

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)

бакалавр

(ступінь вищої освіти)

на тему Дослідження особливостей термічної обробки для дисків газотурбінних
двигунів виготовлених із нікелевого сплаву ХН77ТЮР

(назва теми)

Виконав(ла): студент(ка) IV курсу, групи ІФз 210

Спеціальності 132 Матеріалознавство

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Прикладне матеріалознавство

КНИШГ.О

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник

ФАСОЛЬ Є.О

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет Інженерно – фізичний
Кафедра Фізичне матеріалознавство
Ступінь вищої освіти бакалавр
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)

КНИШ Ганна Олександрівна
(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Дослідження особливостей термічної обробки для дисків газотурбінних двигунів виготовлених із нікелевого сплаву ХН77ТЮР
керівник проєкту (роботи) ст.викладач Фасоль Єлизавета Олександрівна
(науковий ступінь, вчене звання, ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)
- затверджені наказом закладу вищої освіти від «» 2024 року №
2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 12.06.2024
3. Вихідні дані до проєкту (роботи) ескіз диску ГТД, вимоги до матеріалу.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) характеристика та умови експлуатації виробу. вимоги до матеріалу, номенклатура виробів та маршрутна технологія їх виготовлення, характеристика матеріалів виробів, розробка режимів та технології термічної обробки, технічний контроль попередження та виявлення дефектів, технічний контроль попередження та виявлення дефектів, спеціальна частина

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

ДОДАТОК А

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1	ФАСОЛЬ Є.О, ст.викладач		
2	ФАСОЛЬ Є.О, ст.викладач		
3	ФАСОЛЬ Є.О, ст.викладач		
4	ФАСОЛЬ Є.О, ст.викладач		
5	ФАСОЛЬ Є.О, ст.викладач		
6	НЕСТЕРОВО.В, доцент, к.т.н		
7	ФАСОЛЬ Є.О, ст.викладач		
нк	Джус А.В, асистент		

7. Дата видачі завдання «15» квітня 2024 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Характеристика та умови експлуатації виробу. Вимоги до матеріалу	19.04.2024	
2	Номенклатура виробів та маршрутна технологія їх виготовлення	26.04.2024	
3	Характеристика матеріалів виробів	15.05.2024	
4	Розробка режимів та технології термічної обробки	25.05.2024	
5	Технічний контроль попередження та виявлення дефектів	30.05.2024	
6	Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях	01.06.2024	
7	Аналіз причин руйнування болтів зі сталі 30	05.06.2024	

Студент(ка)

(підпис)

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи)

(підпис)

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

ЗМІСТ

Вступ	6
1 Характеристика та умови експлуатації виробів. Вимоги до матеріалів.....	7
2 Номенклатура виробів та маршрутна технологія їх виготовлення.....	12
3 Характеристика матеріалів виробів	16
6 Охорона праці.....	41
6.2 Заходи по забезпеченню безпеки.....	43
6.3 Заходи по забезпеченню виробничої санітарії та гігієни праці	46
7.4 Заходи з пожежної безпеки	50
7 Спеціальна частина	52
7.1 Обґрунтування необхідності автоматичного регулювання температури та тиску вакууму в печі	52
7.2 Вибір технічних засобів автоматичного регулювання температури та тиску вакууму в печі	54
Висновки	59
Перелік посилань.....	60

ВСТУП

Сучасні газові турбіни відрізняються різноманітністю конструкцій та типів (закритого, відкритого циклів), робочого тіла (тих, що працюють за рахунок спалення палива або за рахунок зовнішнього джерела тепла, наприклад тепла газів, що отримані в виробничому процесі), призначення (стаціонарні, транспортні, авіаційні, судові).

Газотурбінний двигун засмоктує повітря з атмосфери, стискає його в компресорі в кілька разів. В камері згорання повітря, що має підвищений тиск, упорскують паливо, отримана суміш згорає з утворенням продуктів горіння з температурою від 730 до 1370°C. Частина високотемпературного газового потоку, що має високий тиск, використовується для обертання турбіни, яка в свою чергу приводить в рух компресор. Решта потоку використовується для створення реактивного струменя в турбореактивних двигунах або обертання приводного валу в турбогвинтових двигунах.

Тривала та надійна робота газової турбіни залежить в першу чергу від роботи найбільш важко навантажених деталей турбіни. Вибір матеріалів при виготовленні деталей газових турбін, що працюють при підвищених температурах, передбачає необхідність враховувати специфіку їх напруженого стану та особливостей експлуатації турбін різного призначення.

В даному дипломному проєкті розглядаються особливості умов експлуатації диску газової турбіни. Обирається сплав який буде задовольняти висунуті вимоги, та термічна обробка для нього.

1 ХАРАКТЕРИСТИКА ТА УМОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВИРОБІВ. ВИМОГИ ДО МАТЕРІАЛІВ

Диски призначені для установки робочих лопаток та передач з них крутного моменту та осьової сили на вал. Вони складаються з таких основних компонентів, як обод, полотно та ступиця[1].

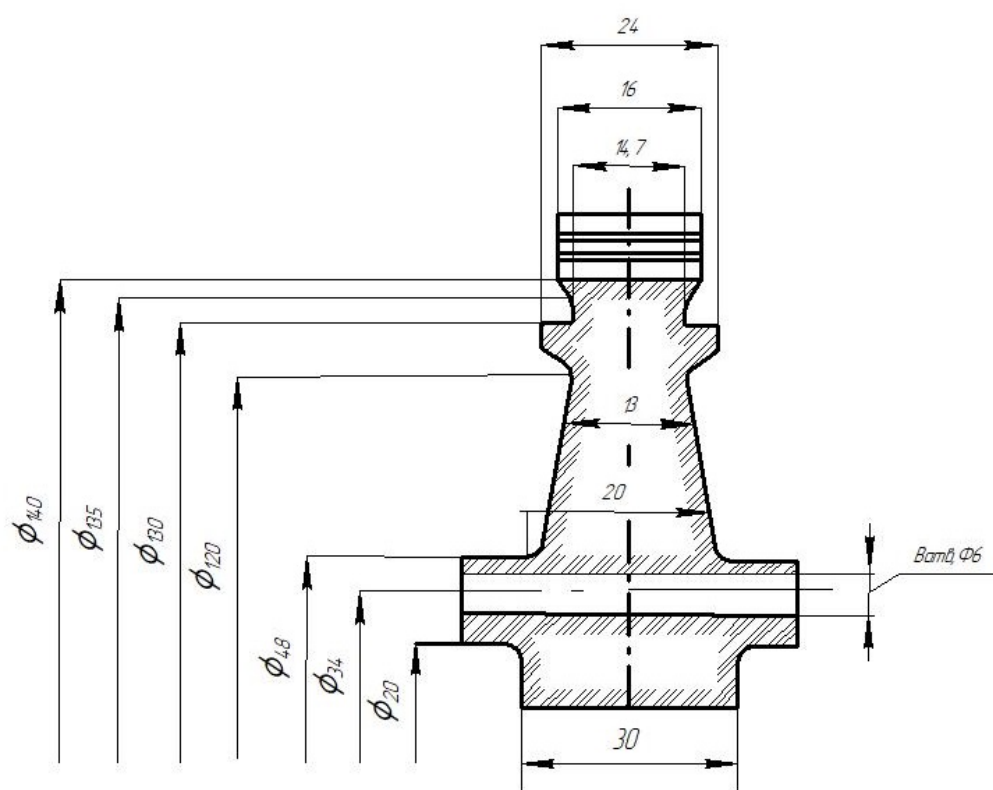


Рисунок 1.1 – Диск газової турбіни

При аналізі напруженого стану диска необхідно розрізнити саме полотно диска від виступів замкової частини. Складні напружені стани в полотні диска виникають через вплив відцентрових сил та градієнту температур, які змінюються як по радіусу, так і вздовж осі диска. Ці впливи призводять до появи радіальних, тангенціальних і осьових напружень які, як правило, значно менше за розміром, ніж величина градієнтів температур [2].

Градiєнти температур по радіусу сягають 220°C (в серцевині диска температура досягає 530°C , а на поверхні 750°C).

У процесі експлуатації напружений стан диску змінюється через перерозподіл напружень внаслідок повзучості, а також при пусках і зупинках, що викликають різкі зміни температурних напружень. Оцінка напруженого стану дисків у зоні пазів, призначених для кріплення лопаток, розташованих по ободу диска, а також поблизу отворів для кріплення диску, що знаходяться на певному радіусі, може викликати певні труднощі. Під час роботи турбіни відбуваються коливання дисків з встановленими лопатками, які передаються від лопаток, затиснених при обертанні ротора в ободі диска [3].

При розрахунку напружень у виступах диску часто обмежуються визначенням середніх розтягуючих напружень від відцентрових сил, а в ряді випадків доповнюють їх оцінкою напружень від зминання на контактних поверхнях і умовних згинаючих напружень в зубцях, задаючись рівномірним розподілом напружень по зубцям. Суттєві ускладнення напруженого стану відбуваються внаслідок концентрації напружень в пазах, різниці в коефіцієнтах лінійного розширення матеріалу лопаток і дисків, згину в осьовому напрямку під дією осьового градієнту температур і вібраційних напружень, від дії коливання лопаток. Додаткові напруження в диску можуть виникати у випадку анізотропії механічних і фізичних властивостей матеріалу. В залежності від конструкції диску і умов роботи ГТУ співвідношення між діючими в різних місцях диску напруженнями змінюються: в деяких місцях диску максимальними є радіальні напруження, в інших - тангенціальні. Різкі пуски і зупинки машини викликають іноді значні термічні напруження, і вони переважають над напруженнями відцентрових сил. При роботі на пиловидному паливі засмічуються монтажні зазори в пазах диску, в результаті чого змінюються умови теплопередачі від лопаток до дисків, а також жорсткість кріплення лопаток, все це впливає на напружений стан диска.

В дисках і роторах турбін, запуск яких відбувається за короткий час, найбільш навантажена зона, прилегла до осевого отвору, під час запуску є практично холодною. Металургійні дефекти, які зазвичай мають у центрі поковок, можуть грати роль концентраторів напружень [4].

Руйнування турбінних дисків можуть бути спричинені статичними, термоциклічними і вібраційними напруженнями. В таблиці 1.1. наведені умови роботи декількох дисків і причини їх руйнування.

Таблиця 1.1 - Умови роботи і причини руйнування дисків

№	Місце і характер руйнування	Умови роботи	Причини руйнування
1	2	3	4
1.	Утворення міжзеренної макротріщини в основі пазу виступу диска.	Експлуатація при підвищених температурах.	Високі статичні напруження при підвищених температурах.
2.	Обрив трьох виступів диска	Експлуатація впродовж тривалого часу при температурі 700°C металу виступів.	Руйнування диску, виготовленого з чутливого до надрізу матеріалу, внаслідок накладання напружень вигину
3.	Обрив трьох виступів диску.	Експлуатація впродовж 3000 годин при температурі ободу 460-550°C.	Не встановлена.
4.	Руйнування диску.	Стенові випробування	Кувальна тріщина в поковці, не виявлена

		впродовж 200 годин при температурі ободу 600°C.	при ультразвуковому контролі за допомогою циліндричного щупа.
--	--	--	---

Кінець таблиці 1.1

1	2	3	4
5.	Міжзеренні тріщини в пазах під стопорні пластинки і відрив частини диска.	Багатократні пуски і зупинки.	Руйнування від термічної втоми диску в процесі тривалої експлуатації при наявності високих термічних напружень протилежного знаку.

Відомі руйнування і другого роду:

- відриви за циліндричним перерізом(від радіальних напружень);
- руйнування від невиявлених при контролі дефектів матеріалу в центральній частині диску, різко знизивши його пластичність; 3)утворення тріщини біля отворів під фіксуючі штифти робочих лопаток(через міжкристалічну корозію, термічну втому);4)руйнування зубчастих виступів внаслідок нерівномірності прикладання навантаження (через помилку при виготовлення пазів на станках, недостатньої компенсації згину робочих лопаток газовими силами і короблення профільної частини лопаток, що призводить до зміщення центру ваги;5)утворення тріщин біля ексцентричних отворів для кріплення дисків;6)втомне руйнування зубців виступів через коливання, які передаються від лопаток;7)зріз кільцевих виступів і утворення тріщин у сполучних з ним пазах під дією температурних напружень [5].

Вихід з ладу може відбуватись і по причині утворення в них підвищених деформацій, навіть якщо вони не призводять до надмірних пошкоджень.

Таким чином матеріал для диску газової турбіни повинен мати достатній рівень короткочасної міцності при звичайних температурах, тривалої міцності при температурах експлуатації, та, одночасно, високий опір втомі та ударну в'язкість як при звичайних так і при високих температурах. На підставі аналізу умов експлуатації та вимог до матеріалу можна зробити висновок про доцільність використання при виготовленні диску газової турбіни групи жароміцних сплавів на основі нікелю або на залізо-нікельовій основі.

2 НОМЕНКЛАТУРА ВИРОБІВ ТА МАРШРУТНА ТЕХНОЛОГІЯ ЇХ ВИГОТОВЛЕННЯ

Номенклатура – це перелік виробів, що оброблюються у виробничому підрозділі. У термічному цеху проходять термічну обробку лопатки першої ступені турбіни. Ескіз деталей наведено на рис. 1.1. У табл. 2.1 наведено номенклатуру оброблюваних деталей

Таблиця 2.1 – Номенклатура виробу із жароміцного ливарного сплаву

№ п/п	Назва виробу	Матеріал виробу	Маса виробу кг	Розміри виробу, мм				Вимоги до матеріалу
				b	l	h	d	
1		2	3	4	5	6	7	8
1	Диск газової турбіни	XH77ТЮР	0,3	40	140		80	$T_{\text{експл}} < 730^{\circ}\text{C}$, $\sigma_{\text{В}}^{20} = 1000 \text{ МПа}$, $\delta = 13\%$, КСУ=300 КДж/м ² , $\sigma_{1}^{700} > 390 \text{ МПа}$ (за $N = 10^7$ циклів), $\sigma_{100}^{750} > 320 \text{ МПа}$, $\sigma_{0,2} = 680 \text{ МПа}$

Технологія виготовлення виробів на машинобудівних, іструментальних, спеціальних заготівельних підприємствах уявляє собою логічну послідовність технологічних операцій, виконання яких дозволяє отримати якісні вироби із відповідними характеристиками та властивостями матеріалу [6].

Маршрутна технологія уявляє собою рух заготовок по цехах та відділеннях підприємства, в ній зазначаються виконувані операції, які можуть повторюватися але мати різне призначення, режими та забезпечувати зміну форми, розмірів, шорсткості поверхні, мікроструктури та властивостей. В розробці маршрутної технології приймають участь фахівці тих цехів, в яких відбувається обробка даного виробу. Вона може включати десятки операцій.

Із урахуванням умов експлуатації виробів, на основі довідкових даних по аналогічній групі виробів та групі матеріалів складаються вимоги до макрота мікроструктури, що забезпечують необхідний комплекс властивостей.

На основі цих вихідних даних вирішується одне із основних питань маршрутної технології – обрання ефективного методу виготовлення заготовки виробу (литтям, зварюванням, гарячою прокаткою, куванням, штампуванням), потім пропонується вид термічної обробки, що забезпечує отримання необхідних макро- та мікроструктури, властивостей матеріалу.

При виготовленні виробів вони можуть піддаватися термічній обробці декілька разів. В цьому випадку у маршрутній технології передбачається попередня, основна та додаткова термічна обробка [7].

Маршрутна технологія дає уявлення про виробничі підрозділи, в яких здійснюється оброблення виробів та в короткому вигляді сутність цих оброблень.

Таким чином, аналіз схеми маршрутної технології дозволяє виділити ті операції, які призводять до змін в структурі та властивостях.

Таблиця 2.1. - Маршрутна технологія виготовлення диску газової турбіни.

№	Назва операції	Цех(дільниця)	Призначення
1	2	3	4
1.	Вхідний контроль	Заготівельний цех	Контроль хімічного складу,

			розмірів, відсутності дефектів заготовки
2.	Кування	Ковальський цех	Надання необхідної форми, розмірів та створення сприятливої мікроструктури заготовки

Кінець таблиці 2.1

1	2	3	4
3.	Механічне оброблення(попереднє)	Механічний цех	Надання заготовці необхідної форми та розмірів, видалення облою.
4.	Основна термічна обробка	Термічний цех	Отримання заданих робочим кресленням необхідних структури та властивостей (гартування + старіння)
5.	Контроль	Термічний цех	Перевірка структури та властивостей на зразках свідках
6.	Остаточне механічне оброблення (шліфування та полірування)	Механічний цех	Надання виробу остаточних розмірів, геометрії, шорсткості, відповідно робочому кресленню
7.	Контроль	Механічний цех	Повний контроль виробу відповідно робочому кресленню

Опишемо більш детально етапи маршрутної технології, що викладено в таблиці 2.1:

Вхідний контроль проводиться для контролю хімічного складу, розмірів, макроструктури та відсутності дефектів заготовок.

Кування в гарячих штампах нікельових сплавів призведе до отримання практично готового профілю з малими припусками на механічну обробку. Такий метод забезпечує високу однорідність мікроструктури готової деталі.

Механічне оброблення проводиться для надання деталі необхідних форм та розмірів після кування.

Основна термічна обробка проводиться для отримання необхідної структури та властивостей жароміцності. Отримання необхідної структури важливо для того щоб виріб відповідав заданим вимогам. Основна термічна обробка являє собою гарт з температури 1080°C на повітрі з наступним старінням при 750-775°C протягом певного часу і охолодженням на повітрі. Температури та час витримки уточнюються експериментально в залежності від особливостей обраного матеріалу.

Контроль проводиться для перевірки структури та властивостей (ударної в'язкості, міцності, твердості, пластичності та, іноді, довготривалої міцності) після термічної обробки.

Остаточне механічне оброблення забезпечує остаточні розміри та стан поверхні після ТО.

Контрольна операція забезпечує повний контроль виробу у відповідності з робочим кресленням.

3 ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРІАЛІВ ВИРОБІВ

Диск газової турбіни працює в найбільш напружених температурних умовах, механічних навантажень, теплових змін і вібрацій. Тому, матеріал для диска має володіти наступними властивостями:

- високим опором окисленню при робочих температурах, тобто високою жаростійкістю (окалиностійкістю) у відповідному газовому середовищі;

- достатньою жароміцністю, тобто за необхідний термін служби при робочих температурах не повинна відбуватись надмірна пластична деформація, пов'язана з повзучістю;

- достатній запас пластичності без схильності до окрихчування з часом і малою чутливістю до надрізу;

- високою термічною стійкістю, тобто матеріал не повинен бути чутливим до тепло змін, особливо в тих випадках, коли двигун працює з частими зупинками;

- високим опором втомі в інтервалі робочих температур;

- задовільною технологічністю, тобто здатністю піддаватись холодній і гарячій обробці; в необхідних випадках добре зварюватись, відливатись у форми;

- однорідністю і стабільністю властивостей;

Доволі важливо дотримуватись правильну технологію обробки, котра має забезпечувати:

- відсутність різнозернистості у виробі;

- відсутність наклепу, який залишився після механічної обробки як в поверхневих шарах, так і в деталі в цілому, якщо вона працює при високих температурах.

- однорідність матеріалу виробу за хімічним складом в поверхневих і внутрішніх шарах, для чого необхідно видаляти за допомогою механічної обробки поверхневий шар, змінений при термічній обробці, або застосовувати термічну обробку в печах з нейтральною атмосферою;

- однорідність по розподіленню інтерметалідних і карбідних фаз в матеріалі виробу.

Для виготовлення диску газової турбіни було обрано сплав ХН77ТЮР хімічний склад якого наведено в таблиці 3.1, типовий режим термічної обробки та властивості після термічної обробки в табл. 3.2, та границі тривалої міцності і витривалості при високих температурах в табл. 3.3.

Таблиця 3.1 – Хімічний склад сплаву на основі нікелю ХН77ТЮР

Марка сплаву	Вміст елементів, % (мас.)										
	Ni	C	Si	Mn	Cr	Ti	Al	B	Ce	Fe	Інші
ХН77ТЮР (ЭИ437БУ)	Основа	≤0,07	≤0,6	≤0,4	19- 22	2,4- 2,8	0,6- 1,0	≤0,01	≤0,01	≤1,0	≤0,07 Cu

Нікель є основою найбільш поширених на сучасному етапі жароміцних сплавів для деталей ГТУ. Передумовами широкого використання цих сплавів є висока температура плавлення та щільне пакування ґратки нікелю. В ГЦК ґратці дифузійна рухомість атомів менша за ОЦК.

Чистий нікель не має високої жароміцності $\sigma_{100}^{800} = 40 \text{ МПа}$. При легуванні нікелю 20% хрому тривала міцність підвищується на 25–30% за рахунок збільшення сил міжатомного зв'язку. Алюміній підвищує жароміцність (рис. 3.2) як в подвійній системі так і в багатоконпонентних системах на основі нікелю. Позитивний вплив алюмінію зумовлений формуванням міцнювальної γ' -фази (Ni_3Al). Об'ємна кількість γ' -фази складає: ~5% при вмісті алюмінію 0,6%; ~25% при вмісті алюмінію 1,7%; ~42% при вмісті алюмінію 4%. Збільшення кількості γ' -фази підвищує

жароміцність нікелевих сплавів (рис.3.3). Проте надмірне легування алюмінієм (понад 3–4%) призводить до погіршення технологічної пластичності нікельхромових сплавів, ускладнюється обробка тиском.

Легування титаном 2,5–3,0%

нікельхромових сплавів сприяє утворенню дисперсних частинок інтерметаліду Ni_3Ti , це підвищує жароміцність і збільшує тривалу міцність $\sigma_{100}^{800} = 150 \text{ МПа}$, проте робочі температури нижчі за сплав із частинками Ni_3Al .

Це пов'язано із значною невідповідністю параметрів ґраток матриці та фази нової сполуки Ni_3Ti .

При підвищених температурах відбувається інтенсивна коагуляція цих частинок. Сумарний вміст алюмінію та титану в сучасних жароміцних деформуваних сплавах сягає 7–9%

(підвищення вмісту цих елементів суттєво ускладнює здатність до деформації сплавів), в ливарних – 12%.

В сплавах на основі нікелю залізо не є основним легувальним елементом. Його присутність може бути пояснена можливістю використання для легування замість хрому більш дешевого ферохрому. Якщо температура експлуатації не перевищує 700–750°C вміст заліза може сягати 5–8%, в складнолегованих сплавах з високою робочою температурою залізо погіршує жароміцність, тому його вміст не повинен перевищувати 1–2%.

В нікелевих сплавах міститься вуглець, що утворює карбіди титану, хрому, в присутності азоту – карбонітриди. Карбідні фази можуть мати як позитивний так і негативний вплив на властивості сплавів, в залежності від природи, форми та розподілу цих фаз. Карбонітрид $Ti(C,N)$ знижує пластичність та в'язкість при виділенні у вигляді видовжених частинок. В той же час, він є модифікатором, подрібнює зерно, підвищує густину відливок, зменшує схильність до міжкристалітної пористості.

Схема легування сплавів повинна враховувати умови подальшої експлуатації виробів.

При призначенні матеріалів для виготовлення дисків турбін необхідно враховувати особливості експлуатації цих деталей. На диски останніх ступеней компресорів та диски турбін діють високі напруження та нерівномірне температурне поле. Так, наприклад, ободи дисків розігріваються до температури 550-800°C, температура ступиці дисків турбіни не перевищує 300-550°C. Диски мають значну кількість концентраторів напружень, тому до матеріалів висуваються вимоги:

- висока міцність та жароміцність в усьому діапазоні робочих температур;
- низька чутливість до концентраторів напружень;
- висока пластичність при тривалих та короткочасних навантаженнях;
- високій опір малоцикловій втомі;
- стабільність структури та фазового складу сплаву;
- висока технологічність.

Для забезпечення цих вимог легування сплавів, передбачає зміцнення твердого розчину, підвищення вмісту γ' -фази, контрольоване виділення карбідів та γ' - фази на межах зерен, запобігання утворення крихких сполук. Дисккові сплави на основі нікелю є складнолегованими композиціями, що важко обробляються тиском. В сплавах не припускаються виділення типу σ -, μ - фаз, великі за розміром частинки карбідів, зональні ліквідаційні неоднорідності. В дискових матеріалах використовується принцип багатокомпонентного легування, що є характерним для матеріалів лопаток турбін.

Штапування до термічної обробки спричиняє появу в дисках текстури деформації, що пов'язана з дендритним характером кристалізації зливків та неоднаковим ступенем деформації різних ділянок заготовок дисків. Збільшення об'ємної кількості γ' -фази сприяє формуванню текстури деформації та погіршує технологічність дисків. В сучасних сплавах для дисків вміст γ' -фази сягає 60%. В цьому випадку зростає неоднорідність її розподілу, виникає глибока різнозереність. Перед гартуванням для

підвищення однорідності зерен проводять відпал при температурах 900-1000°C. З метою отримання оптимального рівня властивостей для дисків проводять гартування та старіння.

ХН77ТЮР (ЭИ437БУ) відноситься до дисперсійно твердіючих сплавів, зміцнення відбувається за рахунок виділення інтерметалідної γ' -фази. В результаті термічної обробки сплав набуває високих властивостей жароміцності та довготривалої міцності але при цьому зберігає добру пластичність та ударну в'язкість.

Таблиця 3.2 - Механічних властивості сплаву ХН77ТЮР при 20°C після оптимального режиму термічної обробки.

Марка сплаву	Режим ТО	Температура експлуатації, °C	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, кДж/м ²
<i>Вимоги</i>	-	730	680	1000	13	-	300
ХН77ТЮР (ЭИ437БУ)	Гарт з 1080°C, 8 год., повітря; старіння при 750-775°C, 16 год., повітря	750	670	1000	14	15	300

Таблиця 3.3 - Границі тривалої міцності та витривалості при високих температурах

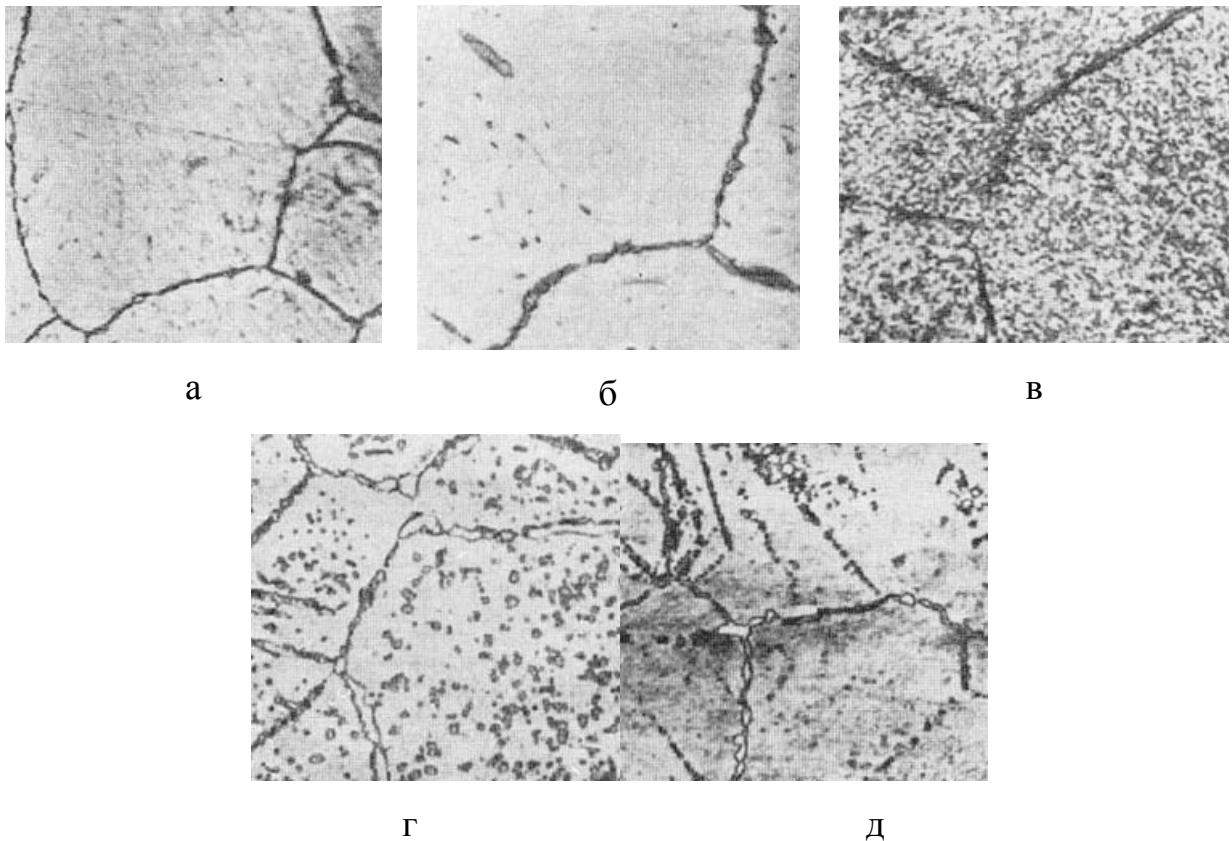
Марка сталі	Границя тривалої міцності, границя витривалості, границя повзучості, МПа	Температура випробування, °C			
		550	600	700	750
ХН77ТЮР (ЭИ437БУ)	σ_{-1}	370	310	390	290
	σ_{100}	800	700	440	320

	$\sigma_{0,2}$	575	560	550	545
--	----------------	-----	-----	-----	-----

Сплав ХН77ТЮР працює при температурах від 600°C до 750°C. Мають дисперсійний механізм зміцнення за рахунок інтерметалідної γ' -фази.

Для підвищення границі міцності і жароміцності деталі після гарту піддають старінню при 750 – 775°C протягом 5 – 16 годин з охолодженням на повітрі.

В початковий період старіння, утворюються області твердого розчину збагаченого легувальними елементами і когерентно пов'язаного з матрицею, в наслідок чого збільшується електроопір.

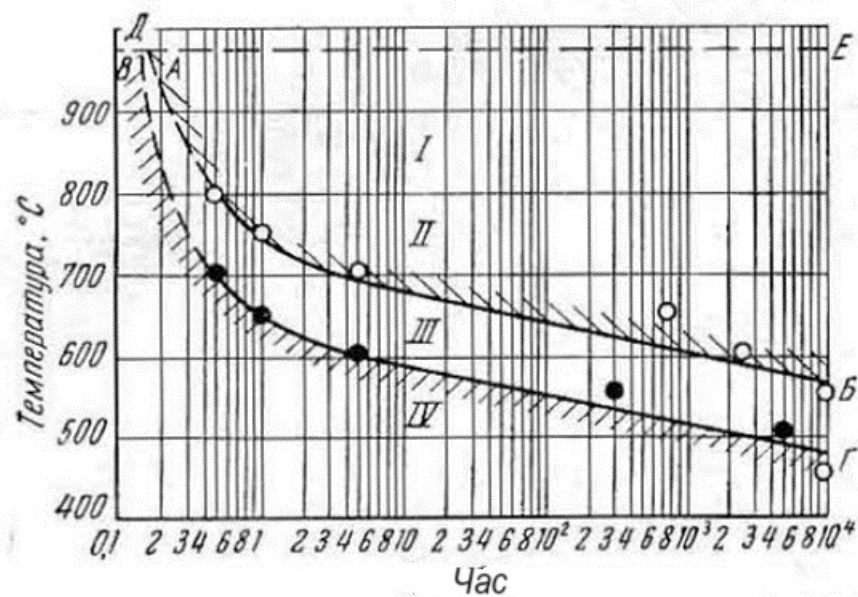


а – обробка гартування з 1080°C, 8 годин, повітря + 700°C, 16 годин; б – обробка + 500 год. при 700°C; в – те ж + нагрівання при 800°C; г – те ж при 900°C; д – 500 год. при 900°C + випробування при 700°C
($\sigma = 450\text{МПа}$, 21 год.) $\times 500$

Рисунок 3.1 – Структура сплаву ХН77ТЮР після різноманітних обробок

В процесі подальшого старіння когерентний зв'язок між зміцнювальною фазою та основним твердим розчином поступово порушується і електроопір знижується. При температурах вище 800°C і тривалих витримках спостерігається укрупнення частинок γ' -фази (рис. 3.1) і при $\sim 870^{\circ}\text{C}$ вона повністю переходить в твердий розчин. Одночасно в випадку довготривалої витримки (1000 год.) при 800°C починає виділятися інша фаза голчастої (пластинчастої) форми типу Ni_3Ti з гексагональною ґраткою (η -фаза).

Окрім зміцнювальних фаз γ' [$\text{Ni}_3(\text{TiAl})$] і η , в нікель-хромистому сплаві в залежності від умов попередньої обробки при дуже великих температурах виділяються карбіди Cr_7C_3 і при понижених – карбіди Cr_{23}C_6 , а також карбонітриди титану $\text{Ti}(\text{CN})$ з проміжними параметрами ґратки. Прикладенні напруження сприяють випаданню і огрубленню частинок.



I – обособлення і коагуляція γ' -фази типу $\text{Ni}_3(\text{Ti}, \text{Al})$; II – розпад зон предвиділення на границях зерен з утворенням γ' -фази; III – заключна стадія інкубаційного періоду – утворення зон предвиділення γ' -фази; IV – ранні стадії інкубаційного періоду

Рисунок 3.2 – Діаграма структурного стану сплаву ХН77ТЮР на різних стадіях старіння

Розглянемо вплив старіння на структурні перетворення і фазовий склад сплаву ХН77ТЮР при тривалості випробування до 10000 годин і встановлення температурна залежність від часу утворення γ' -фази і зон предвиділення цієї фази (рис. 3.2). крива АБ визначає початок обособлення γ' -фази типу $Ni_3(Ti,Al)$, тобто поява некогерентних з матрицею частинок. Крива ВГ характеризує початок появи на границях зерен, видимих під мікроскопом ($\times 18000$), зон предвиділення, які розпадаються в процесі старіння з утворенням γ' -фази.

Розбіжності в концентрації легуючих елементів на границях зерен слугують причиною відмінностей в кінетиці виділення γ' -фази в часі.

Великий вплив на механічні властивості і довготривалу міцність сплаву ХН77ТЮР має температура гарту. Границя міцності при кімнатній температурі і при 700°C з підвищенням температури гарту знижується, а показники пластичності підвищуються (рис 4.3).

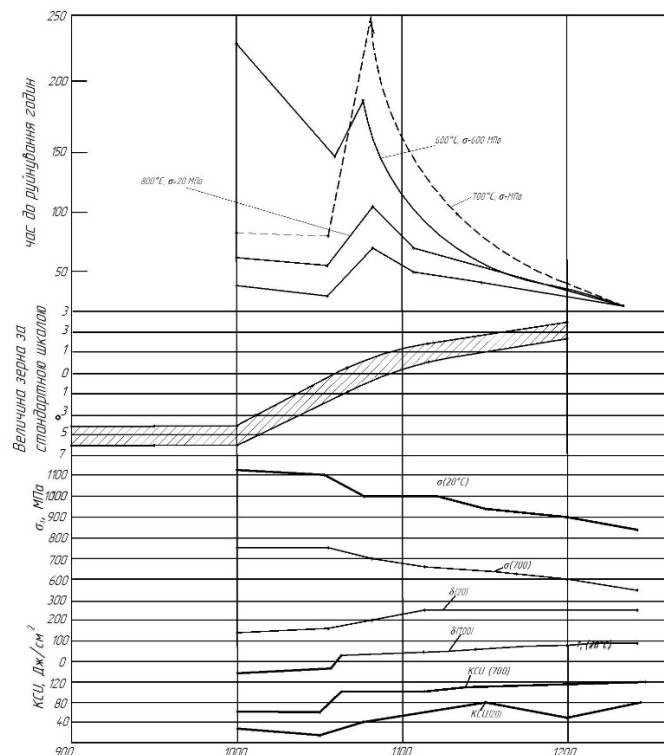


Рисунок 3.3 – Вплив температури гарту на механічні властивості, величину зерна і довготривалу міцність сплаву ХН77ТЮР

Найвища довготривала міцність при 600 – 800°C досягається після гарту 1080°C і старіння при 700°C протягом 16 годин.

При знижених температурах випробування (500 - 600 °C) найкращі значення довготривалої міцності отримують після гарту при 1000 °C і старіння 16 годин при 700 – 750 °C.

При гартуванні з 1150 – 1200 °C найбільш висока довготривала міцність при 700-750 °C досягається тоді, коли проводять проміжний нагрів потягом 24 годин при 1000 °C, який сприяє коагуляції карбідних частинок по границям зерен і в зернах, з 16 годинним старінням при 700 – 750 °C.

Швидкість охолодження при гарті також впливає на структуру і властивості сплаву ХН77ТЮР.

При охолодженні крупних виробів в воді або деталей малого розміру на повітрі розпад твердого розчину не спостерігається. Після повільного охолодження з піччю або в випадку деталей великого об'єму структура сплаву стає явно гетерогенною.

При повільному або уповільненому охолодженні з температури гарту матеріал набуває високу міцність (280 НВ) і властивості зістареного матеріалу.

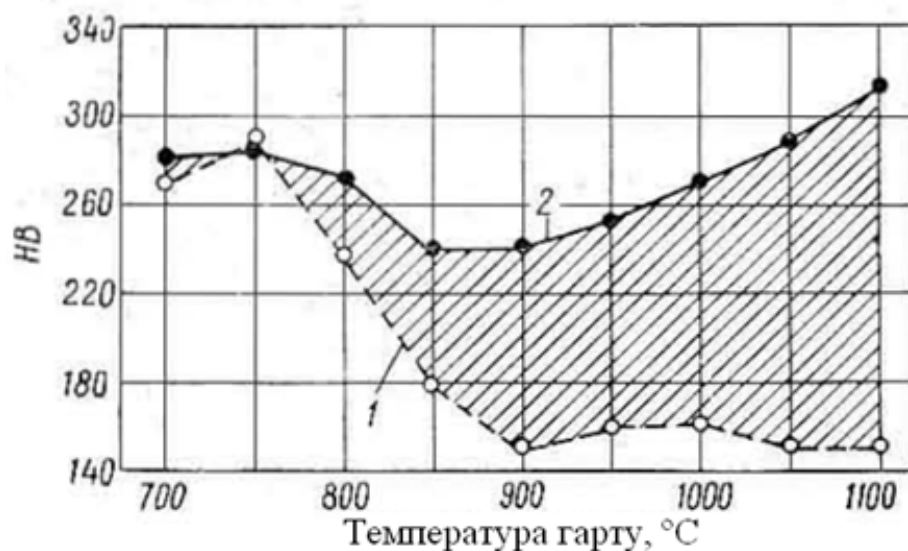


Рисунок 3.4 – Вплив температури гартування та старіння при 700°C протягом 16 годин на твердість сплаву ХН77ТЮР

О переході інтерметалідних фаз в твердий розчин при нагріві під гарт можна судити за зміною дилатометричних кривих, а також кривих електроопору, твердості і за результатами фазового аналізу.

На рисунку 3.4 показано зміну твердості попередньо зістареного сплаву ХН77ТЮР в залежності від температури нагріву під гарт.

Як видно з малюнку, твердість тільки загартованого сплаву з підвищенням температури нагріву під гарт зменшується, а твердість сплаву, загартованого і зістареного, спочатку дещо знижується, а після цього підвищується. Однак у всіх випадках після гарту і старіння твердість не падає нижче 240 НВ. Заштрихована частина діаграми вказує на приріст твердості внаслідок наступного старіння при 700°C. Якщо зміцнення при 700°C пов'язувати з утворенням γ' – фази, то можна зробити висновок, що перехід частинок γ' – фази в твердий розчин відбувається і при більш низьких температурах. Про це свідчать данні інтерметалідного аналізу. Довготривалий нагрів сплаву ХН77ТЮР (до 1000 годин) при 800 °C практично не змінює кількості інтерметалідної фази, яке становить 11-12% від маси металу. Після нагріву при 900 °C воно дорівнює 7,5%, а після 100 годин нагріву при 950 °C – всього 3%. Відмічено, що кількість хрому в осаді після довготривалої витримки при 950 °C збільшується, а на ряду з γ' – фази в осаді присутня η – фаза.

З рисунку 3.4 впливає одна характерна особливість сплаву ХН77ТЮР. Якщо сплав, зістарений при 700°C, нагріти до більш високої температури (800 або 900 °C), то відбувається знеміцнення матеріалу. Однак при наступному нагріві до 700 °C властивості майже повністю відновлюються, тобто відбувається зворот.

Сплав ХН77ТЮР має є модифікацією сплаву ХН77ТЮ і відрізняється від нього присадкою 0,005 – 0,008% В.

Введення невеликої кількості бору підвищує довготривалу міцність. Найбільш висока стійкість до руйнування при 700°C і $\sigma = 400$ МПа отримується при введенні $\sim 0,015\%$ В. але так як при цій кількості бору виникають труднощі з гарячою обробкою тиском, прийняті його присадки в кількості $0,005 - 0,008\%$.

Поряд з більш високою жароміцністю сплав ХН77ТЮР має також високі характеристики пластичності при підвищених температурах в порівнянні зі сплавом ХН77ТЮ. на ряді зразків відмічена зміна характеру руйнування при довготривалих випробуваннях: замість межкристалітного зламу часто спостерігається внутрішньокристалітний. Це означає що присадка $0,008\%$ В усуває межу крихкості і дозволяє більш повно використовувати пластичні властивості всього об'єму матеріалу.

Вивчення матеріалу турбінних дисків із сплаву ХН77ТЮР до і після їх експлуатації дозволило встановити, що характеристики міцності (σ_B та $\sigma_{0,2}$) порівняно мало змінюються в процесі експлуатації, а пластичність і ударна в'язкість в значній мірі знижуються.

Данні о довготривалій міцності, отримані при $550 - 650^{\circ}\text{C}$, свідчать про те що матеріал зміцнюється в процесі експлуатації та стає нечутливим до надрізів. Досліди при 750°C також показали малу чутливість до надрізу.

Досвід експлуатації турбінних дисків показав, що деталі розтріскуються в тих місцях, де температура і напруження більш високі. Також були випадки розтріскування біля основи замка при роботі дисків в умовах перегріву та дії тепло змін. На інших об'єктах диски газових турбін працювали задовільно протягом тривалого часу (6000 годин і більше).

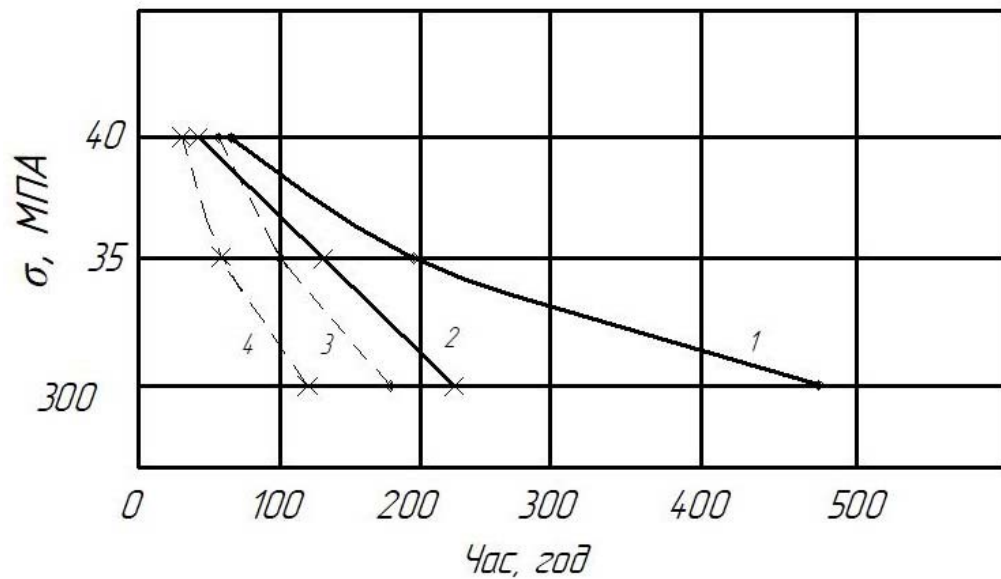


Рисунок 3.5 – Залежність між напруженням і часом до появи тріщин і до руйнування при постійних та циклічних випробуваннях сплаву ХН77ТЮР при 750 °С

Видалення наклепаного шару і полірування по радіусу покращують стійкість дисків турбіни до розтріскування.

Приведені на рисунку 3.5 криві залежності між напруженням і часом до руйнування зразків і часом що викликає появу на зразках перших тріщин, іноді називають кривими пошкоджуваності. При розрахунку деталей не можна допускати напружень і температур, що перевищують значення, які відповідають кривим пошкоджуваності.

Сплав ХН77ТЮР має високий опір повзучості до 750°С і високу довготривалу міцність.

Випробування на втому гладких зразків і зразків з надрізом показали що є велика різниця в границях витривалості при кімнатній і високих температурах.

Порівнюючи границі витривалості гладких зразків сплаву ХН77ТЮР та інших жароміцних сплавів, варто зазначити, що при 700 °С сплав ХН77ТЮР володіє високою втомною міцністю.

Сплав ХН77ТЮР при 800 і 900 °С володіє достатньо високим опором до окислення і для нього є характерним затухаючий процес окислення. Дослідження показують, що при довготривалій витримці при 1000 °С і вище відбувається суттєве окислення в поверхневих шарах.

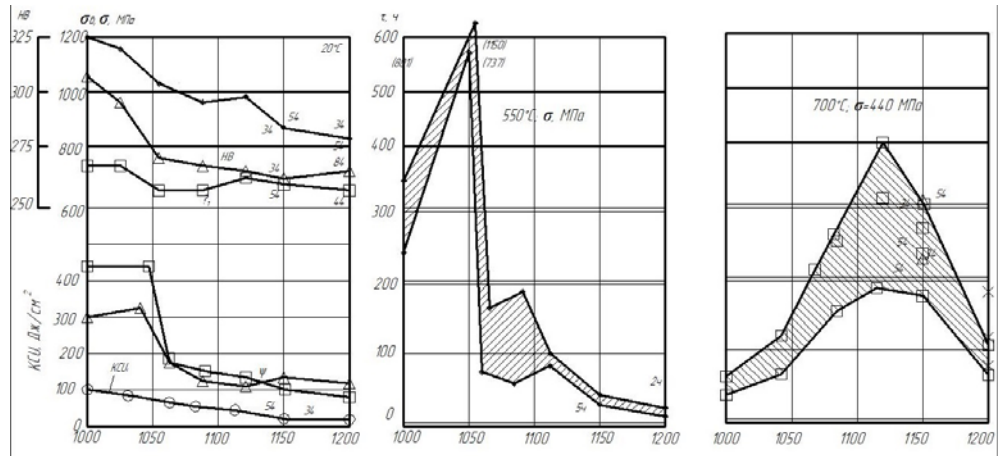


Рисунок 3.6 – Вплив температури гарту з наступним старінням на зміну механічних властивостей при 20°С і довготривалій міцності. Гарт з 1000 - 1120 °С, 8 годин; з 1150°С, 3 і 5 годин; 1200 °С, 2 і 4 години; охолодження на повітрі, старіння при 750 °С, 16 годин, повітря

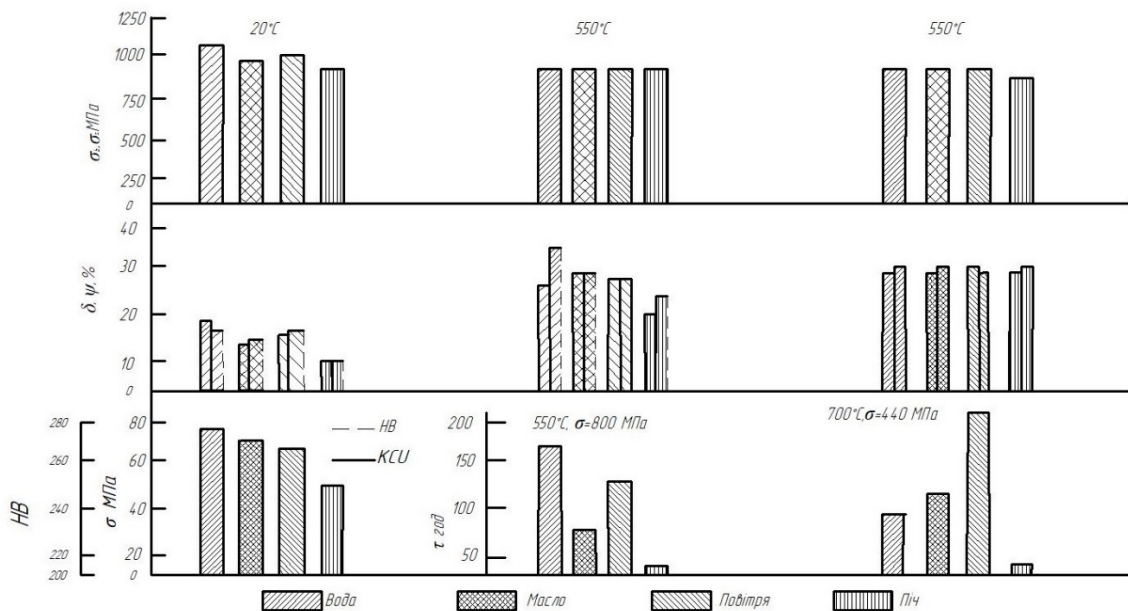


Рисунок 3.7 – вплив швидкості охолодження сплаву ХН77ТЮР після нагріву на 1080°С на механічні властивості і довготривалу міцність. Режим старіння після гарту: 750 °С, 16 годин, охолодження на повітрі

Рисунок 3.7 – вплив швидкості охолодження сплаву ХН77ТЮР після нагріву на 1080°С на механічні властивості і довготривалу міцність. Режим старіння після гарту: 750 °С, 16 годин, охолодження на повітрі

На рисунках 3.6 та 3.7 показано вплив температури гарту і швидкостей охолодження на зміну механічних властивостей і довготривалої міцності сплаву ХН77ТЮР.

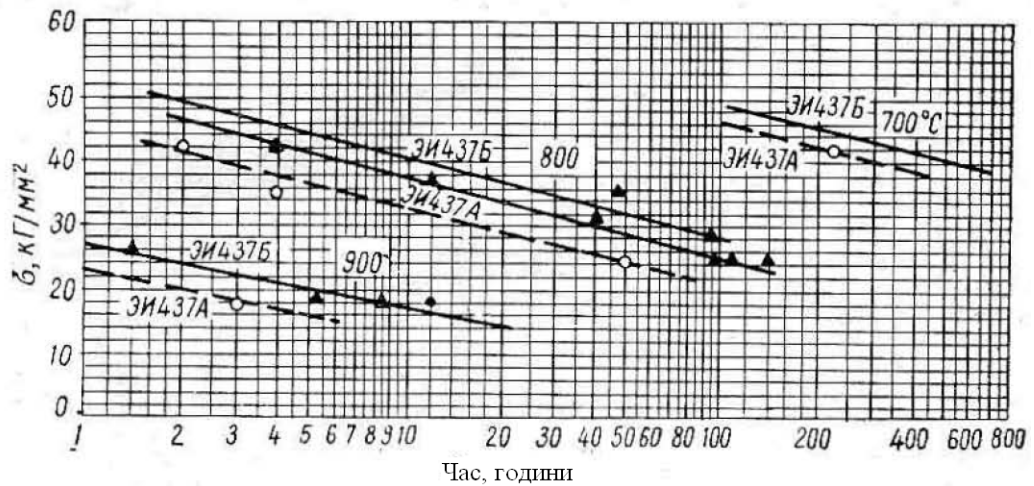


Рисунок 3.8 – Довготривала міцність сплавів ХН77ТЮР та ХН77ТЮ

За довготривалою міцністю сплав ХН77ТЮР при високих температурах значно краще ніж сплав ХН77ТЮ (рис 3.8). При температурах випробувань 700 та 800°C 100 годин довготривала міцність сплаву ХН77ТЮР більша ніж в сплаву ХН77ТЮ на 7 – 5 МПа. За опором повзучості сплав ХН77ТЮР також має переваги.

При порівнянні довготривалої міцності зразків, взятих з прутків і дисків, можна відмітити великий розкид даних, при чому тим більший, чим нижче температура випробування. Цей розкид пов'язаний з фактичним вмістом титану в сплаві, який згідно з маркою знаходиться в межах 2,2 – 2,8%.

При вмісті в сплаві 2,3 – 2,5 % Ті границя міцності при короткочасових випробуваннях на розтяг складає близько 900 МПа, а при вмісті ~2,6 – 2,8% Ті він вищий 1000 МПа при достатньо високій пластичності.

На механічні властивості при кімнатній та підвищених температурах (500 - 600 °C) оказує сильний вплив різнозернистість сплаву, що також служить причиною сильного розкиду властивостей.

Найкращі властивості для роботи їх до 550°C забезпечуються при гарті з 1000 °C, а для роботи при 650-750 °C – з 1080 °C при тривалості нагріву 8

годин. При нагріві в інтервалі робочих температур в сплаві відбувається структурні зміни, пов'язані з виділенням, розчиненням γ' – фази і її коагуляцією які мають вплив на механічні властивості (рис. 4.9).

При відсутності навантаження нагрів області 550 - 650°C сприяє зміцненню сплаву і зниженню пластичних властивостей, а нагрів при 750 °C мало змінює властивості. При більш високих температурах нагріву відбувається знеміцнення сплаву. При випробуваннях під навантаженням при 550 - 650 і 750°C, а також в перші години випробування (до 40 – 50 годин) сплав не чутливий до концентраторів напруження (надрізу), а при більш довготривалих випробуваннях чутливість до надрізу помітна (рис. 4.10).

Сплав ХН77ТЮР добре зварюється методом електрошлакового зварювання при використанні флюсу АНФ-7. Бор, титан і алюміній при зварюванні на вигорають. В зоні біля шва спостерігається помітний ріст зерна.

4 РОЗРОБКА РЕЖИМІВ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

Технологія термічної обробки – складова частина технологічного процесу виготовлення виробу, яка забезпечує отримання необхідної структури, механічних та експлуатаційних властивостей, якості цього виробу.

З довідкової літератури обираємо оптимальний режим термічної обробки для диску газової турбіни. До основної операції слід віднести істинне гартування та старіння, до допоміжних операцій можна віднести контрольні операції.

Вибір основних операцій ТО необхідно здійснювати таким чином, щоб технологія була високопродуктивною, забезпечувала б найбільш раціональне використання матеріальних та енергетичних ресурсів і головне – високу якість продукції.

На рисунку 4.1 наведений графік термічної обробки диску газової турбіни зі сплаву ХН77ТЮР.

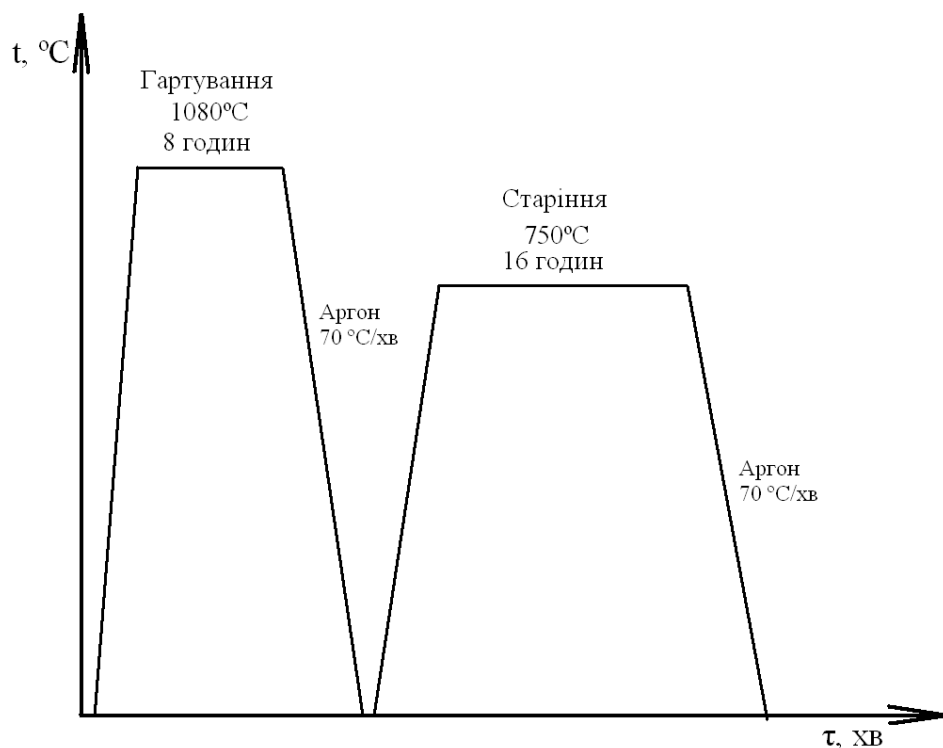


Рисунок 4.1 - Графік режиму термічної обробки диску газової турбіни

Розрахуємо час що буде витрачено на гартування за формулою:

$$\tau_{\text{заг}} = \tau_{\text{н}} + \tau_{\text{в}} + \tau_{\text{ох}}, \quad (4.1)$$

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

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

$\tau_{\text{ох}}$ – час охолодження після термічної обробки до кімнатної температури, хв.

Вироби завантажуються у нагріту піч. Час нагрівання виробу до заданої температури розраховується за формулою:

$$\tau_{\text{н}} = S \times k \times f \times L_{\text{спл}} \quad (4.2)$$

де S – характеристичний розмір виробу (діаметр кулі, циліндру, найменше ребро призми і т.ін.), $S = 20$ мм;

k – коефіцієнт форми, $k = 2,0$;

f – коефіцієнт розташування виробів в нагрівальному пристрої, що впливає на час нагрівання, $f = 2,2$;

$L_{\text{спл}}$ – коефіцієнт легування сплаву, хв/мм.

$$L = f \cdot (c/\lambda) \quad (4.3)$$

c – теплоємність, кДж/(кгК);

λ – теплопровідність, Вт/(мК).

При нагріві до 1080°C під гарт коефіцієнт легування сплаву буде дорівнювати:

$$L_{\text{спл}} = 0,27 \cdot \frac{0,528 \cdot 28}{0,59 \cdot 34,1} = 0,198$$

При нагріві до 750°C для старіння коефіцієнт $L_{\text{спл}}$ буде дорівнювати:

$$L_{\text{спл}} = 1,44 \cdot \frac{0,523 \cdot 26}{0,557 \cdot 26,65} = 1,319$$

Звідси час нагрівання під гартування для диску газової турбіни зі сплаву ХН77ТЮР складає:

$$\tau_{\text{н}} = 20 \times 2,0 \times 2,2 \times 0,198 = 17,42 \text{ хв.}$$

Час витримки при гартуванні $\tau_{\text{в}}$, хв., при заданій температурі обираємо рекомендований технологією $\tau_{\text{в}} = 480$ хв.

Охолодження після гартування проводиться на повітрі. Тривалість охолодження розраховують за формулою:

$$\tau_{\text{ох}} = (t_{\text{п}} - t_{\text{к}}) / V_{\text{ох}} \quad (4.4)$$

де $t_{\text{п}}$ – температура початку охолодження, °C

$t_{\text{к}}$ – температура кінця охолодження, °C

$V_{\text{ох}}$ – швидкість охолодження, °C/хв. ($V_{\text{ох}} = 70$ °C/хв)

$$\tau_{\text{ох}} = (1080 - 20) / 70 = 15,14 \text{ хв.}$$

Таким чином загальний час, що було затрачено на гартування дорівнює:

$$\tau_{\text{заг}} = 17,42 + 480 + 15,14 = 512,56 \text{ хв.}$$

Розрахуємо час, що було витрачено на старіння.

$$\tau_{\text{н}} = 20 \times 2,0 \times 2,2 \times 1,319 = 116,072 \text{ хв.}$$

Час витримки τ_v беремо з довідникових даних, він дорівнює 16 год. = 960хв.

Охолодження після старіння відбувається в аргоні, швидкість охолодження при цьому складає 70 °С/с, звідси час затрачений на охолодження:

$$\tau_{ох} = (750 - 20)/70 = 10,42 \text{ хв.}$$

Загальний час затрачений на старіння складає:

$$\tau_{заг} = 116,072 + 960 + 10,42 = 1086,49 \text{ хв.}$$

Для здійснення операції гарту та старіння обираємо піч СНВ 7,5.20.7/11 та СНВ 7,5.20.7/8: С – електрична, Н – камерна, В – вакуумне середовище (контрольоване), з довжиною 2000 мм, шириною 750мм, висотою 700мм робочого простору з максимальною температурою нагріву до 1100°С та 800 °С відповідно.

Розробимо схему садки:

Садкою – називають сукупність виробів, які одночасно перебувають в печі. Схема садки зображена на рисунку 4.2.

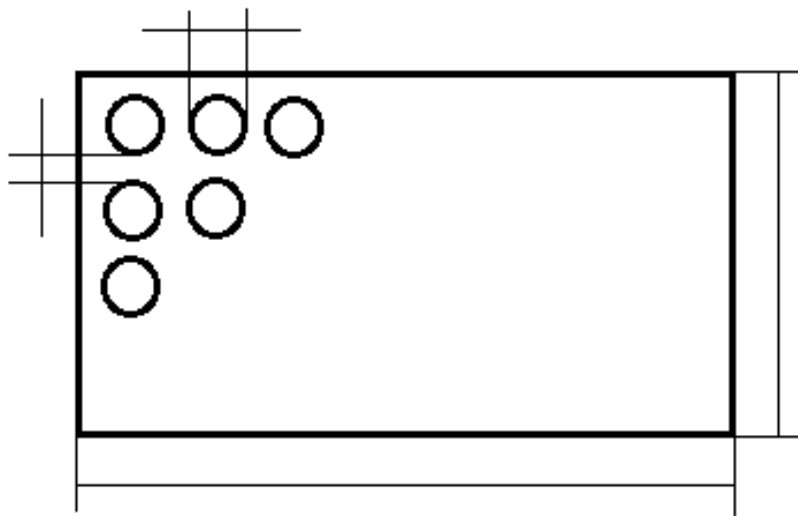


Рисунок 4.2. – Схема садки печі СНВ 7,5.20.7/11

Вироби розташовуються в садці регулярно на певній відстані один від одного. В піч диски завантажуються на піддонах. Так як висота диску становить 40 мм, а діаметр його складає 180 мм, то на кожному піддоні розташовується 14 виробів, з відстанню між виробами рівною половині діаметру диску. Піддони можна розташувати в декілька ярусів, відстань між ними становить половину висоти диску. Всього в печі можливо розташувати піддони в 11 ярусів. Таким чином кількість деталей в усій садці складає 154 штуки.

Маса одного виробу складає 8,364 кг, розрахуємо масу садки:

$$M_c = n_c \cdot M_b = 154 \cdot 8,364 = 1288,056 \text{ кг}$$

Маса деталей розташованих на одному піддоні складатиме:

$$M_n = n_n \cdot M_b = 14 \cdot 8,364 = 117,096 \text{ кг}$$

Раціональне використання контрольних операцій дозволяє попередити появу браку і надає можливість оцінити якість продукції, що обробляється.

При виконанні гартування контролюють всі основні технологічні параметри процесу: тривалість та температуру нагрівання, температуру охолоджуючих середовищ.

Передбачається три види контролю:

- вхідний, при цьому визначається марка сплаву, хімічний склад (за допомогою стилоскопів), стан поверхні, форма і розміри. На поверхні не повинно бути грубих подряпин, тріщин, вдавлювань, контролюється це за допомогою люмінесцентного методу дефектоскопії.

- поточний (поопераційний), контролюються задані параметри.

- вихідний (завершальний), на цьому етапі перевіряються параметри виробів, які передбачені робочим кресленням. Проводяться випробування на розтяг, та ударним згином. Контролюється час та температура гартування, відпуску.

Таким чином, під час виконання термічної обробки необхідно дотримуватись маршрутної технології, яка оформлюється у вигляді технологічної карти. Карта технологічного процесу термічної обробки представлена у таблиці 5.1.

Кінець таблиці 4.1

1	2	3	4	5	6	7
3	Старіння		$t=750\pm 10^{\circ}\text{C}$			
3.1	Нагрівання	СНВ 7,5.20.7/8	$\tau_{\text{н}}=116,072\pm 5\text{хв}$		Піддони, садка, n=154 шт.	Контролюється температура та тривалість нагрівання
3.2	Витримка	СНВ 7,5.20.7/8	$t=750\pm 10^{\circ}\text{C}$ $\tau=960 \pm 5\text{хв}$		Піддони, садка, n=154 шт.	Контролюється температура та тривалість витримки.
3.3	Охол.			Повітря, $t\leq 20^{\circ}\text{C}$ $\tau_{\text{ох}}=10,4\text{хв}$		Контролюється температура та тривалість охолодження
5.	Контроль вихідний (мікроструктура: $\gamma + \gamma' + \text{K}$)	Металографічний мікроскоп МІМ-7, УВМ-10				Контролюються: $\sigma_{\text{В}}^{20}=1000\text{МПа}$, $\delta=13\%$, $\text{КСУ}=300 \text{ КДж/м}^2$, $\sigma_{-1}^{700}>390\text{МПа}$ (за $N=10^7$ циклів), $\sigma_{100}^{750}>320\text{МПа}$, $\sigma_{0,2}=680\text{МПа}$ та мікроструктура

5 ТЕХНІЧНИЙ КОНТРОЛЬ, ПОПЕРЕДЖЕННЯ ТА ВИПРАВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ

Висока якість продукції забезпечується вірно проведеним вхідним, міжопераційним та завершальним контролем.

Вхідний контроль охоплює перевірку матеріалів, що використовуються для виготовлення дисків. Ретельне виконання вхідного контролю робить неможливим появу неякісної продукції на виробництві; вхідним контролем визначається хімічний склад матеріалу виробів і його відповідність робочому кресленню, а також відсутність внутрішніх та зовнішніх дефектів форми та розмірів.

Межопераційний контроль технологічних процесів термічної обробки полягає в перевірці готовності термічного обладнання і оснащення до проведення термічної обробки; вимірювані, регулюванні і запису робочих температур автоматичними терморегуляторами у печах з заданою точністю; точне виконання витримок при виконанні операції нагріву й охолодження лопаток.

При поточному контролі контролюються усі параметри операцій: температура, час, схема садки, витрати середовища, тиск, середовище при охолодженні його температура, структура та властивості виробів після виконання операцій.

Вихідний є обов'язковою операцією, тому що після термічної обробки здійснюється механічне оброблення, складальні операції, тобто лопатки повинні передаватись із необхідними структурами та властивостями.

Основними видами контролю якості дисків газових турбін після термічної обробки є:

- візуальний контроль для виявлення тріщин, оплавлення поверхні диску та інших поверхневих дефектів (100%);
- контроль мікроструктури;

- перевірка жароміцності матеріалу на зразках свідках.

В таблиці 4.1. представлені основні види дефектів дисків газової турбіни, що можуть виникнути в результаті термічної обробки.

Таблиця 4.1 - Можливі дефекти при ТО, їх види, причини появи, заходи по запобіганню та усуненню

Назва операції	Вид дефекту	Причина появи	Заходи по запобіганню	Заходи по усуненню
1	2	3	4	5
Гартування	1.Тріщини	1.1.завищена швидкість охолодження при гартуванні. 1.2.завищена швидкість нагрівання. 1.3.завищена температура гартування (перепал)	1.1.використання оптимального гартівного середовища. 1.2,1.3.нагрівання з регламентованою швидкістю та кінцевою температурою нагрівання.	Дефект не виправний
	2.Знеелегування поверхневих шарів	2.1.невідрегульований тиск вакууму	2.1.контроль тиску в вакуумі	2.1.Невиправний дефект
	3.Короблення	3.1.Нераціональне розташування виробів в садці. 3.2.Охолодження з високою швидкістю.	3.1.Дотримання схеми садки при її формуванні. 3.2.Гартування у відповідному середовищі.	Дефект не виправний

Кінець таблиці 5.1

1	2	3	4	5
Старіння	1.Понижена твердість.	1.1.Недостарювання.	1.1.Контроль температури та тривалості	1.1.Повторне старіння.

			процесу старіння.	
	2.Завищена твердість.	2.1.Перестарювання.	2.1.Контроль температури та тривалості процесу старіння.	2.1.Повторна термічна обробка

Таким чином передбачені в технологічній карті види контролю перевіряють наступні характеристики виробу:

а) Вхідний контроль:

- хімічний склад – є обов'язковою операцією і перевіряється відповідність матеріалу виробів робочому кресленню. Використовуються експресні методи контролю (спектральний, хроматографічний). Приладом є стилоскоп.

- розмір та геометрія виробів, стан поверхні (на поверхні не повинно бути грубих подряпин, вдавлень і тріщин).

- мікроструктура шару (рентгеноструктурні, рентгеноспектральні, оптичні мікроскопи).

б) Поточний контроль – здійснюється після виконання основних та додаткових операцій. Після гартування контролюється твердість та розмір зерна. Випробування здійснюються на твердомірі, металографічний метод використовують для визначення структури сталі.

в) Вихідний або завершальний контроль – обов'язково перевіряються параметри виробу, які передбачені кресленням. Випробування на розтяг, згин, стиснення проводять на універсальній випробувальній машині (УВМ – 10). Контролюється час та температура гартування, низького відпуску. Контролю піддається процентний вміст захисної атмосфери (прилади непрямого та прямого регулювання атмосфери).

6 ОХОРОНА ПРАЦІ

Анотація: в розділі надані основні заходи з охорони праці в термічному відділенні при вакуумному термічному обробленні деталей газотурбінних двигунів.

6.1 Аналіз потенційних небезпек

а) Незадовільна професійна підготовка фахівців, що може призвести до хибного виконання обов'язків і, як наслідок, до травматизму;

б) Незадовільна організація робочого місця, що може бути пов'язано з невиконанням вимог ергономіки, що може привести до механічних травм;

в) Можливість ураження електричним струмом, що може бути пов'язано з порушеннями правил з електробезпеки, з несправністю енергоспоживаючого обладнання та відсутністю захисного заземлення (занулення) технологічного обладнання, що може призвести до електричних травм або літального наслідку;

г) Можливість механічного травмування, що може бути пов'язано з незадовільним станом робочої зони (захаращеність, нераціональне розташування технологічного обладнання), непередбаченим контактом з частинами обладнання, що рухаються або переміщуються;

г) Втрата герметичності трубопроводів, що подають захисні гази до вакуумних електричних печей, що може призвести до витoku робочих газів і як наслідок до отруєнь;

д) Негативний вплив електромагнітних полів і випромінювання, внаслідок наявності енергоспоживаючого та енергогенеруючого обладнання в робочих зонах, що може призвести до зниження імунітету та загальних захворювань;

е) Незадовільне освітлення в робочій зоні, внаслідок виходу з ладу освітлювальних приладів або надмірної їх забрудненості, що може призвести до погіршення розрізнення об'єктів і, як наслідок, до травматизму;

є) Можливість раптових загорянь внаслідок порушень правил потенційної безпеки, що може призвести до пожеж;

ж) Небезпека, що пов'язана з недостатньою підготовкою персоналу в умовах надзвичайних ситуацій, що може призвести до травматизму людей, загибелі;

6.2 Заходи по забезпеченню безпеки

а) Фахівцям обов'язково необхідно мати професійну підготовку, для того щоб уникнути аварійної ситуації. Вони повинні мати уявлення що до обладнання з яким планують працювати і специфіки самої роботи. До робіт залучаються особи з отриманими знаннями по спеціальності згідно з НПАОП 0.00-4.12-05 «Типового положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань з охорони праці». Доцільно використовувати стимулювання бездоганного виконання правил з охорони праці.

б) Робочі місця в термічних цехах як правило бувають груповими. Не радше чим один раз на п'ять років виконується атестація робочих місць в процесі якої визначаються відповідність умов роботи до вимог нормативно-правових актів. Норми ергономіки визначаються: площа на одного працюючого не менше $4,5 \text{ м}^2$, висота робочої зони не менше $3,2 \text{ м}^2$, площа на одного працюючого не менше 15 м^3 згідно ГОСТ 12.2.061 – 81 «Организация рабочего места при роботестоя». Розташування тепловипромінюючого обладнання повинно виконуватися при використанні природної вентиляції.

в) З метою виключення можливості ураження електричним струмом передбачені наступні заходи:

Організаційні. До виконання робіт допускаються особи віком не молодше 18 років; проводиться навчання з правил електробезпеки; перевіряються знання та атестується персонал на другу чи третю групу з електробезпеки, згідно НПАОП 0.00.–4.12.–05 «Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці». Для кожного обладнання складаються схеми нормальної та аварійної роботи. Повинна забезпечуватися відповідність електрообладнання всім вимогам, правилам з електробезпеки як в цілому, так і по складовим частинам, згідно НАПБ В.01.056–2005/111 «Правила будови електроустановок. Протипожежний захист електроустановок». Експлуатацію та ремонт електрообладнання повинен здійснювати тільки спеціально підготовлений персонал, згідно ДНАОП.0.00–1.21–98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів» та ДНАОП 1.1.10–1.01–2000 «Правила безпечної експлуатації електроустановок».

Технічні. Всі неізольовані струмопровідні елементи електричного обладнання повинні бути надійно огорожені суцільними огорожами, зняття або відкриття яких можливе лише за допомогою спеціальних пристроїв, згідно ПУЕ–2011 «Правила улаштування електроустановок». Розташування струмоведучих частин доцільно виконувати на недоступній висоті (не менше 3,5 м). Необхідно також передбачити встановлення блокуючих пристроїв, згідно ГОСТ 12.4.155–85 ССБТ «Устройствазащитногоотключения. Классификация. Общитехническиетребования», які поділяються на електричні, механічні та електро–механічні. Все електроспоживаючеобладнання повинно бути заземлене згідно ГОСТ 12.1.030–81 ССБТ «Защитноезаземление, зануление».

г) Для виключення механічного травмування передбачені наступні заходи:

Організаційні. Виконання цехових інструкцій, що до правил утримання робочих місць (захаращеність не допускається, поли повинні бути в належному стані). Проведення усіх зазначених інструктажів та перевірка

знань з охорони праці згідно з НПАОП 0.00-4.12-05 «Типового положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань з охорони праці» [18] , наявність знаків безпеки (наприклад, знак «Обережно, небезпечна зона» в присутності кранів).

Технічні. В термічних цехах для переміщення деталей по технологічному циклу, як правило, використовують кран-балку. Небезпека травматизму пов'язана з використанням несправного вантажопідйомного обладнання. В якості заходів передбачені виключення – знаходження робітників на шляху переміщення вантажу. Обов'язково враховується те, що вантажопідйомність кран-балки повинна перевищувати на 20% масу вантажу. Для безпечної експлуатації кран-балки передбачено встановлення обмежувачів ходу.

Використання індивідуальних засобів захисту згідно з НПАОП 0.00-4.26-96 «Положення про порядок забезпечення працівників спеціальним одягом, спеціальним взуттям та іншими засобами індивідуального захисту» [26]:

- спецодяг ГОСТ 27575-87 «Костюмы мужские для защиты от общих производственных загрязнений и механических воздействий. Технические условия»; [28]

- рукавиці брезентові ГОСТ 12.4.010-75 «Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты. Рукавицы специальные. Технические условия»;

- спеціальне взуття із захисним металевим носком ГОСТ 28507-90 «Обувь специальная для защиты от механических воздействий- от ударов в носочной части с внутренними металлическими носками ударной прочностью 200 Дж». [30]

г) Для виключення витоків робочих газів із трубопроводів передбачено: використання металевих трубопроводів, щодення перевірка герметичності з'єднань омилюванням, фарбування трубопроводів у кольори, що відповідають газам, що транспортуються. В разі використання гнучких

шлангів, вони повинні бути тільки армованими. З'єднуватися шланги повинні тільки спеціальними хомутами та з'єднувачами згідно з ГОСТ 25453-89 «Пневмоаппараты и кондиционеры рабочего газа. Условные проходы и присоединительные резьбы»

д) Для мінімізації негативного впливу електромагнітних полів і випромінювання передбачено виносити електромагнітне обладнання в окремі приміщення, встановлення металевих екранів між генератором та робочою зоною. Також необхідно постійно контролювати рівень електромагнітного випромінювання згідно ГОСТ 12.1 006-84 "Електромагнітні поля. Допустимі рівні на робочих місцях і вимоги до проведення контролю".

6.3 Заходи по забезпеченню виробничої санітарії та гігієни праці

е) Для забезпечення необхідного рівня освітлення на ділянці термічного оброблення деталей газотурбінних двигунів, який складає не менше 200 лк, передбачено використання системи загального штучного освітлення. Виконаний розрахунок кількості світильників і загального освітлення у приміщенні.

Розрахунок освітлення виробничих приміщень

Основними розрахунковим рівнянням методу світлового потоку є:

$$, \dots \dots \dots (6.1)$$

$\Phi_{л}$

де - розрахункове значення світлового потоку однієї лампи в кожному світильнику, лм;

E_n

- нормоване значення освітленості, лк;

S - площа освітлюваної поверхні, м²;

k_z - коефіцієнт запасу;

z - коефіцієнт мінімальної освітленості;

N - загальна кількість світильників;

n - кількість ламп у одному світильнику;

η - коефіцієнт використання світлового потоку.

Для розрахунку необхідно визначити площу освітлюваної поверхні, в даному випадку використано приміщення розмірами 66×30×10(м), тобто площа освітлюваної поверхні 1980 м².

- Вибираємо систему освітлення: для приміщень термічного відділення використовується загальне освітлення.

- Визначаємо рівень нормованої освітленості (E_n) в залежності від найменшого розміру об'єкта розрізнення (більше 5,0 мм), робота з виробами в гарячих цехах. Розряд зорових робіт – VII, $E_n = 200$ лк.

- Вибираємо джерела світла. Так як в приміщенні замало природного світла і приміщення великогабаритне доцільно обрати газорозрядні лампи ДРЛ.

- Обираємо тип світильника для обраних ламп з урахуванням умов навколишнього середовища, характеристики і класу освітлювального приміщення. Світильники типу РСП, L/h=1,6.

- Оцінюємо коефіцієнт запасу та коефіцієнт нерівномірності освітлення:

$$k_3 = 1,6; z = 1,15.$$

- Оцінюємо коефіцієнт відбиття поверхонь приміщення в залежності від виділення пилу у процесі роботи. Так як робоче приміщення – світле, то маємо значення коефіцієнтів: $\rho_c = 50\%$; $\rho_{ст} = 30\%$; $\rho_{п} = 10\%$.

- Розраховуємо кількість рядів світильників у приміщенні:

$$N_p = B / ((H - h_p) \cdot [L / h]) = 30 / ((10 - 1) \cdot 1,6) = 2 \text{ ряди}$$

- Визначаємо максимально припустиму відстань між рядами світильників:

$$L_{max} = B / N_p = 30 / 2 = 15 \text{ м}$$

- Висота підвісу світильника над робочою поверхнею:

$$h = L_{max} / [L / h] = 15 / 1,6 = 9,37 \text{ м}$$

- Висота звисання світильника від стелі:

$$h_3 = H - h_p - h = 30 - 1 - 9,37 = 19,63 \text{ м}$$

- Чисельне значення індексу приміщення;

$$i = A \cdot B / (h \cdot (A + B)) = 66 \cdot 30 / (9,37 \cdot (66 + 30)) = 2,2$$

- Значення коефіцієнта використання світлового потоку η

$$\eta = 56\% = 0,56$$

-Визначаємо сумарний світловий потік освітлювальної установки у даному приміщенні

$$\Phi_{\Sigma}=(E_n \cdot S \cdot k_3 \cdot z) / \eta = (200 \cdot 1980 \cdot 1,6 \cdot 1,15) / 5,2 = 140123 \text{ лм}$$

- Визначаємо умовну загальну кількість світильників у приміщенні, виходячи з позиції розташування їх у вершинах квадрата:

$$N^* = AB / L_{\max}^2 = 66 \cdot 30 / 15^2 = 8,8 = 9 \text{ шт}$$

- Розраховуємо світловий потік умовного джерела світла:

$$\Phi_{\text{л}}^* = \Phi_{\Sigma} / N_{\text{л}} = 140123 / 9 = 15569 \text{ лм}$$

де $N_{\text{л}}$ – загальна кількість ламп у приміщенні, шт;

$$N_{\text{л}} = N^* \times n = 9 \cdot 1 = 9 \text{ шт}$$

n – кількість ламп у світильнику

- тип стандартної лампи з найближчим значенням фактичного світлового потоку лампи $\Phi_{\text{л}}$ – ДРЛ250, $\Phi_{\text{л}} = 13500$, потужність 250 Вт

$$m = \Phi_{\text{л}}^* / \Phi_{\text{л}} = 15569 / 13500 = 1,15$$

- Оптимальна кількість світильників у приміщенні:

$$N = N^* \cdot m = 9 \cdot 1,15 = 10,37 \text{ шт}$$

- Фактична кількість

$$N_{\phi}=11 \text{ шт}$$

- Визначаємо розрахункову освітленість E_p у приміщенні, що створюється при застосуванні стандартних ламп:

$$E_p=(\Phi_{\text{л}} \cdot N_{\text{л}} \cdot \eta)/(S \cdot k_3 \cdot z) = (13500 \cdot 11 \cdot 5,2)/(1980 \cdot 1,6 \cdot 1,15) = 211,9 \text{ лк}$$

-Розраховуємо загальну потужність освітлювальної установки:

$$P_{\Sigma}=N_{\text{л}} \cdot P_{\text{л}}=9 \cdot 250=2250 \text{ Вт}$$

Для освітлення приміщення необхідно використати 11 світильників типу РСП по одній лампі ДРЛ250 у кожному, світловий потік кожної лампи $\Phi_{\text{л}}=13500$, загальна потужність світильників 2250 Вт. Освітленість у приміщенні за таких умов 211,9 лк.

7.4 Заходи з пожежної безпеки

є) Для попередження загорянь застосовують наступні заходи:
Організаційні:

- виконання інструктажів та перевірка знань з пожежної безпеки, згідно НПАОП 0.00.–4.12.–05 «Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці» та НАПБ А 01.001–2004 «Правила пожежної безпеки в Україні» .

- наявність схем з ліквідації загорянь;

- наявність знаків пожежної небезпеки, згідно ДСТУ 3960–2000 «Системи тривожної сигналізації. Системи охоронної і охоронно – пожежної безпеки» ; [34]

Технічні заходи: наявність первинних засобів пожежогасіння (вогнегасники, пожежні щити, системи автоматичного пожежосповіщення), згідно НАПБ Б 01.008–2004 «Правила експлуатації вогнегасників» та ГОСТу 12.3.046–91 ССБТ «Установки пожаротушения автоматические. Общие технические требования». В термічному відділенні при вакуумному термічному обробленні деталей газотурбінних двигунів повинно бути ВПП 10 літрів 4 штуки, пожежний щит, в який входить: 2 вогнегасника ВПП, 2 лопати, 2 відра попід, 2 лома, кошик з піском.

7 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

Для запобігання окислення, зневуглецювання та знелегування поверхні виробу використовується захисне середовище - вакуум. Воно дозволяє виключити операції очищення, забезпечує економію матеріалів, зменшує енергетичні витрати, підвищує культуру виробництва.

Головні переваги ТО виробів із сплавів в вакуумі порівняно з традиційними способами нагрівання і охолодження:

- висока стабільність властивостей оброблюваних виробів від партії до партії;
- відсутність зневуглецьованого і знелегованого шару;
- зменшення деформації;
- підвищення надійності і експлуатаційної стійкості виробів;
- отримання чистої і світлої поверхні;
- відсутність забруднення навколишнього середовища і покращення умов праці;
- економія електроенергії;
- відсутність необхідності в складських приміщеннях.

Перерахованим перевагам протиставлено лише один недолік: високі капіталовкладення при закупівлі і введенні вакуумного обладнання в експлуатацію.

7.1 Обґрунтування необхідності автоматичного регулювання температури та тиску вакууму в печі

Автоматичне регулювання теплового режиму необхідно для:

- підтримки заданої температури нагрівання та рівномірність нагріву;
- раціонального використання теплової енергії;
- більш точного регулювання параметрів, залежних від температури;
- безпечної роботи системи нагрівання.

При відсутності систем автоматичного регулювання температури можливим недоліком може бути перегрів деталі, внаслідок чого буде відбуватись значний ріст зерна, що призведе до невідповідності механічних властивостей. При температурах, більших за температуру солідус, може спостерігатися таке явище як перепал, при якому відбувається оплавлення меж зерен, що є невиправним дефектом. Все це негативно впливає на подальшу обробку, кінцеві механічні характеристики матеріалу деталі та період її роботи. Можливі і такі високі показники невідповідності, що змушують зовсім вилучати партію деталей як брак. Це призводить до значних грошових втрат, які є неприпустимими для підприємства.

При недостатній температурі нагрівання, не буде досягатися необхідна для обробки зона існування певної фази, або концентрація максимального розчинення легувальних елементів у твердому розчині, що призведе до зміни механічних властивостей, а саме їх погіршення. Для усунення цього дефекту необхідно проводити повторний цикл термічної обробки, що також є небажаним, через збільшення вартості готової продукції, а також складність досягнення необхідної структури та механічних властивостей.

Контроль тиску вакууму є важливим, через сублімацію легувальних елементів з поверхні виробів, яка може спостерігатися при його збільшенні. Тобто може відбуватися знелегування, що вважається браком деталей. Робочим тиском у вакуумній печі вважається вакуум на рівні $10^{-4} - 10^{-5}$ мбар.

У процесі виробництва нікелевих сплавів, вакуумна обробка відіграє ключову роль у забезпеченні високої якості та довговічності кінцевого продукту.

7.2 Вибір технічних засобів автоматичного регулювання температури та тиску вакууму в печі

Для контролю температури в печі на виробництві використовують термопари. Термопара – це термоелектричний термометр. Принцип його дії заснований на виникненні термоелектрорушійної сили в провідниках різного хімічного складу, кінці яких з'єднані з одного боку і називаються гарячим спаєм. Ефект виникнення термо-ЕРС полягає в різниці температур на гарячому спаї та холодних кінцях.

Схема термопари зображена на рисунку 7.1.

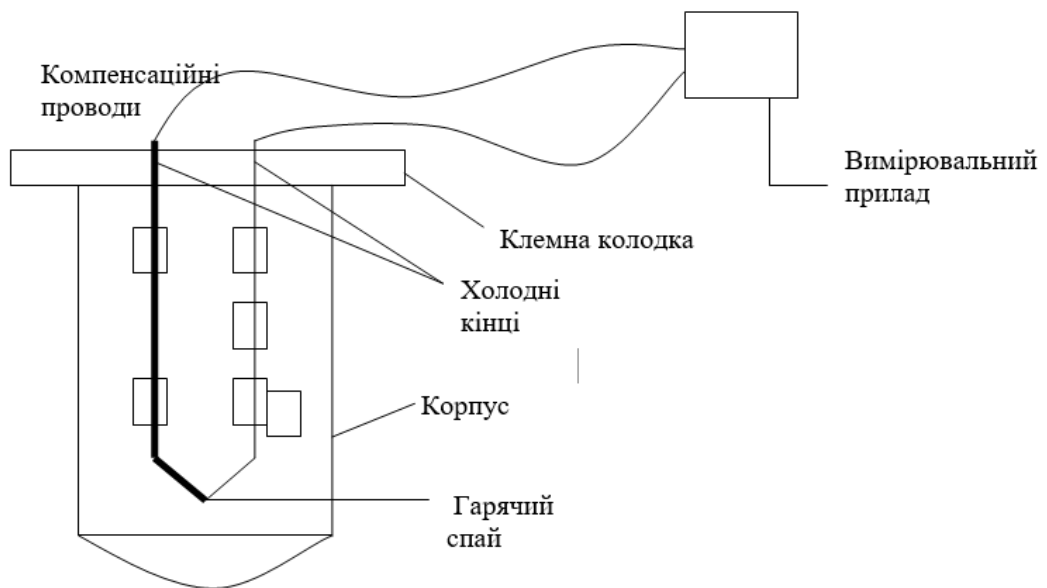


Рисунок 7.1 - Схема термопари у корпусі

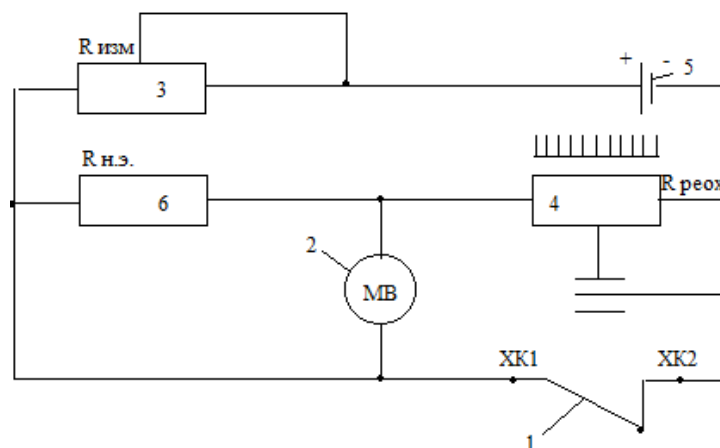
Термо-ЕРС такої пари провідників залежить тільки від температури та мало залежить від довжини всіх провідників. Гарячий спай розміщується в нагрітому середовищі, а холодні кінці через компенсаційні проводи можуть під'єднанні до будь-якого вимірювального приладу.

Вибір матеріалів для термоелектродів в основному залежить від значення температури та навколишнього середовища. Для відпалу титанових

сплавів доцільніше за все буде обрати термопару платиново-платиновородієву ТПП (з хімічним складом одного електроду – 90%Pt, 10%Rh, (платинородій) та іншого – 100%Pt (платина)). Вона працює в інтервалі температур від -20°C до 1600°C . Розміщуються термоелектроди в металевому корпусі , який виготовлений із корозійностійких або жаростійких сталей, в окремих випадках корпус може бути виготовлений із керамічних матеріалів. На корпусі зі сторони холодних кінців встановлюється клемна колодка, яка слугує для приєднання компенсаційних проводів. З метою уникнення електричного замикання електродів, використовують "керамічні буси".

Як правило, термопару встановлюють в середній зоні печі або посередині однієї зони печі. Для зручності завантаження садки глибина встановлення термопары за об'ємом печі не перевищує 100 мм. Термопару намагаються розташувати поблизу нагрівника на відстані 200-300мм, що надає можливість оперативно керувати температурою.

В якості пристрою для вимірювання показань термопары обрано автоматичний потенціометр (рис. 7.2).



1-термопара; 2-мільвольтметр; 3-позиційний додатковий опір; 4-реохорд
5-джерело живлення; 6-резистор –нормальний елемент

Рисунок 7.2 – Потенціометр

Цей пристрій реалізує позиційне регулювання температури в об'єкті та сигналізацію про перегрівання.

Принцип роботи потенціометра базується на компенсаційному методі вимірювання температури (стабілізації). Цей метод полягає в урівноваженні невідомого сигналу, який надходить з термопар, відомим сигналом потенціометру.

Принцип роботи потенціометра полягає в наступному:

Робоча термопара 1 розміщується в нагрітій печі.

Робочий пристрій підключено до робочої термопар.

Контрольні виміри температури виконуються за допомогою контрольних термопар та контрольного вимірювального пристрою.

При заміні робочої термопар на контрольну на контрольному пристрої з'являється термо ЕРС $E(t)$, значення якої можна визначити за допомогою вбудованого мілівольтметра 2.

Необхідно привести положення стрілки мілівольтметра до нуля за допомогою реохорда.

Для фактичного виміру температури за допомогою вбудованого джерела живлення 5 з'являється врівноважуюча електрична величина. Джерело живлення врівноважує електричну величину, яка надходить з термопар.

Процес врівноваження проходить за допомогою перемикання місткісних блоків. Положення ручки кожного блоку градуйовано в °С.

Регулюючий пристрій побудовано на базі компаратора, резистивного датчика сигналу $U_{\text{зад}}$, який відповідає заданому значенню температури. Компаратор перемикається в позитивний стан при $E(t) < U_{\text{зад}}$; цей стан використовують для включення нагрівання. При перевищенні заданого значення температури нагрівання виключається.

Клас точності потенціометра становить 0,02...0,2, що забезпечує велику точність регулювання температури та оперативність.

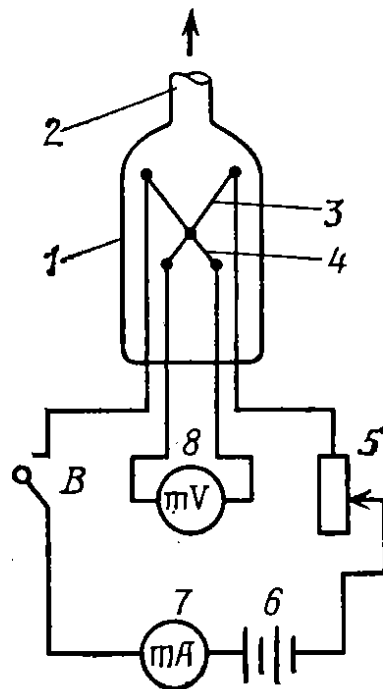
Високий клас точності приладу дозволяє точно контролювати температуру в середовищі печі, бо попередня похибка не перевищує допустиму похибку вимірювань.

Для вимірювання вакууму використовують вакуумметри, які поділяють на:

– теплові, принцип дії яких заснований на залежності теплопровідної здатності газового середовища від ступеня розрядження.

– термопарні, принцип дії яких заснований на вимірюванні температури нагрітого тіла, яке розміщено у розряджене середовище.

– іонізаційний, який заснований на вимірюванні ступеня іонізації нагрітого газового середовища всередині печі.



1 – керамічний корпус датчика вакууму; 2 – відвід; 3 – нитка нагріву
4 – термопара; 5 – терморезистор (реостат); 6 – джерело живлення; 7 – міліамперметр; 8 – мілівольтметр термопар

Рисунок 7.3 - Схема термопарного вакуумметра

Принцип роботи полягає у:

Перед початком відкачування повітря із робочого простору печі за допомогою терморезистора встановлюється нульове положення стрілки на міліамперметрі терморезистора (7).

При відкачуванні повітря із робочого простору печі та корпусу датчика вакууму, зменшується теплоперенесення від нитки розжарювання до термопари, що відчувається як падіння температури на термопарі.

Величина цього падіння може бути перетворена у значення вакуума.

Клас точності цього приладу 0,1-0,5, що дає змогу дуже ретельно перевіряти та швидко реагувати на зміну показника вакууму.

ВИСНОВКИ

В даному дипломному проєкті розглянуто особливості умов експлуатації диску газової турбіни.

Сплав ХН77ТЮР, найкраще відповідає висунутим вимогам щодо показників міцності, пластичності, опору втомі та жаростійкості.

Проаналізовано вплив легувальних елементів алюмінію, титану, хрому та бору на структуру і властивості сплаву.

Підібрано раціональний режим термічної обробки: гартування - нагрів до температури 1080°C; старіння при 750°C.

Розроблені карта маршрутної технології і технологічна карта термічної обробки, згідно останньої послідовно виконуються операції гартування, старіння, також передбачено використання контролю властивостей і мікроструктури і аналіз можливих дефектів на кожному етапі термічного оброблення.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки компрессора и вентилятора. Часть I. Монография. г. Запорожье, изд. ОАО «Мотор Сич», 2003. – 396 с.
2. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки турбины. Часть II. Монография. г. Запорожье, изд. ОАО «Мотор Сич», 2003. – 420 с
3. Kear B. H. Aircraft gas turbine materials and processes/ B. H. Kear, E. R Thompson //Science. – 1980. – Т. 208. – №. 4446. – С. 847-856.
4. Schilke P. W. Advanced gas turbine materials and coatings / P. W. Schilke //GE Energy. – 2004 – 269 p.
5. Fadok J. Advanced gas turbine materials, design and technology / J. Fadok //Advanced Power Plant Materials, Design and Technology. – Woodhead Publishing, 2010. – С. 3-31.
6. Roddy D. Advanced power plant materials, design and technology / D. Roddy //Woodhead Publishing Series in Energy. Elsevier – 2010 - 448 p
7. Clausen P. D., Evans S. P., Wood D. H. Design, manufacture, and testing of small wind turbine blades / P. D. Clausen, S. P. Evans, D. H. Wood //Advances in wind turbine blade design and materials. – Woodhead Publishing, 2023. – С. 441-461.
8. Mishnaevsky Jr L. Materials for wind turbine blades: An overview/ Jr. L. Mishnaevsky // Materials. – 2017. – Т. 10. – №. 11. – С. 1285.
9. Конспект лекцій з дисципліни (1 частина) “Спеціальні сталі та сплави в газотурбобудуванні” для студентів спеціальності 132 “Матеріалознавство” усіх форм навчання / Укл.: В. Я. Грабовський, О. А. Глотка. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2017. - 82 с

10. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної бакалаврської дипломної роботи для студентів спеціальності 132 «Матеріалознавство» освітня програма (спеціалізація) «Прикладне матеріалознавство» усіх форм навчання/Укл.: І.М. Лазечний, О.В. Климов, О.А. Глотка, Ю.І. Кононенко, О.В. Лисиця. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2022. – 57 с

11. Жидецький В. Ц. Практикум із охорони праці: навч. посібник / В. Ц. Жидецький В. С. Джигирей, В. М. Сторожук [та ін.] ; ред. В. Ц. Жидецький ; Українська акад. друкарства, Український держ. лісотехн. ун-т. – Львів : Афіша, 2000. – 352 с.

12. Конспект лекцій (2 частина) з дисципліни “Спеціальні сталі та сплави в газотурбобудуванні” для студентів спеціальності 132 «Матеріалознавство» усіх форм навчання/ Укл.: В.Я. Грабовський, О.А. Глотка. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2017. - 82 с