

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 Дослідження режимів термічного оброблення нікелевих та залізо-нікелевих
сплавів з метою проектування термічного відділення термічного цеху із вакуумної
обробки дисків турбіни ГТД
(назва теми)

Виконав(ла): студент(ка) 2 курсу, групи ІФ232м

Спеціальності 132 Матеріалознавство

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Прикладне матеріалознавство

МАСЛОВ Ю.О

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник КЛИМОВ О.В

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

2023

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

Завідувач кафедри _____

« _____ » _____ 20 ____ року

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

МАСЛОВ Юрій Олександрович

(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Дослідження режимів термічного оброблення нікелевих та залізо-нікелевих сплавів з метою проектування термічного відділення термічного цеху із вакуумної обробки дисків турбіни ГТД

керівник проєкту (роботи) доцент, к.т.н Климів Олександр Володимирович
(науковий ступінь, вчене звання, ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

затверджені наказом закладу вищої освіти від « _____ » _____ 20 ____ року № _____

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 18.12.2023

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) умови експлуатації дисків ГТД, ХН45МВТЮБР, ХН60ВТ

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Аналіз літературних джерел, матеріали та методика, експериментальна частина, розрахунок економічної ефективності, охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів, плакатів) план термічного відділення, презентація

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1	КЛИМОВ О.В доцент, к.т.н		
2	КЛИМОВ О.В доцент, к.т.н		
3	КЛИМОВ О.В доцент, к.т.н		
4	КРУГЛІКОВА В.О, доцент, к.т.н		
5	НЕСТЕРОВ О.В., доцент, к.т.н		
НК			

7. Дата видачі завдання « _____ » _____ 20__ року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Аналіз літературних джерел		
2	Матеріали та методика досліджень		
3	Експериментальна частина		
4	Економіко-організаційна частина		
5	Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях		
	План термічного відділення		

Студент(ка)

_____ Юрій МАСЛОВ
(підпис) (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи)

_____ Олександр КЛИМОВ
(підпис) (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської роботи: 90 с., 19 табл., 11 рис., 2 додатки, 25 джерел.

ДИСК ГТД, ЛЕГУВАННЯ, НІКЕЛЕВИЙ СПЛАВ, ЗАЛІЗО-НІКЕЛЕВИЙ СПЛАВ, ЛЕГУВАННЯ, ДИСПЕРСІЙНЕ ЗМІЦНЕННЯ, ТВЕРДИЙ РОЗЧИН, γ' - ФАЗА, ПЛАН ТЕРМІЧНОГО ВІДДІЛЕННЯ

Мета проекту полягає в розробці науково-технічної бази для підвищення якості та ефективності термічної обробки, спрямованої на покращення міцності, стійкості до високих температур і довговічності дисків турбіни ГТД. Застосування вакуумної термічної обробки є ключовим аспектом, оскільки воно дозволяє проводити процеси при контрольованому тисковому середовищі, що впливає на кінетику реакцій і формування мікроструктури матеріалу.

В рамках дослідження вивчається фізико-хімічна природа нікелевих та залізо-нікелевих сплавів, їхні структурні особливості та властивості. Аналізуються режими термічного оброблення, зокрема нагрівання, утримання та охолодження, які мають вирішальне значення для отримання бажаних механічних характеристик.

Спираючись на результати дослідження, ми плануємо розробити оптимальні технологічні процеси для термічної обробки дисків турбіни ГТД.

У результаті дипломного проекту передбачається розробка проекту термічного відділення термічного цеху для вакуумної обробки дисків турбіни ГТД. Це відділення буде високотехнологічним обладнанням, забезпечуючи високий рівень автоматизації та контролю за процесами, що гарантує стабільну якість виготовлених компонентів та підвищує ефективність виробництва.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Аналіз літературних джерел	8
1.1 Характеристика та умови експлуатації дисків ГТД	8
1.2 Структура, фазовий склад і властивості сплавів на основі нікелю	13
1.3 Термічна обробка жароміцних сплавів.....	17
2 Матеріали та методика досліджень	28
2.1 Хімічний склад сплавів, які досліджуються	28
2.2 Дослідження мікроструктури сплавів.....	29
2.2.1 Приготування зразків.....	29
2.2.2 Дослідження мікроструктури на МІМ-7.....	30
2.3 Дослідження механічних властивостей.....	31
3 Експериментальна частина	33
3.1 Характеристика та термічна обробка сплаву ХН60ВТ	34
3.2 Характеристика та термічна обробка сплаву ХН45МВТЮБР (ЭП718-ИД).....	38
3.3 Розрахунок тривалості нагрівання дисків ГТД.....	41
3.4 Розрахунки кількості обладнання по завантажувальним відомостям....	45
4 Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях.....	50
4.1 Аналіз потенційних небезпек	50
4.2 Заходи забезпечення безпеки.....	52
4.3 Заходи забезпечення виробничої санітарії та гігієни праці.....	59
4.4 Заходи з пожежної безпеки	61

	6
4.5 Заходи безпеки в надзвичайних ситуаціях	62
5 Економіко-організаційна частина.....	64
5.1 Актуальність теми з позиції маркетингу	64
5.2 Послідовний аналіз	65
Висновок	77
Перелік джерел посилань	78
Додаток А.....	81

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку технологій виробництва, термічна обробка металів і сплавів визначається як ключовий етап виробничого процесу, забезпечуючи необхідні механічні та фізико-хімічні властивості матеріалів. Особливо важливим є вивчення режимів термічного оброблення для нікелевих та залізо-нікелевих сплавів, які знаходять широке застосування у виробництві деталей для газотурбінних двигунів (ГТД).

Дипломний проєкт присвячений системному дослідженню та оптимізації режимів термічного оброблення нікелевих та залізо-нікелевих сплавів з метою розробки ефективного термічного відділення для обробки дисків турбіни ГТД у вакуумному середовищі. Високотехнологічне обладнання такого відділення є важливою складовою для забезпечення стабільної якості та надійності турбін, що безпосередньо впливає на ефективність і безпеку авіаційних та енергетичних систем.

Дослідження включатиме в себе аналіз фізико-хімічних властивостей сплавів, їхню структуру та механічні характеристики на різних етапах термічного оброблення. Результати дослідження будуть використані для розробки оптимальних технологічних процесів вакуумної термічної обробки дисків турбіни, з метою підвищення їхньої міцності, стійкості до високих температур і довговічності в експлуатації.

Мета дипломного проєкту полягає в створенні науково-технічної бази для оптимізації технологічних процесів термічної обробки, що дозволить підвищити ефективність виробництва та забезпечити високу якість виготовлених компонентів для газових турбінних двигунів.

1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1 Характеристика та умови експлуатації дисків ГТД

Основною частиною ротора турбіни є диск. Диск слугує для встановлення робочих лопаток, що створюють крутний момент, і для передачі цього крутного моменту з лопаток на вал.

Диски турбін (рис 1.1) у загальному випадку мають обід 1 з "ялинковими" виступами 2, що утворюють пази 3 для кріплення робочих лопаток, полотно 4 і маточину 5, а також фланці 6 для кріплення до інших дисків і до вала. До фланців диска можуть кріпитися інші диски, дефлектори 7, лабіринти 8, балансувальні вантажі [1].



1 - обід диска; 2 - виступ диска; 3 - паз для лопатки; 4 - полотно; 5 - маточина; 6 - фланець; 7 - дефлектор; 8 - профільна частина робочої лопатки; 9 - замок; 10 - нижня полиця; 11 - ніжка

Рисунок 1.1 - Диск із пазами "ялинкового" типу для встановлення робочих лопаток

Під час проектування дисків необхідно забезпечити цілу низку вимог.

Так, необхідно забезпечити достатній запас міцності на розрив для будь-яких можливих умов експлуатації, оскільки руйнування диска завжди призводить до катастрофічних наслідків і не може бути локалізовано в межах корпусу турбіни.

Наступна вимога - мінімальна ймовірність руйнування диска від перегріву (тобто захист від безпосереднього контакту з високотемпературним газом і надійна - з необхідними запасами - робота системи охолодження). Диски ТВД зазвичай захищені від контакту з газом і потоку тепла з проточної частини як конструктивно (дефлекторами і проміжними дисками), так і є системою охолодження (потоками повітря, що охолоджує диски, дефлектори) [1, 2].

Ефективна система охолодження, що забезпечує нижчий рівень температури диска, дає можливість використання менш дорогих матеріалів або зменшення маси. Для охолодження найбільш навантаженої і найбільш масивної частини диска - маточини - може бути використано охолоджувальне повітря з низькою температурою.

Прикладом є конструкція ротора, де маточину диску охолоджують повітрям через КНТ, що на сотні градусів холодніше, ніж повітря КВТ, яке зазвичай використовують для цих цілей. З одного боку, цей варіант збільшує температурні напруження в диску (що виникають через різницю температур ободу диска). Однак позитивний ефект від збільшення міцності маточини, мабуть, превалює. Конструкція диска має бути надійною і довговічною і забезпечувати передачу крутного моменту з дисків на вал. Як правило, ці елементи диска є найбільш напруженими і важкими в забезпеченні циклічного ресурсу. З'єднання дисків із валом може бути виконано кількома способами:

- призонтальними (з малими зазорами) болтами або штифтами, при цьому деталі стягуються гайками або стяжними болтами;

- шліцами - через подовжений фланець диска або допоміжний вал. Таке з'єднання є одним із найбільш поширених.

-Шпильками (болтами), розташованими паралельно осі вала, які стягують між собою диски [1-3].

Недоліком конструкції зі стяжними шпильками (болтами) є ймовірність їхнього витягування під час експлуатації. Крім того, отвори в дисках для шпильок є концентраторами напружень і знижують циклічну довговічність диска. З цих причин конструкції такого типу зараз застосовуються рідко.

Фланці диска, необхідні для кріплення до вала, намагаються перенести в область найнижчих напружень і подовжують для підвищення гнучкості та зменшення градієнтів напружень.

Також необхідне надійне, технологічне і довговічне (насамперед за циклічним ресурсом) замкове з'єднання з лопатками. Замкове з'єднання є найточнішим за розмірами і найбільш трудомістким у виробництві диска. Поломка замкового з'єднання веде до обриву робочої лопатки, подальшого пошкодження інших лопаток у проточній частині та вимушеного вимкнення двигуна в польоті.

Загалом під час проектування диска необхідно знайти ефективний компроміс між конструктивною складністю системи охолодження, витратами енергоресурсів на охолодження, властивостями застосовуваного матеріалу, масою та вартістю одержуваного диска. Основною метою проектування (при виконанні всіх нормативних запасів міцності) є забезпечення необхідного циклічного ресурсу диска. Циклічний ресурс диска визначає величину тієї частини вартості технічного обслуговування, яка витрачається на заміну так званих деталей «обмеженого циклічного ресурсу»(Life Limited Parts - LLP) - насамперед дисків, а також дефлекторів і проміжних дисків.

Забезпечення циклічного ресурсу, тобто запасу міцності за малоцикловою втомою, є нині головним завданням під час конструювання диска. Для розв'язання цього завдання моделюють зміну в часі (тобто в нестационарній постановці) механічних напружень і розподілу температур у деталях ротора протягом одного робочого (польотного) циклу. Завдання розв'язується методом ітерацій - шляхом послідовних перевірок циклічного

ресурсу різних варіантів конструкції (методом кінцевих елементів) - зі зміною конфігурації, матеріалу, температури. Під час оптимізації конфігурації диска та інших деталей ротора виключають або послаблюють концентратори напружень - ті місця, у яких наявний циклічний ресурс мінімальний [4].

Основна частина розрахунків проводиться в припущенні про осьову симетрію основних деталей, що є досить близьким до істини припущенням. Моделювання теплового стану і напружень в осесиметричній постановці ефективно за співвідношенням результативності та трудомісткості. Остаточну оптимізацію конструкції диска (особливо його фланцевих з'єднань і замкової частини) проводять у повній просторовій постановці - з моделюванням розподілу нестационарних температур і напружень у спеціально виділених просторових елементах конструкції.

Усі ці розрахунки проводяться для ротора загалом - для врахування взаємодії деталей під час роботи, яка відіграє дуже важливу роль. Крім того, всі згадані деталі ротора повинні мати однаковий ресурс - для того, щоб їх можна було замінити одночасно - без додаткового відправлення двигуна в ремонт. При цьому спрощується і відстеження ресурсу в експлуатації з плануванням технічного обслуговування.

Максимальна досягнута величина циклічного ресурсу ротора ТВД становить 20000...25000 циклів. У роторі ТНД може бути досягнуто більш високе значення циклічного ресурсу, але з урахуванням необхідності узгодження цього ресурсу з ресурсом роторних деталей ТВД збільшення на 5000 циклів тільки для ТНД вже не має практичного значення.

З'єднання робочих лопаток з диском - напружене і відповідальне місце в конструкції турбіни.

Нині кріплення робочих лопаток у диску турбіни виконується у вигляді так званого "ялинкового" замка.

Зуби під дією відцентрової сили та згинальних моментів працюють на зріз, вигин, зім'яття, а перерізи по западинах замка лопатки з впадинами виступів у диску - на розтягнення. Зуби в лопатці і в диску виконуються з

великою точністю, щоб забезпечити рівномірність контакту зубів по всій поверхні - як за довжиною, так і шириною. Наприклад, допуск на крок зубів становить близько 0,008...0,016 мм. Так забезпечується рівномірне навантаження всіх зубів з'єднання і уникається небезпечне перевантаження окремих елементів замка [3-5].

Ялинковий замок знайшов виняткове застосування на практиці завдяки своїм перевагам:

- клиноподібна форма замкової частини лопатки
- периферійної частини диска забезпечує близький до рівномірного розподіл напружень (товщина обода і маса диска з лопатками виходить мінімальною).
- вільна посадка лопатки в замку (із зазором) усуває виникнення температурних напружень у з'єднанні;
- можлива легка заміна лопаток у колесі в разі перебирання вузла або їх пошкодження.

Під час побудови "ялинкового" замка основними параметрами є крок лопаток по зовнішньому діаметру диска, кут клина і кількість зубів.

-Кут клина замка вибирають, як правило, в межах 30...45°, кількість зубів - від двох до п'яти. Зі збільшенням числа зубів зменшується величина навантаження на кожен зуб, але збільшується концентрація напружень, оскільки при більшій кількості зубів величина радіуса западин зубів зменшується. Тому менше число пар зубів краще.

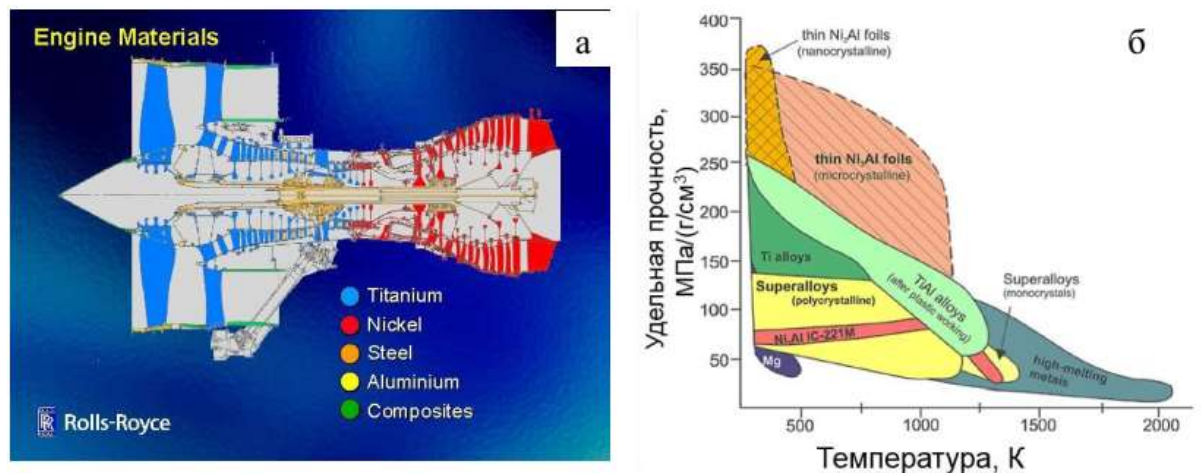
-Найбільш навантажений поперечний переріз у перемичці виступів диска розташований біля основи виступів, а у лопатки - у першій западині замка. Для зниження напружень в елементах замкового з'єднання ширину обода диска роблять трохи більшою за товщину полотна.

-Пази в диску виготовляються протяжкою, а замкова частина лопаток - фрезеруванням або шліфуванням. Для підвищення втомної міцності поверхні «ялинкового» замку лопатки можуть бути зміцнені, наприклад обдуванням мікрокульками.

1.2 Структура, фазовий склад і властивості сплавів на основі нікелю

Жаростійкі нікелеві сплави - складнолеговані сплави на нікелевій основі, з присадками хрому і низки інших легуючих елементів (Cr, Mo, W, V, Al, Ti, Nb, C, B, Se, Hf тощо), що володіють високим опором пластичній деформації і руйнуванню під дією високих температур і окислювальних середовищ [1 - 4].

У сучасних газотурбінних двигунах ~50% деталей виготовляють зі сплавів на основі нікелю [5], які працюють у найгарячіших зонах ГТД (рис. 1.2 а). Наприклад, із ЖНС виготовляють робочі та соплові лопатки, диски ротора турбіни, деталі камери згоряння тощо (рис. 1.2 а). ЖНС вирізняються своєю унікальною здатністю працювати в умовах екстремально високих температур, окислення і гарячої корозії, властивих для газових турбін.



а – матеріали; б – в залежності від питомої міцності

Рисунок 1.2 - Матеріали, що застосовуються в ГТД

Сплави на основі нікелю мають підвищені механічні властивості, які перевершують механічними властивостями, які перевершують за аналогічними характеристиками інші застосовувані сплави (рис.1.1 б), наприклад, на основі заліза і титану. У роботі [6] зазначено, що інтерметалідні

сплави на основі TiAl (рис. 1.1 б) мають високу питому міцність в інтервалі температур 150...600 °С, проте монокристалічні суперсплави на основі нікелю мають більш високі властивості при підвищених температурах аж до 1200...1250 °С.

Завдяки здатності нікелю розчиняти в собі значну кількість легуючих елементів при високих температурах легувальних елементів при високих температурах, ЖНС мають складний хімічний склад (до 15 різних легувальних елементів, включно з рідкоземельними металами). До складу сучасних РНС входять дорогі рідкоземельні легувальні метали, такі як реній і рутеній, що підвищують температуру експлуатації сплавів.

Теорія жароміцності сплавів [7] базується на 3 постулатах:

1) формування гетерофазної структури внаслідок виділення дисперсних частинок γ -фази на основі інтерметаліду $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$, а також карбідів і боридів

2) висока термічна стабільність фаз завдяки введенню тугоплавких елементів W, Mo, Co, а також рідкоземельних металів Re, Ru що пригнічують дифузію і забезпечують твердорозчинне зміцнення при підвищених температурах;

3) поряд із високою міцністю структура меж зерен повинна сприяти релаксації напружень, що виникають при скупченні дислокацій, а виділення, розташовані по межах зерен, повинні запобігати прослизання зерен одне відносно одного [7]. Сегрегації таких елементів як В і С сприяють підвищенню міжкристалітної міцності внаслідок уповільнення дифузійних процесів по межах зерен, утруднення утворення пор і прослизання зерен [8].

Технологія виготовлення деталей з жароміцних сплавів невіддільна від технології отримання самого сплаву і, в основному, визначає рівень властивостей і максимальну робочу температуру [8-12]. Розвиток турбобудування багато в чому зумовлений успіхами у створенні нових жароміцних сплавів із заданими властивостями. Однак, легування сплавів тугоплавкими елементами та ренієм призвело до підвищення їхньої густини.

На основі аналізу даних, наведених у роботах [12], розглянемо найважливіші фази, які трапляються в сплавах на нікелевій основі: γ -фаза - є основою нікелевих сплавів (матрицею), що має гранецентровану кубічну (г.ц.к.) ґратку. Твердорозчинне зміцнення забезпечується за рахунок введення легувальних елементів, що відрізняються атомним діаметром (Co, Fe, Cr, Mo, W, V). Слід зазначити, що тугоплавкі елементи, наприклад, W, Mo вносять найбільший внесок у зміцнення, а інші елементи такі як Cr, Fe, Ti, Co і V є слабкими зміцнювачами [12]. Основний ефект від введення перерахованих вище елементів проявляється в придушенні процесу переповзання дислокацій, контрольованого самодифузією атомів нікелю. Завдяки цьому досягається підвищення тривалої міцності твердого розчину за високих температур. Серед ЖНС виділяють групу залізонікелевих сплавів, у яких у матриці, крім перерахованих елементів, збалансовано вміст заліза та нікелю [13].

Механізм зміцнення інтерметалідними фазами полягає в утрудненні утворення і руху дислокацій цими частинками. Для того щоб дислокації могли долати частинки, відстань між якими дорівнює l , необхідне напруження зсуву.

Що менший розмір частинки, то більший їхній вміст, і що більш рівномірно вони розподілені в сплаві, тим вища напруження τ . Тому для досягнення максимальної жароміцності сплавів домагаються, щоб зміцнювальна фаза складалася з когерентних нанорозмірних частинок [14].

Технологічна пластичність нікелевих сплавів багато в чому зумовлена хімічним складом, особливо вмістом основних γ -утворювальних елементів Al і Ti, що має вирішальний вплив на кількість зміцнювальної γ -фази і температуру її повного розчинення (t_s).

γ -фаза - інтерметалідна сполука $Ni_3(Al,Ti)$, має ГЦК. ґратку, впорядковану структуру L_{12} типу. Основними γ -утворювальними елементами є Al і Ti. Після високотемпературного нагрівання (вище за температуру розчинення γ -фази) і подальшого низькотемпературного старіння в тілі великих зерен γ -фази виділяються когерентні дрібнодисперсні (розміром $\sim 0,1...0,2$ мкм) частинки впорядкованої γ - фази. Завдяки такій обробці

забезпечуються високі жароміцні властивості нікелевих сплавів. Важливо зазначити, що параметр невідповідності (місфіт) між γ і γ' фазами незначний (0...1,5%), що забезпечує високу термічну стабільність структури жароміцних нікелевих сплавів при експлуатаційних температурах (650...850°C).

У найбільш жароміцних сплавах під час ТО виділяється до 55...60% γ' -фази, що забезпечується високим вмістом Al і Ti (до 6...10%). У такому разі щільність розподілу частинок збільшується, а відстань між ними зменшується. Ця обставина призводить до утруднення вентуризерації дислокаційного ковзання під час повзучості [14]. Важливо зазначити, що до жароміцних нікелевих сплавів висуваються вимоги не тільки щодо жароміцності, а й за пластичністю. Тому під час вибору режиму ТО залежно від хімічного складу залежності від хімічного складу конкретного сплаву призначають такий режим, який дає змогу отримати оптимальний розмір когерентних виділень γ' -фази, але не перевищує 0,4 мкм.

Карбіди. Вуглець додають у невеликих кількостях $\sim 0,05...0,2\%$. Основними карбідоутворювальними (карбід типу MC) елементами є Ti, Ta і Nb. Карбіди типу MC під час термічної обробки, а також у процесі експлуатації, такі можуть розпадатися і перетворюватися на карбіди типу M_6C та/або $M_{23}C_6$. Зазначені карбіди виділяються переважно по межах зерен [15]. Наприклад, карбіди типу $Me_{23}C_6$, що виділяються після старіння по межах зерен, мають переважно глобулярну форму, ускладнюють міжзеренне прослизання і тим самим сприятливо впливають на тривалу міцність жаростійких нікелевих сплавів [16].

Боридні фази. Діаметр атомів бору менший за діаметр легувальних елементів і невеликі добавки бору утворюють боридні фази, які сегрегують здебільшого по межах зерен. У забезпеченні структурної стабільності важливу роль відіграють також межі зерен, їхня будова і властивості. Такі фази сприяють підвищенню міжкристалічної міцності внаслідок уповільнення дифузійних процесів по межах зерен, утворення пор і прослизання зерен. Виділення, розташовані по межах зерен, повинні запобігати прослизанню

зерен одне відносно одного. Введення бору забезпечує пластичність жароміцних нікелевих сплавів за рахунок спільної сегрегації з нікелем на границях зерен і формування там шарів з розупорядкованою структурою [17], а також сприятливо впливає на характеристики повзучості жароміцних нікелевих сплавів. Таким чином, невеликі добавки бору мають позитивний вплив на характеристики жароміцності.

У деяких випадках через недостатню ретельну оптимізацію хімічного складу сплаву в процесі ТО або під час експлуатації можуть утворюватися складу сплаву, а також у процесі ТО або під час експлуатації можуть утворюватися небажані фази (топологічно щільноупаковані (ТПУ) σ - і μ -фази). Такі фази, наприклад, ТПУ фази можуть мати форму рівних пластин і часто утворюються по границях карбідних виділень. Особлива небезпека полягає в тому, що в тих місцях, де відбувається виділення ТПУ фаз, твердий розчин збіднюється тугоплавкими елементами, що неминуче призводить до знеміцнення сплаву і зниження характеристик тривалої міцності та пластичності.

1.3 Термічна обробка жароміцних сплавів

Термічна обробка впливає на структуру матеріалу, змінюючи величину зерна, кількість та розподіл дисперсних фаз. Крім того, цей процес формує стани границь зерен і сприяє виокремленню зміцнювальних фаз, що значно підвищує механічні властивості матеріалів, призначених для використання в умовах підвищених температур.

Аустенітні дисперсійно-твердіючі сталі та сплави можуть пройти різноманітні термічні обробки для досягнення бажаних характеристик. Ці обробки включають відпал для розширення зерен та зменшення напружень, гартування для зміцнення структури, відпуск для оптимізації властивостей та

дисперсійне твердіння, яке сприяє відокремленню дисперсних фаз для поліпшення міцності. Також може застосовуватися відпускання для зняття внутрішніх напружень, що можуть виникнути на попередніх етапах обробки. Ці різні етапи термічної обробки спрямовані на досягнення оптимальних властивостей та мікроструктури для конкретного використання матеріалу.

Дисперсійно-твердіючі сплави поділяються на слабо, помірно і сильно дисперсійно-твердіючі в залежності від інтенсивності процесів твердіння. Хоча існує певна непевність у чіткому розмежуванні між цими групами, вони легко відрізняються за інтенсивністю твердіння, як вказано в роботах [18] і [19].

Сильно дисперсійно-твердіючі сталі і сплави найефективніше зміцнюються внаслідок твердіння при кататермічному старінні. У цих сплавах міститься 5-7% і більше зміцнювальної фази. Додаткове старіння цих матеріалів майже не призводить до подальшого зростання твердості і міцності. Прикладами таких сплавів є НХ35ВТЮ (ЭИ787), ЭИ929, ЭИ867, Nin-109, NiN-115 та інші.

Помірно дисперсійно-твердіючі сплави зміцнюються як при кататермічному, так і при ізотермічному старінні. Ці матеріали, такі як ХН35ВТ (ЭИ612), ЭИ612К, ХН35ВТР (ЭИ725), ЭП164, А-286, Дискалой-24, містять 2-5% зміцнювальної фази.

Сплави, слабо або мало дисперсно-твердні, зміцнюються лише за умов штучного ізотермічного старіння. Піддавати ці сталі і сплави кататермічному старінню не ефективно, і вони містять невелику кількість зміцнювальної фази (до 2%). До цієї категорії належать сплави, такі як EI813, X25N16G7AP (ЭИ835), EI435, Nim-75, V-480S та інші.

Отже, немає необхідності в проведенні швидкого охолодження цих сплавів після високотемпературного нагріву. Зміцнення сплавів цієї групи можна досягти природним кататермічним або штучним ізотермічним старінням, або, в кінцевому підсумку, за допомогою їх комбінації.

Для деяких сплавів, зокрема тих, які містять значну кількість зміцнювальної фази, найкращий компроміс механічних властивостей може бути досягнутий за допомогою подвійного гартування (нормалізації) [20]. Перший етап високотемпературної нормалізації (1170-1200°C) призводить до утворення гомогенного твердого розчину і великого зерна, що сприяє найвищому опору повзучості. Другий етап низькотемпературної нормалізації (1000-1100°C) сприяє переважному виділенню карбідів вздовж меж зерен і формуванню зміцнювальної фази різної дисперсності. При подальшому охолодженні від 1050°C на повітрі відбувається більше виділення γ' -фази [20]. У багатьох сплавах, таких як ХН70ВМТЮ (ЭИ617), ЭИ929, ХН35ВТЮ (ЭИ787), а також у серії "німонік", подвійна нормалізація з наступним старінням суттєво підвищує властивості термостійкості та пластичності.

Для досягнення високих механічних властивостей майже всі жароміцні сплави перед введенням у експлуатацію піддають дисперсійному твердінню, що полягає в виділенні дисперсних фаз із твердого розчину. Склад і характер зміцнювальних фаз визначають температурні режими старіння для кожного конкретного сплаву.

У жароміцних сплавах на основі нікельхрому, залізонікельхрому та кобальтнікельхрому містяться:

- а) первинні карбіди (TiC, VC, TaC, ZrC, NbC) з високою температурою дисоціації;
- б) вторинні карбіди ($M_{23}C_6$, M_6C , M_7C_3), що виділяються з твердого розчину. Карбід $M_{23}C_6$ утворюється в сплавах із 5% Cr та вище;
- в) основні зміцнювальні інтерметалідні γ' -фази (Ni_3Ti , Ni_3Al , Ni_3Nb).

Завдяки тонкій дисперсності цих фаз та їх когерентності з твердим розчином, сплави при їх утворенні набувають максимальної жароміцності.

Сталі і сплави з карбідним зміцненням використовуються при температурах, які нижчі, ніж ті, де застосовують сплави з інтерметалідним зміцненням. Карбіди менш дисперсні, більш схильні до коагуляції і розподілені в матриці сплаву менш рівномірно, ніж γ' -фази. Однак для

досягнення середньої жароміцності досить одного карбідного зміцнення. Карбідні фази додатково зміцнюють сплави, які вже твердіють в результаті виділення γ' -фази.

Морфологія частинок γ' -фаз і карбідів в значній мірі залежить від термічної обробки і її тривалості, що впливає на властивості сплавів. Продовжена теплова обробка призводить до збільшення розмірів частинок γ' -фази і викликає реакції, які переважно відбуваються по межах зерен. Для розуміння процесів, які відбуваються в сплавах під час термічної обробки, і прогнозування їх властивостей при тривалому експлуатаційному використанні, надзвичайно важливо мати точні дані про склад γ' -фази при різних температурах і різних часах витримки при цих температурах, а також знати хімічний склад матричного твердого розчину. Кінетика перетворення карбідних і інтерметалідних фаз, а також їхні реакції можуть бути оцінені за допомогою даних про кінетику змін твердості, фізичних і механічних властивостей [21].

Швидкість реакції перетворення γ' -фази піддається більшим змінам при наявності напружень під час теплової обробки, ніж у випадку напружень, які вже існували перед цим. Напруження сприяють процесам виділення та перетворення, сприяють потовщенню границь зерен і спричиняють ефект подовження та коалесценції зміцнювальних фаз, як це було демонстровано в роботах [22,23].

Збільшення розмірів зерна сприяє прискоренню реакцій перетворень карбідних і інтерметалідних фаз, які відбуваються в зонах прикордонної взаємодії. Наприклад, у великозернистих сплавах спостерігається значна ранність появи високотемпературної пластинчастої фази.

У дослідженні [24] виявлено утворення інтерметалідних фаз $\text{Ni}_2\text{-Al}$ та Ti в сплаві зі складом 15 Cr-25 Ni-3Al-2,5 Ti поряд із γ' -фазою $\text{Ni}_3(\text{Al, Ti})$. Фаза $\text{Ni}_2\text{-Al}$, Ti формується під час старіння при 700°C та приймає форму пластин, розміри яких збільшуються зі збільшенням часу витримки. Ця фаза виділяється переважно в областях, які не містять γ' -фазу, а також вздовж меж

зерен. Оскільки вона є некогерентною з твердим розчином, мікропорожнечі перед руйнуванням сплаву утворюються переважно поблизу цих виділень.

Фази Лавеса (типу AB_2) надають невелике зміцнення сплавам через свою некогерентність з твердим розчином та термічну нестабільність. Однак при наявності γ' -фази фази Лавеса можуть продовжувати термін служби сплавів за умови їхньої тривалої інкубаційної періодичності, особливо при температурах, які не перевищують 750°C .

Фази боридів, такі як M_3B_2 , M_3B , M_5B_5 , у різних бормістких сплавах мають складний хімічний склад. Наприклад, згідно з результатами дослідження [25], такі фази відповідають з'єднанню $(Mo_{0,5}Cr_{0,25}Ti_{0,15}Ni_{0,10})_3B_2$. В залежності від наявності різних фаз і стану сплаву (литі або деформовані) визначають режими твердіння. Температура старіння не повинна призводити до розчинення зміцнювальних фаз і їхньої коагуляції. У деяких випадках, навіть за високих температур, що спричиняють коагуляцію частинок і їх виділення в менш дисперсній формі, свідомо використовують для досягнення потрібних властивостей. Зазвичай старіння сплавів з карбідним зміцненням проводять при $600-800^\circ\text{C}$, а з інтерметалідним зміцненням - при $700-1000^\circ\text{C}$, залежно від кількості і складу надлишкових фаз. Зі збільшенням кількості зміцнювальної фази (сума титану і алюмінію) у сплавах підвищується температура старіння. Сплави, які містять більше 8% (Ti + Al), піддаються нагріванню до $1050-1200^\circ\text{C}$ і охолоджують на повітрі, отримуючи максимальне зміцнення. Режими старіння можна змінювати в залежності від потрібних властивостей сплаву. Важливо враховувати, що складні термічні обробки, такі як багатоступеневі режими старіння, можуть бути неефективними для короткочасних або тривалих термінів служби сплавів, оскільки структури, отримані в їхньому результаті, можуть піддаватися змінам під впливом умов тривалої експлуатації, температури і навантаження.

Процеси старіння в сплавах продовжуються незалежно від їхнього вихідного структурного стану. Частинки зміцнювальної фази коагулюють, а менш стійкі частинки розчиняються в твердому розчині. Водночас

відбуваються повторні і неодноразові виділення нових частинок, які більш еквілібровані на даному етапі.

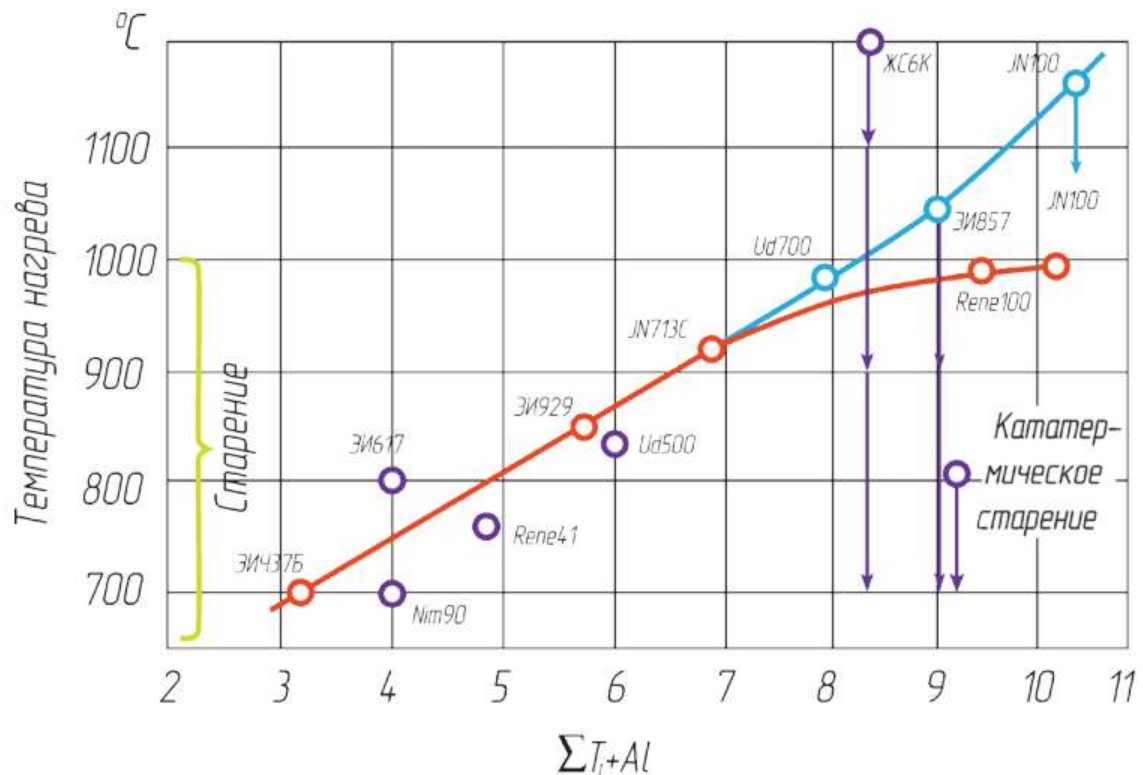


Рисунок 1.3 - Режими старіння сплавів на основі нікелю в залежності від вмісту титану і алюмінію

Процеси старіння в сплавах продовжуються незалежно від їхнього вихідного структурного стану. Частинки зміцнювальної фази коагулюють, а менш стійкі частинки розчиняються в твердому розчині. Водночас відбуваються повторні і неодноразові виділення нових частинок, які більш еквілібровані на даному етапі. Ці процеси взаємодіють одночасно, і переважання того чи іншого процесу залежить від температурних умов. Після витримки, яка зазвичай триває від 4 до 16 годин при температурах старіння, сплави охолоджують на повітрі.

Слід відзначити, що за кордоном температура гартування нижча, а час витримки значно менший (приблизно в 2 рази), ніж температура гартування, яка використовується для вітчизняних сплавів. Внаслідок цього закордонні сплави мають більш дрібнозернисту структуру порівняно з тими, що

використовуються у нас. Навпаки, друге гартування за кордоном не є загальнопоширеним явищем, у той час як в Україні воно успішно використовується для багатьох сплавів.

Типові режими термічної обробки можуть бути адаптовані відповідно до конкретних вимог. Відомо, що сплави з великим розміром зерна, які формуються при нагріванні до високих температур, володіють більш високим опором повзучості, порівняно з дрібнозернистими. Грубозернисті сплави (з рейтингом 2-3) також виявляють значну тривалу міцність при високих температурах. Однак для помірно високих температур (600-700°C) більш висока жароміцність спостерігається у сплавів з середнім розміром зерна, оціненим на 4-5 балів. Дрібнозерниста структура, через більшу поверхневу енергію границь зерен, стає менш стабільною, особливо при підвищених температурах експлуатації. Таким чином, для жароміцних сплавів, призначених для тривалої експлуатації, розмір зерна важливо зберігати в межах 3-4 балів за стандартною шкалою. Цей розмір зерна, зазвичай, досягається при нагріванні до 1100-1120°C для сплавів із загальною легованістю та до 1150-1170°C для складнолегованих сплавів.

Для досягнення високих механічних властивостей міцності при кімнатній та невисоких температурах (~ 550°C), процедуру нормалізації слід проводити при температурах від 950 до 1050°C, а старіння - при більш низьких температурах. Цей підхід призводить до отримання дрібнозернистих структур (5-6 балів), зміцнених тонкодисперсними відділеннями γ' -фази.

Отже, вибір режиму термічної обробки формується з урахуванням необхідних механічних характеристик. У випадку використання сплавів, які суттєво твердіють внаслідок дисперсійного зміцнення, для роботи при температурах, що перевищують інтервал твердіння (наприклад, при 900-950°C), зазвичай застосовують лише один етап нормалізації. При нагріванні до робочих температур спостерігається інтенсивне твердіння, і такі сплави мають максимальне зміцнення в зоні робочих температур, що дозволяє їм ефективно витримувати навантаження протягом певного часу. Проте зазначено, що

попередньо зістарені такі сплави мають менший резерв опору високим температурам та навантаженням, що робить їх менш ефективними. Слабо дисперсійно-твердіючі сплави (наприклад, ЭИ813, ЭИ435, Inconel-600) піддаються старінню, оскільки дисперсійне твердіння має невеликий ефект і відбувається під час експлуатації.

Для забезпечення довготривалої стабільності сплавів важливо використовувати сплави з помірним вмістом зміцнювальних фаз (тобто матеріалів із помірною дисперсійно-твердіючою структурою). При цьому значущим є отримання рівномірного та максимального виділення тонкодисперсних інтерметалідних і карбідних фаз, що може бути досягнуто за допомогою ступінчатих режимів обробки. Хоча ступінчасті режими старіння [25], в деякій мірі, можуть призводити до втрати властивостей міцності, вони помітно підвищують пластичність та зменшують схильність сплавів до теплової крихкості. Втім, подальші експерименти виявили, що цей метод може бути неефективним. Наприклад, на сильно дисперсійно-твердіючому сплаві ХН35ВТЮ (ЭИ787) були проведені порівняльні тести, включаючи складні режими термічної обробки та простий режим, складений лише з одного етапу старіння при 750°C. Вимірювалася схильність до теплової крихкості під час експлуатації протягом 10 000-20 000 годин при температурі 700°C. Результати показали, що незалежно від складності попереднього режиму термічної обробки сплав виявляє крихкість. Збільшення числа ступенів відпустки чи тривалості витримки впливає лише на початкові значення ударної в'язкості, але в процесі старіння це значення знижується, і це відбувається менше інтенсивно після термічної обробки, складеної з одного етапу старіння.

Як вже зазначалося, процеси дисперсійного виділення та розчинення термодинамічно нестійких частинок другої фази відбуваються неперервно і регенеруються цикл за циклом. Незалежно від того, наскільки сплав був попередньо зістарений та які режими термічної обробки застосовувалися, при тривалій тепловій витримці він буде змінювати свої властивості, стаючи більш

хрупким внаслідок постійного виділення частинок зміцнювальної фази та зміни структурного стану.

Звернемо увагу на оригінальний та простий режим термічної обробки для дисперсійно-твердіючих гарячо або холоднодеформованих сплавів, що складається з одинарного етапу старіння і не включає попереднього гартування.

Цей режим термічної обробки дозволяє досягати найкращих характеристик міцності і пластичності в широкому температурному діапазоні, а також забезпечує високу жароміцність і опір втомі при температурах до 750°C [16]. Відзначається високим опором тепловій крихкості та стійкістю до надрізів. Цей режим, що включає лише один етап старіння, був випробуваний на деяких сплавах і успішно впроваджений у виробництво [16, 21, 22]. На жаль, інформації щодо застосування цих режимів за кордоном наразі відсутні.

Ще однією важливою умовою для забезпечення тривалої стабільності сплавів є досягнення високої термічної стійкості зміцнювальних фаз. Це досягається за допомогою ускладнення складу зміцнювальних фаз шляхом введення в сплав елементів, які частково утворюють зміцнювальну γ' -фазу. Найбільш ефективні зміцнювальні γ' -фази, такі як Ni_3Al і Ni_3Ti , а також їх комбінації, такі як $\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})$, можуть бути ускладнені додаванням таких елементів, як ніобій, тантал, олово, кремній, магній, берилій, рутеній, молібден та інші. Ці елементи сприяють дисперсійному твердінню нікелевих сплавів. Зокрема, елементи з трошки більшим атомним діаметром, наприклад, олово, викликають особливий інтерес.

Для розслаблення внутрішніх напружень і стабілізації розмірів деталей часто застосовується відпуск. Внутрішні напруги можуть виникати внаслідок механічної обробки, зварювання або в процесі експлуатації. Готові вироби з жароміцних сплавів піддають відпуску при температурах 400-700°C залежно від розмірів виробу; після відпуску застосовується повільне охолодження. При більш високих температурах відпуску можуть розпочинатися процеси старіння, і для багатьох сплавів відпуск може бути поєднаний зі звичайним

старінням. Таким чином, як завершальну обробку перед експлуатацією, доцільно проводити старіння, що дозволяє повністю зняти внутрішні напруження.

У процесі тривалої термічної обробки або під час експлуатації в багатьох жароміцних сплавах можуть утворюватися σ -, μ - та інші фази, які не мають строго визначеного стехіометричного співвідношення і представляють собою тверді розчини змінного складу. Ці фази можуть спричинити зниження пластичних властивостей сталей і сплавів. Виникненню σ -фази можуть сприяти хром, вольфрам, молібден. Додавання невеликих кількостей кобальту (до 5%) може зменшити утворення σ -фази, оскільки він входить у склад зміцнювальної фази Ni_3M і вивільняє хром у твердий розчин. Проте вміст кобальту понад 5% може активно впливати на утворення σ -фази, особливо при недостатці хрому в сплаві. Існують методи розрахунку часу утворення σ -фази в сплавах, такі як розрахунок точки N_v - точки щільності електронних вакансій, проте ці методи не завжди є точними. Деякі сплави можуть мати небезпечну точку N_v , але при цьому не утворювати σ -фазу. У деяких високоміцних литих сплавах, таких як Ud-700, Ud-500, Ud-520, IN-713C, Rene-41, виявлено σ -фазу, проте її наявність майже не впливає на міцність цих сплавів [25].

Сплави на нікелевій основі успішно утримуються від окислення до температур 850-950°C. Проте при більш високих температурах, зокрема під час нагрівання для гартування, вони можуть піддаватися окисленню на поверхні та вздовж границь зерен. Тому для термічної обробки жароміцних сплавів при високих температурах, рекомендується використовувати вакуумні печі, забезпечуючи охолодження металу струменем інертного газу після завершення витримки. Якщо окислення є неприпустимим, слід використовувати печі з захисною атмосферою. Нагрівання в соляних ваннах не рекомендується, оскільки хлоридні ванни можуть реагувати з поверхнею металу під час нагрівання, навіть при температурах старіння.

Термічні печі для проведення старіння можуть бути звичайними, з повітряною атмосферою та нагріванням газом. Використання розбавленої екзотермічної атмосфери є відносно безпечним і економічним рішенням. Ендотермічна атмосфера не рекомендується. Якщо необхідно уникнути окислення, застосовують атмосферу аргону. Важливо підтримувати точність регулювання температури під час термічної обробки в межах 4-5°C для формованих сплавів і 8-10°C для ливарних.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Хімічний склад сплавів, які досліджуються

Диски газотурбінних двигунів (ГТД) виготовляють з високоміцних сплавів, щоб забезпечити необхідну міцність та термостійкість при високих температурах та великих обертальних швидкостях. Давайте розглянемо вказані матеріали. Залізонікелевий сплав ХН45МВТЮБР (ЭП718-ИД).

Цей сплав є високоміцним нікелевим сплавом і часто використовується в гарячих зонах газотурбінних двигунів.

Забезпечує міцність та термостійкість при високих температурах.

Нікелевий сплав ХН60ВТ (ЭИ868). Нікелеві сплави, такі як ХН60ВТ, також застосовуються в газотурбінних двигунах через їхню високу міцність та стійкість до окислення при високих температурах. Хімічний склад сплавів наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад сплавів ХН45МВТЮБР (ЭП718-ИД), ХН60ВТ (ЭИ868)

Марка сплаву	Вміст елементів, % (мас.)															
	C	Cr	Mo	Ni	Ti	W	Nb	V	Al	Mn	Si	S	P	Zr	Ce	B
	не більше															
ХН45МВТЮБР	0,10	14,0-16,0	4,0-5,2	43,0-47,0	1,9-2,4	2,5-3,5	0,8-1,5	-	0,9-1,4	0,6	0,3	0,01	0,015	0,02	0,1	0,008
13Х12Н2В2МФ	0,1-0,16	10,5-12	0,35-0,5	1,5-1,8	-	1,6-2,0	-	0,18-0,3	-	0,6	0,6	0,03	0,03	-	-	-

2.2 Дослідження мікроструктури сплавів

2.2.1 Приготування зразків

Мікрошліф - це зразок, поверхня якої готується для проведення мікроаналізу. Правильне виготовлення шліфів є ключовим, оскільки від цього залежить правильність інтерпретації мікроструктур. Найзручнішими є прості форми зразків, такі як циліндр або куб. Зразки виготовляють із нахиленими кутами на поверхні мікрошліфа, щоб уникнути розривання тканини під час полірування. Розміри зразків зазвичай складають діаметр 10-20 мм або сторона квадрата 10-20 мм при висоті 10-15 мм. Вони вирізаються за допомогою токарного, фрезерного або стругального верстата. Для металів і сплавів із високою твердістю та складною оброблюваністю використовуються нормальні різальні інструменти, зроблені із твердих або надтвердих сплавів, або застосовують тонкі абразивні крути та електроіскрове різання. Зразки з крихких матеріалів відбирають за допомогою алмазного інструменту.

Процес шліфування виконується за допомогою абразивних кругів, і під час цього процесу важливо застосовувати ефективне охолодження. Завершення шліфування настає після повного вирівнювання всієї поверхні різку або шліфа. Шліфування проводять за допомогою 4-5 різних номерів шліфувального паперу, який обирається відповідно до властивостей оброблюваного матеріалу.

Полірування застосовується для видалення невеликих дефектів поверхні та залишених після шліфування подряпин. Цей процес виконується на спеціальному полірувальному верстаті, диск якого покритий фетром, тканиною або оксамитом. Диск верстата зволожують полірувальною рідиною, що складається з води, в яку додаються частки полірувального порошку, такого як оксид алюмінію або оксид хрому.

Для виявлення структури матеріалу можна використовувати техніку створення рельєфу або фарбування різними кольорами його структурних компонентів, що часто досягається хімічним травленням. Під час травлення

кислота впливає в основному на межі фаз і зерен, які є місцями з найбільш дефектною структурою і які на протравленому шліфі стають виїмками. Світло, яке падає, буде розсіюватися, і в полі мікроскопа ці області будуть виглядати темними, тоді як тіла зерен будуть виглядати світлими.

Зразки сплавів для зазначеного випробування (мікрошліфи), щавили хімічно в реактиві складу: 92 мл HCl + 5 мл H₂SO₄ + 3мл HNO₃ + 5 г CuSO₄ + 50 мл C₂H₅OH або електролітично в реактиві 9,8 г H₂SO₄ + 16 г NaCl + 5,4 г FeSO₄ + 100 H₂O при густині струму 0,1 А/см².

2.2.2 Дослідження мікроструктури на МІМ-7

Оптична мікроскопія ґрунтується на використанні білого світла, оптичних лінз та призм. Металографічний мікроскоп МІМ-7, заснований на цих принципах, надає можливість отримати корисне збільшення до 1440 і 1350 разів при візуальному спостереженні, а також до 2000 разів при фотографуванні. Зазначений мікроскоп є вертикальним оптичним мікроскопом.

Мікроскоп МІМ-7 складається з оптичної системи, фотографічної апаратури, освітлювального обладнання та механічної системи. В оптичну систему входять об'єктив, окуляр, дзеркала та призми. Об'єктив і окуляр є складними системами лінз, розміщеними в одній оправі. Об'єктив, звернений до об'єкту для огляду, створює його зворотне, збільшене дійсне зображення. Окуляр, призначений для ока спостерігача, надає уявне, збільшене зображення, отримане об'єктивом. Однак важливо зауважити, що окуляр не може підвищити роздільної здатності мікроскопа. Вибір окуляра проводиться таким чином, щоб деталі структури, збільшені об'єктивом, були чітко видимі.

2.3 Дослідження механічних властивостей

Для визначення ресурсу виробів, які працюють в екстремальних умовах, критично мати повний набір характеристик міцності для кожного матеріалу, включаючи параметри багатоциклової втоми. Ці характеристики можуть бути визначені шляхом проведення серії випробувань.

Досліджувані схеми навантаження, такі як одновісне "розтягування-стиснення" і "чистий згин з обертанням", передбачають різні напружено-деформовані стани матеріалів. Одновісне навантаження включає в себе зміну довжини матеріалу, тоді як чистий згин з обертанням викликає комбінацію різних деформацій, таких як згин і обертання.

Під час випробувань буде важливо вимірювати реакцію матеріалу на навантаження і визначати, як ці навантаження впливають на його міцність та стійкість. Результати випробувань допоможуть побудувати криві напруження-деформації та визначити характеристики багатоциклової втоми, що є ключовими для прогнозування ресурсу виробів в умовах екстремальних навантажень.

Випробування на розтяг проводять для металевих зразків за допомогою спеціальних розривних машин, таких як ІМ-12А, РМ-500 та інші. Стандартні зразки певної форми і розмірів закріплюються у захопленні машини і піддаються розтягуючому навантаженню, яке збільшується. Сила, яка розтягує зразок, вимірюється силоміром розривної машини. Розрив зразка відбувається, коли сила розтягу перевищує опір матеріалу.

Під час випробування автоматично фіксуються напруги, що виникають в матеріалі, і записуються на діаграмі розтягування. На цій діаграмі по осі ординат відображається розтяжне зусилля P (в кгс), а по осі абсцис - деформація або абсолютне подовження зразка (в мм).

З діаграми можна визначити показники механічних властивостей, такі як межа пропорційності, пружність, плинність, міцність, справжній опір розриву,

відносне подовження і відносне звуження, оскільки на ній виділяються характерні точки, такі як А (границя пропорційності), Б (границя текучості), Г (максимальна сила), Д (розрив).

Визначення твердості сплавів виконувалось методом Роквелла за допомогою установки «Amsler». Для виконання вимірювань використовувався алундовий індентор з радіусом закруглення 2,5 мм. Навантаження на індентор становило 250 МПа. Перед навантаженням індентор разом із зразком прогрівався до температури випробування. Тривалість зберігання під навантаженням складала 30 секунд.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

У сучасних газотурбінних двигунах більшість дисків турбіни та останніх ступенів компресора піддаються нерівномірному, часто нестационарному нагріванню, де обідна частина може досягати температур від 550 до 800°C, тоді як серцевина нагрівається до 300-550°C.

Основними контрольованими властивостями таких дисків є границі міцності, плинності, повзучості та малоциклічна втома. Слід відзначити, що опір малоциклічній втомі, зокрема, має вирішальне значення для тривалості служби диска. Розробка дисків, здатних ефективно працювати в умовах значного температурного різниці для двигунів нових поколінь, представляє собою складне та відповідальне завдання. Механізми зміцнення, відповідальні за межі міцності та тривалу міцність, мають різні природні основи, що робить досягнення високих значень обох параметрів самостійною та складною проблемою.

Для забезпечення працездатності дисків з нікелевих сплавів матеріал повинен відповідати наступним основним вимогам:

- високий рівень тривалої і короткочасної міцності у всьому діапазоні робочих температур;
- низька чутливість до концентрації напружень при статичному навантаженні;
- висока пластичність при тривалому і короткочасному навантаженні;
- досить високий опір малоциклічній втомі;
- стабільність структури і фазового складу;
- хороша технологічність.

Практика показує, що ГЦК ґратка сприяє високій міцності, пластичності та опору повзучості при більш високих температурах, порівняно з ОЦК ґраткою. Це обумовлено впливом кількох факторів, серед яких важливе

значення мають високі показники модуля пружності та коефіцієнту дифузії в ГЦК гратці легувальних елементів.

Найважливішим є висока розчинність багатьох елементів у матриці та можливість контрольованого виділення інтерметалідів, таких як γ' -фаза та карбіди. Це дозволяє створювати сплави для деталей різних застосувань.

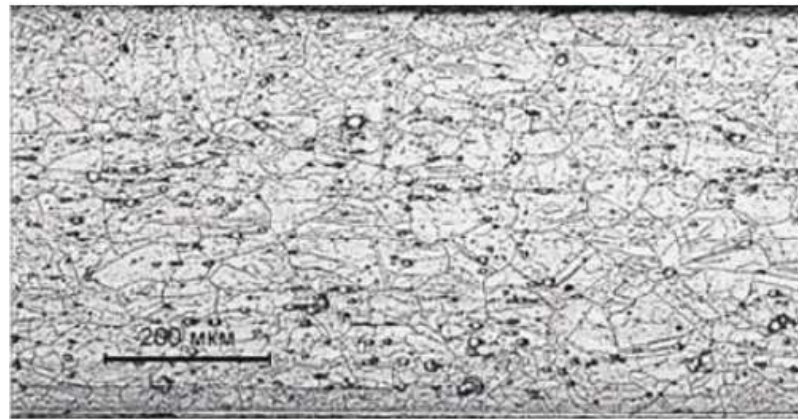
3.1 Характеристика та термічна обробка сплаву ХН60ВТ

Жароміцний хромонікелевий сплав ХН60ВТ (ЭИ868) таблиця 2.1 містить з 13-15 % вольфраму належить до гомогенних сплавів на основі γ -твердого розчину, володіє хорошими технологічними властивостями і досить високою окалинотійкістю [1]. Температура інтенсивного окалиноутворення на повітрі - 1100 °С [2]. Він добре штампується і, що дуже важливо, добре зварюється.

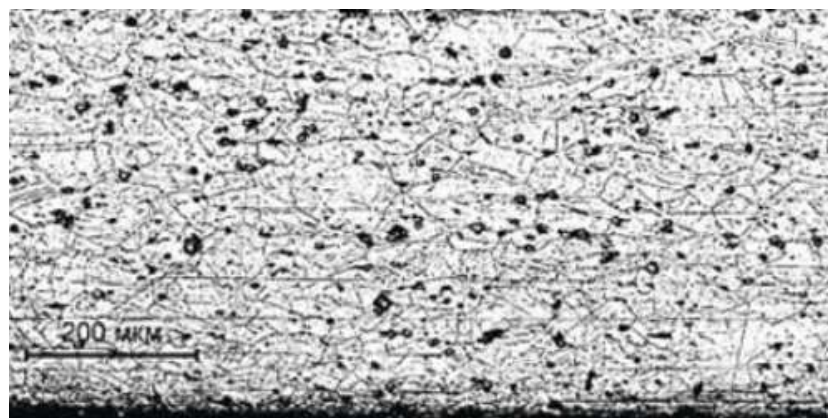
Сплав ХН60ВТ (ЭИ868) – це жароміцний сплав, на основі нікелю та хрому, легований вольфрамом і титаном, використовують для виготовлення деталей камер згоряння, форсажних камер та інших деталей з робочою температурою до 1000-1100°С. Високі пропорції нікелю, хрому та інших елементів визначають і такі властивості, як тугоплавкість та пластичність. Іншими найважливішими якостями сплаву ХН60ВТ є стійкість до корозії і підвищений електричний опір. Недоліком сплаву ХН60ВТ можна вважати лише досить високу його вартість. Але і цей недолік дуже умовний внаслідок високої міцності і довговічності виробів. Крім того, є можливість вторинної переробки матеріалу, що робить використання даного сплаву вигідним. Сплав ХН60ВТ має низьку концентрацію γ' -утворюючих елементів, тому не містить в своїй структурі γ' -фазу, відрізняється підвищеною пластичністю і не вимагає термічної обробки після зварювання. Структура сплаву складається з легованого W нікелевого γ -твердого розчину і карбідної фази $\text{Ni}_3\text{W}_3\text{C}$ і Cr_{23}C_6 .

Схема виробництва холоднокатаного рулонного прокату зі сплаву ХН60ВТ передбачає термічну обробку в безперервному гартівно-травельному агрегаті для зняття внутрішніх напружень (наклепу), що утворилися в холодному стані. внутрішніх напружень (наклепу), що утворилися під час прокатки рулонів у холодному стані.

Мікроструктура зразків холоднокатаного прокату після термічної обробки в інтервалі температур від 1130 до 1180 °С ідентична, фактичний розмір зерна, отриманий на зразках, відповідає номеру 8, 6 шкали 3 Г ДСТУ 8972:2019 (рисунок 3.1), що задовольняє вимогам ТУ 14-1-1747-76, розмір зерна від 5 до 9 номери.



а



б

а — при 1150 °С; б — при 1180 °С

Рисунок 3.1 – Мікроструктура сплаву ХН60ВТ після гартування

З підвищенням температури гартування до 1200-1250°C спостерігається збільшення розміру аустенітного зерна до номера 4 ДСТУ 8972:2019 за рахунок протікання процесу збірної рекристалізації (рисунок 3.2).

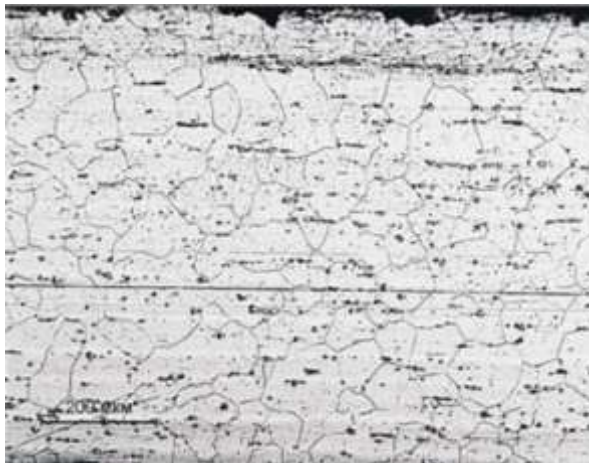


Рисунок 3.2 - Мікроструктура сплаву ХН60ВТ
після гартування при 1250 °С

Отже, для сплаву ХН60ВТ (ЭИ868) характерною термічною обробкою є гартування при температурі 1150°C, яке проводиться з метою розчинення карбідних і інтерметалідних фаз у твердому розчині, тобто для отримання однорідного твердого розчину, що володіє мінімальною твердістю. Сплав має невелику кількість зміцнювальної фази, тому старіння не проводиться. Структура після термічної обробки $\gamma + \text{Ni}_3\text{W}_3\text{C} + \text{Cr}_{23}\text{C}_6$ (рисунок 3.3) Гартування жароміцних сплавів за своїм ефектом відрізняється від гартування вуглецевих сталей і проводиться з метою розчинення карбідних та інтерметалідних фаз (в основному γ' -фазу) в твердому розчині, тобто з метою отримання пересиченого твердого розчину. При призначенні температури гартування необхідно враховувати можливість найбільш повного розчинення вторинної фази. Верхня границя інтервалу температури гартування має бути нижчою за температуру солідусу для запобігання плавленню границь зерен. При перегріванні порушується зв'язок між зернами та під дією гартівних напружень виникають міжкристалічні тріщини, що суттєво погіршують пластичність та міцність.

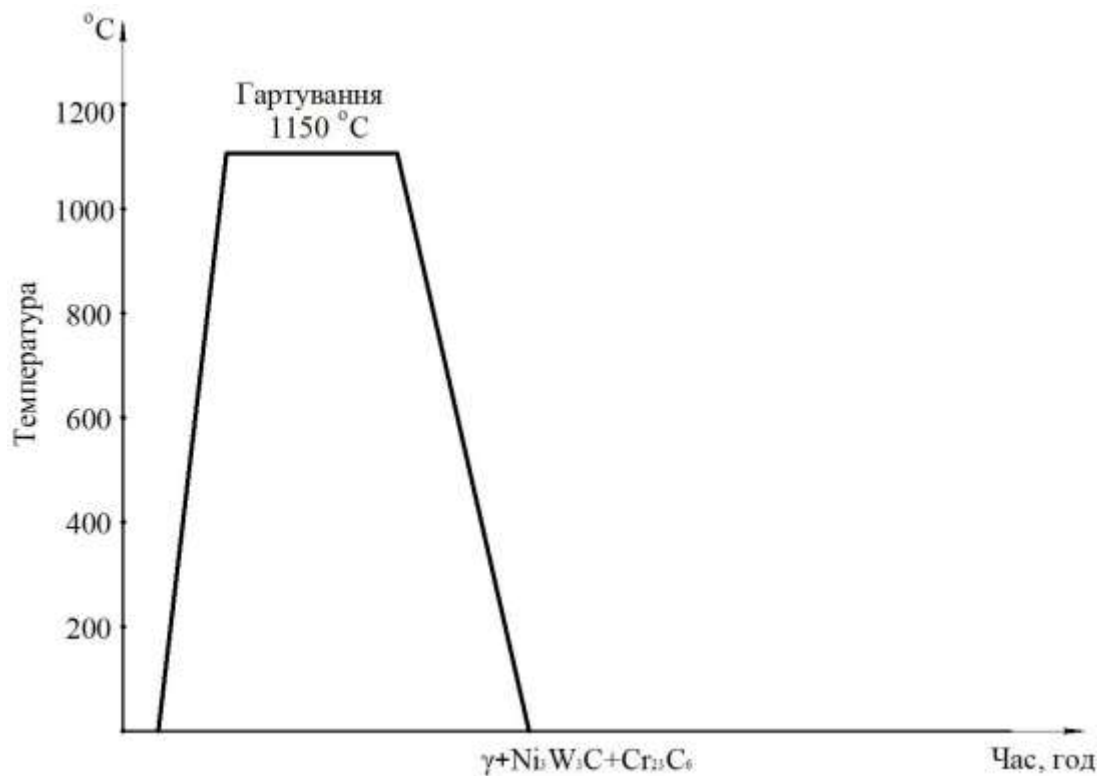


Рисунок 3.3 – Графік термічної обробки сплаву ХН60ВТ

Після проведення термічної обробки сплав характеризується високими жароміцними властивостями, які наведені в таблиці 3.1

Витримка при високих температурах дозволяє розчинити надлишкові фази в твердому розчині і отримати зерна необхідних розмірів.

Швидкість охолодження при гартуванні повинна бути достатньою для запобігання розпаду пересиченого твердого розчину, або при виділенні незначної кількості вторинної фази зберігати необхідну пересиченість твердого розчину. Стійкість переохолодженого твердого розчину залежить від схеми легування, вмісту легувальних елементів та структури сплаву до гартування. У випадку складнолегованих жароміцних сплавів, навіть при охолодженні у воді, не існує можливості повністю уникнути виділення надлишкових фаз через низьку стійкість переохолодженої матриці, тому після гартування в структурі окрім пересиченого твердого розчину на основі нікелю присутні ультра-дисперсні частинки γ' -фази.

Охолодження у воді може бути недоцільним через виникаючі при гартуванні напруження, що здатні привести до жолоблення виробів та появи

тріщин. Тому для проведення гартування деталей з жароміцних нікелевих сплавів найчастіше застосовують охолодженням на повітрі (або в аргоні).

Таблиця 3.1 – Показники границі витривалості і жароміцності сплаву ХН60ВТ

Марка сплаву	Температура, °С	σ_{100} , МПа	$\sigma_{2/100}$, МПа	σ_{-1} , МПа
ХН60ВТ	800	110	83	160
	900	52	34	120

Механічні властивості сплаву $\sigma_{0,2} = 680$ МПа ; $\sigma_B = 220$ МПа, $\delta = 45\%$;
 $\psi = 50\%$

3.2 Характеристика та термічна обробка сплаву ХН45МВТЮБР (ЭП718-ИД)

ХН45МВТЮБР (ЭП718) – жароміцний залізохромонікелевий сплав, використовується для виготовлення високоміцних елементів зварних конструкцій статорних вузлів ГТД, які тривало експлуатаються при температурах 600-700°C і короткотривало при 800°C. Основою сплаву є аустенітний твердий розчин системи Cr-Ni-Fe, легований молібденом, алюмінієм, ніобієм, бором, цирконієм, церієм. За жароміцними властивостями матеріал перевершує всі хромонікелеві сталі типа ЭИ969, та інші аналогічного призначення і широко використовуються для робочих високонавантажених лопаток КВТ. Сплав володіє задовільною корозійною стійкістю у всіх кліматичних умовах і достатньо високою жаростійкістю до 800°C. Хімічний склад наведено на в таблиці 2.1. Механічні властивості сплаву та режим термічної обробки наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Механічні властивості сплаву ХН45МВТЮБР після ТО

Марка сплаву	Режим ТО	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %
ЭП718-ИД (ХН45МВТЮБР)	Гарт 1010°C 1.30-2 год, аргон, Старіння 1:780 °C 5-6год, аргон Старіння 2:660 °C, 11-16год, аргон	700	1150	12	14

Властивості жароміцності наведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Показники границі витривалості і жароміцності сплаву ХН45МВТЮБР

Марка сплаву	σ^{600}_{100} , МПа	$\sigma^{600}_{0,2/100}$, МПа	σ_{-1} , МПа
ХН45МВТЮБР	795	-	400

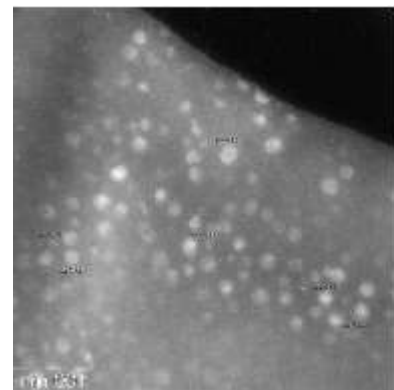
Термічна обробка для цього сплаву – це гартування і подвійне старіння. Гартування проводиться з метою отримання пересиченого твердого розчину. Основна мета двоступеневого (подвійного) старіння - створити велике число центрів виділень на високотемпературній ступені, коли пересиченість твердого розчину велика, а потім на низькотемпературній ступені отримати необхідну ступінь розпаду розчину і оптимальний розмір виділень. В результаті досягаються більш висока щільність і однорідність розподілу виділень, ніж це можливо при одноступінчастому старінні при підвищеній температурі. Ступеневе старіння викликає виділення γ' -фази в більшій кількості порівняно зі стандартним і таким чином одержують більш високий ефект від дисперсійного зміцнення. Як наслідок цього твердість і характеристики міцності (границя міцності і плинності) при ступінчастому старіння вище, ніж при стандартному. Також відмінність в термообробці

позначається на довговічності. При ступінчастому вона зростає. Ступінчасте старіння має перевагу перед стандартним - поряд із скороченням тривалості процесу, він дає збільшення показника довговічності і підвищення рівня міцності властивостей сплаву.

Мікроструктура сплаву ЭП718 для всіх досліджених станів характеризується аустенітною матрицею з наявністю неметалевих включень і вторинних фаз у напрямку деформації, рис. 3.4, а. Проведення циклу старіння призводить до появи дисперсних інтерметалідних зміцнювальних частинок розміром 10-20 нм, рис. 3.4, б



а



б

а — $\times 100$; б — $\times 10000$

Рисунок 3.4 - Мікроструктура сплаву ЭП718 після старіння при різних варіантах збільшення

Структура після такої обробки: $A + \gamma' + K + \text{бориди}$. В термічнообробленому стані (гарт і подвійне старіння) після витримки 100 годин на повітрі при 800°C для сплаву характерно збільшення маси на $0,025\text{г/м}^2\text{год}$.

При термічній обробці сплавів повинні бути отримані:

- високий ступінь гомогенізації твердого розчину та максимально можливий рівень досконалості кристалічної ґратки матриці;
- велика величина зерна, яка забезпечить максимальну жароміцність;

- максимальна об'ємна частка основної зміцнювальної γ' – фази;
- сферичні частинки зміцнювальних фаз по границях зерен, що заважають проковзуванню границь зерен та порівняно слабо знижують пластичність.

Саме враховуючи вищенаведені показники, необхідно застосувати такі операції термічної обробки як гартування та подальше старіння. Графік термічної обробки сплаву ХН45МВТЮБР наведено на рисунку 3.5.

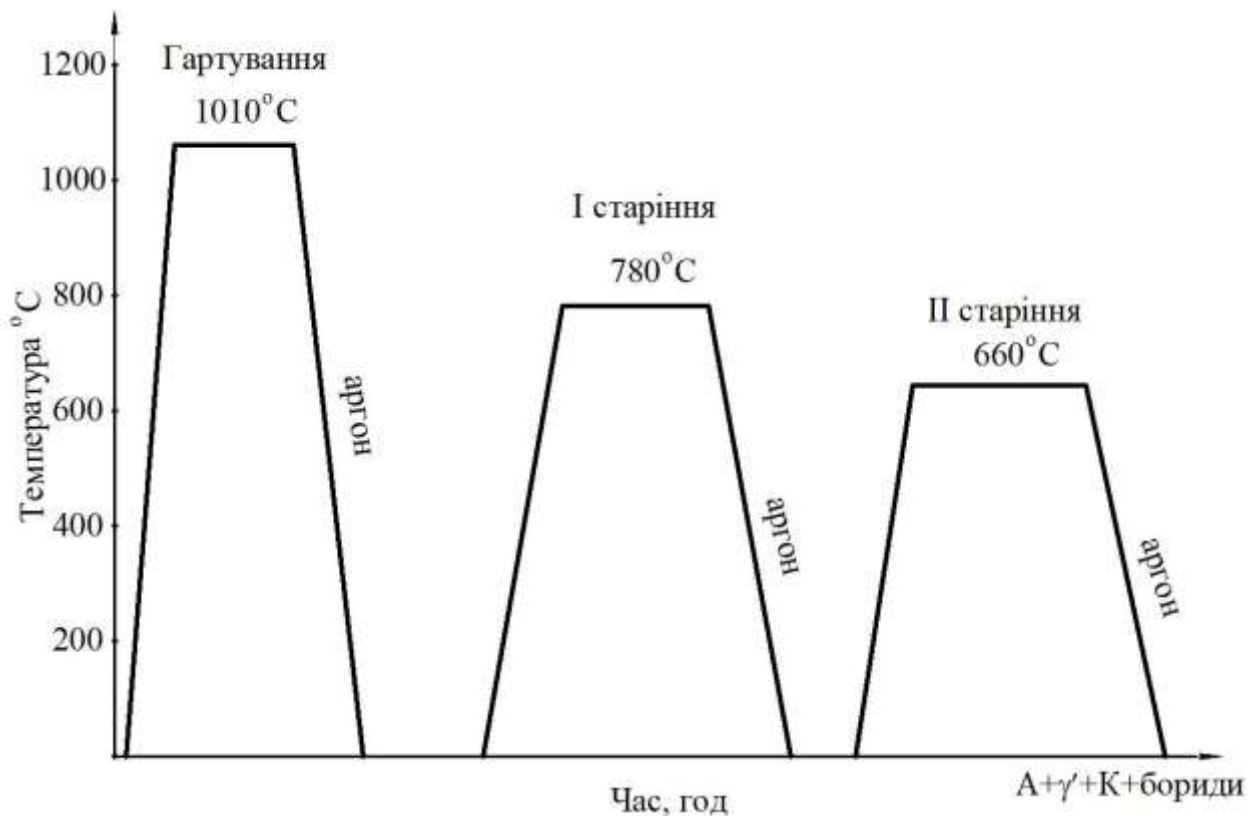


Рисунок 3.5 – Графік термічної обробки сплаву ХН45МВТЮБР

3.3 Розрахунок тривалості нагрівання дисків ГТД

Як основне обладнання для здійснення основних операцій термічної обробки дисків виготовлених із обраних матеріалів вакуумна піч.

Розміри диску зі сплав ХН60ВТ: $d_{\text{внутр.}} = 96\text{мм}$, $d_{\text{зовн.}} = 320\text{мм}$, $h = 32\text{мм}$;
а зі сплав ХН45МВТЮБР: $d_{\text{внутр.}} = 54\text{мм}$, $d_{\text{зовн.}} = 240\text{мм}$, $h = 24\text{мм}$.
Масу 1 диску зі сплав ХН77ТЮР розрахуємо за формулою:

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot \pi \cdot (d_{\text{зовн.}}^2 - d_{\text{внутр.}}^2) \cdot h / 4$$

$$m = 7800 \cdot 3,14 \cdot (0,320^2 - 0,096^2) \cdot 0,032 / 4 = 18,3 \text{ кг.}$$

Диски розміщують по одному в 5 ярусів по висоті $(250\text{мм} / (32+32/2) = 5,2)$

Садка складає 5 дисків, які поміщують в піч у спеціальному пристосуванні.

$$m_c = 18,3 \cdot 5 = 91,5 \text{ кг.}$$

Маса 1 диску зі сплав ХН45МВТЮБР становить:

$$m = 7800 \cdot 3,14 \cdot (0,240^2 - 0,054^2) \cdot 0,024 / 4 = 8,04 \text{ кг.}$$

Диски розміщують по одному в 6 ярусів по висоті $(250\text{мм} / (24+24/2) = 6,9)$

Садка складає 6 дисків, які поміщують в піч у спеціальному пристосуванні. $m_c = 8,04 \cdot 6 = 48,24 \text{ кг.}$

Деталі обробляють у термічних печах типу СНЗ. Для всіх видів дисків обираємо:

для гартування – піч СНВ- 4.8.2,5/13 з розмірами робочого середовища: ширина – 0,4м, довжина – 0,8м, висота – 0,25м, максимальна температура нагрівання – 1300°C.;

для старіння – камерна піч СНВ – 4.8.2,5/10 з розмірами робочого середовища: ширина – 0,4м, довжина – 0,8м, висота – 0,25м, максимальна температура нагрівання – 1000°C.

Розрахуємо час проведення операцій термічної обробки.

Диск зі сплаву ХН60ВТ:

Час для нагрівання для гартування обирають із довідника з розрахунку 60с на 1мм виробу. $\tau_H = 60\text{с} \cdot 112\text{мм} = 6720\text{с} = 112\text{хв} = 1,87\text{год.}$

Витримка при $1150 \pm 10^\circ\text{C}$ триває $\tau_B = 480\text{хв} = 6\text{год.}$

Охолоджують диски з температури гартування на повітрі до кімнатної зі швидкістю 5°C/с :

$$\tau_{ox} = (1150-20)/5 = 212\text{с} = 3,53\text{хв.}$$

$$\tau_{\Gamma} = \tau_H + \tau_B + \tau_{ox} = 112+480+3,53 = 595,53\text{хв.}$$

Загальний час проведення ТО: $\tau = \tau_{\Gamma} + \tau_{CT} = 175,53+1093,03 = 1268,56\text{хв.}$

Аналогічно для диску зі сплаву ХН45МВТЮБР

Час для нагрівання для гартування.

$$\tau_H = 60\text{с} \cdot 93\text{мм} = 5580\text{с} = 93\text{хв} = 1,55\text{год.}$$

Витримка при $1050 \pm 10^\circ\text{C}$ триває $\tau_B = 240\text{хв} = 4\text{год.}$

Охолоджують диски з температури гартування на повітрі до кімнатної зі швидкістю 5°C/с :

$$\tau_{ox} = (1220-20)/5 = 240\text{с} = 4\text{хв.}$$

$$\tau_{\Gamma} = \tau_H + \tau_B + \tau_{ox} = 93+240+4 = 337\text{хв.}$$

Для виконання операції старіння виріб нагрівають до технологічної температури $950 \pm 15^\circ$ за $\tau_n = 70c \cdot 93mm = 6510c = 108,5xv = 1,8год.$

Технологічна витримка при заданій температурі становить $\tau_b = 480xv = 8год.$

Охолодження на повітрі зі швидкістю $5^\circ C/c$:

$$\tau_{ox} = (950-20)/5 = 186c = 3,1xv.$$

$$\tau_{CT} = \tau_n + \tau_b + \tau_{ox} = 108,5 + 480 + 3,1 = 591,6xv.$$

$$\tau = \tau_r + \tau_{CT} + \tau_{CT2} = 337 + 591,6 = 928,6xv.$$

Диски перебувають під впливом інерційних відцентрових сил, що виникають при обертанні від маси робочих лопаток і власної маси дисків. Ці сили викликають в дисках напруження розтягу. Від нерівномірного нагріву дисків турбін виникають температурні напруження, які можуть викликати як розтягування, так і стиснення елементів диска.

Окрім напружень розтягу і стиснення, в дисках може виникати напруження кручення і вигину. Напруження кручення з'являється, якщо диски передають крутний момент, а вигину - виникають під дією різниці тисків і температур на бічних поверхнях дисків, від осьових газодинамічних сил, що діють на робочі лопатки, від вібрації лопаток і самих дисків, під дією гіроскопічних моментів, що виникають при еволюціях літака.

З перерахованих напружень найбільш суттєвими є напруження від відцентрових сил власної маси диска і вінця лопатки, а також температурні (у разі нерівномірного нагріву диска). Напруження вигину залежить від товщини диска і способу з'єднання дисків між собою і з валом та можуть бути значними лише в тонких дисках. Напруження кручення зазвичай невелике і в розрахунках, у більшості випадків, не враховуються.

Оскільки диски знаходяться при вказаних вище навантаженнях, вони повинні мати високий рівень жароміцності, міцності та твердості, а також високі показники зносостійкості.

3.4 Розрахунки кількості обладнання по завантажувальним відомостям

При цьому методі необхідний час роботи обладнання для виконання конкретної операції визначається на основі даних завантажувальної відомості. Вона складається для кожної операції термічної обробки та кожного обладнання. Ця методика більш точна, вона враховує масу садки, загальний час, зайнятий обладнанням при обробці садки, раціональний спосіб завантаження виробів в піч і в певній мірі відображає необхідний час для обробки конкретних виробів. У відомість включають усі вироби, які обробляються на даному обладнанні.

Кількість садок на рік:

$$N_i = M_{pi} / P_{ci}.$$

Необхідний загальний час роботи печі

$$T_z = \sum_{i=1}^n T_i.$$

Необхідний час роботи печі для обробки і-го виробу $T_i = N_i \cdot \tau_{zag i}$

Визначимо кількість печей $Pr = T_z / \Phi_d$;

де Φ_d – річний фонд часу роботи обладнання.

$$\Phi_d = D_{роб.} \cdot K_{зм} \cdot T_{зм} \cdot K_{вик},$$

де $D_{роб.}$ – кількість робочих днів за рік,

$K_{зм}$ – кількість змін за добу,

$T_{зм}$ – тривалість однієї зміни, год,

$K_{вик}$ – коефіцієнт використання часу роботи обладнання, $K_{вик} = 0,94...0,96$.

$$\Phi_d = 250 \cdot 2 \cdot 8 \cdot 0,95 = 3800 \text{ год.}$$

Коефіцієнт завантаження розраховують за формулою: $K_z = P_p / P_{np}$.

Для 1 турбіни необхідно 1 диск, тому річна програма виготовлення – 6500 шт.

Обладнання – СНВ – 4.8.2,5/13,

Таблиця 3.4 - Операція ТО – гартування.

Назва	Матеріал	Маса виробу m_i , кг	Річна програма M_{pi}		Садка P_{ci}		Кількість садок на рік N_i , шт	Загальний час обробки садки $\tau_{заг}$, год.	Необхідний час роботи печі T_i , год.
			шт.	кг	шт.	кг			
Диск турбіни	ХН60ВТ	18,3	6500	118950	5	91,5	1300	9,93	12909
Диск турбіни	ХН45МВТЮБР	8,04	6500	52260	6	48,24	1084	5,6	6070,4
Усього T_z									18979,4

Для проведення гартування кількість печей: $P_{пч} = 18979,4 / 3800 = 4,99$ шт, приймаємо 5 шт. $K_{зц} = 4,99 / 5 = 0,998$.

Обладнання – СНВ – 4.8.2,5/10,

Таблиця 3.5 - Операція ТО – старіння

Назва виробу	Матеріал	Маса виробу m_i , кг	Річна програма M_{p_i}		Садка P_{c_i}		Кількість садок на рік N_i , шт	Загальний час обробки садки $\tau_{заг_i}$, год.	Необхідний час роботи печі T_i , год.
			шт.	кг	шт.	кг			
Диск турбіни	ХН60ВТ	8,04	6500	52260	6	48,24	1084	9,86	10688,2
Диск турбіни	ХН45МВТЮБР	8,04	6500	52260	6	48,24	1084	9,86	10688,2
Усього T_3									21376,4

Для проведення старіння кількість печей: $Pr_e = 21376,4/3800 = 7,039$ шт, приймаємо 7 шт. $K_{з_в} = 7,039/10 = 0,7$.

При проектуванні ділянки (відділення, цеху) розраховують площу для розташування обладнання, допоміжних служб, проходів, проїздів.

Загальна площа визначається наступним чином:

$$P_{заг} = P_{кор} + P_{доп} + P_{прох},$$

де $P_{кор}$ – корисна виробнича площа, необхідна для розташування обладнання;

$P_{доп}$ – допоміжна площа, необхідна для розташування технологічного оснащення, деталей до та після термічної обробки, технологічних та допоміжних матеріалів, для організації міжопераційних складів, місць для формування садок та ін.; $P_{прох}$ – площа проходів та проїздів.

При визначенні $P_{кор}$ користуються нормативами питомої площі, необхідної для розташування одиниці обладнання (печі, установки, агрегату), $m^2/одиницю$ обладнання для діляниці (відділення) з термообробки виробів, які пройшли механічну обробку, оснащеної обладнанням періодичної дії – 40...90 m^2 на одиницю обладнання.

$$\text{Отже, } P_{кор} = 40m^2 \cdot 21 \text{ шт} = 840m^2.$$

Площі ділянок для складування виробів, оснащення $P_{доп}$ та площа проходів $P_{прох}$ визначається як частка від $P_{кор}$: $P_{доп} \approx 0,25P_{кор}$; $P_{прох} \approx 0,25P_{кор}$.

$$\text{Тоді, } P_{доп} = 840 \cdot 0,25 = 210 m^2, P_{прох} = 840 \cdot 0,25 = 210 m^2.$$

$$P_{заг} = 840 + 210 + 210 = 1260 m^2.$$

Термічні підрозділи розташовують в одноетажних спорудах прямокутної форми, це забезпечує ефективне виведення шкідливих викидів природним шляхом (аерацією). Термічні відділення розташовують в відповідному цеху (ливарному, ковальському, інструментальному, механічному), термічні цехи – в окремій будівлі. Для їх спорудження використовують збірні залізобетонні конструкції, які порівняно з металевими значно економічніше, вимагають менше витрат металу, менше кородують.

Уніфіковані габаритні схеми одноповерхневих промислових будівель вибирають у відповідності із ГОСТ 23837-79, який передбачає певну відстань між колонами, ширину прольотів. Відділення (цех) можуть мати один (два) прольоти ширина яких дорівнює 12, 18, 24, 30 або 36 м. Довжина визначається за допомогою рівняння: $L = P_{заг}/B$, де B – загальна ширина відділення (цеху). Ширину діляниці B приймаємо 36м. $L = 1260/24 = 35$ м.

Довжина приймається кратною відстані між колонами. Відстань між колонами по зовнішнім стінам дорівнює 6м, по середньому ряду колон між прольотами – 12 м.

Враховуючи відстань між колонами – 6м, розраховуємо кількість прольотів: $l = L/6$, $l = 35/6 = 5,83$ шт. Приймаємо кількість прольотів – 6шт.

Для виконання підйомно-транспортних операцій, завантаження та розвантаження обладнання, ремонтів обладнання використовуємо кран-балки (2шт по одній на кожен прольот).

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

В розділі надані основні заходи з охорони праці при виробництві дисків ГТД із нікелевих і залізо-нікелевих сплавів.

4.1 Аналіз потенційних небезпек

а) Небезпеки які пов'язані з порушенням роботодавцем вимог НПАОП 0.00-7.11-12 «Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцем охорони праці працівників». А саме: вимог щодо облаштування виробничих приміщень, що може бути пов'язано з втратою конструктивної міцності будівель та споруд, незабезпеченням придатних метеорологічних умов, перевищенням граничнодопустимих концентрацій шкідливих речовин, недостатнього рівня освітлення.

б) Можливість ураження електричним струмом, при виконанні службових обов'язків внаслідок порушення правил з електробезпеки, несправності енергоспоживаючого обладнання, відсутності групових або індивідуальних засобів захисту, що може призвести до електричних травм або летального наслідку.

в) Небезпеки, пов'язані з визначенням хімічного складу дослідних матеріалів методами спектрального аналізу з використанням спектрофотометрів. Основними небезпеками є: потужні електронне та оптичне випромінювання при спектральному аналізі.

г) Небезпеки які пов'язані з виготовленням дослідницьких виробів методом пресування порошкових матеріалів, спікання отриманих виробів, що може бути пов'язано, з механічними травмами при пресуванні та термічними опіками при спіканні.

д) Можливість отримання механічних травм при підготовці зразків або дослідницьких виробів до подальших випробувань що може бути пов'язано з порушеннями правил охорони праці під час роботи з абразивним інструментом (НПАОП 28.0-1.30-12) зокрема: використання абразивного інструменту який не пройшов випробування, порушення правил експлуатації, що може призвести до тяжких травм.

е) Небезпеки які пов'язані з дослідженням структури металу методом оптичної металографії з використанням оптичних мікроскопів зокрема: ушкодження органів зору при хибній комбінації світлофільтрів, об'єктивів та окулярів.

є) Можливість отримання механічних травм внаслідок порушень правил з охорони праці при підготовці зразків для випробування твердості, механічних та технологічних властивостей та при безпосередніх випробуваннях. Основними небезпеками можуть бути: використання застарілого та небезпечного обладнання, порушення умов проведення випробувань.

ж) Небезпеки які пов'язані із обробкою результатів досліджень із використанням ПК, зокрема ушкодження кістково-м'язового апарату внаслідок довготривалої роботи в однотипній позі, що може призвести до зниження працездатності та розвитку професійних захворювань.

з) Незадовільні параметри мікроклімату які повинні відповідати фізіологічним потребам організму працюючих, із врахуванням енергетичних витрат на виконувану роботу згідно з ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» внаслідок неефективної роботи систем опалення та повітрообміну, що може призвести до загальних захворювань.

і) Невідповідність вимогам ДБН В.2.5-28-2006 «Природне і штучне освітлення» освітлення робочих зон дослідницької лабораторії внаслідок виходу з ладу освітлювальних приладів або хибного розрахунку їх кількості та потужності, що може призвести до погіршення зору.

к) Можливість загоряння внаслідок порушень правил пожежної безпеки, які зазначені в НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні», а саме хибне визначення видів та кількості первинних засобів пожежогасіння відносно категорій приміщень с пожежної безпеки, що може привести до пожежі.

л) Небезпеки які пов'язані з умовами надзвичайних ситуації.

4.2 Заходи забезпечення безпеки

а) Згідно вимог НПАОП 0.00-7.11-12 «Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників» передбачено:

Виробниче приміщення повинні мати достатню площу і висоту, для раціонального планування робочих місць відповідно до СНиП 2.09.04 – 87 «Административные и бытовые здания» та СНиП 2.09.02 – 85 «Производственные здания».

Конструкція робочого місця дослідника має відповідати сучасним вимогам ергономіки і забезпечувати оптимальне розміщення на робочій поверхні пристроїв і документів, які необхідні для виконання досліджень.

б) Згідно вимог НПАОП 40.1-1.01-97 «Правила безпечної експлуатації електроустановок» для безпечного проведення робіт необхідно виконати наступні організаційні заходи:

- призначити працівників, відповідальних за безпечне проведення робіт;
- видати наряд або розпорядження;
- видати дозвіл на підготовку робочих місць і на допуск;
- підготувати робочі місця та забезпечити допуск до роботи;
- забезпечити нагляд при виконанні робіт;
- при необхідності, організувати переведення на інше робоче місце;
- забезпечити оформлення перерв у роботі та порядок її закінчення.

До основних заходів захисту людини від ураження електричним струмом, відносять:

- забезпечення неможливості випадкового дотику до струмоведучих частин, що перебувають під напругою;
- електричний розподіл мережі;
- усунення небезпеки ураження з появою напруги на корпусах, кожухах та інших частинах електроустаткування, що досягається захисним заземленням, зануленням і захисним відключенням;
- використання малих напруг;
- захист від випадкового дотику до струмоведучих частин кожухами, огороженням або подвійною ізоляцією;
- захист від небезпек можливих при переході напруги з вищої сторони на нижчу;
- контроль і профілактика пошкоджень ізоляції;
- компенсація ємнісної складової струму замикання на землю;
- застосування спеціальних електрозахисних засобів, блокувань, сигналізації та запобіжних пристроїв;
- організація безпечної експлуатації електроустановок.

Усе технічне обладнання повинно бути заземлено з опором заземлюючого контуру 4 – 10 Ом (ПУЕ-2015). Обов'язковим є щоденна перевірка щільності заземлювачів, не рідше як 2 рази на рік перевірка контактів та електричних з'єднань, ремонт обладнання проводять особи які мають кваліфікаційну групу не менше 3. Передбачається використання тільки подвійної ізоляції провідників (ПТБЕ) класу IP44.

Стосовно розташування струмоведучих частин на недоступній висоті (до 1000 В – не менше 3,5 м; більше 1000 В – не менше 6 м). Усі неізольовані струмопровідні лінії повинні бути надійно огорожені, відкриття можливо тільки за допомогою спеціальних пристроїв.

в) Заходи безпеки при визначенні хімічного складу дослідних матеріалів методом спектрального аналізу.

Фізичні основи цього методу заснований на якісному та кількісному визначенні атомного і молекулярного складу розчину по їх спектрам.

Основою цих методів є введення зразків в джерело жорсткого випромінювання де відбувається збудження атомів та їх перетворення в спектральне світіння, таким чином, таким чином основною небезпекою є шкідливий вплив електромагнітного або рентгенівського випромінювання.

Передбачено:

- необхідно в повній мірі володіти даними з інструкції з експлуатації. Наприклад неприпустимим є перевищення номінальної напруги значення якої призначено для певних видів матеріалів;

- особи, що працюють із спектрометрами повинні мати кваліфікацію групи з електробезпеки не нижче 3, передбачене більш часте проведення медичних оглядів, передбачення захист часом;

- робоча камера, де відбувається сам процес виконується з особливих матеріалів, герметичних.

Сучасна конструкція спектрометрів передбачає розподіл зони установленого устаткування до зони де розташовується робоче місце

г) Отримання механічних травм є основною небезпекою при холодному та гарячому деформуванні, що визначається наступним: наявністю частин технологічного обладнання, які рухаються та обертаються, станом вихідних матеріалів, особливостями технологічних прийомів формо змінювання.

Однак, заходи безпеки при холодному та гарячому деформуванні мають принципові відмінності, які визначаються технологіями виконання цих операцій.

Аналіз причин отримання механічних травм при холодному деформуванні та заходи безпеки:

- недосконалість конструктивних рішень кріплення штампів на технологічному обладнанні, зокрема, ненадійність кріплення штампів та їх вузлів до пресу;

- недосконалість конструкцій штампів, зокрема, відсутність зазорів безпеки між рухомими та нерухомими частинами штампів; відсутність технологічних отворів або інших конструктивних елементів для безпечного розміщення заготовок у штампі та безпечного вилучення деталей із них; відсутність атестації штампів та їх маркування за ступенем безпеки;

- відсутність надійних огорожень зони деформування; відсутність захисних пристроїв запобігання аварійних ситуацій;

- порушення правил з охорони праці при виконанні операцій формо змінювання;

- можливість отримання механічних травм внаслідок гострих кромek, заусенців на отриманих деталях або розсипання заготовок.

Для виключення термічних опіків передбачено використання індивідуальних захисних засобів, зокрема, рукавиці брезентові – ГОСТ 12.4.010-75 ССБТ «Средства индивидуальной защиты. Рукавицы специальные. Технические условия».

д) Для виключення механічних травм при підготовці зразків передбачено:

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

У відповідності з НПАОП 28.0-1.30-12 «Правила охорони праці під час роботи з абразивними інструментами»:

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

- перед початком роботи круг, встановлений на верстат повинен бути перевірений на ходу при робочому числі обертів;

- роботу можна починати тільки впевнившись в тому, що круг не має биття, а биття шпинделя шліфувального станка не перевищую 0,03 мм;

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

На підприємствах де застосовується абразивний інструмент повинні бути інструкції:

- по установці і експлуатації абразивного інструменту;

- по випробуванні кругів на міцність.

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

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

е) При визначенні типу структури використовується горизонтальний металографічний мікроскоп МИМ-8 призначений для дослідження мікроструктури металів та інших не прозорих об'єктів в світловому полі при прямому і відбитому освітленні, а також в темному полі і в поляризованому світлі. Освітлення здійснюється від лампи розжарювання яка забезпечує направлений світловий потік.

Правильне використання мікроскопа виходить тільки за умови раціональної комбінації об'єктів, окулярів. При вживанні їх треба

враховувати, тому що збільшення повинно знаходитися в межах від 500 до 1000 апертур.

Крім правильної комбінації об'єктів і окулярів, не менш важливе значення має і правильне застосування світлофільтрів. Як правило, при роботі з об'єктивами-ахроматами слід застосовувати світлофільтри, а з апохроматами можна працювати і без них.

Об'єктиви-ахромати мають корекцію тільки для середніх кольорів видимої частини спектра, з цієї причини при білому світлі вони дають зображення з не чіткими контурами, пофарбованими головним чином по краю поля зору. Щоб погасити всі кольори, в яких об'єкт не має корекції, застосовують жовто-зелений світлофільтр. З огляду на те, що об'єктиви-апохромати мають корекцію майже для всіх кольорів видимої частини спектра, жовто-зелені світлофільтри для них зайві.

є) Для уникнення механічних травм внаслідок порушень правил з охорони праці при підготовці зразків для випробування твердості, механічних та технологічних властивостей та при безпосередніх випробуваннях, необхідно працювати на справному верстаті, своєчасно проводити заміну деталей, термін експлуатації яких вже закінчився та використовувати захисні окуляри та рукавиці; для виключення травмування органів зору передбачено застосування захисних окулярів, які служать для захисту очей від ушкоджень частками твердих тіл, що летять попереду, знизу і збоку. Ці окуляри оснащені фігурними боковинами, що відкидаються. Застосовувати прозорий екран для захисту очей робітника від поранень частками, що відлітають.

ж) Інтенсивна робота з персональними комп'ютерами, обладнаними візуальними дисплейними терміналами є причиною виникнення багатьох захворювань.

Робота користувача ПК виконується в одноманітній позі в умовах обмеження загальної м'язової активності при рухливості кистей рук, великому напруженні зорових функцій і нервово-емоційній напрузі під впливом наступних фізичних факторів:

- електростатичного поля;
- електромагнітних випромінювань у наднизькочастотному, низькочастотному та середньо частотному діапазонах (5 Гц – 400 кГц);
- рентгенівського, ультрафіолетового та інфрачервоного випромінювань;
- випромінювань видимого діапазону;
- акустичного шуму;
- незадовільного рівня освітленості;
- незадовільних метеорологічних умов.

Особливе місце серед профзахворювань користувачів ПК займають порушення зору, викликані:

- нераціональним освітленням;
- світлотехнічною специфікою робочих місць із ПК;
- недотриманням режиму праці.

Робота користувача ПК вимагає тривалого статичного напруження м'язів спини, шиї, рук і ніг, що призводить до втоми і специфічних скарг.

Можливе ушкодження хребта, в результаті недостатнього рівня ергономічності робочого місця користувача, тобто якщо крісло неправильно підтримує згин хребта. При цьому плечі і шия напружені і затікають, внаслідок неприродного положення, тому виникають болі в області шиї, спини і голови. В середньому працівник, який використовує ПК, просиджує в такому положенні за все своє життя до 80000 годин (8 років).

Неправильне положення рук при введенні даних за допомогою клавіатури (зап'ястя при наборі підняті вгору) призводить до перетискання нервів у вузьких місцях зап'ястя (синдром зап'ястного каналу).

Синдром RSI (хронічне розтягнення зв'язок) – це пошкодження, що виникає в результаті постійного напруження м'язів кистей рук як результат неправильно обладнаного з погляду ергономіки робочого місця користувача ПК. Це хронічне захворювання може непомітно розвиватися протягом

декількох років. Такі перевантаження призводять до перенапруження всієї м'язової системи людини.

Найбільш небезпечним є те, що внаслідок концентрації уваги на екрані монітора притуплюється своєчасне попередження про болі, які є тривожним сигналом для тіла. Захворювання рук і кистей рук спостерігається у працюючих за ПК у 7-12 разів частіше, ніж у інших, і досить часто помилково діагностується як запалення сухожилів.

Робота за ПК – це робота з особливо відчутною монотонністю: більше ніж 600 однакових дій упродовж 75% робочого часу за 1 годину.

Монотонність роботи, не ергономічність робочого місця та електромагнітні випромінювання призводять до захворювань загально-невротичного характеру у вигляді підвищеної загальної втоми, головного болю, відчуття важкості голови, поганого сну.

Стійкі нервово-психічні порушення у вигляді підвищеної роздратованості, відчуття неспокою, метушливості (збуджений тип), депресивних станів, загальної скутості в роботі, зменшення швидкості реакцій (гальмівний тип), ймовірно, викликані електромагнітними хвилями, які випромінює ПК і монітор.

Вплив електромагнітного випромінювання наднизьких і низьких частот на організм людини вивчено недостатньо, і дослідження в цьому напрямку тривають, але дія електромагнітних полів цих частот на біологічні об'єкти, особливо мозок, вже відома – вона може викликати утворення пухлин.

4.3 Заходи забезпечення виробничої санітарії та гігієни праці

з) Параметри мікроклімату і чистоти повітря визначають згідно вимог ДСН 3.3.6-042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень», в

в залежності від категорії фізичних робіт, для певних робочих місць (постійних і непостійних).

Постійне робоче місце – це місце, на якому працюючий знаходиться понад 50% робочого часу або більше 2-х годин безперервно. Якщо при цьому робота здійснюється в різних пунктах робочої зони, то постійним робочим місцем вважається вся ця зона.

Непостійне робоче місце – це місце, на якому працюючий знаходиться менше 50% робочого часу або менше 2-х годин безперервно.

Необхідно враховувати, що:

- для постійних робочих місць визначаються оптимальні та допустимі параметри мікроклімату в холодний та теплий період року;
- для непостійних робочих місць визначаються тільки допустимі параметри мікроклімату в холодний та теплий період року;
- в холодний період року на постійних робочих місцях: температура оптимальна 18-20 °С, допустима 17-23 °С; відносна вологість: оптимальна 40-60%, допустима 75%; швидкість переміщення повітря: оптимальна не більше 0,2 м/с, допустима не більше 0,3 м/с;
- в холодний період року на непостійних робочих місцях допустима температура: 15-24 °С; допустима відносна вологість: 75%; допустима швидкість переміщення повітря: не більше 0,3 м/с;
- в теплий період року на постійних робочих місцях: температура оптимальна 21-23 °С, допустима 18-27 °С; відносна вологість: оптимальна 40-60%, допустима 40-60%; швидкість переміщення повітря: оптимальна не більше 0,3 м/с, допустима не більше 0,2-0,4 м/с;
- в теплий період року на непостійних робочих місцях допустима температура 17-29 °С; допустима відносна вологість: 65% при температурі 26 °С; допустима швидкість переміщення повітря: 0,2-0,4 м/с.

Відповідно до вимог ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціювання», визначається оптимальний склад і тип систем вентиляції,

кондиціювання та опалення, які забезпечують підтримку передбачених параметрів мікроклімату і чистоти повітря.

і) Виробниче освітлення організується і нормується згідно вимог ДБН В.2.5-28-2018 «Природне і штучне освітлення», залежно від:

- розряду зорової роботи, тобто її характеристики (найменшого розміру об'єкта який різниться, світлості фону, контрасту об'єкта з фоном);
- виду і системи освітлення.

Освітленість від системи загального освітлення повинна складати не менше 200 лк при розрядних лампах і 100 лк при лампах розжарювання. Створювати освітленість більше 750 лк при розрядних лампах і 300 лк при лампах розжарювання дозволяється тільки за наявності обґрунтування; Освітленість від світильників загального освітлення в системі комбінованого підвищувати на один ступінь за шкалою освітленості.

4.4 Заходи з пожежної безпеки

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

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

Відповідно до категорії виробництва з пожежної небезпеки і вимог ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги», указати ступінь вогнестійкості приміщення об'єкта.

Шляхи евакуації працівників на випадок пожежі (переходи, евакуаційні виходи) передбачають згідно вимог ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги».

Максимальну відстань від найбільш віддаленого робочого місця до найближчого евакуаційного виходу визначають згідно СНиП 2.09.02-85 «Производственные здания».

Відповідність обладнання, силових і освітлювальних мереж вимогам пожежної безпеки в першу чергу залежить від відповідності ступеня захисту їх оболонок (ІР) класу пожежанебезпечної зони (П-I, П-II, П-IIIа и П-III) визначених згідно НПАОП 40.1-1.32-01 «Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок».

Засоби виявлення займань та пожеж передбачаються згідно вимог ДБН В.2.5-56:2014 «Системи протипожежного захисту». В даний час можуть використовуватися:

- охоронно-пожежна сигналізація (ОПС) неадресного типу;
- порогові охоронно-пожежна сигналізація;
- адресно-порогова охоронно-пожежна сигналізація.

4.5 Заходи безпеки в надзвичайних ситуаціях

л) Укриття населення в захисних спорудах цивільного захисту.

До захисних споруд цивільного захисту належать:

- сховища;
- протирадіаційні укриття (ПРУ);
- швидкоспоруджувані захисні споруди цивільного захисту.

Також для захисту людей від небезпек, що виникають внаслідок надзвичайних ситуацій у мирний час або у разі впливи засобів ураження в особливий період – використовуються споруди подвійного призначення та найпростіші укриття.

Для вирішення питань щодо укриття населення в захисних спорудах цивільного захисту, завчасно створюють фонд захисних споруд. Цей фонд створюють центральні органи виконавчої влади, місцеві державні адміністрації, органи місцевого самоврядування та суб'єкти господарювання.

Проектування, будівництво, пристосування і розміщення захисних споруд та об'єктів подвійного призначення здійснюються згідно з нормами, які розробляються відповідно до Закону України «Про будівельні норми».

Вимоги щодо утримання та експлуатації захисних споруд визначаються Державною службою України з надзвичайних ситуацій.

5 ЕКОНОМІКО-ОРГАНІЗАЦІЙНА ЧАСТИНА

5.1 Актуальність теми з позиції маркетингу

Дослідження режимів термічного оброблення нікелевих та залізо-нікелевих сплавів в контексті проектування термічного відділення для обробки дисків турбіни газотурбінного двигуна (ГТД) прямо впливає на ефективність та якість виробничого процесу. Інтеграція оптимальних режимів оброблення може покращити міцність, стійкість до корозії та інші технічні характеристики сплавів, що використовуються в виробництві дисків турбіни ГТД. Це в свою чергу дозволяє досягти вищих стандартів якості та продовжити термін служби продукції.

Зниження витрат на виробництво: Впровадження оптимізованих технологій термічної обробки сприяє зменшенню витрат енергії та сировинних матеріалів. Це особливо важливо в умовах постійного підвищення вартості ресурсів. Зменшення витрат виробництва дозволяє зберігати конкурентоспроможність продукції на ринку, а також оптимізує фінансові показники підприємства.

Створення інноваційного образу та привабливості для інвесторів: Впровадження передових технологій виробництва, особливо у сфері термічної обробки металевих сплавів, створює образ інноваційного та передового підприємства. Це робить компанію привабливою для інвесторів, які шукають можливості для вкладення коштів у перспективні галузі, що використовують нові технології та підходи.

Маркетингова стратегія на основі технологічних досягнень: Результати дослідження можуть стати основою для розробки маркетингової стратегії, яка використовує інноваційні технологічні рішення як ключовий елемент привертання уваги клієнтів та створення унікальної пропозиції на ринку. Підкреслення використання передових технологій у виробництві може

виявитися ефективним інструментом для позиціонування компанії як лідера в галузі.

Загальний підхід до маркетингу: Важливо враховувати, що здобутки у сфері дослідження режимів термічного оброблення можуть мати ширший вплив на галузь в цілому, відкриваючи нові можливості для співпраці з іншими підприємствами, розширення асортименту продукції та розвитку нових ринків збуту.

Отже, із позиції маркетингу, тема дослідження режимів термічного оброблення металевих сплавів має потужний потенціал для створення конкурентних переваг, збільшення ефективності виробництва та покращення взаємодії з ринком.

5.2 Послідовний аналіз

У цьому дослідженні був проведений аналіз напрямків застосування продукції та визначені вигоди для споживачів, які були систематизовані у таблиці 5.1. Це дозволяє отримати цілісне уявлення про суть ідеї та визначити базові потенційні ринки, де можна знаходити групи потенційних клієнтів.

Аналіз напрямків застосування продукції вказує на різноманітність можливих використань, що розширює спектр цільових груп та ринків. Отримані вигоди для споживачів визначають переваги, які вони можуть отримати при використанні даної продукції. Це може включати підвищену ефективність, зменшення витрат або отримання продуктів з покращеними технічними характеристиками.

Зазначені напрямки та вигоди надають можливість ідентифікувати ключові аспекти привабливості продукції для різних сегментів ринку. Це важливо для подальшого визначення стратегій маркетингу та залучення уваги споживачів.

Надане цілісне уявлення про ідею продукції та базові потенційні ринки створює фундамент для подальшого пошуку груп потенційних клієнтів. Результати аналізу можуть слугувати основою для розробки цільових стратегій та підходів у маркетингу з метою максимізації успіху продукції на обраному ринку.

Таблиця 5.1 – Опис ідеї

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для споживачів (користувачів)
Дослідження режимів термічного оброблення нікелевих та залізо- нікелевих сплавів з метою проектування термічного відділення термічного цеху із вакуумної обробки дисків турбіни ГТД	Авіаційна промисловість	Підвищення якості і надійності деталей двигунів.
	Виробництво енергетичного обладнання	Оптимізація процесів термічної обробки, зниження експлуатаційних витрат.

У проведеному аналізі була розглянута характеристика потенційного ринку, яка була систематизована та представлена у таблиці 5.2. Цей аналіз надає глибше розуміння ключових параметрів ринку, які впливають на успішність впровадження продукції та взаємодію з цільовою аудиторією.

У рамках даного дослідження були враховані такі аспекти як розмір ринку, тенденції споживання, конкурентні умови, аналіз попиту та пропозиції. Розгляд цих параметрів дозволяє отримати повніше уявлення про обстановку на ринку та здійснити адекватну стратегічну оцінку можливостей та ризиків.

Подальше врахування динаміки ринку, визначення основних учасників та їхніх стратегій сприятиме розробці ефективних маркетингових підходів.

Також важливим є вивчення особливостей цільової аудиторії, їхніх потреб та вподобань, щоб адаптувати продукцію до вимог ринку.

Отже, результати аналізу характеристики потенційного ринку становлять фундамент для розробки стратегій позиціонування продукції, рекламних кампаній та ділового взаємодії з конкурентами. Цей підхід дозволяє забезпечити оптимальне використання можливостей ринку та зробити продукцію максимально відповідною потребам споживачів.

Таблиця 5.2 – Попередня характеристика потенційного ринку

Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
Головні конкуренти	1. Авіаційні підприємства України 2. Авіаційні підприємства Європи GE Aviation, Rolls-Royce, Pratt & Whitney
Динаміка ринку (якісна оцінка)	Стабільне зростання завдяки високому попиту на сучасні авіадвигуни та енергетичні установки
Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Високі технологічні бар'єри, потреба у значних інвестиціях, строгі стандарти якості
Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Дотримання стандартів ISO 9001, AS9100 в авіаційній промисловості, національні стандарти України в металургії та машинобудуванні

У проведеному аналізі були ретельно вивчені та визначені потенційні групи клієнтів, разом із їхніми характеристиками, та сформований орієнтований перелік вимог до товару для кожної із цих груп, який відображено у таблиці 5.3. Цей етап дослідження надає детальну картину різних сегментів цільової аудиторії, їхніх особливостей та унікальних потреб.

Визначені групи клієнтів дозволяють врахувати різноманітність цільового ринку та підготувати індивідуальний підхід до кожної з них. Аналіз характеристик кожної групи споживачів слугує основою для визначення їхніх потреб та уподобань.

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)
Запит на компоненти з підвищеною довговічністю та надійністю для авіаційної галузі та енергетики.	Виробники авіаційного та енергетичного обладнання, спеціалізовані ремонтні заводи.	Виробники цінують інновації та ефективність, ремонтні заводи - надійність та легкість у використанні.	Високі стандарти якості та відповідність специфічним нормам безпеки та експлуатації.

У проведеному аналізі було визначено SWOT-фактори для середовища реалізації інноваційного проекту, та їх результати подані у таблиці 5.4. Цей стратегічний аналіз дозволяє визначити внутрішні та зовнішні фактори, які впливають на успішність та ефективність проекту.

У розділі SWOT розглядаються сильні та слабкі сторони внутрішнього середовища проекту, а також можливості та загрози зовнішнього оточення. Це важливий етап стратегічного планування, який допомагає визначити переваги та недоліки проекту, а також ідентифікувати можливості для розвитку та потенційні загрози.

Отримані результати SWOT-аналізу надають основу для розробки стратегій максимізації переваг та мінімізації негативних впливів. Аналіз

сильних сторін проекту може слугувати основою для позиціонування його на ринку, тоді як розгляд слабких сторін дозволяє вдосконалити внутрішні процеси. Можливості в зовнішньому середовищі можуть бути використані для розвитку та експансії, в той час як загрози можуть вимагати розробки стратегій зменшення їхнього впливу.

Отже, SWOT-аналіз є ключовим інструментом для розуміння контексту реалізації інноваційного проекту та розробки стратегій, спрямованих на його успішну реалізацію.

Таблиця 5.4 – SWOT- аналіз

Сильні сторони:	Слабкі сторони:
Покращення якості кінцевої продукції, зниження виробничих витрат, збільшення терміну служби деталей, висока адаптивність технологій, зростання конкурентоспроможності на ринку.	Потреба в значних інвестиціях для старту проекту, складність процесів впровадження нових технологій, обмежена кількість кваліфікованих кадрів, високі вимоги до обслуговування обладнання.
Можливості:	Загрози:
Розширення ринку збуту за рахунок входження в нові сегменти, створення партнерських відносин з авіаційними та енергетичними компаніями, залучення інвестицій через демонстрацію потенційної ефективності проекту.	Зміна регуляторних вимог, що може вплинути на стандарти виробництва, зростання конкуренції, ризик швидкого знецінення технологій через технічний прогрес, можливість зростання витрат на сировину та енергоресурси.

Підготовка переліку ринкових загроз та ринкових можливостей базується на ретельному аналізі факторів, які впливають на ринок та можливості, які вони відкривають у маркетинговому середовищі. Ринкові загрози та можливості є передбачуваними результатами впливу цих факторів,

ще не реалізованими на ринку і мають певний рівень ймовірності. Наприклад, зниження доходів потенційних споживачів може бути фактором загрози, а на його основі можна зробити прогноз стосовно посилення значущості цінового фактору при виборі товару, що вже є ринковою загрозою.

Перелік сильних та слабких сторін та характеристик ідеї потенційної послуги становить основу для формування її конкурентоспроможності. Новий метод отримання виробів з твердого сплаву дозволяє підприємству виробляти високоякісну та економічну продукцію при мінімальних витратах.

При розробці ринкової стратегії перший етап передбачає визначення стратегії охоплення ринку, включаючи опис цільових груп потенційних споживачів, який відображений у таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
Виробники авіаційних двигунів, підприємства з ремонту та обслуговування ГТД, науково-дослідні інститути у сфері матеріалознавства	Висока для виробників авіаційних двигунів, середня для ремонтних підприємств, висока для науково-дослідних інститутів.	80% серед виробників авіаційних двигунів, 50% серед ремонтних підприємств 70% серед науково-дослідних інститутів.	Висока серед виробників авіаційних двигунів, помірна серед ремонтних, низька серед науково-дослідних інститутів.	Складна для нових гравців через високі бар'єри входу і технічні вимоги в авіаційній галузі, середня для ремонтних підприємств

Була проведена ідентифікація стейкхолдерів, їх пріоритизація та побудована Карта стейкхолдерів для візуалізації взаємозв'язків між ними в контексті інноваційного проекту. З метою відображення взаємодії стейкхолдерів на карті, були виділені три концентричні області, в яких розміщені всі особи, зацікавлені в інноваційному проекті, відповідно до можливостей впливу, які має ініціатор проекту. Внутрішній круг представляє область внутрішніх стейкхолдерів, що відображає повноваження та відповідальності ініціатора. Стейкхолдери в цій області перебувають в прямій залежності від ініціатора, що дозволяє використовувати ефективні методи управління проектом (див. рис. 5.1).



Рисунок 5.1 - Карта стейкхолдерів

Були розраховані витрати на оплату праці, враховуючи баланс робочого часу одного працівника, який є необхідним для виконання конкретного етапу виготовлення авіаційних дисків. У розрахунках також була врахована сума єдиного соціального внеску (ЄСВ), що становить значущий елемент витрат на працю. Отримані дані представлені у таблицях 5.6 і 5.7, які детально розглядають витрати на оплату праці та відповідні обов'язкові внески в

соціальні фонди для забезпечення адекватної фінансової оцінки трудових ресурсів, використаних на кожному етапі виробничого процесу авіаційних дисків.

Таблиця 5.6 – Склад, чисельність та фонд заробітної плати виробничих працівників

Категорії працівників	Наявна чисельність осіб		Тарифна ставка за розрядом виконуваних робіт, грн/год	Ефективний фонд робочого часу, год	Тарифний заробіток, грн	Преміальний відсоток до тарифного заробітку, %	Розмір премії, грн	Річний фонд заробітної плати, грн	ЄСВ, грн
	За зміну	На добу							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Попередня обробка									
1. Основні працівники, в тому числі:									
Шліфувальник	1	3	76,0	1872	13072	15,0	1960,8	180393,6	39686,6
Оператор	1	3	81,8	1872	14069,6	15,0	2110,44	194160,48	236875,8
Майстер	1	3	90,2	1872	15514,4	15,0	2327,16	214098	47101,6
2. Допоміжні працівники									
Контролер	1	2	70,4	1872	12108,8	15,0	1816,32	167101,44	36762,3
Плановик	1	2	72,1	1872	12401,2	15,0	1860,18	171136,56	37650,0
3. Черговий та ремонтний персонал									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Електрик	1	3	79,7	1872	14040	15,0	2106	193752	42625,4
Механік	1	3	74,09	1872	13040	15,0	1956	179952	39589,4
Термічна обробка									
1. Основні працівники, в тому числі:									
Терміст	1	3	86,6	1872	14895,2	15,0	2234,28	205553,76	45221,8
Майстер	1	3	90,5	1872	15566	15,0	2334,9	214810,8	47258,4
2. Допоміжні працівники									
Пірометрост	1	3	79,9	1872	13742,8	15,0	2061,42	189650,64	41723,1
Контролер	1	3	70,4	1872	12108,8	15,0	1816,32	167101,44	36762,3
Плановик	1	3	72,1	1872	12401,2	15,0	1860,18	171136,56	37650,0
3. Черговий та ремонтний персонал									
Електрик	1	3	79,7	1872	14040	15,0	2106	193752	42625,4
Механік	1	3	74,09	1872	13040	15,0	1956	179952	39589,4
Механічна обробка									
1. Основні працівники, в тому числі:									
Токар	1	2	76,55	1872	12675,4	15,0	1901,31	174920,52	38482,5
Шліфувальник	1	2	74,00	1872	12253,17	15,0	1838	169094,04	37200,7
Майстер	1	2	89,7	1872	15428,4	15,0	2314,26	212911,92	46840,6
2. Допоміжні працівники									
Контролер	1	2	70,4	1872	12108,8	15,0	1816,32	167101,44	36762,3
Плановик	1	2	72,1	1872	12401,2	15,0	1860,18	171136,56	37650,0
3. Черговий та ремонтний персонал									
Електрик	1	2	79,7	1872	14040	15,0	2106	193752	42625,4
Механік	1	2	74,09	1872	13040	15,0	1956	179952	39589,4
Разом виробничих працівників	21	54	-	-	-	-	42298,07	3801420	863312,4

Таблиця 5.7 – Склад, чисельність та фонд заробітної плати адмінперсоналу

Посада	Кількість осіб	Посадовий оклад, грн/ос	Преміальний відсоток до окладу, %	Сума премії, грн/ос	Місячна заробітна плата, грн/ос	Річний фонд оплати праці, грн	ЄСВ, грн
1	2	3	4	5	6	7	8
Нач. цеху	3	24050	15,0	3607,5	27657,5	995670	219047,4
Заст з тех. частини	3	18190	15,0	2728,5	20918,5	753066	165674,52
Ст. майстер	3	14300	15,0	2145	16445	592020	130244,4
Інженер-технолог	5	10440	15,0	1566	12006	720360	158479,2
Разом	14	66980/ 221820	-	10047/ 33273	77027/ 255093	2528116	556185,52

Визначаємо матеріальні витрати та вартість споживчих послуг на одиницю виготовленої продукції – одного диску турбіни, дані наведено в таблиці 5.8. Розрахунок проводиться на річну програму випуску двигунів у кількості 100 шт., на один двигун необхідно 3 диски.

Таблиця 5.8 – Розрахунок матеріальних витрат

Матеріальні витрати	Норматив у розрахунку на один. продукт	Виробнича програма, шт.	Обсяг сировини/робіт	Ціна, грн	Сума, грн
Диск ХН60ВТ					
Заготовка	1 шт.	100	100 шт.	4900,00	49000,00
Сировина	62,3 кг		623 кг	11100,00	6915300,00
Кріплення	3 шт./садка		34 садки	85000,00	2890000,00
Термічна обробка заготовки	8 шт./садка, 4 оп.		52 садки	96360,00	5010720,00
Механічна обробка заготовки	5 оп.		500 оп.	7430,00	3715000,00
Диск ХН45МВТЮБР					
Заготовка	1 шт.	100	100 шт.	4900,00	49000,00
Сировина для напилення	72,5 кг		725 кг	11100,00	8047500,00
Кріплення	3 шт./садка		34 садки	85000,00	2890000,00

Продовження таблиці 5.8

1	2		4	5	6
Термічна обробка заготовки	6 шт./садка, 4 оп.		68 садок	96360,00	6552480,00
Механічна обробка заготовки	5 оп.		500 оп.	7430,00	3715000,00
Разом	-	300	-	614370,00	87909660

Таблиця 5.9 – Розрахунок вартості спожитих послуг

Вид послуг	Норматив у розрахунку на од. продукту, мВт	Виробнича програма	Обсяг послуг, мВт	Тарифи, грн/кВт	Сума, грн
Електропостачання	1,19	300	358	5,58	61469280,00

Отже, річна сума амортизації обчислюється як сума, отримана шляхом застосування встановлених норм амортизації до балансової вартості основних засобів. Важливо врахувати, що цей розрахунок також включає витрати на поточний ремонт, які становлять 2% від балансової вартості основних засобів. Усі ці дані і розрахунки відображені в таблиці 5.10, що надає повну інформацію про розподіл амортизації та витрат на обслуговування основних засобів протягом року.

Таблиця 5.10 – Розрахунок амортизації

Група основних засобів	Нормативний термін експлуатації	Первісна вартість ОЗ на 01.01	Надійшло ОЗ		Вибуло ОЗ		Сума, грн
			Дата	Первісна вартість	Дата	Первісна вартість	
Вакуумна піч Czylok FCF V20HC	10 років	320000000	12.08	320000000	-	-	320000000
Вакуумна піч IPSEN T ² T	10 років	200000000	12.08	200000000	-	-	200000000
Токарний верстат	35 років	15000000	17.02	15000000	-	-	15000000
Шліфувальний верстат	40 років	15000000	125.01	15000000	-	-	15000000
Разом	-	-	-	-	-	-	550000000

Таблиця 5.11 – Кошторис витрат

Калькуляційні статті	Витрати	
	у розрахунку на одиницю продукції, грн	у розрахунку на весь обсяг продукції, грн
Сировина та матеріал	293032,2	87909660,0
Електропостачання	6640,2	1997640,0
Заробітна плата основних виробничих працівників	1828,7	548609,6
Заробітна плата допоміжних працівників	1431,5	429444,4
Заробітна плата чергового та ремонтного персоналу	1573,88	472164,0
Заробітна плата адмін. персоналу	1824,1	547230,5
ЄСВ 22%	138087,05	41426115,0
Витрати на утримання та експлуатацію основних засобів/поточний ремонт	157480,00	47244000,0
Загальновиробничі витрати	443110,0	132933000,0
Виробнича собівартість	1356345,43	406903629
Адміністративні витрати	52555,0	157666500
Повна собівартість	2926926,64	878077992,5

Розрахуємо очікуваний економічний ефект від застосування дисків ГТД із сплавів ХН60ВТ та ХН45МВТЮБР.

В прийнятих технічних умовах наведено норма часу до руйнування матеріалу ($\tau = 100$ год). За допомогою випробувань отримано результати довготривалої міцності, що впливає на час до руйнування виробу. Диск зі сплаву ХН60ВТ, Диск ХН45МВТЮБР досліджено згідно ТУ при температурі 650°C та навантаженні 1020 МПа.

Час до руйнування Диск ХН60ВТ = 569 год., Диск ХН45МВТЮБР = 386 год. Якщо враховувати, що норма до руйнування матеріалу 100 год, то ресурсу «Диску ХН60ВТ» збільшується у $569/100 = 5,69$ раз, Диску ХН45МВТЮБР - у $386/100 = 3,86$ раз.

Отже, при використанні порошкової металургії для виготовлення авіаційних дисків один диск може замінити певну кількість дисків, які працюють за нормами часу до руйнування відповідно до ТУ, тому можна розрахувати економічний ефект, як

$$E = T_{\text{Д}} / T_{\text{ТУ}} \times C_{\text{Д}},$$

Де $T_{\text{Д}}$ – термін служби диску, год,

$T_{\text{ТУ}}$ – термін служби диску за нормами ТУ, год,

$C_{\text{Д}}$ – вартість одного диску, грн.

$$E_{\text{диск1}} = 569/100 \times 2926926,64 = 16654212,6 \text{ грн};$$

$$E_{\text{диск2}} = 386/100 \times 2926926,64 = 11297936,8 \text{ грн};$$

Оскільки в двигуні використовуються 3 типи дисків, то візьмемо середнє значення економічного ефекту для 3 типів дисків та розрахуємо економічний ефект для партії в 100 двигунів.

$$E = (E_{\text{диск1}} + E_{\text{диск2}}) / 2 \times 100$$

$$E = (16654212,6 + 11297936,8) / 2 \times 100 = 1397607470 \text{ грн}.$$

Отже, при використанні нового режиму ТО для виготовлення дисків авіаційних двигунів значно збільшується ресурс роботи, та час до руйнування. На партії в 100 двигунів економічний ефект складає 1397607470 гривень. Економічний ефект для одного двигуна, тобто на комплектів з трьох дисків економічний ефект складає 13976074,7 грн.

ВИСНОВОК

В дипломному проєкті розглянуті умови експлуатації дисків ГТД із сплавів ХН45МВТЮБР, ХН60ВТ, проаналізовано характеристики матеріалів, а саме хімічний склад та механічні властивості, вплив легувальних елементів на механічні властивості, раціональні режими термічної обробки. Для кожної деталі із двох груп було розраховані маси садок та тривалості нагрівання, витримки і охолодження. На основі отриманих даних були розроблені технологічні карти термічної обробки обох груп. Для термічної обробки було підібрано обладнання, складанні завантажувальні відомості і згідно річної програми розрахована його кількість. Розглянуті питання із охорони праці та розрахований економічний ефект.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Химушин, Ф. Ф. Жаропрочные стали и сплавы / Ф. Ф. Химушин. – М. : Металлургия, 1969. – 749 с.
2. Симс, Ч. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок. / Ч. Симс, Т. Столофф, В. Хагель; в 2-х кн. – пер. с англ. – М. :Металлургия, 1995. – 568 с.
3. Jozwik, P. Applications of Ni₃Al based intermetallic alloys–current stage and potential perspectives / P. Jozwik, W. Polkowski, Z. Bojar // Materials. – 2015. – № 8. – P. 2537–2568.
4. Sharpe, H. J. Effect of microstructure on high–temperature mechanical behavior of nickel–base superalloys for turbine disc applications / H. J. Sharpe, A. Saxena // Adv. Mat. Res. – 2011.–Vol. 278. – P. 259–264.
5. Pollock, T. M. Nickel–based superalloys for advanced turbine engines: chemistry, microstructure, and properties / T. M. Pollock, S. Tin // J. Propul. Power. – Vol. 22, no. 2. – P. 361– 374.
6. Гуляев, А. П. Перспективы развития жаропрочных сплавов / А. П. Гуляев, С. Б. Масленков // Структура и свойства жаропрочных металлических материалов. – М. : Наука, 1973. – С. 29–41.
7. Масленков, С. Б. Стали и сплавы для высоких температур / С. Б. Масленков, Е. А. Масленкова. – М.: Металлургия, 1991. – 389 с.
8. Saunders, N. Modelling the material properties and behaviour of Ni–based superalloys / N. Saunders, Z. Guo, X. Li, A. P. Miodownik, J–Ph. Schillé // The Minerals, Metals and Materials Society. – 2004. – P. 849–858.
9. Патон, Б. Е. Жаропрочность литейных никелевых сплавов и защита их от окисления / Б. Е. Патон, Г. Б. Строганов, С. Т. Кишкин [и др.]. – Киев. : Наук. Думка, 1987. – 256 с.

10. Sikka, V.K. Processing and operating experience of Ni₃Al-based intermetallic alloy IC – 221M / V. K. Sikka, M. L. Santella, J. E. Orth // *Materials Science and Engineering A*. – 1997. – Vol. 239 – 240. P. 564 – 569.
11. Hilpert, K. Phase Diagram Studies on the Al–Ni Sistem / K. Hilpert, D. Kobertz, V. Venugopal, M. Miller, H. Gerads, F. J. Bremer, H. Nickel // *Z. Naturforsch.* – 1987. – B.42A. – P. 1327–1332.
12. Valitov, V. A. Low temperature and high strain–rate superplasticity of Nickel base alloys / V. A. Valitov, O. A. Kaibyshev, Sh. Kh. Mukhtarov, B. P. Bewlay, M. F. X. Gigliotti // *International Conference On Superplasticity In Advanced Materials Orlando. USA*. – 2001. – P. 417–424.
13. Kawasaki, M. Superplasticity in ultrafine–grained materials / M. Kawasaki, T. G. Langdon // *Rev. Adv. Mater. Sci.* – 2018. – 54. – P. 46–55.
14. McFadden, S. X. Low–temperature superplasticity in nanostructured Nickel and metal alloys / S. X. McFadden, R. S. Mishra, R. Z. Valiev, A. P. Zhilyaev, A. K. Mukherjee // *Letters to Nature*. – 1999. – V. 398. – P. 684–686.
15. Athey, R. L. Progress report on the gatorising TM forging process / R. L. Athey, J. B. Moore // *National Aerospace Engineering and Manufacturing meeting Los Angeles*. – 1975. – P. 1–11.
16. Valitov, V. A. Evolution of microstructure during low temperature superplastic deformation of bulk nanostructured Ni–Cr–Fe–Nb superalloy / V. A. Valitov, S. K. Mukhtarov, A. P. Zhilyaev, O. A. Ruano // *Rev. Adv. Mater. Sci.* – 2010. – 25. – P. 148–154.
17. Valitov, V. A. Microstructure and properties of nanostructured Alloy 718 / V. A. Valitov, Sh. Kh. Mukhtarov, R. Ya. Lutfullin, R. V. Safiullin, M. Kh. Mukhametrakhimov // *Adv. Mat. Res.* – 2011. – 278. – P. 283–288.
18. Mitchell, R. J. Process development & microstructure & mechanical property evaluation of a dual microstructure heat treated advanced Nickel disc alloy / R. J. Mitchell [et al.] // *TMS*. – 2008. – P. 347–356.

19. Pouranvari, M. Microstructure development during transient liquid phase bonding of GTD–111 nickel–based superalloy / M. Pouranvari, A. Ekrami, A. H. Kokabi // *J. Alloy. Compd.* – 2008. – 461. – P. 641–647.

20. Ma, T. Microstructure evolution in a single crystal nickel–based superalloy joint by linear friction welding / T. Ma, M. Yan, X. Yang, W. Li, Y. J. Chao // *Mater. Design.* – 2015. – 85. – P. 613–617.

21. Smith, M. Mechanical properties and microstructural evolution of in-service Inconel 718 superalloy repaired by linear friction welding / M. Smith, L. Bichler, J. Gholipour, P. Wanjara // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2017. – V. 90. – P. 1931–1946.

22. Li, J. Microstructure and mechanical properties of diffusion bonded single crystal to polycrystalline Ni–based superalloys joint / J. Li, J. Cao, X. Lin, X. Song, J. Feng // *Mater. Design.* – 2013. – 49. – P. 622–626.

21. Голубев, В. Н. Влияние структуры жаропрочного никелевого сплава ЖС6У на его свариваемость в твердом состоянии / В. Н. Голубев, Ф. Ш. Шарифьянов, А. В. Власова // *Автоматическая сварка.* – 1985. – № 2. – С. 13–16.

22. Овсепян, С. В. Термическая обработка деформируемых жаропрочных никелевых сплавов для дисков ГТД / С. В. Овсепян, Б. С. Ломберг, М. М. Бакрадзе, М. Н. Летников // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана.* – 2011. – № 4 (Спецвыпуск). – С. 122–130.

23. Sah, I. The recovery of tensile ductility in diffusion–bonded Ni–base alloys by post–bond heat treatments / I. Sah, D. Kim, H. Jung Lee, C. Jang // *Materials and Design.* – 2013. – 47. – P. 581–589.

24. Золоторевский, В. С. Механические свойства металлов: учебник для вузов / В. С. Золоторевский. – 2–е изд. – М. : Металлургия, 1983. – 352 с.

25. McFadden, S. X. Low–temperature superplasticity in nanostructured Nickel and metal alloys / S. X. McFadden, R. S. Mishra, R. Z. Valiev, A. P. Zhilyaev, A. K. Mukherjee // *Letters to Nature.* – 1999. – V. 398. – P. 684–686.

ДОДАТОК А