МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Інженерно-фізичний факультет
(повне найменування факультету)
Фізичне матеріалознавство
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)
магістр
(ступінь вищої освіти)

на тему Підвищення експлуатаційних властивостей деталей гарячого тракту турбіни низького тиску
(назва теми)

Виконав(ла): студент(ка) 2 курсу, групи ІФ 214м

Спеціальності 132 Матеріалознавство
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)
Прикладне матеріалознавство

ЩЕРБАКОВА Д.Р.
(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник ГЛОТКА О.А.
(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент
(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет Інженерно-фізичний факультет
Кафедра Фізичне матеріалознавство
Ступінь вищої освіти магістр
Спеціальність _132 Матеріалознавство_____
(код і найменування)
Освітня програма (спеціалізація) Прикладне матеріалознавство_____
(назва освітньої програми (спеціалізації)

ЗАТВЕРДЖУЮ
В.о. завідувача кафедри _ФМ____
Дар'я ТКАЧ_
«_____» _____2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

ЩЕРБАКОВА Дар'я Русланівна
(ПРІЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Підвищення експлуатаційних властивостей деталей гарячого тракту турбіни низького тиску
керівник проєкту (роботи) к.т.н, доцент ГЛОТКА Олександр Анатолійович
(науковий ступінь, вчене звання, ПРІЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)
затверджені наказом закладу вищої освіти від «04»_листопада_2025_року №503
2. Строк подання студентом проєкту (роботи)
3. Вихідні дані до проєкту (роботи) легування жароміцних нікелевих сплавів.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Літературний огляд, матеріали та методика, експериментальна частина, розрахунок економічної ефективності, охорона праці, висновки_____
_____
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів, плакатів)

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРІЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1	ГЛОТКА О.А., доцент, к.т.н		
2	ГЛОТКА О.А., доцент, к.т.н		
3	ГЛОТКА О.А., доцент, к.т.н		
4	КРУГЛІКОВА В.О, доцент, к.т.н		
5	НЕСТЕРОВ О.В., доцент, к.т.н		
НК	ГРЕШТА В.Л., професор, к.т.н		

7. Дата видачі завдання «10» жовтня 2023 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Літературний огляд		
2	Матеріали та методика досліджень		
3	Експериментальна частина		
4	Економіко-організаційна частина		
5	Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях		
	Висновки		

Студент(ка) _____ Дар’я ЩЕРБАКОВА
(підпис) (Ім’я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи) _____ Олександр ГЛОТКА
(підпис) (Ім’я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської роботи: 102 с., 19 табл., 20 рис., 1 додаток, 23 джер.

ЖАРОМІЦНІ СПЛАВИ, ХН35ВТ, ТЕРМІЧНА ОБРОБКА, ГАРТУВАННЯ, СТАРІННЯ, ДИСК ТУРБІНИ НИЗЬКОГО ТИСКУ, ГАРЯЧИЙ ТРАКТ, ДОВГОТРИВАЛА МІЦНІСТЬ, ТЕРМОЦИКЛІЧНА СТІЙКІСТЬ, ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ, МІКРОСТРУКТУРА.

Мета роботи: Розробка комплексного підходу до підвищення експлуатаційних властивостей деталей гарячого тракту турбіни низького тиску шляхом оптимізації режимів термічної обробки жароміцного сплаву ХН35ВТ.

Об'єкт дослідження: Процеси формування структури та властивостей жароміцного сплаву ХН35ВТ під впливом термічної обробки.

Предмет дослідження: Закономірності впливу режимів термічної обробки на мікроструктуру та комплекс механічних і експлуатаційних властивостей деталей гарячого тракту турбіни низького тиску зі сплаву ХН35ВТ.

Наукова новизна: Встановлено оптимальні параметри гартування та подвійного старіння сплаву ХН35ВТ, що забезпечують формування збалансованої мікроструктури з підвищеною термостабільністю. Визначено кількісні залежності між режимами термічної обробки, структурними характеристиками та експлуатаційними властивостями сплаву при робочих температурах.

Практичне значення: Розроблена технологія термічної обробки дисків турбіни, що забезпечує підвищення довговічності та надійності деталей гарячого тракту.

ЗМІСТ

С.

Вступ 7
1 Літературний огляд 8
1.1 Ключові функціональні вимоги до диска турбіни низького тиску 10
1.2 Умови експлуатації диска турбіни низького тиску 12
1.3 Сучасні жароміцні сплави та їх властивості 15
1.3.1 Нікелеві жароміцні сплави для дисків ТНТ 15
1.3.2 Сплави нового покоління для дисків ТНТ 20
1.3.3 Жароміцні сталі для дисків ТНТ 21
2 Матеріали та методика досліджень 25
2.1 Вимоги до матеріалу диску гарячого тракту турбіни низького тиску 25
2.2 Характеристика обраного матеріалу 29
2.3 Дослідження механічних характеристик 40
2.4 Дослідження мікроструктури 44
3 Експериментальна частина 48
3.1 Маршрутна технологія виготовлення диску ТНТ 48
3.2 Розробка режимів та технології термічної обробки 50
3.3 Технічний контроль, попередження та виправлення дефектів 60
3.4 Аналіз причин руйнування диска турбіни низького тиску 64
4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях 69
4.1 Аналіз потенційних небезпек 70
4.2 Заходи по забезпеченню безпеки. 71
4.3 Заходи по забезпеченню виробничої санітарії та гігієни праці. 75
4.4 Заходи з пожежної безпеки. 78
4.5 Заходи по забезпеченню безпеки у надзвичайних ситуаціях 79
5 Економіко-організаційна частина 82
5.1 Актуальність теми з позиції маркетингу 82
5.2 Послідовний аналіз 83

Висновок 97
Перелік джерел посилань 99
Додаток А 102

ВСТУП

Сучасний розвиток газотурбінних установок і авіаційних двигунів характеризується зростаючими вимогами до їх ефективності, надійності та довговічності. Особливо гострими залишаються питання підвищення експлуатаційних властивостей деталей гарячого тракту, зокрема турбін низького тиску, які працюють в екстремальних умовах високих температур, агресивних середовищ та значних механічних навантажень.

Турбіна низького тиску (ТНТ) є критично важливим вузлом сучасних газотурбінних двигунів, що значною мірою визначає їх експлуатаційну надійність та ефективність. Деталі гарячого тракту ТНТ піддаються комплексному впливу високотемпературної газової корозії, термічної втоми, ерозійного зносу та механічних навантажень, що призводить до прогресуючої деградації їх експлуатаційних характеристик і скорочення ресурсу.

Проблема підвищення експлуатаційних властивостей деталей гарячого тракту ТНТ має комплексний характер і вимагає інтегрованого підходу, що включає як вдосконалення конструкторських рішень, так і застосування прогресивних матеріалів та технологій термічної обробки. Актуальність даного дослідження обумовлена необхідністю розробки нових підходів до підвищення ресурсу та надійності деталей ТНТ, що дозволить забезпечити конкурентоспроможність вітчизняного турбобудування та авіаційного двигунобудування.

Метою даної роботи є розробка комплексного підходу до підвищення експлуатаційних властивостей деталей гарячого тракту турбіни низького тиску шляхом оптимізації конструктивних параметрів, застосування інноваційних жаростійких матеріалів та удосконалення технологій термічної обробки.

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

У роботі досліджуються особливості функціонування диска з робочими лопатками, що є ключовим елементом гарячого тракту турбіни низького тиску, а також розглядаються принципи його роботи в експлуатаційних умовах.

Диск турбіни низького тиску (рис. 1.1) є критичним компонентом газотурбінної установки, оскільки забезпечує ефективне перетворення енергії газового потоку з пониженим тиском у механічну роботу. Робота диска в ступені низького тиску має свої характерні особливості, зокрема, він функціонує при дещо нижчих температурах порівняно з дисками високого тиску, але зазнає значних відцентрових навантажень та вібрацій. При неналежному виборі матеріалів або недотриманні експлуатаційних вимог ці фактори можуть призвести до руйнування компонента [1].

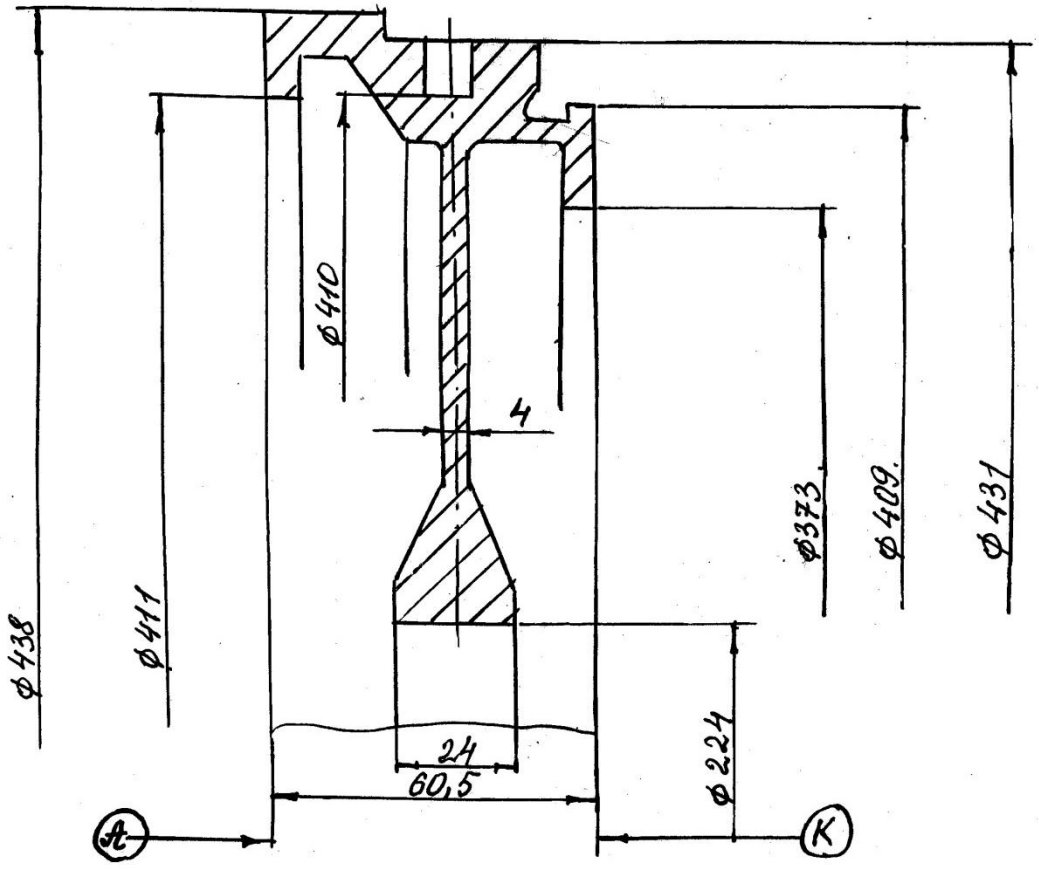

Рисунок 1.1 – Диск турбіни низького тиску

У гарячому тракті турбіни низького тиску (рис. 1.2) диск піддається комплексним навантаженням. Робочі гази, що вже пройшли через ступені високого та середнього тиску, взаємодіють з лопатками диска, створюючи обертальний момент. Хоча температура газового потоку на цій стадії дещо нижча (зазвичай 500-650°C для турбіни низького тиску), термічне навантаження все одно залишається значним фактором впливу на експлуатаційні властивості диска. Додатково, внаслідок більшої довжини лопаток у ступені низького тиску, диск зазнає підвищених відцентрових навантажень та схильний до вібраційних явищ [1, 2].

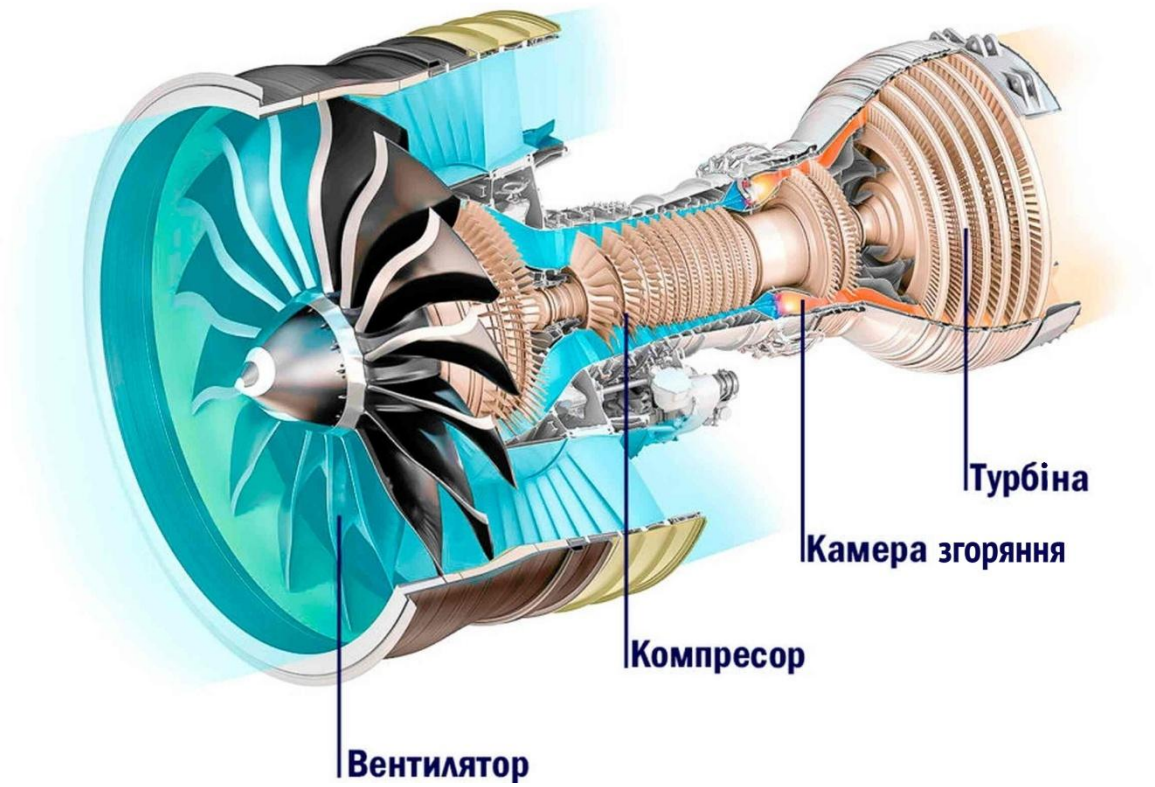

Рисунок 1.2 – Схема турбовентиляторного двигуна

1.1 Ключові функціональні вимоги до диска турбіни низького тиску

Диск турбіни низького тиску виступає одним із найвідповідальніших компонентів гарячого тракту газотурбінної установки та має відповідати комплексу специфічних функціональних вимог, що забезпечують його надійну та ефективну експлуатацію.

Перш за все, енергетична ефективність є фундаментальною вимогою до диска турбіни низького тиску. На цій стадії турбіни відбувається вилучення залишкової енергії газового потоку, який уже пройшов попередні ступені. Конструкція диска має забезпечувати максимальне перетворення цієї енергії в механічну роботу при мінімальних втратах. Оптимальна аеродинамічна форма диска та профілів лопаток, що на ньому розташовані, безпосередньо впливає на коефіцієнт корисної дії всієї установки. Важливою характеристикою є також оптимальне співвідношення потужності до масогабаритних показників, оскільки надмірна маса диска призводить до збільшення інерційних навантажень та зниження динамічних характеристик турбіни [1, 2].

Експлуатаційна надійність при тривалій роботі становить другу критичну вимогу. Специфікою турбіни низького тиску є робота в умовах підвищених вібрацій, що зумовлено більшою довжиною лопаток та відповідно більшим діаметром диска. Матеріал диска має демонструвати високу втомну міцність, щоб протистояти циклічним навантаженням протягом всього терміну служби. Конструкція диска повинна передбачати достатній запас міцності, враховуючи можливі екстремальні режими роботи, зокрема при раптових змінах потужності або короткочасних перевантаженнях. Крім того, з'єднання диска з валом та кріплення лопаток повинні зберігати надійність протягом тривалого періоду без виникнення люфтів або ослаблення.

Термоциклічна стійкість є третьою важливою вимогою, зважаючи на специфіку роботи турбіни. Під час експлуатації газотурбінної установки відбуваються численні цикли нагрівання та охолодження, особливо при

запусках та зупинках. Диск турбіни низького тиску повинен зберігати геометричну стабільність та механічні властивості при таких змінах температури, не допускаючи накопичення термічних напружень, які можуть призвести до деформацій або виникнення мікротріщин. Матеріал диска має характеризуватись низьким коефіцієнтом температурного розширення та високою теплопровідністю для рівномірного розподілу температурних полів.

Структурна цілісність та стійкість до агресивних середовищ також є важливими функціональними вимогами. Диск повинен зберігати свої властивості в умовах впливу високотемпературного газового потоку, який може містити корозійно-активні компоненти. Поверхня диска, особливо в місцях контакту з лопатками, має бути стійкою до фретинг-корозії та ерозійного зношування. При цьому матеріал диска повинен зберігати опір повзучості та релаксації напружень при тривалій роботі в умовах підвищених температур [1, 2].

Вібраційна стійкість є критично важливою для диска турбіни низького тиску, оскільки саме на цьому ступені частіше виникають резонансні явища. Конструкція диска має забезпечувати відсутність резонансних коливань у робочому діапазоні частот обертання. Демпфуючі властивості матеріалу та конструктивні рішення повинні ефективно гасити вимушені коливання, що виникають внаслідок газодинамічних пульсацій та механічних збурень.

Технологічність виготовлення та контролепридатність завершують комплекс ключових вимог. Конструкція диска має передбачати можливість ефективного виробництва з використанням сучасних технологій обробки матеріалів. Доступність критичних зон диска для неруйнівного контролю під час планового технічного обслуговування забезпечує своєчасне виявлення потенційних дефектів. Це особливо важливо для зон концентрації напружень, таких як пази для кріплення лопаток та отвори для балансування.

Отже, диск турбіни низького тиску має відповідати комплексу взаємопов'язаних вимог, що забезпечують його високу ефективність, надійність та довговічність в умовах гарячого тракту газотурбінної установки.

Дотримання цих вимог при проектуванні та виготовленні є запорукою успішної експлуатації всієї турбіни [1, 2].

1.2 Умови експлуатації диска турбіни низького тиску

Диск турбіни низького тиску функціонує в особливих експлуатаційних умовах, які визначають ключові вимоги до його конструкції та матеріалу. Розуміння цих умов є фундаментальним для забезпечення надійності та довговічності даного компонента в складі газотурбінної установки.

Термічний режим гарячого тракту формує одну з найскладніших умов експлуатації диска турбіни низького тиску. Хоча температура газового потоку на цьому етапі нижча порівняно зі ступенями високого та середнього тиску, вона все одно зазвичай становить 500-650°C, що є значним термічним навантаженням для металевих конструкцій. Особливу небезпеку становлять нерівномірні температурні поля, що виникають у диску під час перехідних режимів роботи турбіни. При запуску холодної установки відбувається стрімке підвищення температури, що призводить до виникнення термічних градієнтів між периферійною частиною диска, яка нагрівається першою, та його центральною частиною. Це спричиняє появу термічних напружень, які в поєднанні з механічними навантаженнями можуть призводити до прискореного старіння матеріалу та зниження ресурсу. Додатковий вплив справляють термоциклічні навантаження, пов'язані з частими змінами режимів роботи турбіни, особливо в установках, що використовуються для покриття пікових навантажень енергосистеми [1].

Відцентрові навантаження створюють другий визначальний фактор експлуатаційних умов диска. У турбіні низького тиску, де діаметр проточної частини більший, а лопатки довші порівняно з попередніми ступенями, відцентрові сили досягають значних величин. При швидкості обертання в

діапазоні 3000-3600 обертів на хвилину для промислових турбін матеріал диска піддається постійному розтягувальному навантаженню, що може сягати сотень мегапаскалів. Це навантаження зосереджується насамперед у зоні хвостовиків лопаток та в центральній частині диска, де відбувається з'єднання з валом. Навантаження додатково зростають при нестаціонарних режимах, зокрема під час швидких розгонів турбіни. З часом, під впливом високих температур, у матеріалі диска можуть розвиватися процеси повзучості, що призводять до поступової зміни його геометрії та зниження міцнісних характеристик.

Вібраційні явища становлять третій ключовий фактор експлуатаційних умов. Турбіна низького тиску особливо схильна до виникнення резонансних коливань через більшу гнучкість довгих лопаток та більший діаметр диска. Джерелами вібрації є газодинамічні пульсації потоку, нерівномірність газового потоку, неідеальне балансування ротора та вібрації, що передаються від інших елементів енергетичної установки. Частотний спектр вібрацій зазвичай охоплює діапазон від низькочастотних коливань, пов'язаних з обертанням ротора (50-60 Гц), до високочастотних коливань, спричинених взаємодією газового потоку з лопатками (кілька кілогерц). Особливу небезпеку становлять резонансні явища, коли частота зовнішнього збурення збігається з власними частотами коливань диска або лопаткового апарату. Тривала експлуатація в умовах підвищеної вібрації спричиняє втомне руйнування матеріалу, зокрема в зонах концентрації напружень, таких як пази для кріплення лопаток та технологічні отвори [2].

Ерозійний вплив газового потоку формує четверту важливу умову експлуатації. Хоча в турбіну низького тиску надходить уже відносно очищений газовий потік, він все ще може містити дрібні частинки, що утворюються внаслідок зношування елементів камери згоряння та попередніх ступенів турбіни. Ці частинки, рухаючись із високою швидкістю, спричиняють ерозійне зношування робочих поверхонь, особливо вхідних кромок лопаток та поверхні диска. Крім того, в процесі експлуатації на

поверхнях диска можуть осідати продукти згоряння палива та мінеральні відкладення, що змінюють аеродинамічні характеристики проточної частини та можуть спричиняти локальний перегрів матеріалу.

Корозійне середовище становить п'ятий фактор експлуатаційних умов диска. Продукти згоряння палива часто містять хімічно активні сполуки сірки, ванадію, натрію та інших елементів, які можуть спричиняти високотемпературну корозію металевих поверхонь. Особливо інтенсивно ці процеси відбуваються при роботі турбіни на паливі з підвищеним вмістом шкідливих домішок. У зоні робочих температур диска турбіни низького тиску можуть розвиватися процеси газової корозії, сульфідної корозії та окислення, що призводять до поступової деградації поверхневого шару матеріалу, зниження його міцнісних характеристик та утворення корозійних пошкоджень, які можуть ставати осередками розвитку втомних тріщин.

Змінні режими навантаження формують шостий визначальний фактор експлуатаційних умов. Сучасні газотурбінні установки часто працюють у режимах змінної потужності, відповідно до потреб енергосистеми або технологічного процесу. Це призводить до частих змін температури, тиску та швидкості обертання, що спричиняє циклічне навантаження диска. Особливо несприятливими є режими частих пусків та зупинок, коли відбуваються значні зміни теплового та механічного стану диска. Такі режими сприяють прискореному розвитку втомних процесів у матеріалі та можуть суттєво скорочувати ресурс компонента [1, 2].

Таким чином, експлуатаційні умови диска турбіни низького тиску характеризуються комплексним впливом термічних, механічних, вібраційних, ерозійних та корозійних факторів, що діють одночасно та в різних комбінаціях залежно від режиму роботи турбіни. Розуміння цих умов та їх впливу на матеріал диска є ключовим для розробки ефективних методів підвищення експлуатаційних властивостей деталей гарячого тракту турбіни низького тиску.

Для підвищення експлуатаційних властивостей деталей гарячого тракту турбіни низького тиску використовується сталь ХН35ВТЮ, що демонструє збалансоване поєднання жароміцності, корозійної стійкості та опору повзучості. Оптимізація технології виготовлення та обробки цього сплаву є одним із ключових напрямків покращення експлуатаційних характеристик диска.

Довготривала міцність компонентів гарячого тракту турбіни низького тиску забезпечується комплексним підходом до вибору матеріалів, конструктивних рішень та режимів технічного обслуговування. Зокрема, впровадження прогресивних методів поверхневого зміцнення, оптимізація геометрії диска та застосування сучасних систем моніторингу стану дозволяють суттєво підвищити ресурс та надійність деталей гарячого тракту [1, 2].

1.3 Сучасні жароміцні сплави та їх властивості

Вибір матеріалу для дисків турбіни низького тиску є компромісом між жароміцністю, втомною міцністю, опором повзучості та технологічністю. Сучасні жароміцні сплави, що використовуються для цих відповідальних деталей, можна розділити на кілька основних класів, кожен з яких має свої характерні властивості та сфери застосування.

1.3.1 Нікелеві жароміцні сплави для дисків ТНТ

Розвиток сучасних газотурбінних двигунів привів до створення спеціалізованої групи жароміцних сплавів. Ці матеріали розроблені

спеціально для виготовлення дискових компонентів турбін і мають унікальний комплекс характеристик, що відповідає специфічним умовам експлуатації дисків.

Сплав Інконель 718 став справжнім проривом у технології матеріалів для деталей авіаційних двигунів. Цей нікелевий сплав здобув величезну популярність завдяки унікальному поєднанню високих механічних властивостей при підвищених температурах з відмінною технологічністю. При кімнатній температурі Інконель 718 демонструє границю міцності в діапазоні 1250-1400 МПа, що забезпечує надійність диска при механічних навантаженнях під час запуску та зупинки двигуна. Особливо важливими є його властивості при робочих температурах – границя міцності 1000-1100 МПа при 550°С дозволяє витримувати значні відцентрові навантаження, що виникають при обертанні диска з високою швидкістю. Тривала міцність на рівні 600-650 МПа для ресурсу 100000 годин при 550°С забезпечує безпечну експлуатацію протягом усього періоду між капітальними ремонтами. Важливою перевагою цього сплаву є також його чудова зварюваність, що дозволяє використовувати зварні технології при виготовленні та ремонті великогабаритних дисків турбін низького тиску, особливо для енергетичних газотурбінних установок [3].

Особливе місце в розвитку жароміцних сплавів для дискових компонентів турбін посідає сплав ХН35ВТ (ЭИ612), який був розроблений у Радянському Союзі та широко застосовувався в газотурбінних установках різного призначення. Цей нікелевий сплав із високим вмістом хрому (близько 35%) та комплексним легуванням вольфрамом і титаном демонструє унікальний баланс між жароміцністю, корозійною стійкістю та технологічністю. При кімнатній температурі ХН35ВТ має межу міцності 850-950 МПа, а при робочих температурах 550-600°С зберігає міцність на рівні 700-750 МПа. Особливо важливою характеристикою цього сплаву є його висока тривала міцність — 380-420 МПа для ресурсу 100000 годин при 550°С, що забезпечує надійну роботу дисків протягом усього проектного терміну

експлуатації. Унікальною особливістю ХН35ВТ є виняткова структурна стабільність при тривалому впливі високих температур, що досягається збалансованим легуванням та специфічною термічною обробкою. Висока стійкість до газової корозії та окислення при підвищених температурах робить цей сплав особливо цінним для застосування в корозійно-активних середовищах, наприклад, у газових турбінах, що працюють на паливі з високим вмістом сірки. Додатковою перевагою сплаву ХН35ВТ є його відмінна технологічність – він добре піддається деформації, має хорошу зварюваність та оброблюваність різанням, що спрощує виготовлення складнопрофільних дискових деталей. Все це зробило сплав ХН35ВТ (ЭИ612) одним із найбільш успішних вітчизняних матеріалів для дисків газових турбін, який застосовувався в багатьох енергетичних та транспортних установках і в деяких випадках продовжує використовуватись до сьогодні [4].

З розвитком технологій та підвищенням вимог до ефективності газотурбінних двигунів було розроблено сплав Waspaloy 290, який представляє наступне покоління таких сплавів. Цей сплав призначений для експлуатації при більш високих температурах – до 680°С, що дозволяє підвищити термодинамічну ефективність циклу двигуна. Waspaloy 290 демонструє покращені характеристики міцності – 1350-1450 МПа при кімнатній температурі та 1050-1150 МПа при 550°С. Особливо важливим є підвищення тривалої міцності до 680-720 МПа для ресурсу 100000 годин при 550°С, що забезпечує більший запас надійності при тривалій експлуатації. Визначальною перевагою цього сплаву є його підвищена термічна стабільність – здатність зберігати вихідну мікроструктуру і механічні властивості при тривалому впливі високих температур. Завдяки особливостям легування та термічної обробки, Waspaloy 290 демонструє опір термічній втомі на 15-20% вищий порівняно з Інконель 718, що особливо важливо для дисків турбін низького тиску авіаційних двигунів, які працюють в умовах частих циклів нагрівання-охолодження при змінах режимів польоту [5, 6].

Сучасні високоефективні газотурбінні двигуни потребують матеріалів з ще більш високими характеристиками, що привело до створення сплаву Udimet 720LI. Абревіатура LI (Low Interstitials) означає низький вміст елементів втілення, таких як кисень, азот, вуглець і сірка, що досягається застосуванням спеціальних технологій виплавки. Цей сплав демонструє виняткові механічні властивості – границю міцності 1400-1500 МПа при кімнатній температурі та 1100-1200 МПа при 550°С. Тривала міцність досягає рівня 720-780 МПа для ресурсу 100000 годин при 550°С. Однак головною перевагою Udimet 720LI є значно покращена стійкість до малоциклової втоми – характеристики, що визначає довговічність диска при частих пусках та зупинках двигуна. Малоциклова втома є одним з основних механізмів руйнування дисків турбін низького тиску, особливо в авіаційних двигунах, і підвищення опору цьому виду руйнування суттєво збільшує надійність та ресурс. Udimet 720LI також демонструє виняткову стабільність мікроструктури при тривалих робочих циклах, що запобігає деградації властивостей протягом усього терміну експлуатації. Ці характеристики роблять сплав ідеальним для дисків турбін низького тиску сучасних авіаційних двигунів з підвищеними вимогами до надійності та ресурсу [5, 6].

Таблиця 1.1 – Порівняльна таблиця характеристик нікелевих сплавів для дисків турбін низького тиску [5, 6]

Параметр	ХН35ВТ (ЭИ612)	Inconel 718	Waspaloy 290	Udimet 720LI
Максимальна робоча температура, °С	до 600	до 650	до 680	до 700
$\sigma_В$, МПа	850-950	1250-1400	1350-1450	1400-1500
$\sigma_В^{550}$, МПа	700-750	1000-1100	1050-1150	1100-1200
$\sigma_{0,2}$, МПа	700-750	1050-1200	1150-1250	1200-1300
$\sigma_{0,2}^{550}$, МПа	600-650	850-900	900-950	950-1000
σ_{100000}^{550}, МПа	380-420	600-650	680-720	720-780
δ, %	25-30	18-23	15-20	15-18
δ^{550}, %	18-22	12-15	15-18	14-16
ТКЛР (20-600°С)	$15,5\times10^{-6}$	$14,2\times10^{-6}$ K^{-1}	$13,8\times10^{-6}$ K^{-1}	$13,5\times10^{-6}$ K^{-1}

Кінець таблиці 1.1

Теплопровідність при 550°C, Вт/(м·K)	16-18	19-21	21-23	22-24
Опір термічній втомі	Середній	Базовий рівень	На 15-20% вищий порівняно з Інконель 718	На 25-30% вищий порівняно з Інконель 718
Опір малоцикловій втомі при 550°C	На 10-15% нижчий	Базовий рівень	На 10-15% вищий	На 20-25% вищий
Технологічність	Дуже висока	Висока	Середня	Середня
Зварюваність	Відмінна	Добра	Задовільна	Обмежена
Структурна стабільність при тривалій експлуатації	Висока	Добра	Підвищена	Висока
Основна зміцнююча фаза	Карбіди (MeC, $Me_{23}C_6$)	γ''(Ni_3Nb) + γ'(Ni_3Al,Ti)	γ'(Ni_3Al,Ti)	γ'(Ni_3Al,Ti)
Об'ємна частка зміцнюючої фази	~5-7% (карбіди)	~20% (γ''+γ')	~35% (γ')	~45% (γ')
Оптимальний розмір зерна	5-6 балів ASTM (70-100 мкм)	7-8 ASTM (30-50 мкм)	6-7 ASTM (50-70 мкм)	7-8 ASTM (30-50 мкм)
Основні переваги для дисків ТНТ	Відмінна корозійна стійкість, висока технологічність, низька вартість	Оптимальне поєднання міцності, технологічності та вартості	Висока жароміцність і термічна стабільність	Висока стійкість до малоциклової втоми та повзучості
Обмеження застосування	Нижча міцність порівняно з сучасними сплавами	Обмежена жароміцність вище 650°C	Складніша технологія термообробки	Висока вартість, обмежена зварюваність
Типові області застосування	Диски ТНТ наземних енергетичних ГТД, корозійностійкі деталі	Диски ТНТ авіаційних, морських і наземних ГТД	Диски ТНТ високонавантажених авіаційних ГТД	Диски ТНТ перспективних авіаційних ГТД з підвищеною t° газів
Відносна вартість	0,7-0,8	1,0 (базовий рівень)	1,3-1,5	1,5-1,8

1.3.2 Сплави нового покоління для дисків ТНТ

Неперервне підвищення параметрів сучасних газотурбінних двигунів, зокрема температури газів перед турбіною, вимагає постійного вдосконалення матеріалів для дисків. Для задоволення цих вимог були розроблені спеціалізовані сплави нового покоління з унікальними властивостями.

Рене 65 є одним з найбільш передових сплавів, спеціально створених для дисків турбін низького тиску високонавантажених газотурбінних двигунів. Розроблений компанією General Electric, цей сплав став результатом багаторічних досліджень та оптимізації складу для забезпечення максимальної жароміцності при збереженні технологічності [6 ,7]. Рене 65 демонструє виняткові механічні характеристики — границю міцності 1450-1550 МПа при кімнатній температурі та 1150-1250 МПа при 550°C, що перевершує показники традиційних сплавів. Тривала міцність на рівні 750-800 МПа для ресурсу 100000 годин при 550°C забезпечує надійну роботу протягом усього терміну експлуатації. Ключовою перевагою сплаву є його підвищена термостабільність при циклічних змінах температури, що критично важливо для дисків турбін низького тиску, особливо в умовах частих змін режимів роботи. Особливістю Рене 65 є також знижена схильність до утворення топологічно щільно упакованих фаз (ТЩП-фаз), таких як σ-, μ- та фаз Лавеса, які можуть утворюватися при тривалій експлуатації і призводити до окрихчування матеріалу. Відсутність цих фаз забезпечує збереження пластичності протягом усього строку служби, що підвищує надійність диска в критичних умовах.

Ще більш досконалим представником сучасних сплавів є сплав LSHR (Low Solvus, High Refractory), розроблений в рамках програми NASA для перспективних авіаційних двигунів. Назва сплаву відображає його ключові особливості – низьку температуру повного розчинення γ'-фази (solvus) при одночасно високому вмісті тугоплавких елементів (refractory). Такий баланс

забезпечує унікальне поєднання технологічності (завдяки зниженню температури термообробки) та жароміцності (завдяки тугоплавким елементам). LSHR виготовляється за технологією порошкової металургії, що дозволяє досягти дрібнозернистої гомогенної структури та запобігти лікваційній неоднорідності, характерній для литих сплавів. Цей сплав демонструє найвищі показники міцності серед сплавів – 1500-1600 МПа при кімнатній температурі та 1200-1300 МПа при 550°С. Особливо вражаючою є його тривала міцність – 780-850 МПа для ресурсу 100000 годин при 550°С. LSHR забезпечує виняткову стабільність структури при циклічних навантаженнях та високу однорідність властивостей по всьому об'єму великогабаритних дисків, що досягається завдяки порошковій технології. Ці характеристики роблять сплав ідеальним вибором для дисків турбін низького тиску перспективних двигунів з підвищеною температурою газів та збільшеним ресурсом [6 – 9].

1.3.3 Жароміцні сталі для дисків ТНТ

Незважаючи на домінування нікелевих сплавів у сучасних високоефективних двигунах, жароміцні сталі зберігають важливу роль у виробництві дисків турбін низького тиску для газотурбінних установок з помірними тепловими навантаженнями. Особливо це актуально для стаціонарних енергетичних турбін, де температура газів перед турбіною низького тиску зазвичай не перевищує 550-580°С. Жароміцні сталі пропонують привабливе поєднання достатньої міцності з кращою технологічністю та меншою вартістю порівняно з нікелевими сплавами.

Мартенситні жароміцні сталі

Сталь 15Х12Н2МВФАБ (ЭП517) представляє групу жароміцних мартенситних сталей з високим вмістом хрому (9-12%), що забезпечує

оптимальний баланс між жароміцністю та технологічністю. Ця сталь є аналогом західних марок типу X12CrMoWVNbN 10-1-1 та має границю міцності 950-1050 МПа при кімнатній температурі та 750-800 МПа при 550°С. Тривала міцність становить 400-450 МПа для ресурсу 100000 годин при 550°С, що цілком достатньо для дисків турбін низького тиску енергетичних установок. Важливою перевагою 15Х12Н2МВФАБ (ЭП517) є її відмінна технологічність при виготовленні великогабаритних дисків — вона добре деформується, має високу прогартовуваність, що дозволяє отримувати однорідні властивості по всьому перерізу, та добре зварюється. Підвищена термостійкість сталі забезпечується спеціальним легуванням молібденом (близько 1%) та вольфрамом (до 1%), які утворюють стабільні карбіди, що перешкоджають руху дислокацій при високих температурах. Додаткове легування ванадієм та ніобієм забезпечує дисперсійне зміцнення дрібними карбідами, що значно підвищує тривалу міцність [8-10].

Для більш відповідальних застосувань була розроблена удосконалена жароміцна сталь 15Х16К5Н2МВФАБ (ЭП866; ВНС-30) з комплексним легуванням. Ця сталь призначена спеціально для дисків турбін низького тиску енергетичних установок з підвищеними параметрами пари. 15Х16К5Н2МВФАБ (ЭП866; ВНС-30) демонструє кращі механічні характеристики порівняно з 15Х12Н2МВФАБ (ЭП517) – границю міцності 1000-1100 МПа при кімнатній температурі та 800-850 МПа при 550°С, а також тривалу міцність 450-500 МПа для ресурсу 100000 годин при 550°С. Ключовою перевагою цієї сталі є висока стабільність властивостей при тривалій експлуатації – здатність зберігати початкову міцність і пластичність протягом всього проектного ресурсу. Особливо важливою характеристикою 15Х16К5Н2МВФАБ (ЭП866; ВНС-30) є знижена схильність до теплового охрупчування – явища, при якому тривалий вплив високої температури призводить до втрати пластичності і підвищення крихкості [8-10]. Ця характеристика має критичне значення для дисків турбін низького тиску енергетичних турбін, які працюють безперервно протягом тривалих періодів

(до 40000-50000 годин між плановими ремонтами). Висока стійкість до теплового окрихчування забезпечується ретельно збалансованим хімічним складом, зокрема, оптимальним співвідношенням хрому, молібдену та ванадію, а також мінімізацією вмісту шкідливих домішок, таких як фосфор і сірка.

Високолеговані аустенітні сталі

Для дисків турбін низького тиску з робочою температурою до 600°C часто застосовується жароміцна аустенітна сталь ХН62ВМЮТ (ЭП708) з високим вмістом нікелю. Ця сталь поєднує достатню міцність з виключно високою пластичністю і технологічністю. ХН62ВМЮТ (ЭП708) має границю міцності 900-950 МПа при кімнатній температурі та 700-750 МПа при 550°C, що дещо нижче порівняно з мартенситними сталями. Тривала міцність становить 350-400 МПа для ресурсу 100000 годин при 550°C. Однак ключовою перевагою цієї сталі є її підвищена стійкість до корозійних пошкоджень у порівнянні з мартенситними сталями, що особливо важливо для дисків турбін низького тиску, які можуть контактувати з вологим паром. Високий вміст хрому (близько 18%) та нікелю (11-13%) забезпечує утворення на поверхні стабільної пасивуючої оксидної плівки, що захищає матеріал від корозійного впливу робочого середовища [10].

Іншою важливою перевагою ХН62ВМЮТ (ЭП708) є її висока структурна стабільність при тривалій експлуатації завдяки аустенітній структурі. На відміну від мартенситних сталей, аустенітні сталі не схильні до фазових перетворень при тривалому впливі високих температур, що забезпечує стабільність механічних властивостей протягом усього терміну експлуатації. Особливо важливою характеристикою ХН62ВМЮТ (ЭП708) є її висока термічна пластичність — здатність витримувати значні пластичні деформації при підвищених температурах без руйнування. Відносне видовження цієї сталі при 550°C складає 20-25%, що значно перевищує показники мартенситних сталей (10-15%). Ця властивість забезпечує високу стійкість дисків до термоциклічних навантажень, що виникають при частих

пусках та зупинках турбіни. Додаткове зміцнення ХН62ВМЮТ (ЭП708) досягається складним легуванням молібденом, ванадієм та ніобієм, які утворюють дисперсні карбіди, що перешкоджають руху дислокацій при підвищених температурах і забезпечують необхідний рівень тривалої міцності.

Важливою технологічною перевагою аустенітних сталей є їх чудова зварюваність, що дозволяє використовувати зварні технології при виготовленні великогабаритних дисків складної конфігурації. Завдяки цьому, а також відносно нижчій вартості порівняно з нікелевими сплавами, ХН62ВМЮТ (ЭП708) залишається привабливим матеріалом для дисків турбін низького тиску енергетичних установок, де критичними факторами є вартість, технологічність та довготривала надійність при безперервній експлуатації [10].

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Вимоги до матеріалу диску гарячого тракту турбіни низького тиску

Диск турбіни низького тиску, будучи критичним компонентом гарячого тракту газотурбінної установки, висуває специфічні вимоги до матеріалу, зумовлені особливостями його експлуатаційних умов. Хоча температурні навантаження на диск турбіни низького тиску є нижчими порівняно з деталями турбін високого тиску (зазвичай в діапазоні 500-650°C), комбінація термічних, механічних та вібраційних навантажень формує унікальний комплекс вимог до матеріалу.

Першочерговою вимогою до матеріалу диска турбіни низького тиску є забезпечення високої статичної міцності при робочих температурах. Матеріал повинен демонструвати границю міцності не нижче 800-900 МПа та границю текучості не нижче 600-700 МПа при температурах 550-600°C. Ці характеристики є критичними для протидії значним відцентровим навантаженням, що виникають при високих швидкостях обертання диска.

Особливо важливою характеристикою є тривала міцність — здатність протистояти постійним навантаженням при підвищених температурах протягом всього терміну експлуатації (зазвичай 100000-120000 годин). Матеріал диска повинен забезпечувати границю тривалої міцності на рівні 400-500 МПа при температурі 550°C для ресурсу 100000 годин. Цей показник має принципове значення для забезпечення експлуатаційної надійності диска протягом всього міжремонтного періоду [1, 7].

На відміну від деталей турбін високого тиску, де температури сягають критичних значень, для дисків турбін низького тиску процеси повзучості проявляються меншою мірою, але все ж залишаються значущими. Матеріал диска повинен характеризуватись швидкістю повзучості не більше 1×10^-5 %/год при напруженні 300 МПа і температурі 550°C.

Релаксаційна стійкість — здатність зберігати початковий рівень напружень при тривалій деформації — є особливо важливою для забезпечення стабільності з'єднань диска з лопатками та валом. Критичним параметром є релаксаційна стійкість при робочій температурі, яка повинна забезпечувати збереження не менше 80% початкового напруження після 10000 годин експлуатації.

Диск турбіни низького тиску піддається значним змінним навантаженням, що зумовлює високі вимоги до втомної міцності матеріалу. Зокрема, матеріал повинен забезпечувати границю витривалості при симетричному циклі не нижче 400-450 МПа при температурі 550°C для базового числа циклів 10^7. Критичним є також опір малоцикловій втомі, оскільки диск зазнає значних циклічних навантажень при пусках та зупинках турбіни.

Оскільки диск працює в умовах термоциклічних навантажень, особливо важливою характеристикою є опір термічній втомі — здатність матеріалу витримувати циклічні зміни температури без руйнування. Матеріал повинен забезпечувати не менше 5000-10000 циклів термічного навантаження в діапазоні температур 100-550°C без утворення макротріщин. Для забезпечення цієї характеристики критичними є низький коефіцієнт термічного розширення (не більше 14-15×10^-6 К^-1) та висока теплопровідність (не менше 20-25 Вт/(м·К)) при робочих температурах.

Матеріал диска повинен зберігати структурну стабільність протягом усього терміну експлуатації, не допускаючи значного росту зерна або виділення крихких фаз, що знижують механічні властивості. Особливе значення має однорідність мікроструктури по всьому об'єму диска, оскільки це забезпечує рівномірний розподіл механічних властивостей та запобігає локальній концентрації напружень [1, 5 –7].

Для забезпечення надійної експлуатації диска критичним є контроль розміру зерна (зазвичай 6-8 балів за шкалою ASTM) та відсутність значної анізотропії властивостей. Важливим аспектом є також стабільність фазового

складу при тривалій експлуатації при підвищених температурах, що забезпечує збереження проектних механічних характеристик.

Матеріал диска повинен забезпечувати можливість виготовлення деталі складної геометрії з високою точністю. Для дисків турбін низького тиску, які мають значні розміри (до 1,5-2 метрів в діаметрі), особливо важливою є прогартовуваність матеріалу — здатність забезпечувати однорідні властивості по всьому перерізу. Матеріал повинен бути технологічним при механічній обробці, забезпечуючи можливість точного формування пазів для кріплення лопаток та інших конструктивних елементів.

Хоча диск турбіни низького тиску не контактує безпосередньо з гарячим газовим потоком, він піддається впливу середовища з підвищеною температурою та може зазнавати корозійного впливу. Матеріал повинен бути стійким до окислення при робочих температурах, не допускаючи утворення окалини та зміни розмірів критичних елементів конструкції.

Особливу увагу слід приділяти опору корозії під напруженням та корозійній втомі — явищам, що проявляються при одночасній дії корозійного середовища та механічних напружень. Матеріал повинен забезпечувати коефіцієнт зниження втомної міцності в корозійному середовищі не більше 1,2-1,3 порівняно з інертним середовищем.

Для зон диска, що контактують з лопатками, важливою є стійкість до фретинг-корозії — особливого виду зношування, що виникає при мікропереміщеннях в контактних зонах. Матеріал повинен забезпечувати мінімальні втрати маси при випробуваннях на фретинг-зношування при температурах, близьких до робочих.

Диск турбіни низького тиску працює в умовах інтенсивних вібрацій, що зумовлює особливі вимоги до демпфуючих властивостей матеріалу. Важливим параметром є логарифмічний декремент затухання коливань, який повинен бути не менше 0,02-0,03 при температурах 500-550°C. Високі демпфуючі властивості забезпечують гасіння резонансних коливань та запобігають розвитку втомних руйнувань [1, 5–7, 11].

Матеріал повинен забезпечувати стабільність модуля пружності в робочому діапазоні температур, оскільки це впливає на власні частоти коливань диска та можливість виникнення резонансних явищ. Зміна модуля пружності в діапазоні від кімнатної температури до робочої не повинна перевищувати 15-20%.

Для дисків турбін низького тиску, які мають значні розміри, критично важливою є однорідність властивостей по всьому об'єму деталі. Розкид механічних характеристик не повинен перевищувати 5-7% для межі міцності та 8-10% для відносного видовження. Це забезпечує передбачуваність поведінки диска в експлуатації та можливість точного розрахунку його міцності та ресурсу.

Матеріал повинен забезпечувати можливість ефективного неруйнівного контролю готового виробу, зокрема, ультразвукового та магнітно-порошкового контролю для виявлення внутрішніх дефектів та поверхневих тріщин. Акустична прозорість матеріалу повинна забезпечувати виявлення дефектів розміром від 0,5-1,0 мм при ультразвуковому контролі [7, 11].

Отже, матеріал диска турбіни низького тиску повинен відповідати комплексу взаємопов'язаних вимог, що забезпечують його надійну та безпечну експлуатацію в умовах гарячого тракту газотурбінної установки. Основними вимогами є висока статична та тривала міцність при підвищених температурах, опір повзучості, втомна міцність, термоциклічна стійкість, структурна стабільність та однорідність властивостей. Сучасні матеріали для дисків турбін низького тиску включають переважно жароміцні сплави на основі нікелю та високолеговані сталі, що забезпечують оптимальне поєднання механічних, термічних та технологічних характеристик.

2.2 Характеристика обраного матеріалу

Для виготовлення диску газової турбіни було обрано сплав ХН35ВТ (ЭИ612), представлений у таблиці 2.1. Цей матеріал має залізонікелеву основу та класифікується як помірно дисперсійно твердіючий сплав з карбідним механізмом зміцнення.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад сплаву ХН35ВТ, мас % [12]

Марка сплаву	Вміст елементів (мас. %)										
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Ti	W	S	P	Cu
ЭИ612	0,12	0,6	1,0-2,0	14,0-16,0	34,0-38,0	0,3	1,1-1,5	2,3-3,5	0,02	0,03	0,25

Далі проаналізуємо механічні характеристики сплаву після термічної обробки, що включає гартування при 1180°C протягом 1 години з охолодженням у воді та подвійне старіння (спочатку при 780°C протягом 8-10 годин з охолодженням на повітрі, потім при 730°C протягом 25 годин з охолодженням на повітрі). Відповідні показники властивостей матеріалу при різних температурах випробувань представлені в таблиці 2.2.

Показники довготривалої міцності сплаву представлені в таблиці 2.3. Дані отримані для зразків, що пройшли рекомендований режим термічної обробки, який включає гартування при температурі 1180°C тривалістю 1 година з охолодженням у воді, після чого проводилось подвійне старіння – спочатку при 780°C протягом 8-10 годин з охолодженням на повітрі, а потім при 730°C впродовж 25 годин також з охолодженням на повітрі. Таблиця містить результати випробувань при різних температурних режимах.

Таблиця 2.2 – Механічні властивості сплаву ХН35ВТ (ЭИ612) [4]

$t_{випр.}$, °С	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ,%	ψ,%	KCU КДж/м^2
20	850	550	18	40	600
200	740	440	20	37	1400
300	730	440	16	30	900
400	710	440	19	35	1000
500	680	420	15	23	900
550	680	420	17	37	1300
600	640	400	15	30	650
630	630	390	21	27	1000
650	510	370	10	15	1000
700	460	370	9	11	1000

Таблиця 2.3 – Границя довготривалої міцності для сплаву ХН35ВТ (ЭИ612) [4]

$t_{випр.}$, ^{0}С	σ_{1000}	σ_{10000}	σ_{100000}	$\sigma_{1/10^4}$	$\sigma_{1/10^5}$	σ_{-1}, МПа, при циклах	
						10^7	10^8
500	–	450	360	–	–	–	–
525	–	400	330	–	–	–	–
550	–	390	320	–	–	–	–
600	320	260	210	–	180	–	–
630	250	210	180	–	150	–	–
650	220	200	160	170	130	300	230
700	–	140	100	110	80	–	–

Аналізуючи дані, представлені в таблицях 3.2 та 3.3, можна зробити висновок, що досліджуваний сплав демонструє високі показники як механічних властивостей, так і границь довготривалої міцності. Особливо важливою характеристикою є здатність матеріалу зберігати свої властивості при підвищених температурах, що дозволяє експлуатувати вироби з нього при

температурах до 700°С протягом тривалого періоду. Графічна залежність довготривалої міцності від температури наведена на рисунку 2.1. Додатковою перевагою сплаву є його нечутливість до надрізів, що підвищує експлуатаційну надійність виробів.

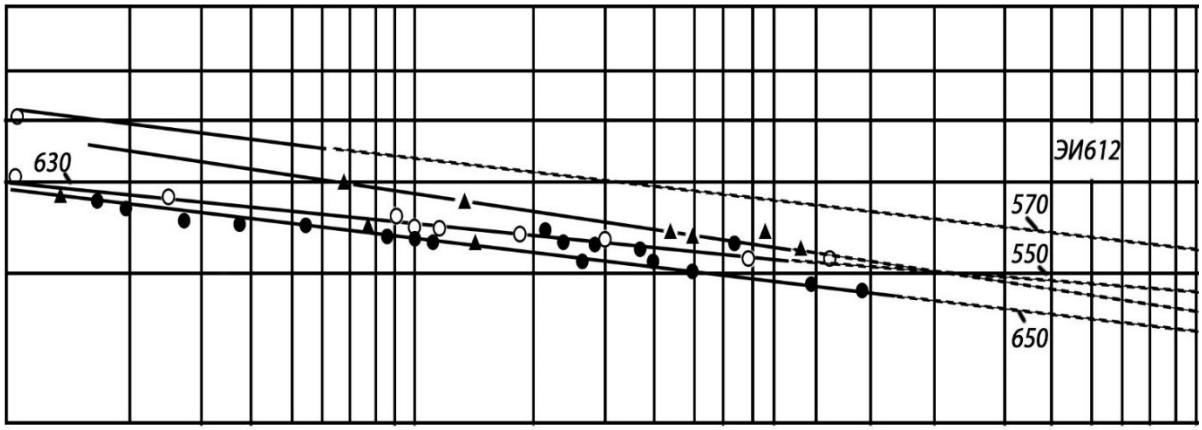

Рисунок 2.1 – Залежність довготривалої міцності від температури [7]

В умовах довготривалих випробувань сплав демонструє задовільну пластичність при розриві, яка після 10000 годин випробувань досягає 5% при температурі 650°С та 1-1,5% при 600°С.

Залежність швидкості повзучості від напружень при різних температурах представлена на рисунку 2.2. Наведені дані підтверджують високі показники жароміцності досліджуваного сплаву. Комбінація оптимального легування та термічної обробки значно підвищує характеристики жароміцності матеріалу.

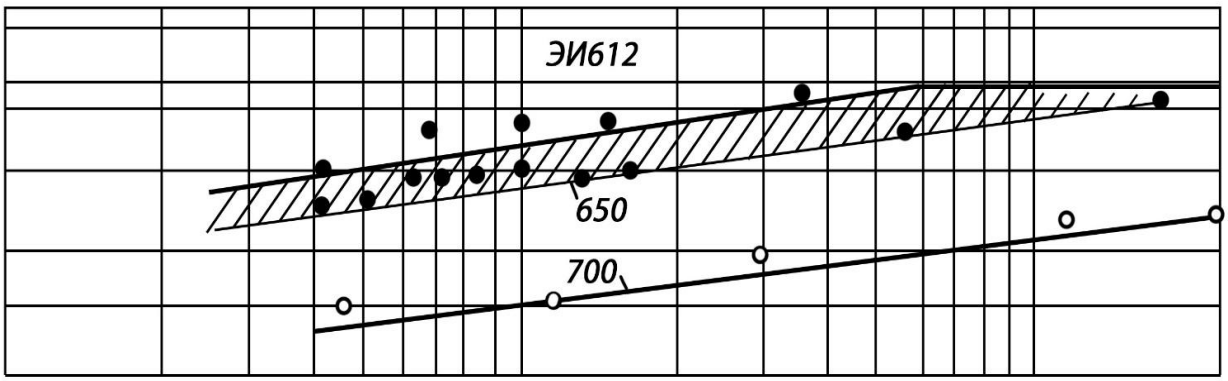

Рисунок 2.2 – Залежність швидкості повзучості від напружень [7]

Структура залізонікелевих жароміцних сплавів складається з твердого розчину (матриці), який може містити додаткові вторинні виділення. Нікель розширює γ-область у системі залізо-хром, і з підвищенням його вмісту γ-область стає домінуючою, що позитивно впливає на жароміцність. Рисунок 2.3 демонструє залежність константи окислення від вмісту нікелю. При досягненні концентрації нікелю 38% константа швидкості окислення стає мінімальною, що підтверджує позитивний вплив збільшення кількості нікелю на жароміцність.

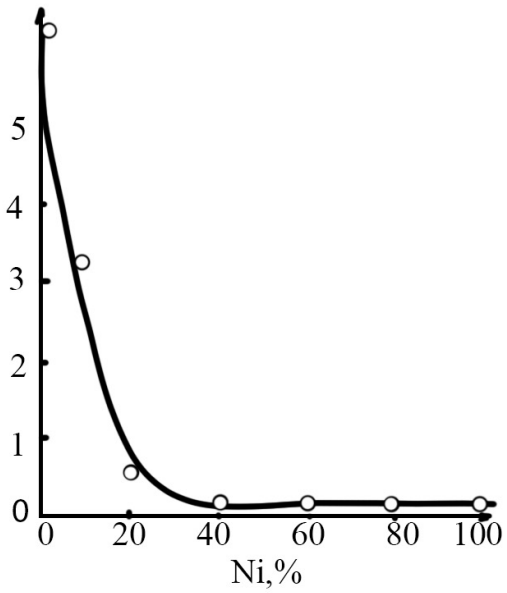

Рисунок 2.3 – Вплив Ni на жаростійкість сплавів системи Fe-Ni [4]

Нікель також є основою для утворення зміцнюючої γ'-фази $Ni_3(Al,Ti)$, яка виділяється при старінні. На рисунку 2.4 показано вплив нікелю на кількість γ'-фази і механічні властивості при кімнатній (а) та підвищених температурах (б). Збільшення вмісту нікелю впливає на кінетику утворення γ'-фази та сприяє зростанню її кількості. Сплав ХН35ВТ із 35% нікелю має високі показники міцності, які досягають максимальних значень при 600°С, при цьому зберігаючи задовільну пластичність.

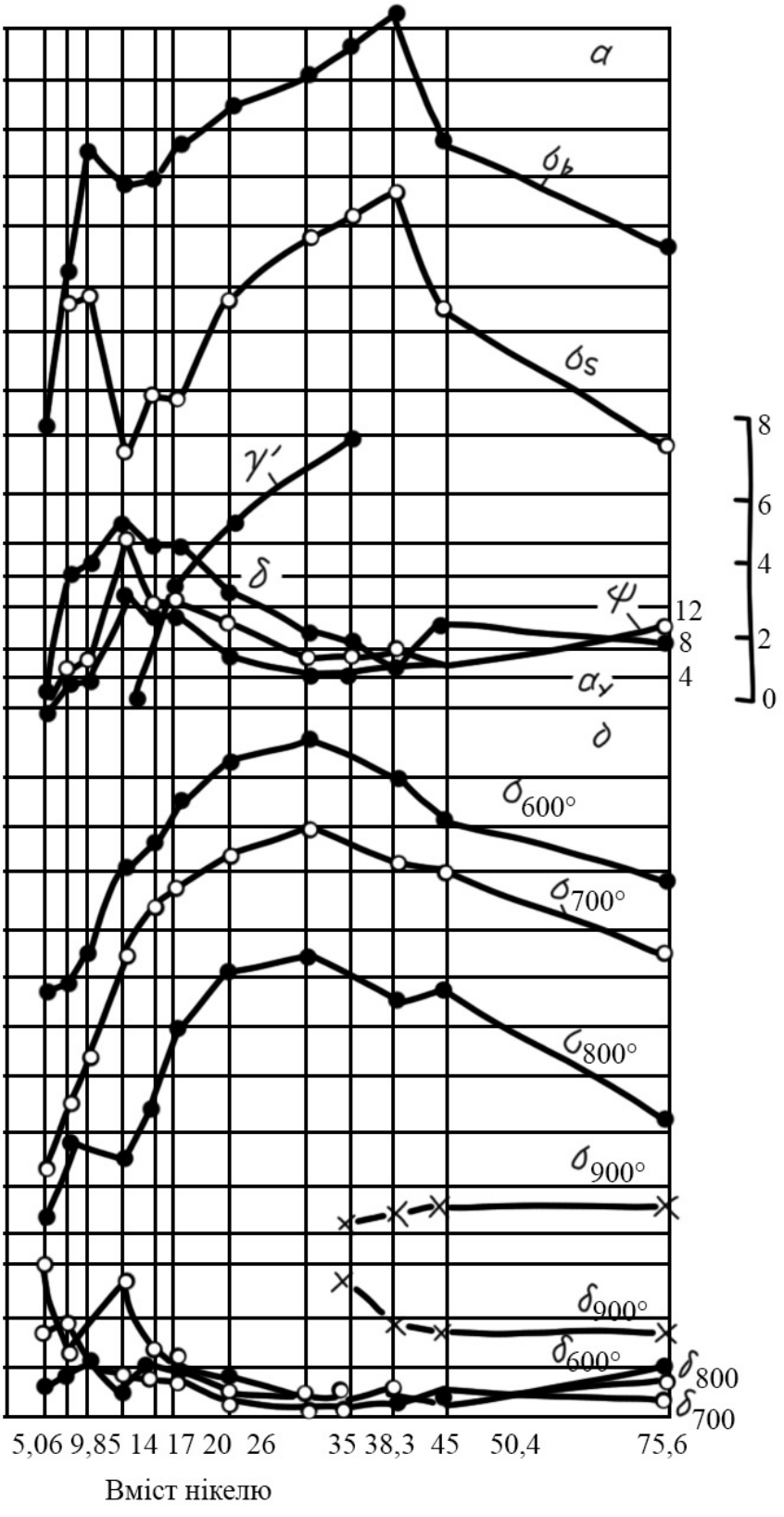

Рисунок 2.4 – Вплив нікелю на зміну кількості γ`-фази та механічних властивостей після відповідної ТО [8]

Важливою особливістю є значна кількість γ'-фази та нечутливість сплаву до швидкості охолодження при гартуванні, що забезпечує збереження жароміцності при термообробці виробів різної маси. Сплави на залізонікелевій основі найбільш схильні до дисперсійного твердіння після гартування γ-твердого розчину при температурах вище 850°С.

Хром підвищує опір окисленню при високих температурах, збільшує енергію зв'язку атомів кристалічної ґратки γ-твердого розчину, що покращує жароміцні характеристики та підвищує температуру рекристалізації легованого аустеніту. Хром утворює з вуглецем карбіди, які після гартування та старіння виділяються в γ-твердому розчині у високодисперсному стані, зміцнюючи сплав. Проте через схильність карбідів хрому до коагуляції це зміцнення може знижуватись під впливом високих температур.

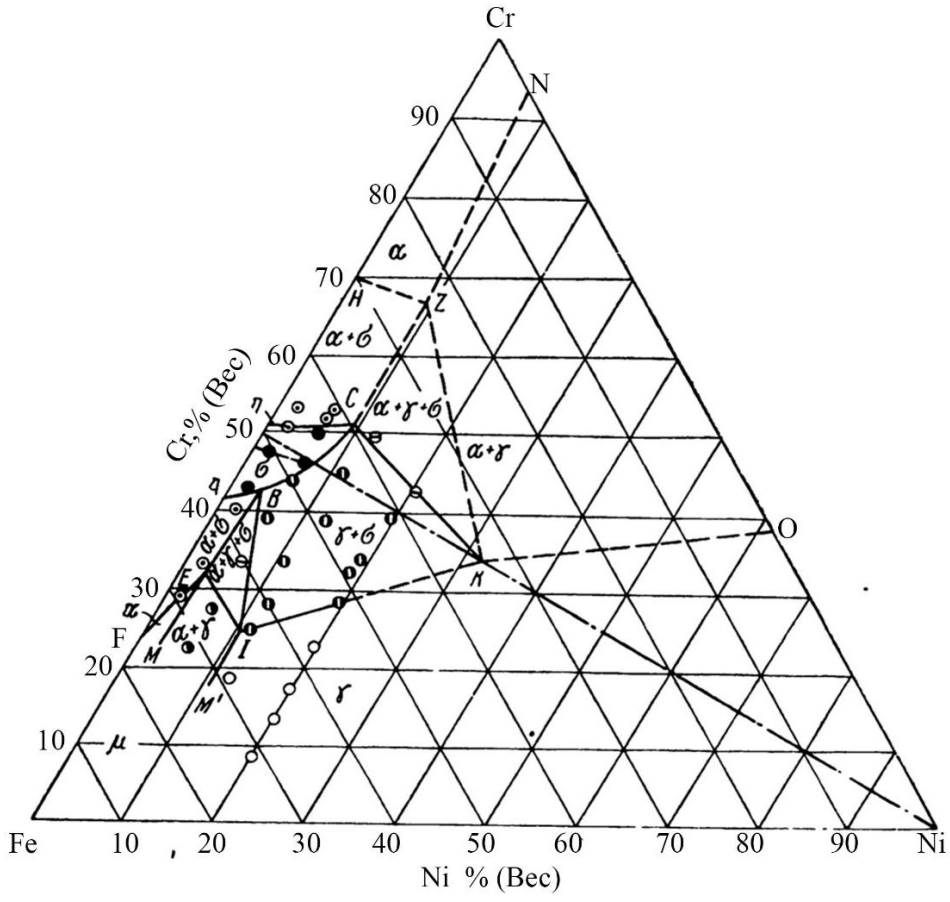

Рисунок 2.5 – Діаграма стану Ni-Cr-Fe при кімнатній температурі [13]

Залізонікелеві сплави мають високу схильність до утворення σ-фази, що можна спостерігати на діаграмі стану Ni-Cr-Fe (рис. 3.5). Утворення σ-фази супроводжується виділенням теплоти, збільшенням об'єму і різким підвищенням твердості, але при цьому знижується пластичність і ударна в'язкість. Хоча крупні частинки σ-фази можуть підвищувати довготривалу міцність, а опір повзучості при короткотривалих випробуваннях може навіть зростати, при довготривалих випробуваннях ці показники знижуються. Тому для сплавів, призначених для довготривалої експлуатації, σ-фаза є особливо шкідливою. Для запобігання її утворенню сплави повинні містити мінімальну кількість домішок, хоча вольфрам, титан і алюміній сприяють її формуванню.

Молібден підвищує температуру рекристалізації γ-твердого розчину, уповільнює знеміцнення, ускладнює дифузійний обмін, рекристалізацію та коагуляцію дисперсних частинок. Він може утворювати фази типу Лавеса Fe2Mo, що сприяє підвищенню жароміцності за рахунок дисперсійного зміцнення.

Вольфрам є корисною добавкою, що підвищує температуру рекристалізації та гальмує дифузійні процеси в області знеміцнення сплаву. Він входить до складу фаз Лавеса типу Fe2W. Через схильність до нерівномірного розподілу та ліквації вольфрам часто вводять разом із молібденом [5].

На рисунку 2.6 зображено кінетику виділення фаз Лавеса залежно від температури старіння. Склад цих фаз змінюється відповідно до легування, оскільки вони можуть розчиняти нікель, утворюючи сполуки $(Fe, Ni, Cr)_2W$ та $(Fe, Ni, Cr)_2(W, Mo)$. Фази відрізняються термічною стабільністю: фаза з вольфрамом більш стійка до коагуляції та розчинення, ніж з молібденом. Частинки Fe2Mo починають розчинятися при температурах 900-950°C, а частинки Fe_2W – при 1000-1050°C. Завдяки фазам Лавеса в сплавах, що зміцнюються γ', можна отримати хороші характеристики жароміцності при задовільній пластичності в умовах довготривалої експлуатації (10000-50000 годин).

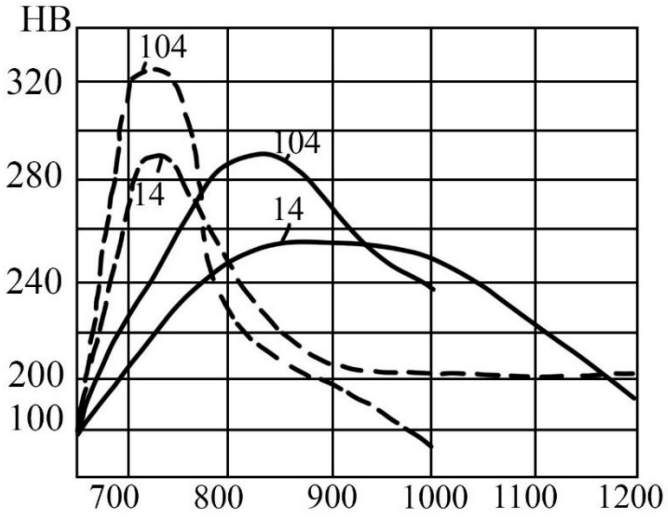

Рисунок 2.6 – Кінетика виділення фаз Лавеса

Титан є ефективним зміцнювачем, що видно з рисунку 2.7, оскільки при старінні він утворює разом із нікелем γ'-фазу Ni_3Ti, яка значно підвищує твердість, характеристики міцності та жароміцності за рахунок дисперсійного твердіння [4].

Вуглець використовується для утворення первинних карбідів типу MC, що перешкоджають надмірному росту зерна при тепловій обробці, та для формування карбідів сприятливої морфології на межах зерен. Найчастіше до складу первинного карбіду входить титан, хоча може міститися і молібден. Вуглець майже не впливає на жароміцність, якщо він розчинений в основній масі. Однак у формі карбідів він може знижувати жароміцність з двох основних причин: 1) зв'язуючи значну кількість легуючого елементу та збіднюючи основну масу; 2) створюючи неоднорідну структуру через наявність карбідної фази.

Термічна обробка сталі ХН35ВТ (ЭИ612) включає гартування (обробку на твердий розчин) та подвійне старіння. Металографічні дослідження сплавів при різних температурах гартування показали, що після гартування з температур 1000-1180°С сплав має типову структуру аустеніту з різним розміром зерна залежно від температури попередньої обробки. Розподіл сполук між металами та карбідних фаз залежить від стану розчину перед

старінням, тобто від температури нагріву сплаву під гартування та швидкості охолодження. На рисунку 2.8 показано вплив температури гартування, а на рисунку 2.9 – вплив середовища охолодження на властивості сталі [6].

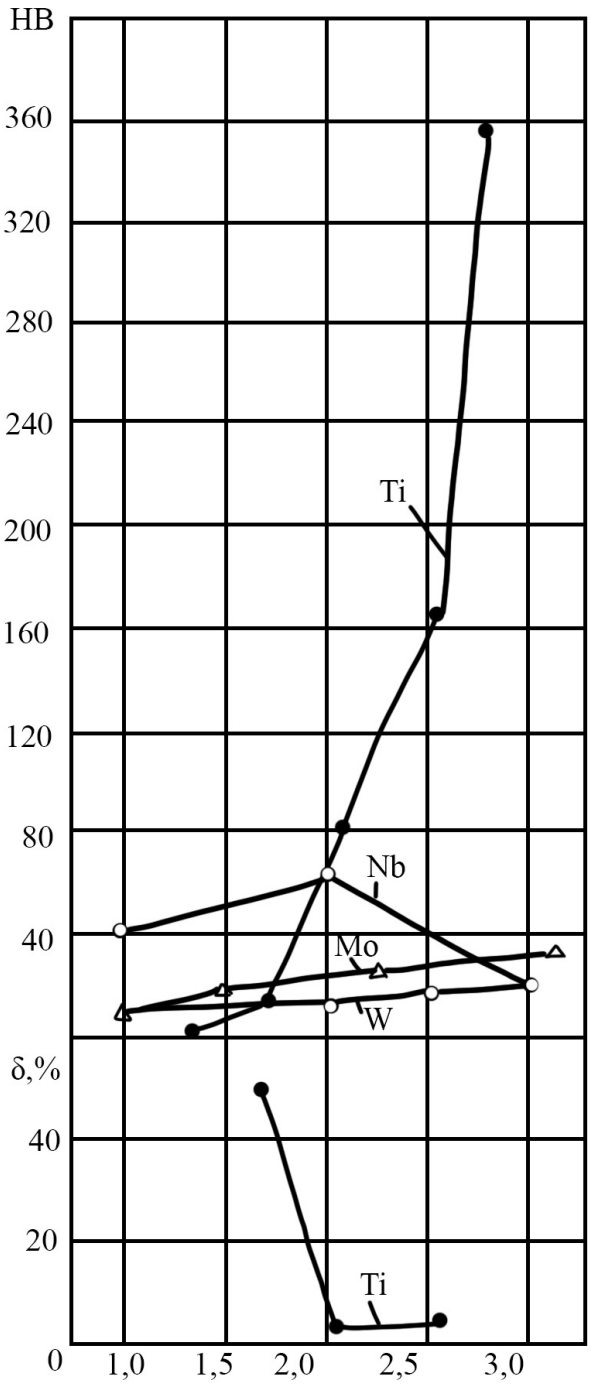

Рисунок 2.7 – Вплив легувальних елементів на властивості сплавів після старіння при 700 °С впродовж 16 год.

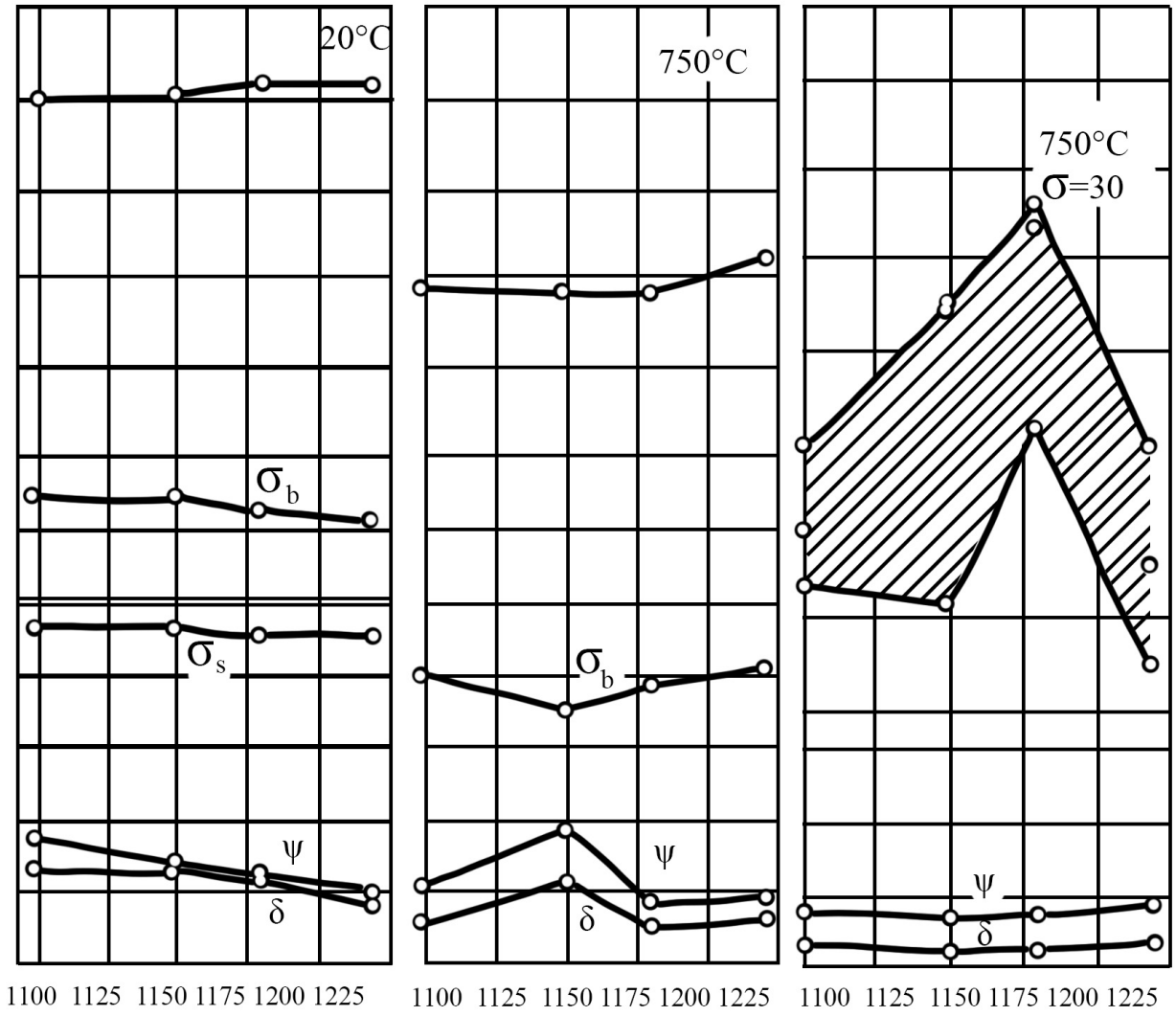

Рисунок 2.8 – Вплив температури гартування на зміну механічних властивостей та довготривалу міцність (охолодження від температури гартування на повітрі) [14]

Найкращі властивості сталі ХН35ВТ досягаються при температурі гартування 1180°С. Проте важливо зазначити, що охолодження із температур гартування на повітрі не забезпечує отримання високих жароміцних характеристик матеріалу. Для досягнення оптимальних жароміцних властивостей необхідне більш швидке охолодження, а саме в оливі.

Слід враховувати, що використання води як охолоджувального середовища для деталей складної конфігурації несе в собі суттєві ризики. Швидке та нерівномірне охолодження у воді може призвести до формування значних внутрішніх напружень та утворення мікронадривів у структурі

матеріалу. Більше того, під час подальшого процесу старіння ці дефекти можуть розвиватись у повноцінні тріщини, що критично погіршить механічні характеристики та експлуатаційні властивості деталі.

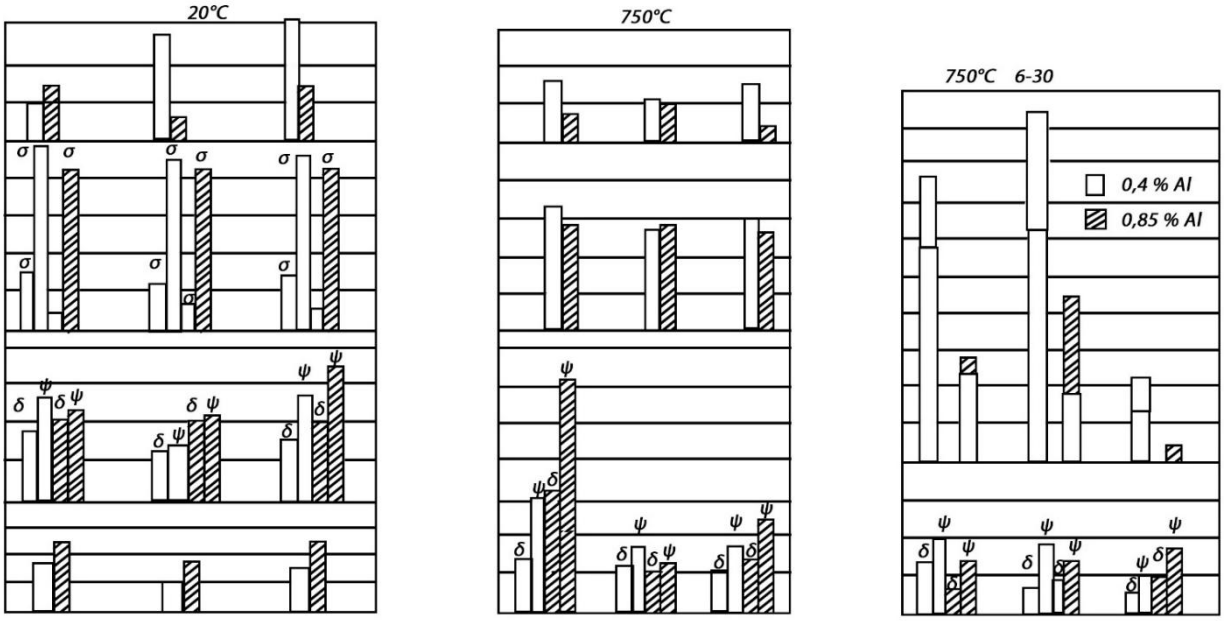

Рисунок 2.9 – Вплив швидкості охолодження при гартуванні від 1180°С на механічні властивості та довготривалу міцність [14]

Таким чином, оптимальним режимом термічної обробки для сталі ХН35ВТ є гартування з температури 1180°С з охолодженням у оливі, що забезпечує необхідний баланс між швидкістю охолодження для формування потрібної структури та запобіганням утворенню небезпечних дефектів [15, 16].

Для сплаву ХН35ВТ рекомендованою температурою гартування є 1180°С з подальшим охолодженням у воді. Це забезпечує оптимальні структурні характеристики матеріалу. Важливо відзначити, що нагрівання вище 1200°С слід уникати, оскільки при таких температурах по границях зерен з'являється евтектична складова, яка сприяє окрихченню сплаву та погіршенню його механічних властивостей.

Основна мета старіння сплаву полягає у створенні ефективного зміцнення за рахунок виділення частинок інтерметалідної γ'-фази. Сплави з

інтерметалідним зміцненням, до яких належить ХН35ВТ, характеризуються меншою температурою розчинення зміцнюючих фаз, особливо γ', а також зниженою схильністю до коагуляції цих фаз, що позитивно впливає на стабільність структури при тривалій експлуатації за підвищених температур [16].

Подвійне старіння є важливим етапом термічної обробки, що забезпечує максимально ефективне поєднання міцності та пластичності в умовах повзучості при температурах 650-750°С. Цей режим термообробки реалізує два різні механізми зміцнення:

1. Під час першого старіння відбувається утворення дисперсних частинок більшого розміру, при взаємодії з якими дислокації зміцнюють сплав за рахунок механізму огинання.
2. При другому старінні формуються частинки меншого розміру, які зміцнюють сплав за рахунок механізму перерізання.

Таким чином, подвійне старіння дозволяє реалізувати одночасно два механізми зміцнення, що суттєво підвищує експлуатаційні характеристики сплаву.

Важливим аспектом процесу старіння є також створення сприятливого розподілу карбідів по межах зерен, що додатково сприяє підвищенню жароміцності та інших експлуатаційних властивостей сплаву ХН35ВТ [15].

2.3 Дослідження механічних характеристик

Випробування на розтяг

На універсальній випробувальній машині УМЕ-10Т проводились стандартизовані випробування на розтяг з використанням циліндричних зразків. Геометричні параметри зразків були визначені згідно зі стандартами:

робоча частина мала форму циліндра з діаметром d_0=10 мм та довжиною l_0=100 мм, що забезпечувало оптимальне співвідношення l_0/d_0=10.

Зразок надійно фіксувався у захватах випробувальної машини та піддавався поступовому розтягуванню до повного руйнування. Під час випробування фіксувалися всі необхідні параметри для визначення ключових механічних характеристик сплаву:

- модуль пружності E (характеризує жорсткість матеріалу)
- границя пропорційності $\sigma_{пц}$ (максимальне напруження, при якому зберігається лінійна залежність між напруженням і деформацією)
- границя міцності $\sigma_{0,02}$ (напруження, що відповідає залишковій деформації 0,02%)
- умовна границя плинності $\sigma_{0,2}$ (напруження, що відповідає залишковій деформації 0,2%)
- фізична границя міцності σ_t
- тимчасовий опір (границя міцності) σ_v (максимальне напруження перед руйнуванням)
- відносне рівномірне подовження δ_r
- відносне видовження після розриву δ (пластичність матеріалу)
- відносне звуження поперечного перерізу після розриву ψ (пластичність матеріалу).

Результати випробувань були представлені у вигляді діаграм розтягу для зразків, які пройшли термічну обробку при різних температурах відпуску (рис/ 2.10). Такі діаграми наочно демонструють залежність механічних властивостей сплаву від режимів термообробки [18, 19].

Ударні випробування

Для оцінки здатності матеріалу чинити опір динамічним навантаженням проводились ударні випробування на маятниковому копрі (рис. 2.11) з граничною енергією 300 Дж. Використовувались зразки з перерізом 10×10 мм та довжиною 55 мм двох типів: зразки з U-подібним концентратором

напруження (радіус r = 1 мм) для визначення ударної в'язкості KCU та зразки без концентратора для визначення ударної в'язкості KC.

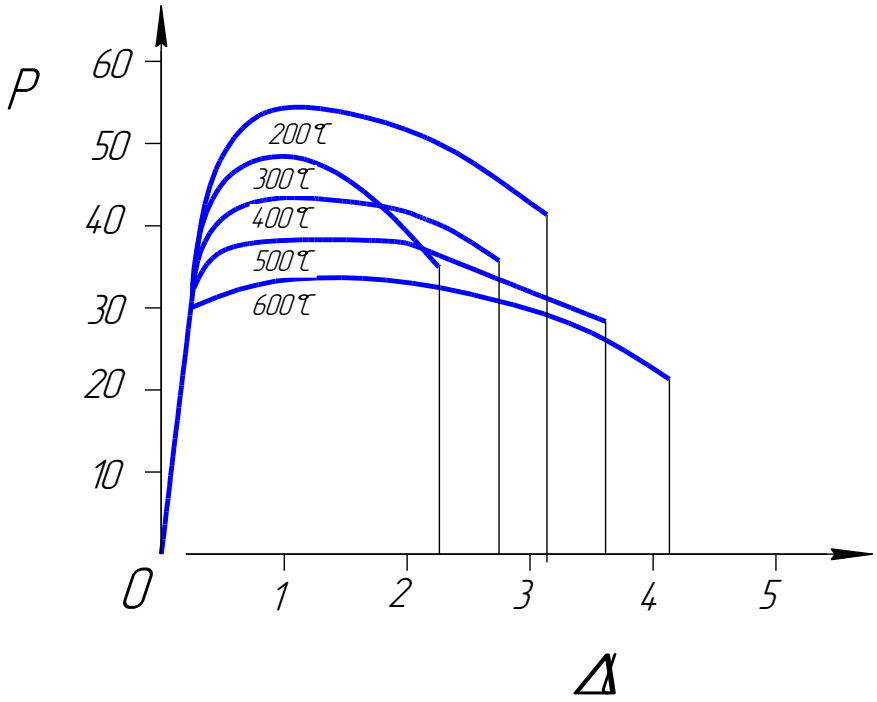

Рисунок 2.10 – Діаграма розтягу зразків

Рисунок 2.11 – Маятниковий копер

Методика проведення випробувань включала наступні етапи:

1. Підняття та фіксація маятника у верхньому положенні за допомогою шаблону
2. Встановлення стрілки копра на нульову позначку
3. Симетричне розміщення зразка на нижніх опорах копра з орієнтацією U-подібного надрізу в протилежну сторону від напрямку удару
4. Вивільнення маятника шляхом відпускання засувки
5. Фіксація показань стрілки, що вказує на енергію, яка залишилась у маятнику після руйнування зразка [18, 19].

Робота руйнування ΔWF розраховувалась за формулою: $\Delta WF = Gh_1 - Gh_2 - W_{втрат}$

де:G - вага маятника

h_1 - висота підйому маятника до удару

h_2 - висота підйому маятника після удару

$W_{втрат}$ - енергія втрат (на подолання тертя в вузлах копра, струшення копра і фундаменту, зминання зразка на опорах і під ножем, кінетична енергія уламків та пружна деформація штанги).

Вимірювання твердості

Твердість за шкалою Роквела (HRC) визначалась у відповідності до ДСТУ EN ISO 6508-1:2019 "Матеріали металеві. Визначення твердості за Роквеллом. Частина 1. Метод випробування" (EN ISO 6508-1:2016, IDT; ISO 6508-1:2016, IDT) на приладі ТК-2 (твердомір конусний). Як індентор використовувався алмазний конус з кутом при вершині 120°. Застосовувались наступні параметри навантаження:

попереднє навантаження $P_0 = 98$ Н

основне навантаження $P_1 = 1373$ Н

сумарне навантаження $P = 1471$ Н

Твердість за Роквелом визначалась як різниця глибин проникнення індентора після прикладання попереднього (P_0) та основного (P_1)

навантаження. Для вимірювання використовувались зразки розмірами 10×10×20 мм або 10×10×30 мм.

Випробування проводились з дотриманням наступних вимог:

- температура випробувального середовища 20°С.
- захист пристрою від ударів та вібрацій.
- ретельне очищення опорних поверхонь робочого столика та зразка.
- стабільне розміщення зразка без зміщення та прогину.
- дотримання границь вимірювання твердості за шкалою С: 20...67 одиниць.

Процедура вимірювання твердості включала:

1. Забезпечення перпендикулярності навантаження до випробовуваної поверхні.
2. Плавне прикладання попереднього навантаження P_0.
3. Плавне прикладання основного навантаження протягом 2-8 секунд.
4. Витримка 2 секунди та плавне зняття основного навантаження.
5. Відлік результатів за шкалою індикатора при дії попереднього навантаження з округленням до 0,5 поділки.

Для забезпечення точності результатів дотримувалась мінімальна відстань між центрами двох сусідніх відбитків або від центру відбитку до краю зразка - не менше 3 мм [18, 19].

Комплексний аналіз результатів усіх проведених випробувань дозволив отримати повну картину механічних властивостей досліджуваного сплаву та встановити вплив різних режимів термічної обробки на його експлуатаційні характеристики.

2.4 Дослідження мікроструктури

Дослідження мікроструктури сплаву виконували за допомогою методів оптичної та електронної мікроскопії. Для підготовки металографічних шліфів використовували такі операції: вирізання зразка, його обробка, шліфування, полірування та травлення. Процес шліфування (рис. 2.12) починали з більш абразивного паперу (з номером 60), згодом переходили до дрібнішого та завершували на папері з номером 220-280. Зразок шліфували, притискаючи його до обертаючогося диска. Після кожного змінюваного паперу зразок очищали від наждачного пилу та шліфували, поки не зникав слід попередньої обробки. Після тонкого шліфування зразок мили водою, щоб видалити залишки абразиву, та полірували.

Механічне полірування виконували протягом 8-10 секунд на спеціальному верстаті (рис. 2.12) з фетровим диском, змоченим розчином H_2O та Al_2O_3. Для виявлення мікроструктури зразки піддавали травленню у спеціальних реактивах. Для загальної структури використовували 4% розчин HNO_3 в етиловому спирті (реактив Нітал), а для виявлення границь зерен — розчин пікринової кислоти в етиловому спирті. Час травлення становив від 5 до 20 секунд залежно від складу сплаву та режиму термообробки. Після травлення зразки промивали етиловим спиртом та висушували [18].

Рисунок 2.12 – Шліфувально-полірувальний станок

Для вивчення мікроструктури використовували горизонтальний металографічний мікроскоп (рис. 2.13). Він мав можливість проводити дослідження у світлому полі, темному полі, у поляризованому світлі, а також мав різні насадки та об'єктиви для збільшення від ×100 до ×1350. Предметний столик мікроскопа мав механізми для координатного переміщення об'єкта з діапазоном 25×25 мм та точністю 0,01 мм. Освітлення забезпечувалося від електролампи розжарювання потужністю 170 Вт з регульованою інтенсивністю світлового потоку [18].

Для отримання зображень досліджуваних поверхонь в цифровому форматі використовували окулярну веб-камеру UMD300 з роздільною здатністю 3,0 Мп та інтерфейсом USB 2.0. Програмне забезпечення Image Analyzer дозволяло проводити вимірювання лінійних розмірів, площі, периметра мікроструктурних складових та статистичну обробку результатів. Цифрові зображення мікроструктури зберігались у форматі TIFF з роздільною здатністю 2048×1536 пікселів для подальшого аналізу.

Рисунок 2.13 – Металографічний мікроскоп Optika IM-3MET

Результати мікроструктурного аналізу використовувались для встановлення взаємозв'язку між структурним станом досліджуваного сплаву та його механічними властивостями, визначеними під час випробувань на розтяг, ударну в'язкість та твердість [18, 19].

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Маршрутна технологія виготовлення диску ТНТ

Технологія виготовлення виробів на машинобудівних, інструментальних та спеціальних заготівельних підприємствах ґрунтується на виконанні логічної послідовності технологічних операцій. Ця послідовність забезпечує отримання якісних виробів з необхідними характеристиками та властивостями матеріалу.

Особливістю виробничого процесу є те, що під час виготовлення диску гарячого тракту турбіни низького тиску деталь піддається термічній обробці декілька разів. Термічна обробка в маршрутній технології може бути:

- Попередньою
- Основною
- Додатковою.

Маршрутна технологія описує рух заготовок по цехах та відділеннях підприємства із зазначенням усіх виконуваних операцій. Важливо, що деякі операції можуть повторюватись, але з різним призначенням та режимами. Такі повторення спрямовані на послідовну зміну форми виробу, розмірів, шорсткості поверхні, мікроструктури, механічних та експлуатаційних властивостей.

Для диску гарячого тракту турбіни низького тиску, який виготовляється зі сплаву ХН35ВТ, маршрутна технологія детально викладена в таблиці 3.1. Ця таблиця представляє покрокову послідовність виробничих операцій, включаючи всі етапи термічної обробки, механічної обробки та контролю якості, що необхідні для отримання кінцевого виробу з потрібними характеристиками для роботи в умовах високих температур та навантажень.

Така структурована маршрутна технологія є критично важливою для забезпечення відтворюваності результатів виробництва та підтримки стабільно високої якості готових дисків турбіни низького тиску. Особлива

увага при виготовленні дисків приділяється забезпеченню рівномірних властивостей по перерізу деталі, мінімізації залишкових напружень та високій точності геометричних розмірів, що безпосередньо впливає на балансування та ефективність роботи турбіни в цілому.

Таблиця 3.1 – Маршрутна технологія виготовлення виробу диску гарячого тракту турбіни низького тиску

№ п/п	Технологічна операція	Місце виконання	Функціональне призначення
1	2	3	4
1	Вхідний контроль матеріалу	Заготівельний цех або заготівельна дільниця ковальського цеху	Перевірка відповідності хімічного складу, оцінка макроструктури та виявлення можливих дефектів у вихідних зливках
2	Ковальські операції	Ковальський цех	Формування первинних габаритів, конфігурації та оптимальної макроструктури заготовки диска
3	Первинна механічна обробка	Механічний цех	Формування проміжної геометрії та розмірів заготовки диска відповідно до технологічних вимог
4	Проміжний технічний контроль	Термічний цех	Проведення візуальної інспекції, аналіз макроструктури та неруйнівний рентгенівський контроль
5	Комплексна термічна обробка	Термічний цех	Забезпечення необхідних експлуатаційних характеристик матеріалу диска згідно з технічними вимогами (гартування з подальшим старінням)
6	Контроль якості термообробки	Термічний цех	Виявлення потенційних дефектів, що виникли під час термічної обробки, та підтвердження досягнення заданих механічних властивостей і показників жароміцності

Кінець таблиці 3.1

1	2	3	4
7	Фінішна механічна обробка	Механічний цех	Доведення геометричних параметрів, розмірної точності та якості поверхні диска до вимог робочої документації
8	Фінальний контроль якості	Механічний цех	Перевірка поверхні на наявність дефектів з використанням капілярного методу (ЛЮМ), оцінка втомних характеристик диска та аналіз його частотних властивостей

3.2 Розробка режимів та технології термічної обробки

Технологія термічної обробки є невід'ємною складовою частиною технологічного процесу виготовлення виробу. Вона забезпечує отримання необхідної структури, механічних та експлуатаційних властивостей, а також загальної якості кінцевого виробу.

При розробці технології термічної обробки необхідно здійснювати вибір основних операцій таким чином, щоб забезпечити високу продуктивність процесу, раціональне використання матеріальних та енергетичних ресурсів, і головне – досягти високої якості продукції.

Для диску газової турбіни зі сплаву ХН35ВТ висунуто суворі вимоги щодо механічних та експлуатаційних характеристик: σ_B повинна становити 720 МПа, $\sigma_{0,2}$ – 400 МПа, δ – 13%, KCU – 400 КДж/м². Також диск повинен відповідати жароміцним характеристикам, а саме: σ_{1000}^{650} має перевищувати 220 МПа, а на базі σ_{100000}^{65} – бути вищою за 130 МПа.

Для забезпечення цього комплексу властивостей розроблено технологію термічної обробки, яка складається з таких основних операцій, як гартування та подвійне старіння. До допоміжних операцій при цьому відносяться різноманітні контрольні операції, які виконуються між основними технологічними етапами для забезпечення якості виробу [14, 15].

Згідно з графіком термічної обробки, представленим на рисунку 3.1, для диску газової турбіни обрано наступні режими термічної обробки. Для гартування застосовуються температури в діапазоні 1080-1100°С з подальшим охолодженням в аргоні. Перше старіння проводиться при температурах 850-900°С також з охолодженням в середовищі аргону. Друге старіння виконується при температурі 700°С з охолодженням в аргоні.

Розрахунок часу, що витрачається на процес гартування, проводиться за формулою [20]

$$\tau_{заг} = \tau_{н} + \tau_{в} + \tau_{ох},$$

де $\tau_{н}$ – час нагрівання до заданої температури, хв;

$\tau_{в}$ – час витримки при технологічній температурі, хв.

Вироби завантажуються у нагріту піч. Для розрахунку часу нагрівання диску газової турбіни до заданої температури використовується формула

$$\tau_{н} = S \cdot k \cdot f \cdot L_{л}$$

де S – характеристичний розмір виробу, мм;

k – коефіцієнт форми; 0,75

f – коефіцієнт розташування виробів в нагрівальному пристрої; 1,4

$L_{л}$ – коефіцієнт легування сталі, хв/мм. 0,27

Формула враховує розміри та форму диску, теплові властивості сплаву ХН35ВТ та характеристики нагрівального обладнання. Точне визначення часу нагрівання необхідне для забезпечення рівномірного прогріву всього об'єму деталі, що запобігає виникненню небажаних термічних напружень та деформацій.

Звідси, час нагрівання під гартування для диску газової турбіни зі сплаву ХН35ВТ складає:

$$\tau_н = 188 \cdot 0,75 \cdot 1,4 \cdot 0,27 = 53,29 \text{ хв.}$$

Охолодження, сам процес гартування проводився в середовищі аргону впродовж:

$$\tau_{ox} = \frac{1080 - 20}{70°C / хв.} = 15хв.$$

Витримка при температурі гартування 1180°С згідно довідникових даних становить

$$\tau_В = 1 – 1,5 \text{ год.}$$

Таким чином загальний час, необхідний для здійснення операції гартування становить:

$$\tau_{заг} = \tau_н + \tau_{ох} = 2,1 \text{ год.}$$

Розрахуємо час, що необхідний для проведення операції старіння.

Перше старіння (температура нагрівання 850°С):

$$\tau_{н1} = 188 \cdot 2,66 \cdot 1,4 \cdot 0,27 = 189,5 \text{ хв.}$$

Час витримки $\tau_в$ згідно з довідниковими даними, становить 10 год = 600хв.

Охолодження після старіння відбувається в середовищі аргону, і швидкість охолодження при цьому складає 70 °С/хв. Тому, час необхідний для охолодження:

$$\tau_{ox1} = \frac{850 - 20}{70°C / хв.} = 11,85хв.$$

(температура нагрівання 700°С)

$$\tau_{н2}=188\cdot4,3\cdot1,4\cdot0,27=305,97хв.$$

Час витримки $\tau_в$ згідно з довідниковими даними, становить 30 год = 1800хв.

Охолодження після старіння відбувається в аргоні, за швидкості охолодження 70 °С/хв.:

$$\tau_{ox2}=\frac{700-20}{70°C/хв.}=9,71хв.$$

Загальний час, необхідний для проведення операції старіння складає [13]:

$$\tau_{заг}=\tau_{заг(гар)}+\tau_{н1}+\tau_в+\tau_{ох}+\tau_{н2}+\tau_{в+}\tau_{ох2}=50,75 \text{ год.}$$

Розрахуємо масу садки для проведення операцій гартування та старіння.

Для здійснення гартування диску газової турбіни обрано піч СНВ-3.6.3/13. Це електрична камерна піч з вакуумним (контрольованим) середовищем, що має робочий простір розмірами 600×300×300 мм. Максимальна температура нагріву печі становить 1300°С. В якості охолоджувального середовища використовується аргон.

Розраховуємо кількість виробів що поміщуються по довжині робочого простору печі СНВ-3.6.3/13:

$$n_д = L/(D+D/2)$$

де L – довжина робочого простору, 600мм;

D– діаметр заготовки, 188мм;

$$n_д=600/(188+188/2) \approx 2 \text{ шт}$$

Розрахуємо кількість виробів, що поміщуються по ширині робочого простору печі [13]:

$$n_ш = Ш/(d+d/2)$$

де Ш – ширина робочого простору, 300мм;

d – ширина заготовки, 188мм;

$$n_ш=300/(188+188/2) \approx 1 \text{ шт.}$$

Тоді в одному ярусі розташовується: $n_{яр} = n_д \cdot n_ш = 2 \cdot 1 = 2$шт. виробів.

Розраховуємо кількість виробів робочого простору по висоті:

$$n_b = B/(b+b/2)$$

де В – висота робочого простору, 300мм;

b – висота заготовки, 36мм;

$$n_b = 300/(36+18) = 5 \text{ яр}$$

Кількість виробів в печі розраховуємо за формулою [13]:

$$N= n_{яр} \cdot n_b = 5 \cdot 2=10 \text{ шт.}$$

Маса заготовки обчислюється як добуток її об’єму V (999,33 $см^3$) на густину сплаву (ρ =8,164 $г/см^3$):

$$M_з = V \times \rho = 999{,}33 \cdot 8{,}164 = 8158{,}53 \text{ г}$$

Звідси маса садки

$$M_с = 8158{,}53 \text{ г} \cdot 10 = 81583{,}3 \text{г} = 81{,}58 \text{ кг}.$$

Для першого старіння доречно використати ту ж саму піч, що й для гартування - СНВ-3.6.3/13.

Для другого старіння обрано піч СНВ 5.10.5/9. Це електрична камерна піч з вакуумним (контрольованим) середовищем, яка має більші розміри робочого простору: 1000×500×500 мм. Максимальна температура нагріву цієї печі становить 900°С. В якості охолоджувального середовища також використовується аргон.

$$n_д = L/(D+D/2)$$

де L – довжина робочого простору, 1000мм;

D– діаметр заготовки, 188мм;

$$n_д = 1000/(188+94) = 3 \text{ шт}.$$

Розрахуємо кількість виробів, що вміщуються по ширині робочого простору печі:

$$n_ш = Ш/(d+d/2)$$

де Ш – ширина робочого простору, 500мм;

d – ширина заготовки, 188мм;

$$n_ш = 500/(188+188/2) \approx 1 \text{ шт}$$

Тоді в одному ярусі розташовується: $n_{яр}= n_д \cdot n_ш=3 \cdot 1=3$шт. виробів.

Розраховуємо кількість виробів робочого простору по висоті:

$$n_b =B/(b+b/2)$$

де B – висота робочого простору, 500мм;

b – висота заготовки, 36мм;

$$n_b =500/(36+36/2) \approx 9 \text{ шт.}$$

Кількість виробів в печі розраховуємо за формулою:

$$N= n_{яр} \cdot n_b = 3 \cdot 9 = 27 \text{ шт.}$$

Маса заготовки обчислюється як добуток її об'єму V (999,33 $см^3$) на густину сплаву (ρ =8,164 $г/см^3$)

$$M_з= V \cdot \rho = 999,33 \cdot 8,164 = 8158,53 \text{ г.}$$

Звідси маса садки

$$M_c=8158,53 \text{ г} \cdot 27 \text{ шт.} = 220280,31 \text{ г} = 220,28 \text{ кг.}$$

Таблиця 3.2 – Карта технологічного процесу термічного оброблення диску газової турбіни

Ескіз виробу		Технічні вимоги				
Дивись креслення 1		Матеріал		Властивості		Структура
		Сплав ХН35ВТ		$\sigma_в^{20}$=720МПа, $\sigma_{0,2}$=400МПа, δ=13%, KCU= 400КДж/м^2, σ_{1000}^{650}>220МПа, $\sigma_{1/100000}^{650}$ >130МПа		
№	Операція або перехід	Обладнання прилади або інструменти	Умови нагрівання: t, τ, середовище, його склад .	Умови охолодження: $t_К$, V, середовище, тривалість	Пристосування технологічність та кількість виробу в ньому	Умови оброблення та контролю
1	2	3	4	5	6	7
1.	Вхідний контроль	Стилоскоп, штангенциркуль, мікрометр				Хімічний склад, розміри, відсутність поверхневих дефектів.
2.	Гартування Нагрів	СНВ3.6.3/13	$t_н$=20 -1080ºС; $\tau_н$=53,29хв, вакуум		Піддон,10 виробів, маса 81кг	t; $\tau_н$, тиск вакууму, а також кількість виробів в садці
2.1	Витримка	СНВ 3.6.3/13	$t_в$=1080ºС $\tau_в$=60хв. вакуум		Піддон,10 виробів, маса 81кг	t; $\tau_в$, тиск вакууму, а також кількість виробів в садці
2.2	Охолодження	СНВ 3.6.3/13		$t_п$=1080±10ºС; $t_к$=20ºС; $V_{ох}$=70ºС/хв, $\tau_{ох}$=15хв; аргон	Піддон,10 виробів, маса 81кг	$t_п$, $t_к$,$\tau_{ох}$,$V_{ох}$,
3.	Контроль	ТШ, металографічний мікроскоп МІМ-7				мікроструктуру, геометрію,зовнішній огляд, номер зерна

Продовження таблиці 3.2

1	2	3	4	5	6	7
4	Старіння					
4.1	Перше старіння Нагрівання	СНВ 3.6.3/13	$t_н$=20-850ºС; $\tau_н$=189,5хв, вакуум		Піддон,10 виробів, маса 81кг	t; $\tau_н$, тиск вакууму, а також кількість виробів в садці
4.2	Витримка	СНВ 3.6.3/13	$t_в$=850ºС $\tau_в$=600хв. вакуум		Піддон,10 виробів, маса 81кг	t; $\tau_в$, тиск вакууму, а також кількість виробів в садці
4.3	Охолодження	СНВ 3.6.3/13		$t_п$=850±10ºС; $t_к$=20ºС; $V_{ох}$=70ºС/хв, $\tau_{ох}$=11,85; повітря	Піддон,10 виробів, маса 81кг	$t_п$, $t_к$,$\tau_{ох}$,$V_{ох}$.
4.4	Друге старіння Нагрівання	СНВ 5.10.5/9:	tн=20-700ºС; τн=305,97хв, вакуум		Піддон,27 виробів, маса 220кг	t; τн, тиск вакууму, а також кількість виробів в садці
4.5	Витримка	СНВ 5.10.5/9:	$t_в$=700ºС τв=1800хв. вакуум		Піддон,27 виробів, маса 220кг	t; τв, тиск вакууму, а також кількість виробів в садці
4.6	Охолодження	СНВ 5.10.5/9		tп=700±10ºС; tк=20ºС; Vox=70ºС/хв, τox=9,7хв; аргон	Піддон,27 виробів, маса 220кг	tп, tк,τox,Vox.

Кінець таблиці 3.2

1	2	3	4	5	6	7
5	Остаточний контроль.	ТШ, металографічний мікроскоп МІМ-7				Контролюється механічні властивості, структура.

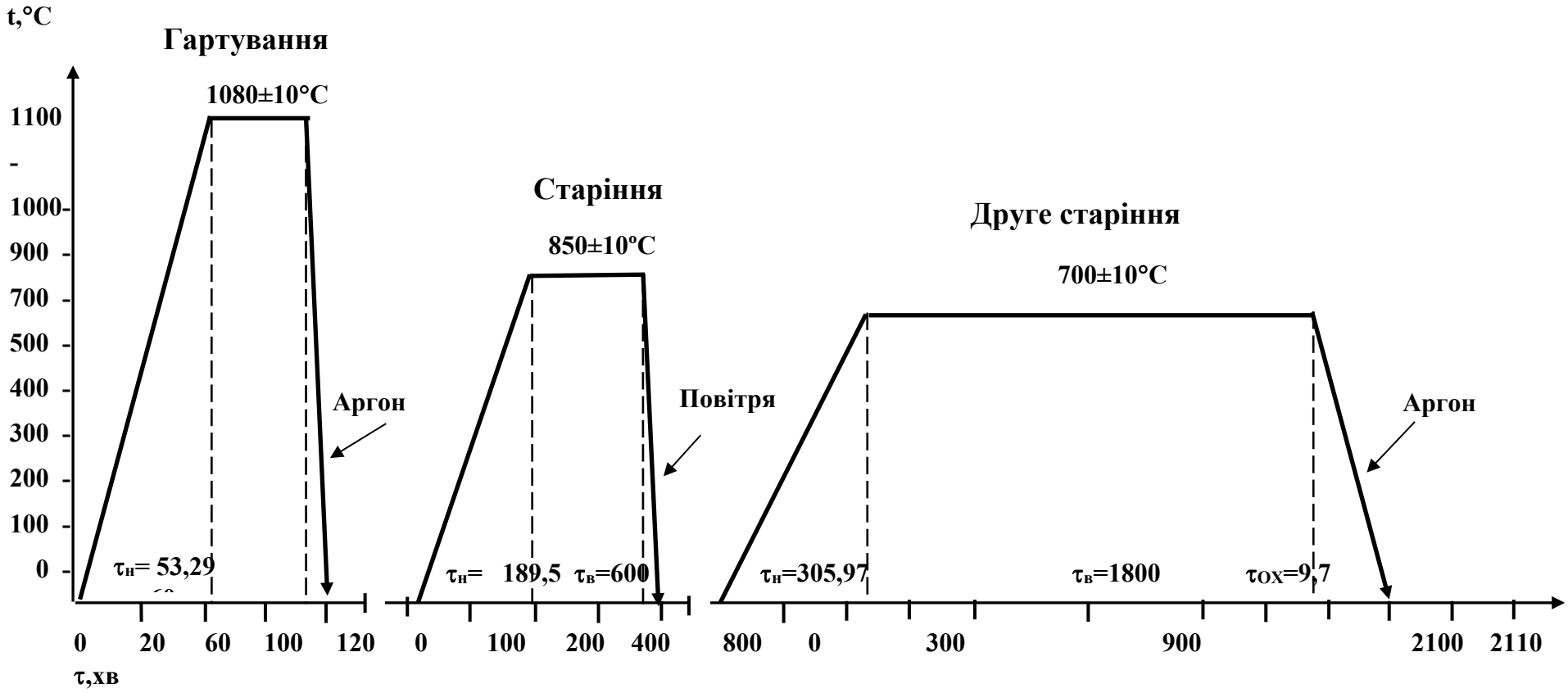

Рисунок 3.1 – Графік термічної обробки диску газової турбіни зі сплаву

3.3 Технічний контроль, попередження та виправлення дефектів

Забезпечення високої якості дисків газової турбіни досягається завдяки системному проведенню контрольних операцій на всіх етапах виробництва.

На етапі вхідного контролю здійснюється ретельна перевірка сировинних матеріалів та хімічних компонентів, що використовуються у виробничому процесі. Цей етап контролю гарантує відсутність неякісних матеріалів у виробничому циклі. Спеціалісти перевіряють відповідність хімічного складу сплаву технічним вимогам, зазначеним у робочій документації, а також проводять діагностику на наявність структурних і геометричних дефектів заготовок.

Міжопераційний контроль зосереджується на перевірці технологічної готовності термічного обладнання та оснащення перед початком термообробки. В ході цього контролю фахівці забезпечують точне вимірювання, регулювання та документування температурних режимів за допомогою автоматичних систем моніторингу. Особлива увага приділяється дотриманню часових інтервалів під час нагрівання та охолодження дисків [2, 3].

У процесі поточного контролю проводиться моніторинг усіх технологічних параметрів: температурних режимів, тривалості обробки, конфігурації розміщення деталей, витрат технологічних середовищ, параметрів тиску, характеристик охолоджувального середовища. Також аналізуються структурні та фізико-механічні властивості дисків після кожного етапу термообробки.

Вихідний контроль є завершальним і критично важливим етапом, оскільки після термічної обробки диски направляються на подальше механічне оброблення та складальні операції. Тому перед передачею на наступні виробничі дільниці необхідно переконатись у відповідності структурних та механічних характеристик дисків встановленим вимогам [2].

Ключовими методами контролю якості дисків після завершення термообробки є:

- візуальна інспекція всіх без винятку дисків на предмет виявлення тріщин, оплавлень та інших поверхневих дефектів
- металографічне дослідження мікроструктури
- випробування зразків на відповідність характеристикам жароміцності

У таблиці 3.3 наведено перелік типових дефектів диску газової турбіни, що можуть виникати внаслідок недотримання технологічних режимів термічної обробки.

Таблиця 3.3 – Можливі дефекти при ТО, їх види, причини появи, заходи по запобіганню та усуненню

Назва операції	Вид дефекту	Причина появи	Заходи по запобіганню	Заходи по усуненню
1	2	3	4	5
Гартування	1.Тріщини	1.1.Неметалеві включення, та інші концентратори напружень.	1.1.Вилучення неметалевих включень додатковою обробкою.	Дефект невипраний
		1.2.Завищена швидкість охолодження при гартуванні.	1.2.Ввикористання оптимального гартівного середовища.	

Продовження таблиці 3.3

		1.3.Завищена швидкість нагрівання.	1.3.Нагрівання з регламентовано ю швидкістю та кінцевою температурою нагрівання.	
		1.4.Завищена температура гартування.		
	2.Крупне зерно аустеніту	Перегрів.	Дотримання оптимальної температури та часу нагрівання.	Повторний гарт
	3.Понижена твердість.	Охолодження зі швидкістю менше критичної.	3.1.Проведення охолодження у відповідному середовищі.	Повтеорне термічне оброблення
	4.Коробленн я	4.1.Нераціональн е розташування виробів в садці. 4.2.Охолодження з високою швидкістю.	4.1.Дотримання схеми садки при її формуванні. 4.2.Гартування у відповідному середовищі.	Дефект невиправни й
Старін -ня	Понижена жароміцність	1.1. Недостарю-вання, низька температура старіння або недостатня тривалість витримки	1.1.Контроль температури та тривалості процесу старіння.	1.1. Повторне старіння.

Кінець таблиці 3.3

		1.2 Перестарювання, висока температура старіння або завищена тривалість витримки	1.2.Контроль температури та тривалості процесу старіння.	1.2. Повторне достарюван-ня.

Таким чином передбачені в технологічній карті види контролю перевіряють наступні характеристики виробу.Вхідний контроль забезпечує первинну перевірку характеристик матеріалу та заготовок:

- хімічний склад контролюється як обов'язкова операція для встановлення відповідності матеріалу виробів вимогам робочого креслення. Для цього використовуються експресні методи контролю, такі як спектральний та хроматографічний аналіз. Основним приладом для проведення такого контролю слугує стилоскоп;
- розмір та геометрія виробів оцінюються разом із станом поверхні, при цьому на поверхні не повинно бути грубих подряпин, вдавлювань і тріщин;
- мікроструктура шару досліджується за допомогою рентгеноструктурних, рентгеноспектральних методів та з використанням оптичних мікроскопів.

Поточний контроль проводиться після виконання як основних, так і додаткових операцій. Зокрема, після гартування обов'язково контролюється твердість матеріалу та розмір зерна. Для визначення твердості застосовуються твердоміри, а для оцінки структурних параметрів сталі використовується металографічний метод дослідження [2, 7].

Вихідний або завершальний контроль є заключним етапом перевірки, під час якого обов'язковій перевірці підлягають усі параметри виробу, які безпосередньо передбачені технічним кресленням та нормативною документацією.

3.4 Аналіз причин руйнування диска турбіни низького тиску

Руйнування диска турбіни низького тиску (ТНТ) становить серйозну технічну проблему, що потребує ретельного аналізу та вивчення. Розглянемо детальніше основні причини, що призводять до такого руйнування.

Втомне руйнування матеріалу є однією з найпоширеніших причин виходу з ладу дисків ТНТ. Цей процес розвивається поступово внаслідок тривалої дії циклічних навантажень. Під час експлуатації турбіни диск постійно піддається змінним механічним навантаженням, особливо при частих запусках і зупинках обладнання. Кожен такий цикл створює напруження в матеріалі, що з часом призводить до зародження мікротріщин (рис. 3.2). Вони зазвичай виникають у зонах концентрації напружень – біля отворів кріплення, пазів для лопаток, галтельних переходів. Поступово ці мікротріщини збільшуються, об'єднуються і врешті-решт формують магістральну тріщину, яка може спричинити катастрофічне руйнування всього диска. Особливо небезпечними є відцентрові сили, що виникають при обертанні ротора, оскільки вони створюють розтягувальні напруження, які прямо сприяють розвитку втомних тріщин (рис. 3.3) [11].

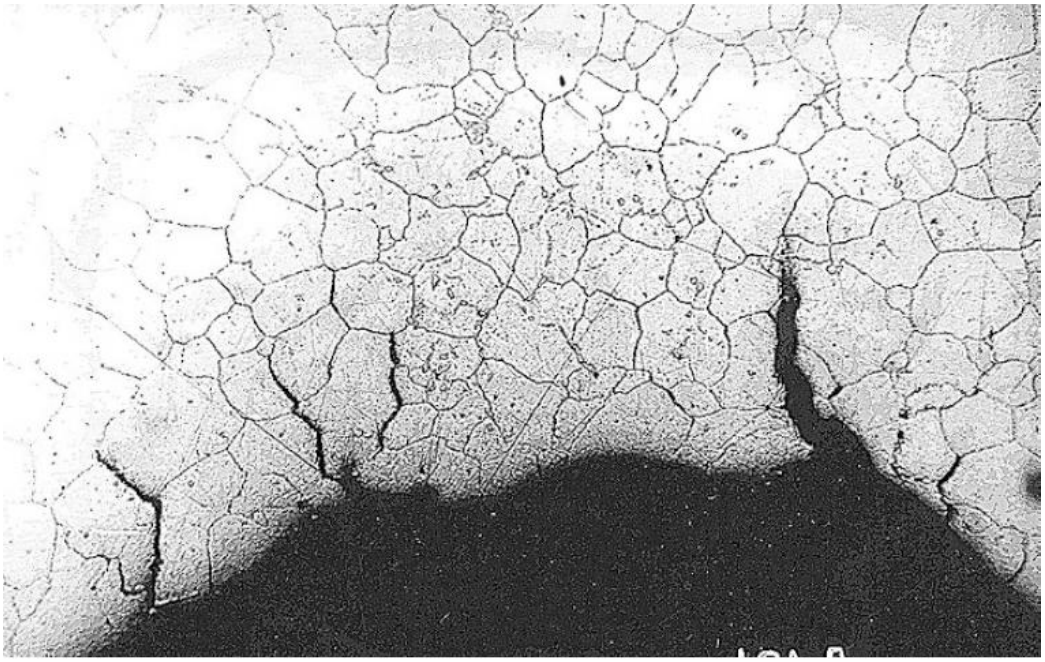

Рисунок 3.2 – Мікротріщини в основі канавки диска

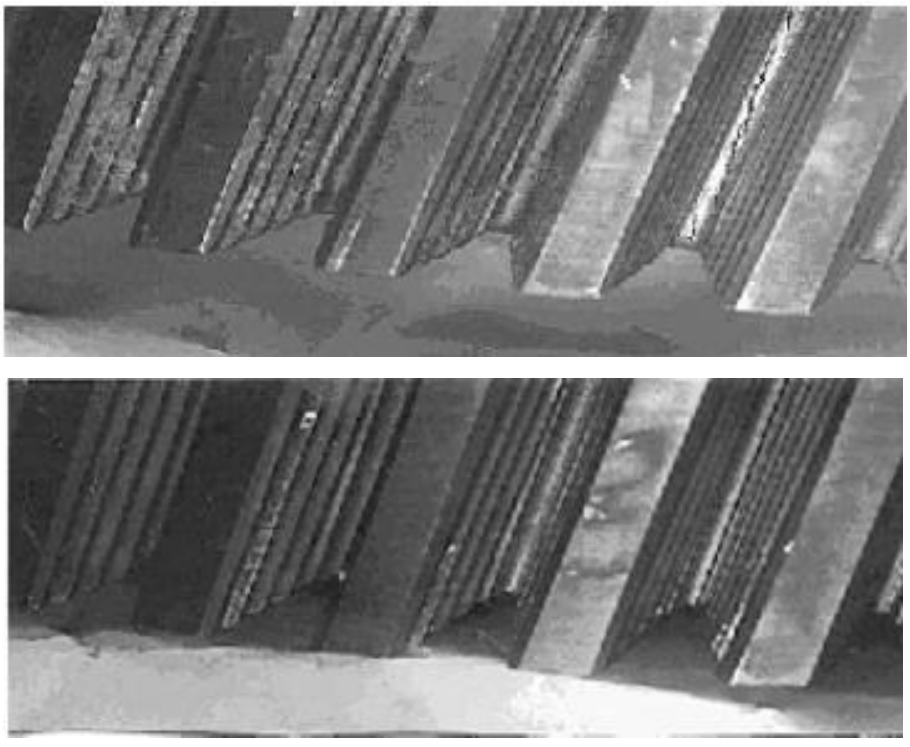

Рисунок 3.3 – Тріщини біля основи шліців дисків, виготовлених зі сталі ЭИ612.

Термічна втома також відіграє значну роль у процесі руйнування дисків турбін низького тиску. Під час роботи турбіни диск зазнає нерівномірного нагрівання – його периферійна частина швидше нагрівається і охолоджується порівняно з центральною масивною частиною. Така температурна нерівномірність призводить до виникнення термічних напружень через різне теплове розширення окремих зон диска. При багаторазовому повторенні циклів нагрівання-охолодження в матеріалі накопичуються пошкодження, що призводять до деградації його структури. Особливо небезпечними є режими швидкого запуску чи аварійної зупинки, коли виникають максимальні температурні градієнти. Постійна зміна температурних режимів викликає також старіння матеріалу, зниження його пластичності та підвищення крихкості, що робить диск більш вразливим до руйнування навіть при номінальних навантаженнях.

Дефекти матеріалу, що виникають під час виготовлення дисків, суттєво впливають на їхню довговічність. Сучасні диски турбін зазвичай виготовляються з високолегованих сталей або спеціальних сплавів шляхом кування з подальшою термічною обробкою. На різних етапах виробництва можуть виникати металургійні дефекти: неоднорідність структури, мікропори, неметалеві включення, локальні відхилення в хімічному складі. Навіть незначні шлакові включення можуть стати концентраторами напружень і осередками зародження тріщин при експлуатації. Проблеми можуть виникати також під час термообробки масивних дисків – недостатня прогартовуваність центральних зон може призводити до неоднорідності механічних властивостей. Механічна обробка також може створювати дефекти поверхні – подряпини, риски, задирки, які стають додатковими концентраторами напружень. Важливо враховувати, що дефекти виготовлення часто мають прихований характер і можуть проявлятися лише після тривалої експлуатації.

Корозійні процеси та ерозійний знос також належать до вагомих факторів руйнування дисків ТНТ. Робоче середовище турбіни – пара або гарячий газ – створює умови для розвитку різних видів корозії. Висока

температура прискорює окислення поверхні і сприяє газовій корозії. Особливо небезпечною є корозія під напруженням, коли хімічний вплив середовища поєднується з механічними навантаженнями, що може призводити до міжкристалітного розтріскування матеріалу. У парових турбінах конденсація вологи може викликати електрохімічну корозію. Крім того, наявність твердих частинок у потоці робочого тіла призводить до ерозійного зносу поверхні диска. Корозійні та ерозійні пошкодження поступово зменшують ефективну товщину матеріалу, створюють поверхневі нерівності, що стають концентраторами напружень і прискорюють розвиток втомних тріщин [11].

Перевищення розрахункових навантажень під час експлуатації є безпосередньою причиною передчасного руйнування дисків. Сучасні турбіни розраховані на роботу в певному діапазоні навантажень і температур. Проте в реальних умовах експлуатації можливі відхилення від нормальних режимів – перевищення частоти обертання, раптові зміни потужності, перегрів. Кожне таке перевантаження зменшує залишковий ресурс диска. Особливо небезпечними є короткочасні пікові навантаження, які можуть не фіксуватися системами контролю, але створювати значні динамічні напруження в матеріалі. Також небезпечними є аварійні ситуації, пов'язані з порушенням роботи системи охолодження, що може призводити до локального перегріву окремих зон диска і виникнення додаткових термічних напружень. Навіть незначне систематичне перевищення проектних навантажень може суттєво скоротити ресурс диска.

Вібраційні явища мають значний вплив на процеси руйнування дисків турбін. Під час роботи турбіни виникають різноманітні вібрації, пов'язані з обертанням ротора, пульсаціями потоку робочого тіла, аеродинамічними процесами навколо лопаток. Особливо небезпечними є резонансні явища, коли частота зовнішнього збудження збігається з власною частотою коливань диска або його окремих елементів. У такому випадку амплітуда коливань може стрімко зростати, створюючи додаткові циклічні напруження, що прискорюють втомне руйнування. Нестабільність потоку робочого тіла може

викликати самозбуджувані коливання лопаток (флатер), які передаються на диск. Тривала робота в умовах підвищеної вібрації призводить до поступового накопичення втомних пошкоджень і може викликати раптове руйнування диска навіть при номінальних навантаженнях.

Неправильний монтаж та дисбаланс ротора також належать до серйозних причин руйнування дисків ТНТ. При складанні турбіни важливо дотримуватись строгих технологічних вимог щодо центрування, балансування, затягування кріплення. Неточності при монтажі можуть призводити до нерівномірного розподілу навантаження на диск, виникнення додаткових згинальних моментів, перекосів. Особливо важливим є правильне балансування ротора в зборі, оскільки навіть незначний дисбаланс при високих обертах створює значні відцентрові сили, що призводять до додаткових циклічних навантажень. Важливе значення має також дотримання правильних моментів затягування кріпильних елементів – як недостатнє, так і надмірне затягування може спричиняти локальні концентрації напружень. Неправильно встановлені зазори між статорними і роторними елементами можуть призводити до задівань, що викликають локальні перегріви та пошкодження [2].

Таким чином, руйнування диска турбіни низького тиску зазвичай є результатом комплексної дії багатьох факторів, що накладаються один на одного і взаємно посилюються. Для забезпечення надійності та безпеки експлуатації турбінного обладнання необхідно враховувати всі вказані причини при проектуванні, виготовленні, монтажі та експлуатації, а також впроваджувати сучасні методи діагностики та моніторингу технічного стану, що дозволяють своєчасно виявляти початкові ознаки пошкоджень та запобігати аварійним ситуаціям.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Технологічний процес термічної обробки деталей гарячого тракту турбіни низького тиску та пов'язані з ним дослідження структурно-фазового стану жароміцних нікелевих сплавів супроводжуються комплексом потенційно небезпечних і шкідливих виробничих факторів. Забезпечення безпеки персоналу та створення належних умов праці при виконанні зазначених робіт є невід'ємною складовою технологічного процесу та науково-дослідної діяльності.

Експериментальна частина дипломної роботи виконувалась із застосуванням високотемпературного обладнання, прецизійних вимірювальних приладів та хімічних речовин, що створює специфічні ризики для працівників лабораторії. Основними джерелами потенційної небезпеки при проведенні досліджень та термічної обробки жароміцних нікелевих сплавів є:

• експлуатація електротермічного обладнання підвищеної потужності (вакуумних печей для гартування та старіння);

• вплив високотемпературних полів під час роботи з нагрівальними установками;

• можливість термічних травм при маніпуляціях із розжареними зразками та деталями;

• використання агресивних хімічних сполук у процесі підготовки металографічних шліфів;

• виділення токсичних випарів при хімічному травленні металографічних зразків;

• застосування діагностичного обладнання з джерелами іонізуючого випромінювання.

Для мінімізації виробничих ризиків та запобігання негативному впливу на здоров'я працівників необхідно суворо дотримуватись комплексу

організаційно-технічних заходів з охорони праці, промислової безпеки та виробничої санітарії. У даному розділі розглянуто ключові аспекти забезпечення безпечних умов праці при проведенні науково-дослідних робіт та технологічних операцій термічної обробки деталей гарячого тракту турбіни низького тиску з жароміцних нікелевих сплавів.

4.1 Аналіз потенційних небезпек

а) Незадовільна організація робочих зон у відділенні, що може бути пов'язано з порушенням вимог ергономіки і може призвести до зниження працездатності.

б) Можливість ураження електричним струмом. Головними причинами ураження можуть бути невиконання правил електробезпеки, несправність енергоспоживаючого обладнання, наприклад, поява напруги на не струмоведучих частинах обладнання, відсутність захисного заземлення або занулення, що може призвести до електричних травм або летального наслідку.

в) Можливість механічного травмування при переміщенні деталей за допомогою мостових кранів (підйомно-транспортних машин) зокрема: несправності гальмівної системи, обриву вантажопідйомних пристроїв, порушень правил безпеки що може призвести до аварійних ситуацій.

г) Втрата герметичності трубопроводів що подають робочі гази до технологічного обладнання з причин: механічних пошкоджень газопроводів, корозійних ушкоджень, що може призвести до вибухів та пожеж.

д) Негативний вплив теплового випромінювання від нагрітої садки що може призвести до порушення теплового балансу.

е) Термічні опіки в наслідок випадкового доторкання до обладнання або деталі.

ж) Підвищена запиленість робочої зони що є специфікою процесу або не справністю системи повітряобміну що може призвести до захворювань дихальних шляхів.

з) Не задовільне освітлення робочого відділення, що може бути пов’язано з виходом з ладу освітлювальних приладів або надмірної їх забрудненості. Це може призвести до погіршення зору, погіршення здатності розрізнювати об’єкти, а внаслідок і до травмування.

и) Можливість загорянь причинами яких є порушення правил пожежної безпеки, виток горючих робочих газів, коротке замикання, що може призвести до пожежі.

і) Небезпеки які пов’язані з особливими умовами праці у надзвичайних ситуаціях.

4.2 Заходи по забезпеченню безпеки.

Організація робочих місць при виконанні операцій ТО.

Робочі місця термістів повинні відповідати відповідним вимогам ДСТУ ГОСТ 12.2.061:2009 «Система стандартів безпеки праці. Устаткування виробниче. Загальні вимоги безпеки до робочих місць», ДСТУ 8604:2015 «Дизайн та ергономіка. Робоче місце для виконання робіт сидячи. Загальні ергономічні вимоги».

Структуру ділянок термічної та хіміко-термічної обробки можна уявити в наступному вигляді:

Норми безпечності визначають:

- площа на одного працюючого не менше 4,5 м^2;
- висота робочої зони від підлоги до стелі не менше 3,2 м;
- об’єм, що припадає на одного працюючого, не менше 15 м^3.

Розташування тепловипромінюючого обладнання повинно виконуватися з урахуванням потоків повітря при використанні природної або штучної загально обмінної вентиляції.

Кольорове рішення технологічного обладнання повинно відповідати вимогам ДСТУ EN ISO 7010:2019 «Графічні символи. Кольори та знаки безпеки. Зареєстровані знаки безпеки».

Для виключення можливості ураження електричним струмом передбачені такі заходи**:**

- організаційні:

До виконання робіт допускаються особи віком не молодше 18 років, що пройшли навчання та перевірку знань з електробезпеки згідно ДНАОП 1.1.10 – 1.01 - 2000 «Правила безпечної експлуатації електроустановок – споживачів» та отримали допуск з електробезпеки відповідної групи.

Для кожного електроспоживаючого обладнання повинні бути складені експлуатаційні схеми нормальної і аварійної роботи.

-технічні:

Всі не ізольовані токопровідні елементи електрообладнання повинні бути надійно огороджено суцільними огородженнями, зняття або відкриття можливе тільки за допомогою спеціальних пристроїв.

Розташування струмоведучих частин на недоступній висоті. Висота розташування визначається значенням напруги: при напрузі до 1000В – не менше 3,5м, при напрузі більше 1000В – не менше 6м.

Електричне блокування здійснює розрив ланцюга спеціальними контактами згідно ДСТУ EN 61008-1:2014 "Вимикачі диференційного струму без вбудованого захисту від надструмів побутового та аналогічного призначення. Частина 1. Загальні правила". Наприклад, завантаження та розвантаження садки з термічної печі виконується тільки при автоматичному відключенні струму блокуючими пристроями.

Захисне заземлення або занулення. Принцип дії захисного заземлення або занулення полягає у зниженні до безпечних значень напруги дотику, яка

обумовлена замиканням на корпус. Електрообладнання необхідно заземлювати або занулювати у відповідності з ПУЕ – 2017 «Правила улаштування електроустановок».

При роботах, що пов’язані з можливістю ураження електричним струмом необхідно використовувати індивідуальні засоби захисту в відповідності з НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безопасной эксплуатации электроустановок потребителей», НПАОП 40.1-1.01.97 «Правила безпечної експлуатації електроустановок».

Для захисту від ураження електричним струмом необхідно використовувати сухі брезентові рукавиці, або використовувати більш складні технічні способи захисту.

Основними заходами захисту від механічного травмування є:

Організаційні:

- дотримання чистоти та порядку на робочому місці згідно ДСТУ ГОСТ 12.2.061:2009 «Система стандартів безпеки праці. Устаткування виробниче. Загальні вимоги безпеки до робочих місць»;
- наявність попереджувальних знаків;
- проведення усіх видів інструктажів та перевірка знань з охорони праці при виконанні конкретних операцій.
- Робітники термічних цехів повинні забезпечуватись захисним спецодягом та індивідуальними захисними засобами згідно ДСТУ EN ISO 13688:2016 "Одяг захисний. Загальні вимоги" (EN ISO 13688:2013, IDT; ISO 13688:2013, IDT):

- Брезентові захисні костюми - ДСТУ EN ISO 13688:2016 "Одяг захисний. Загальні вимоги" (EN ISO 13688:2013, IDT; ISO 13688:2013, IDT)

- Рукавиці брезентові – ДСТУ EN ISO 13688:2016 "Одяг захисний. Загальні вимоги" (EN ISO 13688:2013, IDT; ISO 13688:2013, IDT).

- Спеціальне взуття (ботинки, напівсапоги) із захисними носками згідно ДСТУ 10998-74 «ССБП Взуття спеціальне шкіряне для захисту від механічних пошкоджень». Взуття зварювальника повинно бути з глухим воротом.

Технічні:

В термічних цехах для переміщення деталей та заготовок по технологічному циклу, як правило, застосовують кран-балку. Небезпека механічного травмування пов’язана з використанням несправного монтажно-підйомного обладнання, не атестованими вантажно-підйомними пристроями (тара, стропи, захватні кліщі) Існують кран-балки з дистанційним (за допомогою пульта) або ручним керуванням. Перевагою дистанційного керування є можливість здійснення постійного візуального контролю за переміщенням вантажу, а перебування працівника в безпечній зоні гарантує його особисту безпеку. Попереджувальні надписи про вантажопідйомність крана і його роботу відповідають вимогам ДСТУ EN ISO 7010:2019 «Графічні символи. Кольори та знаки безпеки. Зареєстровані знаки безпеки»..

Обов’язково враховується, що вантажопідйомність кран-балки на 10-20% вища ніж маса вантажу, що підіймається. Активну безпеку підйомних машин в процесі експлуатації підвищують засоби та прилади безпеки:

- обгранцювачі ходу (запобігають переміщенню крану і підйому вантажу);

- пристосування, що забезпечує стійкість крана (обгранцювачі навантаження);

- прилади освітлення та сигналізації.

Заходи безпеки щодо герметичності трубопроводів, що подають робочі гази до робочого місця**:**

- один раз на добу перевірка герметичності з’єднань магістральних трубопроводів омилюванням

- огляд стану технологічного обладнання один раз на добу

- - перевірка працездатності місцевої витяжної вентиляції

- використання індивідуальних засобів захисту – респіратори, напівмаски згідно ДСТУ EN 149:2017 "Засоби індивідуального захисту органів дихання. Фільтрувальні півмаски для захисту від аерозолів. Вимоги, випробування, маркування" (EN 149:2001+A1:2009, IDT).

4.3 Заходи по забезпеченню виробничої санітарії та гігієни праці.

Основними заходами захисту від теплового випромінювання є використання індивідуальних засобів захисту:

- спеціального одягу згідно ДСТУ EN ISO 11612:2018 "Одяг захисний. Одяг для захисту від тепла та полум'я. Мінімальні експлуатаційні вимоги" (EN ISO 11612:2015, IDT; ISO 11612:2015, IDT);

- рукавиць згідно ДСТУ EN 420:2017 "Рукавички захисні. Загальні вимоги та методи випробування" (EN 420:2003+A1:2009, IDT);

- групові засоби захисту: повітряні завіси між джерелами теплового випромінювання та зонами, де знаходяться робітники.

У деяких випадках, наприклад, при гартуванні деталей з високолегованих сплавів при температурах більш 1100°С використовують азбестові фартухи та рукавиці.

Для виключення термічних опіків передбачено використання індивідуальних захисних засобів, зокрема, спеціального одягу, спеціального взуття та спеціальних рукавиць.

Засоби індивідуального захисту, передбачені в нормативно-правових актах з охорони праці, повинні бути видані працівникам залежно від характеру та умов праці на строк носіння, який у будь-якому випадку не повинен перевищувати строк придатності, визначеного документами виробника (інструкціями з експлуатації, паспортами тощо).

Ці ЗІЗ повинні відповідати вимогам стандартів, зокрема, ДСТ 12.4.011-89. ССБТ. “Засоби захисту працівників. Загальні вимоги і класифікація”.

Забезпечення дотримання загального порядку забезпечення ЗІЗ працівників, для яких їх застосування є обов'язковим під час трудового процесу, встановлюється Положенням № 53, яке поширюється на всі підприємства, установи, організації незалежно від форм власності.

Обов'язковість видачі спецодягу, спецвзуття та інших ЗІЗ на роботах зі шкідливими та небезпечними умовами праці передбачена ст. 163 КЗпП.

Заходи по зниженню вмісту шкідливих речовин в повітрі робочих зон.

- герметизація обладнання , ущільнення з’єднань, люків та отворів де утворюються шкідливі речовини;

- видалення шкідливих речовин методом загальної або місцевої вентиляції;

- застосування індивідуальних засобів захисту респіратора або напівмаски.

Застосування автоматизації дає змогу вивести людину із забрудненого приміщення в приміщення з чистим повітрям. Удосконалення технологічних процесів дозволяє замінювати шкідливі речовини нешкідливими, відмовлятися від застосування пилоутворюючих процесів, замінювати тверде пальне на рідке або газоподібне, встановлювати газо-пилоулавлювачі в технологічний цикл та ін. Відповідно до ДСТУ Б А.3.2-12:2009 «Система стандартів безпеки праці. Системи вентиляційні. Загальні вимоги».

Аерація металургійних цехів є основним і найбільш простим дієвим заходом

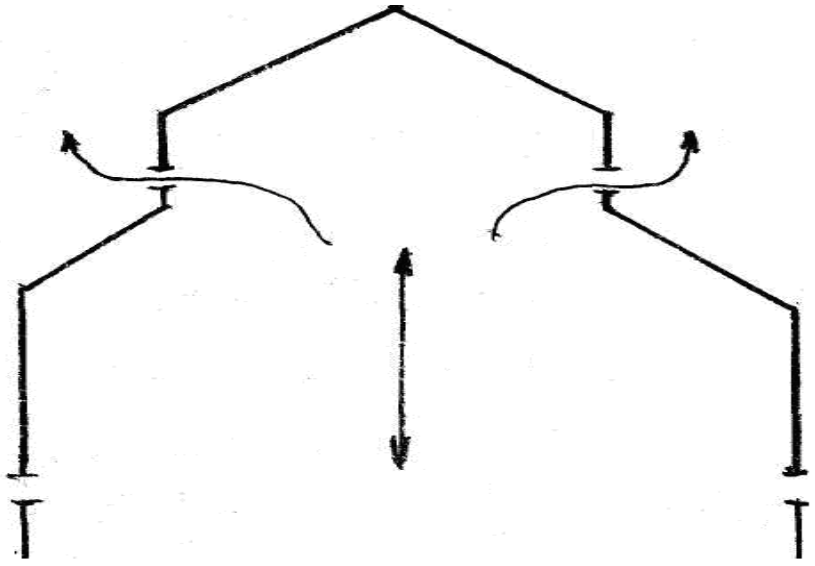

Рисунок 4.1 – Схема аерації цеху

Розрахунок повітрообміну за умови виділення шкідливих речовин (газів, парів, пилу), що надходять у робочу зону.

$$L_B = \frac{C_{вр}}{q_{ПДК} - q_П} \cdot 3600, м^3/год$$

$$L_B = \frac{0,4}{0,1 - 0.03} \cdot 3600 = 20556 м^3/год$$

Для забезпечення оптимальної освітленості в робочих приміщеннях яка нормується згідно ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення», як 200 лк передбачено устрій бокового природного освітлення та системи штучного рівномірного загального освітлення. У системі використовуються газорозрядні лампи типу ДРЛ, ДРУ потужністю від 400 до 800 Вт які встановлюються у світильники типу РСП що забезпечує VI-VII розряд зорової роботи при Ен-200 лк.

Для нормалізації параметрів повітряного середовища в проекті передбачено: устрій технічних систем, які повинні забезпечувати параметри повітряного середовища у відповідності до норм, які вказані в таблиці 1, згідно СНіП 23-01-99 «Будівельна кліматологія».

Таблиця 4.1 – Оптимальні фізичні параметри повітряного середовища цеху.

Період року	Температура,^{0}С	Відносна вологість, %	Швидкість руху,м/с
Холодний	18 - 22	40 - 60	0,1 – 0,3
Теплий	20 - 23	40 - 60	0,1 – 0,4

В холодний період року для забезпечення оптимальної температури виробничого приміщення слід використовувати систему водяного опалення та подавати зовнішнє повітря через калорифери.

В теплий період року для зниження температури повітря в робочому просторі необхідно використовувати природну вентиляцію, або загально обмінну приточно-витяжну вентиляцію згідно ДСТУ Б А.3.2-12:2009 "Системи вентиляційні. Загальні вимоги".

4.4 Заходи з пожежної безпеки.

Для попередження пожежі та вибухів на ділянках передбачені такі заходи як наявність первинних засобів пожежегасіння, зберігання легкозаймистих речовинна спеціальних складах, кількість таких речовин на дільниці не більше добового запасу.

Робочий персонал повинен регулярно здавати екзамени з охорони праці і пожежної безпеки, проходити тренінг інструктажі та бути допущений до самостійної роботи.

В комплексі заходів, що використовуються в системі протипожежного захисту, важливе значення має вибір найбільш раціональних способів та засобів гасіння різних горючих речовин матеріалів згідно зі ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об`єктів будівництва. Загальні вимоги».

Приміщення підрозділів термічної обробки мають категорію по пожежній небезпеці «Д», тому особливих мір захисту не передбачається. Використовуються пінні ВХП-10 і вуглекислотні ВВК-5 вогнегасники, пожежні щити до складу яких входять: лом, пожежна сокира, багір, лопата штикова, лопата совкова, вогнегасник, відро пожежне, ящик для піска, кошма.

4.5 Заходи по забезпеченню безпеки у надзвичайних ситуаціях

Забезпечення безпеки персоналу досягається:

- підвищенням стійкості промислового об’єкту в умовах НС; організацією рятувальних та відновлювальних робіт на промисловому об’єкті, наявністю технічних ресурсів до більш швидкої евакуації персоналу із зони ураження;

- ефективною організацією евакуації та проведенням рятувальних робіт.

Єдина державна система цивільного захисту забезпечує реалізацію державної політики у сфері цивільного захисту.

Вона складається з функціональних і територіальних підсистем і їх ланок.

Основні завдання єдиної державної системи цивільного захисту:

- забезпечення готовності міністерств та інших центральних і місцевих органів виконавчої влади, органів місцевого самоврядування, підпорядкованих їм сил і засобів до дій, спрямованих на запобігання і реагування на надзвичайні ситуації;

- забезпечення реалізації заходів щодо запобігання виникненню надзвичайних ситуацій;

- навчання населення правилам поведінки і дій при виникненні надзвичайної ситуації;

- виконання державних цільових програм, спрямованих на запобігання надзвичайним ситуаціям, забезпечення сталого функціонування підприємств, установ і організацій, зниження можливих матеріальну них втрат;

- обробка інформації про надзвичайні ситуації, публікація інформаційних матеріалів з питань захисту населення і територій від наслідків надзвичайних ситуацій;

- прогнозування і оцінка соціально-економічних наслідків НС, визначення на основі прогнозування потрібності сил та матеріально-фінансових ресурсів.

- створення, раціональне зберігання і використовування резерву матеріальних і фінансових ресурсів, необхідних для попередження і реагування на НС.

- оповіщення населення о загрозі і виникненні НС, своєчасне і достовірне інформування о фактичній обстановці та прийнятих заходах.

- захист населення при виникненні НС.

- проведення рятувальних і інших невідкладних робіт при ліквідуванні наслідків НС, організація життєзабезпечення постраждалого населення.

- пом’якшення можливих наслідків НС у разі їх виникнення.

- виконання заходів по соціальному захисту постраждалого населення.

- реалізація визначених законом прав по захисту населення від наслідків НС, а також лиць або членів їх сімей, які приймали участь у ліквідації цих ситуацій.

- а також інші задачі передбачені законом.

В залежності від масштабів і особливостей прогнозованої або виниклої НС, єдина державна система цивільної оборони може функціонувати в наступних режимах:

- повсякденного функціонування;

- в режимі підвищеної готовності;

- надзвичайної ситуації;

- надзвичайного стану.

Режим повсякденного функціонування - встановлюється при нормальній виробничо-промислової, радіаційної, хімічної, сейсмічної, гідрогеологічної, гідрометеорологічної, техногенної та пожежного стану і при відсутності епідемій, епізоотій, епіфітотій.

Режим підвищеної готовності - встановлюється тимчасово, в повному обсязі або частково у разі загрози виникнення надзвичайної ситуації, для

окремих територіальних підсистем єдиної державної системи цивільного захисту за рішенням Кабінету Міністрів України або обласних державних адміністрацій.

Режим надзвичайної ситуації - встановлюється тимчасово, в повному обсязі або частково у разі виникнення надзвичайної ситуації для окремих територіальних підсистем єдиної державної системи цивільного захисту за рішенням Кабінету Міністрів України або обласних державних адміністрацій.

Режим надзвичайного стану - встановлюється тимчасово, в повному обсязі або частково, в межах тер торії, на якій введено правовий режим надзвичайного стану для окремих територіальних підсистем єдиної державної системи цивільного захисту згідно Закону України "Про правовий режим надзвичайного стану"

5 ЕКОНОМІКО-ОРГАНІЗАЦІЙНА ЧАСТИНА

5.1 Актуальність теми з позиції маркетингу

Глобальний ринок газотурбінних двигунів демонструє стабільну позитивну динаміку, що зумовлена зростаючими енергетичними потребами та посиленням екологічних вимог до енергогенеруючих систем. Виробники галузі працюють в умовах підвищених вимог до технологічності та екологічності своєї продукції, що стимулює інтенсивний розвиток інноваційних підходів до проектування та виготовлення критичних компонентів, зокрема з титанових сплавів.

За аналітичними даними Precedence Research, ринок газотурбінних установок має сприятливі перспективи розвитку на період 2023-2032 років. Цьому сприяє розширення сфер застосування таких систем у різноманітних секторах економіки — від генерації електроенергії та авіаційної галузі до нафтогазового комплексу і морського транспорту. Важливою тенденцією стає переорієнтація ринку на екологічно збалансовані технічні рішення, що передбачають використання природного газу та альтернативних екологічно безпечних палив. Це відображає загальносвітовий тренд на забезпечення сталого розвитку та зменшення негативного впливу на довкілля.

В умовах посилення конкурентної боротьби на ринку газотурбінної техніки, удосконалення технологій термічної обробки деталей з титанових сплавів набуває стратегічного значення за наступними напрямками:

1. Зміцнення конкурентних позицій — оптимізація режимів термічної обробки створює можливості для підвищення експлуатаційних характеристик і надійності ключових компонентів, що формує суттєві конкурентні переваги в ринковому середовищі.
2. Оптимізація виробничих витрат — удосконалення термічних процесів дозволяє раціоналізувати використання матеріальних та енергетичних

ресурсів, що позитивно впливає на економічну ефективність виробництва.

3. Покращення експлуатаційного ресурсу — підвищення якісних показників та довговічності деталей газотурбінних двигунів забезпечує скорочення експлуатаційних витрат на технічне обслуговування та ремонт, що становить вагомий аргумент для споживачів.

З маркетингової перспективи, впровадження прогресивних методів термічної обробки може стати визначальним фактором успішного просування на ринку газотурбінних систем, які відповідають сучасним стандартам продуктивності, надійності та ефективності використання ресурсів.

5.2 Послідовний аналіз

У роботі проведено комплексний аналіз напрямків практичного застосування розробленої продукції та визначено ключові переваги для потенційних споживачів (таблиця 5.1). Представлена інформація формує цілісне уявлення про сутність запропонованої технологічної ідеї та окреслює перспективні ринкові сегменти, в межах яких доцільно ідентифікувати групи цільових клієнтів.

За результатами проведеного дослідження встановлено, що запропонована технологія забезпечує формування суттєвих конкурентних переваг на ринках транспортного машинобудування та енергетичного обладнання. Основні переваги полягають у підвищенні експлуатаційних характеристик виробів та оптимізації виробничих витрат.

Виконаний аналіз характеристик потенційного ринку (таблиця 5.2) свідчить про наявність стабільного попиту з боку підприємств авіадвигунобудування. Водночас для ефективного виходу на ринок та забезпечення конкурентоспроможності пропонованих технологічних рішень

необхідно залучення цільових інвестицій для придбання спеціалізованого обладнання та проведення процедур сертифікації відповідно до галузевих стандартів і нормативних вимог.

Таблиця 5.1 – Опис ідеї

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для споживачів (користувачів)
Закономірності впливу термічної обробки на структуру жароміцних залізо-нікелевих сплавів	Авіаційна промисловість.	Підвищення надійності та довговічності деталей двигунів; Збільшення міжремонтних інтервалів; Зниження експлуатаційних витрат.
	Космічна галузь.	Збільшення стійкості конструктивних елементів до екстремальних температур; Підвищення ресурсу роботи в умовах термоциклічних навантажень; Мінімізація ризиків технічних відмов.
	Енергетика.	Оптимізація витрат на обслуговування та ремонт обладнання завдяки міцнішим матеріалам; Підвищення ККД енергетичних установок; Зменшення викидів шкідливих речовин.

Таким чином, запропоновані технологічні рішення з оптимізації режимів термічної обробки жароміцних нікелевих сплавів дозволяють досягти значного підвищення експлуатаційних властивостей деталей гарячого тракту турбін низького тиску, що має стратегічне значення для забезпечення конкурентоспроможності вітчизняного машинобудування на глобальному ринку високотехнологічної продукції. Виконаний аналіз характеристики потенційного ринку (табл. 5.2).

Таблиця 5.2 – Попередня характеристика потенційного ринку

Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
Головні конкуренти	Pratt & Whitney (США) Rolls-Royce Holdings (Великобританія Safran Aircraft Engines (Франція) MTU Aero Engines (Німеччина)
Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростання на 5-7% щорічно завдяки підвищенню попиту в цивільній авіації та модернізації енергетичного обладнання
Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Необхідність значних інвестицій у високотехнологічне обладнання (від 5 млн дол.). Потреба у кваліфікованих кадрах з досвідом у галузі матеріалознавства жароміцних сплавів. Тривалий цикл кваліфікації та затвердження нових технологічних процесів (1-3 роки).
Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Авіаційні стандарти AS9100, NADCAP для спеціальних процесів. Міжнародні стандарти ISO 9001, ISO 14001. Галузеві стандарти AMS (Aerospace Material Specifications). Сертифікація від авіаційних регуляторів FAA, EASA.

Аналіз потенційного ринку свідчить про перспективність технологій підвищення експлуатаційних властивостей деталей гарячого тракту турбіни низького тиску. Сегмент характеризується високою інноваційною активністю та готовністю впроваджувати прогресивні методи термічної обробки для забезпечення конкурентних переваг.

Найбільший потенціал комерціалізації розроблених технологічних рішень зосереджений у сфері авіаційного двигунобудування та виробництва енергетичного обладнання, де критичними факторами є підвищення ресурсу роботи, забезпечення термічної стабільності та зниження експлуатаційних витрат. Ринок демонструє стабільне зростання, що створює сприятливі умови для впровадження інноваційних технологій термічної обробки жароміцних нікелевих сплавів.

На основі проведеного маркетингового дослідження було визначено ключові сегменти потенційних споживачів технології термічної обробки деталей гарячого тракту турбіни низького тиску. Для кожного сегменту проаналізовано специфічні потреби та сформовано відповідний комплекс вимог до послуг, що дозволяє розробити оптимальну стратегію позиціонування та просування науково-технічних послуг на ринку.

Таблиця 5.3 – Попередня характеристика потенційних клієнтів

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів (користувачів)
1	2	3	4
Підвищення ресурсу роботи компонентів турбіни в умовах високих температур	Виробники авіаційних двигунів (OEM)	Консервативність у впровадженні нових технологій Тривалий цикл випробувань та сертифікації Високі вимоги до якості та стабільності процесів	Відповідність міжнародним авіаційним стандартам Забезпечення відтворюваності результатів Повна документація процесів Гарантований приріст ресурсу деталей на 20-30%

Кінець таблиці 5.3

1	2	3	4
Оптимізація міжремонтних інтервалів газотурбінних установок	Підприємства енергетичного сектору	Орієнтація на економічну ефективність Важливість безперебійної роботи обладнання Плановий характер ремонтних робіт	Документоване підтвердження збільшення міжремонтних інтервалів Економічне обґрунтування ефективності Технічна підтримка при впровадженні Сумісність з існуючими системами контролю
Підвищення конкурентоспроможності послуг з ремонту та відновлення	Сервісні центри з обслуговування газотурбінного обладнання	Орієнтація на швидкість виконання робіт Необхідність диференціації на ринку Потреба в розширенні портфоліо послуг	Можливість інтеграції в існуючі виробничі процеси Навчання персоналу новим технологіям Оперативна технічна підтримка Конкурентна вартість впровадження
Зниження витрат на виробництво компонентів турбін	Виробники промислових газотурбінних установок	Орієнтація на оптимізацію виробничого циклу Пошук балансу між вартістю та якістю Чутливість до термінів впровадження	Адаптивність технології до різних типів сплавів Мінімізація капітальних вкладень Скорочення тривалості термічної обробки Зниження енергоємності процесів
Розробка нових матеріалів з покращеними властивостями	Науково-дослідні інститути та лабораторії	Фокус на інноваційність та наукову новизну Пріоритет публікацій та патентування Орієнтація на довгострокову перспективу	Детальна наукова методологія Можливість масштабування результатів Співпраця в подальших дослідженнях Інтелектуальна власність на розробки

З метою всебічного оцінювання перспектив впровадження проекту було застосовано методологію SWOT-аналізу, що дозволила структурувати та класифікувати визначальні чинники як внутрішнього, так і зовнішнього середовища.

Ця аналітична техніка забезпечує комплексне вивчення проекту з чотирьох ключових аспектів: переваг (наявних конкурентних відмінностей,

доступних ресурсів та професійних компетенцій колективу), недоліків (внутрішніх обмежень та можливих проблемних зон), ринкових перспектив для подальшого розвитку проекту, а також потенційних зовнішніх викликів, що можуть вплинути на успішність реалізації.

Підсумки проведеного SWOT-аналізу узагальнено в таблиці 5.4. Упорядкування та узагальнення аналітичних даних формує ґрунтовну платформу для обґрунтованого стратегічного планування та формування дієвого плану імплементації проекту, що враховує як існуючі переваги, так і можливі виклики.

Таблиця 5.4 – SWOT- аналіз

Сильні сторони:	Слабкі сторони:
• Інноваційність запропонованої технології термічної обробки, що забезпечує підвищення експлуатаційних властивостей деталей на 25-30%. • Наявність патентоспроможних технічних рішень та захищеної інтелектуальної власності. • Підтверджена експериментальними дослідженнями ефективність методики. • Міждисциплінарна команда фахівців з матеріалознавства, теплофізики та металургії. • Наявність лабораторної бази для проведення експериментальних робіт. • Економічна ефективність технології за рахунок оптимізації режимів термообробки.	• Відсутність власної виробничої бази для промислового впровадження технології. • Обмежені фінансові ресурси для масштабування проекту та проведення повного циклу випробувань. • Тривалий період сертифікації та впровадження технології (1-2 роки). • Недостатність промислового досвіду впровадження розробленої технології. • Обмежена маркетингова підтримка та відсутність налагоджених каналів комунікації з потенційними клієнтами. • Залежність від партнерів для промислового масштабування технології.

Кінець табл. 5.4

Можливості:	Загрози:
• Зростаючий попит на технології підвищення ресурсу деталей турбін у зв'язку з тенденцією до екологізації енергетики. • Потенціал для формування стратегічних партнерств з виробниками турбінного обладнання. • Можливість адаптації розробленої технології для різних типів жароміцних сплавів. • Державні програми підтримки інновацій в енергетичному та авіаційному секторах. • Потенціал для міжнародної співпраці та виходу на глобальні ринки. • Можливість диверсифікації за рахунок адаптації технології для інших високотемпературних застосувань. • Тенденція до локалізації виробництва критичних компонентів в національній економіці.	• Жорстка конкуренція з боку провідних міжнародних компаній з великим досвідом та ресурсами. • Валютні ризики при закупівлі імпортного обладнання та матеріалів для впровадження технології. • Посилення міжнародних вимог до сертифікації авіаційних компонентів. • Ризик появи альтернативних технологій підвищення властивостей деталей турбін. • Політична нестабільність, що може вплинути на інвестиційний клімат. • Складність прогнозування довгострокових експлуатаційних властивостей оброблених деталей. • Ризик зміни галузевих стандартів та технічних вимог.

Для формування результативної стратегії комерціалізації проекту було виконано комплексний SWOT-аналіз, який забезпечив структуровану оцінку внутрішніх можливостей та зовнішніх чинників ринкового середовища, що дозволило окреслити стратегічні вектори розвитку з належним урахуванням потенційних загроз.

Фундаментальним компонентом розробки маркетингової стратегії став процес детального вивчення та категоризації потенційних споживачів технології. У межах маркетингового дослідження здійснено сегментування ринку за відповідними параметрами, проведено оцінювання економічної перспективності кожного виділеного сегменту з урахуванням потенціалу його

подальшого розширення, фінансових можливостей цільової аудиторії та інтенсивності конкурентної боротьби.

Інтегрований аналіз дозволив виявити найбільш перспективні сегменти споживачів та сформувати індивідуалізовану стратегію позиціонування для кожної цільової групи (табл. 5.5). Запропонований диференційований підхід сприяє максимально ефективному використанню наявного ресурсного потенціалу компанії та створенню специфічних конкурентних пропозицій для різних категорій споживачів на цільових ринках.

Таблиця 5.5 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачі в сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
Підприємства авіабудівного сектору. Компанії аерокосмічної галузі. Організації енергогенеруючого комплексу.	Значний	Авіабудівний сектор: 800 комплектів щорічно. Аерокосмічна галузь: 500 комплектів щорічно. Енергогенеруючий комплекс: 1200 комплектів щорічно.	Підвищений через лімітовану кількість кваліфікованих постачальників.	Суттєві внаслідок жорстких нормативних вимог та необхідності галузевої сертифікації.

Для ефективної координації інноваційного проекту реалізовано детальне картографування зацікавлених сторін із застосуванням методології побудови Карти стейкхолдерів. Розроблена карта має трирівневу концентричну структуру, що відображає градацію впливу різних груп на розвиток проекту.

У внутрішньому колі (ядрі карти) зосереджені суб'єкти, які функціонально підпорядковані ініціативній групі проекту, що забезпечує

безпосередній контроль над ключовими процесами розробки та впровадження. Проміжне коло відображає екосистему співпраці, включаючи стратегічних партнерів, компанії-постачальники та пріоритетних клієнтів, взаємодія з якими вимагає розвинутих комунікаційних механізмів. Периферійне коло охоплює контролюючі інстанції, суспільні групи та конкурентні суб'єкти, вплив на діяльність яких суттєво обмежений і потребує систематичного відстеження трансформацій у відповідних сферах.

Подібна багаторівнева візуалізація взаємозв'язків сприяє раціоналізації комунікативних процесів та вдосконаленню системи управління проектними ризиками. Карта стейкхолдерів підлягає систематичному перегляду та актуалізації відповідно до еволюції проектного середовища.

Рисунок 5.1 - Карта стейкхолдерів

Ефективна реалізація дослідницького проекту ґрунтувалась на детальному розмежуванні функціональних обов'язків та сфер відповідальності

між учасниками робочої групи (табл. 5.6), що забезпечило оптимальне використання фахових навичок кожного спеціаліста для досягнення комплексних дослідницьких цілей.

Координуюча функція наукового керівника полягала в загальному управлінні дослідницькими процесами, формуванні концептуальних напрямів роботи та наданні експертних консультацій щодо методології дослідження. Його професійний досвід став визначальним фактором у структуруванні та систематизації наукового пошуку.

Діяльність старшого наукового співробітника характеризувалась дуалістичною природою – поєднанням активної дослідницької роботи з функціями якісного моніторингу. Під його контролем знаходились питання дотримання методологічної цілісності та відповідності процедурним стандартам, що забезпечило об'єктивність отриманих наукових даних.

Експериментальний компонент дослідження перебував у зоні відповідальності інженера-дослідника. До його компетенції входила підготовка та технічне обслуговування лабораторного устаткування, практична реалізація експериментів та інтерпретація емпіричних результатів. Його методичний підхід до виконання цих завдань став запорукою високої достовірності отриманих експериментальних даних.

Забезпечення безперебійності дослідницького процесу покладалось на лаборанта, який відповідав за виконання операційних завдань, документальний супровід та створення належних умов для проведення експериментів. Його сумлінне ставлення до допоміжних функцій суттєво підвищило продуктивність всього дослідницького процесу.

Синергетична взаємодія між членами команди, високий рівень професіоналізму кожного учасника та чітке розмежування функціональних зон відповідальності забезпечили досягнення значущих наукових результатів. Індивідуальний внесок кожного спеціаліста став інтегральною складовою успішності всього дослідницького проекту.

Таблиця 5.6 – Склад, чисельність та фонд заробітної плати

Посада	Кіль-кість осіб	Посадовий оклад, грн	Преміальний відсоток до окладу, %	Сума премій, грн	Місячна заробіт-на плата	Річний фонд оплати праці, грн	ЄСВ, грн
Науковий керівник	1	18000	20	3600	21600	259200	57024
Старший науковий співробіт-ник	1	15000	20	3000	18000	216000	47520
Молодший науковий співробіт-ник	1	10800	20	2160	12960	155520	34214,4
Лаборант	2	9700	20	1940	11640	279360	61459,2
Разом	5	53500	-	10700	64200	910080	200217,6

В рамках калькуляції собівартості проекту проведено розрахунок витрат на матеріали, які включають закупівлю необхідних матеріалів для проведення досліджень та виготовлення дослідних зразків. Детальний перелік матеріалів та їх вартість представлено в таблиці 5.7.

Таблиця 5.7 – Розрахунок матеріальних витрат

Матеріальні витрати	Одиниця виміру	Кількість	Ціна за од., грн	Сума, грн
Аргон	л	160	37,5	6000
Травник	шт	20	170	3400
Олівець	шт	20	20	400
Зразки	шт	70	500	35000
Реактиви	шт	1	1800	1800
Змінні лінзи	комплект	2	3500	7000
Тара зразків	комплект	20	50	1000
Разом	-	-	-	54600

Розрахунок вартості послуг. До цієї статті належать витрати на електропостачання, водопостачання тощо (табл. 5.8).

Таблиця 5.8 – Розрахунок вартості спожитих послуг

Вид послуг	Одиниця виміру	Кількість	Тариф, грн	Сума, грн
Електропостачання	кВт·год	5000	6,25	31250
Водопостачання	$м^3$	60	35,2	2112
Теплопостачання	Гкал	12	2260	27120
Разом	-	-	-	60482

Для оцінки амортизаційних відрахувань розраховано річну суму амортизації обладнання, виходячи з його первісної вартості та встановленого п'ятирічного терміну експлуатації. Результати розрахунків амортизації представлені в таблиці 5.9.

Таблиця 5.9 – Розрахунок амортизації та ремонту

Обладнання	Кількість	Вартість, грн	Загальна вартість, грн	Річна амортизація (20%), грн	Поточний ремонт (2%), грн
Металографічний мікроскоп	2	99 500	199000	27860	3980
Електронний мікроскоп	1	1400000	1400000	196000	28000
Піч вакуумна лабораторна	1	2200000	2200000	308000	44000
Комп'ютер	4	40000	160000	22400	3200
Принтер	1	16000	16000	2240	320
Разом	9	3755500	3975000	556500	79500

Враховано основне устаткування: вакуумна піч, твердоміри, мікроскоп та комп'ютери. Загальна річна сума амортизації з урахуванням ремонту складає 3698640 грн.

Відображаємо кошторис витрат на основі даних, вказаних в табл. 5.6-5.9. В табл. 5.10 наведено кошторис витрат на проведення науково-дослідницьких робіт.

Таблиця 5.10 – Кошторис витрат

Стаття витрат	Сума, грн
Фонд заробітної плати	910080
ЄСВ	200218
Матеріальні витрати	54600
Вартість послуг	60482
Амортизація обладнання	556500
Поточний ремонт	79500
Виробнича собівартість	1861380
Адміністративні витрати (20%)	455040
Повна собівартість	2316420

Обчислення економічної ефективності проводилося шляхом зіставлення фінансових показників від впровадження інноваційної технологічної розробки відносно стандартної промислової методики термообробки (табл. 5.11).

Таблиця 5.11 - Порівняння технологій термічної обробки без деталізації матеріалів

Показник	Од. виміру	Стандартна технологія	Удосконалена технологія
Якість продукції	Вища	Середня	Якість продукції
Продуктивність	Вища	Середня	Продуктивність
Витрати на енергію	Зменшені на 30%	В середньому	Витрати на енергію
Загальні виробничі витрати	Зменшені на 15%	В середньому	Загальні виробничі витрати

Запропонована інноваційна технологія характеризується зниженими виробничими витратами порівняно з традиційними методами термічної обробки та одночасно забезпечує суттєве збільшення експлуатаційного ресурсу компонентів газотурбінних двигунів. Сукупний економічний ефект формується з двох ключових складових: зменшення періодичності заміни деталей протягом загального терміну експлуатації силової установки та скорочення експлуатаційних витрат, що включає економію електроенергії та оптимізацію загальновиробничих видатків.

ВИСНОВОК

На основі проведених досліджень з підвищення експлуатаційних властивостей деталей гарячого тракту турбіни низького тиску можна зробити наступні висновки.

Аналіз умов експлуатації деталей гарячого тракту турбіни низького тиску показав, що вони працюють у складних умовах термоциклічних навантажень, відцентрових сил, вібрацій та корозійно-активних середовищ при температурах 500-650°С, що вимагає застосування матеріалів з високими показниками жароміцності, термостійкості та структурної стабільності.

Обґрунтовано вибір сплаву ХН35ВТ (ЭИ612) для виготовлення дисків турбін низького тиску, який демонструє оптимальне поєднання високих механічних характеристик (σв = 850 МПа, σ0,2 = 550 МПа при 20°С) з відмінною термостабільністю структури при тривалій експлуатації та технологічністю виготовлення.

Встановлено закономірності впливу легуючих елементів на структуру та властивості досліджуваного сплаву: підвищений вміст нікелю (35%) забезпечує розширення γ-області та утворення зміцнюючої γ'-фази Ni3(Al,Ti), хром підвищує корозійну стійкість, а вольфрам і титан сприяють підвищенню жароміцних характеристик через утворення стабільних карбідів та інтерметалідних сполук.

Розроблено оптимальний режим термічної обробки дисків турбін низького тиску зі сплаву ХН35ВТ, що включає гартування при температурі 1080-1100°С з охолодженням в аргоні та подвійне старіння при 850°С (10 год) та 700°С (30 год), що забезпечує формування дисперсійно-зміцненої структури з оптимальним співвідношенням міцності та пластичності.

Експериментально доведено, що запропонована технологія термічної обробки забезпечує досягнення необхідних експлуатаційних характеристик: $\sigma_в$ = 720 МПа, $\sigma_{0,2}$ = 400 МПа, δ = 13%, KCU = 400 КДж/м², σ_{1000}^{650} > 220 МПа,

$\sigma_{100000}^{650} > 130$ МПа, що відповідає вимогам до деталей гарячого тракту турбіни низького тиску.

Проведено аналіз причин руйнування дисків турбін низького тиску, який виявив, що основними механізмами є втомне руйнування, термічна втома, а також вплив дефектів матеріалу та корозійних процесів. Розроблені рекомендації щодо підвищення надійності дисків направлені на мінімізацію впливу цих факторів.

Розроблено комплексну маршрутну технологію виготовлення дисків турбін низького тиску, що включає оптимізовані режими термічної обробки та систему контролю якості на всіх етапах виробництва, що дозволяє забезпечити стабільно високі експлуатаційні характеристики виробів.

Запропоновано систему заходів з охорони праці та промислової безпеки при виконанні технологічних операцій термічної обробки жароміцних сплавів, що забезпечує мінімізацію ризиків для персоналу та відповідає вимогам чинних нормативних документів.

Результати дослідження мають практичне значення для вдосконалення технології виготовлення дисків турбін низького тиску та можуть бути впроваджені у виробництво для підвищення надійності та довговічності деталей газотурбінних двигунів, що працюють в умовах високих температур та механічних навантажень.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Авіаційно-космічні матеріали та технології / [В.А. Богуслаєв. [В.А. Богуслаєв, А.Я. Качан, Н.Є. Калініна та ін.]. – Запоріжжя : Вид-во ВАТ "Мотор Січ", 2009. – 351 с.

2. Богуслаєв В.А. Технологічне забезпечення експлуатаційних характеристик деталей ГТ: посібник/ В.А. Богуслаєв та ін. - Запоріжжя: ОАО «Мотор Січ», 2000. – 248 с.

3. Gaiduk S.V. Heat-resistant nickel alloys // LAP LAMBERT Academic Publishing. – 144 Saarbrucken, Deutschland. - 2012. – 196 p.

4. Масленков, С.Б. Жаропрочные стали и сплавы. М.: Металлургия. – 1983. – 192 с.

5. Симс Ч., Хагель В. Жаропрочные сплавы // Пер. с англ. под ред. Савицкого Е.М. - М. : Металлургия, 1976. - 567 с.

6. Симс Ч.Т., Столоффа Н.С., У.К. Хагеля. Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок: В 2-х кн.; Пер. с англ. под ред. Р.Е. Шалина. – М.: Металлургия, 1995. – Кн. 1. - 384 с. ; Кн. 2. - 384 с.

7. Котсорадис Д., Феликс П., Фишмайстер Х. и др. Жаропрочные сплавы для газовых турбин. Материалы международной конференции; пер. с англ. Под ред. Р.Е. Шалина. – М. : Металлургия, 1981. - 480 с.

8. Гапонова О.П. Сталі та сплави з особливими властивостями./ О.П.Гапонова, А.Ф.Будник - Суми: СумДУ, 2014. – 240 с.

9. Дурягіна З.А. Сплави з особливими властивостями: навч. посіб./ З.А.Дурягіна, О.Я.Лизун, В.Л.Пілюшенко - Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2007. – 236 с.

10. Маткова, А. В., & Матвійчук, С. М. (2010). Металеві сплави для виготовлення авіаційної техніки. *Наукові нотатки*, (29), 121-122.

11. Конспект лекцій з дисципліни (2 частини) “Спеціальні сталі та сплави в газотурбобудуванні” для студентів спеціальності 132 “Матеріалознавство” усіх форм навчання / Укл.:В.Я. Грабовський, О.А. Глотка. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2017. - 164 с.

12. ДСТУ 8806:2018. Сплави жароміцні нікелеві та кобальтові. Марки та технічні вимоги. [Чинний від 2019-01-01]. Київ : ДП "УкрНДНЦ", 2018. 15 с. (Національний стандарт України).

13. Atkins M. Atlas of continuous cooling transformation diagrams for engineering steels. Sheffield : British Steel Corporation, 1980. – 260 p.

14. Grujicic M. A Comparative Analysis of the Mechanical Response of Ni-Based Superalloy for Turbine Disk Application to a Family of High-Strength Steels: Experiments and Simulations.// M.Grujicic, N.Arakere, & R.Yavari. Materials Science and Engineering – A: 2009, 508(1-2), 59-74.

15. Rajan T.V. Heat treatment: principles and techniques / T.V Rajan C. P. Sharma // PHI Learning Pvt. Ltd – 2011. – 611p.

16. George E. Totten. Steel Heat Treatment - Metallurgy And Technologies / George E. Totten // CRC Press – 2006. – 1077 p.

17. Greenberg J. H. Industrial Thermal Processing Equipment Handbook / J. H. Greenberg // Asm International. 1994. – 400 p.

18. Афтанділянц Є.Г. Матеріалознавство: підручник./ Є.Г.Афтанділянц, О.В.Зазимко, К.Г.Лопатько - Київ: Вища освіта, 2012. – 548 с.

19. Мережко Н. В. Матеріалознавство і технологія матеріалів: підручник для вищих навч. закл. / Н.В.Мережко, Н.К.Зіміна, С.О.Сіренко, О.І.Сім’ячко - Київ: нац. торг.-екон. Ун-т, 2010. – 352 с.

20. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної магістерської дипломної роботи для студентів спеціальності 132 "Матеріалознавство" усіх форм навчання. /Укл.: І.М. Лазечний, В.Я. Грабовський, Ю.І Кононенко, О.В. Лисиця – Запоріжжя: НУ “Запорізька політехніка», 2019. - 38 с.

21. Про охорону праці [Електронний ресурс] – Чинний від 1992-10-14. : станом на 20.01.2018 р.–К.:ВРУкраїни,1998.– URL: http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12. – (Закон України).

22. Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників [Електронний ресурс] : НПАОП 0.00-7.11-12. – На заміну наказу МНС України від 26.12.2011 № 1350 ; чинний від 2012-03-16. – К. : МНС України, 2012. – 116 с. – URL: http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0226-12. – (Нормативно-правовий акт охорони праці);

23. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом [Текст] : ДСТУ Б В.2.5-82:2016. – На заміну ДБН В.2.5-27-2006 ; чинний від 2017-04-01. – К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 109 с. – (Державний Стандарт України).

ДОДАТОК А