обработки материалов. – 2005. – № 2. – С. 61-70.

12. Каблов, Е.Н. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД [Электронный ресурс]. ВИАМ. – 2012.

13. Богуслаев, А.В. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки компрессора и вентил-тора: моногр. Часть 1 / А. В. Богуслаев и др.. – Запорожье, изд. ОАО “Мотор Сич”, 2003. – 396 с.

14. Богуслаев, А.В. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки турбины: моногр. Часть 2 / А.В. Богуслаев, Ф.М. Муравченко, П.Д. Жеманюк, В.К. Яценко, А.Я. Качан, Э.И. Цивирко, С.Б. Беликов, М.Р. Ор-лов, В.Е. Замковой, В.Ф. Мозговой, О.В. Рубель. – Запорожье, изд. ОАО “Мотор Сич”, 2003. – 420 с.

15. Богуслаев, А.В. Прогрессивные технологии моделирования, оптимизации и интеллектуальной автоматизации этапов жизненного цикла авиационных двигателей: моногр. / А.А. Олейник, А.А. Олейник, Д.В. Павленко, С.А. Субо-тин; под ред. Д.В. Павленко, С.А. Субботина. – Запорожье: ОАО “Мотор-Сич”, 2009. – 468 с.

16. Мовчан, Б.А. Жаростойкие покрытия осаждаемые в вакууме / Б.А. Мовчан, И.С. Малащенко. – Киев : Наукова думка, 1983. – 231 с.

17. Борисов, Ю.С. Плазменные порошковые покрытия / Ю.С. Борисов, А.Л. Борисова. – Киев : Техніка, 1986. – 223 с.

18. Петрушин, Н.В. Физико – химические и структурные характеристики жаропрочных никелевых сплавов / Светлов И.Л.. Метал. 2001. 63 – 73 с.

19. Лащенко, Г. І. Плазменное упрочнение и напыление; Киев-Екотехнология; 2003р. 8-10 с.

20. D.H. Jack, I.M. Stoney Scand. J. Metall., 1 (1972), pp. 217-221. View in Scopus.
21. Y. Sun, Kinetics of layer growth during plasma nitriding of nickel based alloy Inconel 600, Journal of Alloys and Compounds, Volume 351, Issues 1–2, 2003, Pages 241-247, [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(02\)01034-4](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(02)01034-4)
22. A.S. Rizk, D.J. McCulloch, Surf. Technol., 9 (1979), pp. 303-315, View in Scopus
23. A.S. Rizk, D.J. McCulloch, Surf. Technol., 9 (1979), pp. 303-315, View in Scopus
24. Сігова, В.І. Технологія і проектне рішення термічних цехів і дільниць: навч. Посіб. / В.Б.Юскаєв, А.Ф. Будник. – Суми: Вид-во СумДУ, 2010. – 318 с.
25. Будник, А.Ф. Типове обладнання термічних цехів та дільниць: Навчальний посібник. -Суми: Вид-во СумДУ, 2008. - 212 с.