

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

на інженерно-фізичній факультет  
(повне найменування інституту, назва факультету)  
кафедра фізичного матеріалознавства  
(повна назва кафедри)

**Пояснювальна записка**

до дипломного проекту (роботи)

Магістр

(ступінь вищої освіти (освітній ступінь))

на тему Особливості структури та термічної обробки  
дисків турбіни зі сплавів на основі нікелю

Виконав: студент II курсу, групи ТР-213  
спеціальності (напряму підготовки)

132 матеріалознавство  
(код і назва напряму підготовки, спеціальності)

Данішевський Д.В.  
(прізвище та ініціали)

Керівник Кашов О.В.  
(прізвище та ініціали)

Рецензент Гархоменко А.В.  
(прізвище та ініціали)

м.Запоріжжя  
2018 рік

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Запорізький національний технічний університет**  
 (повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут, факультет Інженерно-фізический  
 Кафедра Різкого матеріалознавства  
 Ступінь вищої освіти (освітній ступінь) Магістр  
 Спеціальність 132 матеріалознавство  
(код і назва)  
 Напрямок підготовки Тришарне матеріалознавство  
(код і назва)

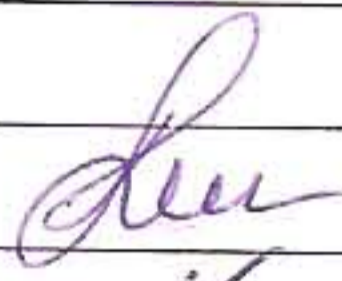
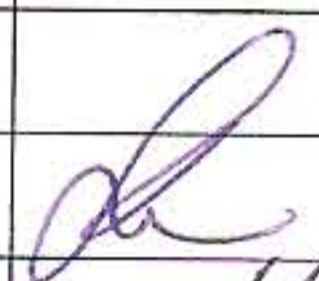
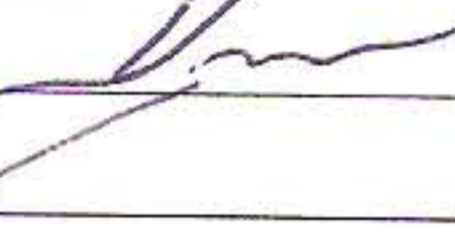
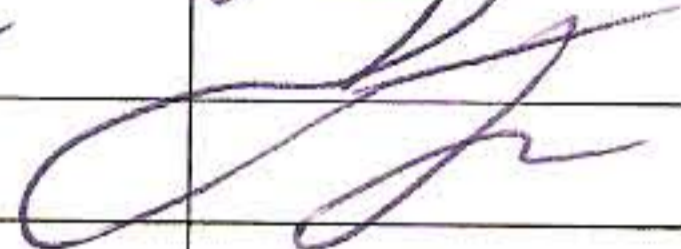

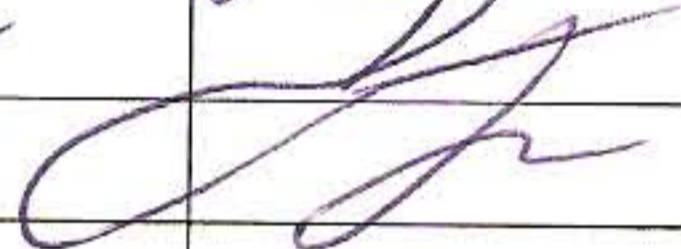
**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
 /Завідувач кафедри ТМ  
Климов О.В.  
 "12" 12 2018 року

**ЗАВДАННЯ**  
**НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТУ**

- (прізвище, ім'я, по батькові)
- Тема проекту (роботи) Особливості структури та термічної обробки осей в турбінах зі сталей на основі нікелю.
  - керівник проекту (роботи) Климов О.В.  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
  - затверджені наказом вищого навчального закладу від "18" 10 2018 року № 284
  - Строк подання студентом проекту (роботи) 15.12.18
  - Вихідні дані до проекту (роботи) Сталі сталей, технічні вимоги до матеріалів, орієнтовна технологія виробів, умови виробів
  - Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
    1. Аналітичний огляд
    2. Матеріали дослідження
    3. Вплив термічної обробки на структуру та властивості нікелевого сплаву
    4. Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях
    5. Екологічна безпека
    - 6.
  - Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
 

Технічний конструктивний рисунок осей турбіни ПТА, Профіль термічної обробки осей турбіни, Вплив теплових термічної обробки на структуру та властивості нікелевого сплаву, Оптимізація температури нагріву під гарячування, Вплив в'язкопластичної термічної обробки на структуру та властивості нікелевого сплаву, Вплив низькотемпературної термічної обробки на структуру та властивості нікелевого сплаву.

## 6. Консультанти розділів проекту (роботи)


Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
Б.коштов. з	Кузнецов В.В., к.е.н., доцент		
Охоронопр.	Нестеров О.В. к.т.н. доц		
И.ч.напр.	Плат О.В. к.т.н. доц		

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналітичний огляд	01.10 - 01.11	
2	Літературне дослідження	01.11 - 20.11	
3	Властивостейної обробки на структуру та властивості нікелевих сплавів	24.11 - 28.11	
4	Охорона праці та безпека у надриваючих ситуаціях	01.12 - 06.12 08.12 - 11.12	
5	Економічна частота	11.12 - 14.12	

Студент

  
(підпис)Данишевський Д.В.  
(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)

  
(підпис)Климов О.В.  
(прізвище та ініціали)

Данішевський

Особливості структури та термічної обробки дисків турбіни зі сплавів на основі нікелю

## РЕФЕРАТ

ПЗ: 131с., 32 табл., 24рис., 24джерела

Мета даної роботи – дослідження особливостей структури та термічної обробки дисків турбіни з деформівних сплавів на основі нікелю та проектування технології термічної обробки дисків зі сплавів ЭИ698-ВД, ЭК79-ИД, ЭП742-ИД.

В роботі вивчені особливості впливу легування та термічної обробки на структуроутворення деформівних нікелевих сплавів та його вплив на експлуатаційні властивості виробів. Обрано матеріали та методи дослідження. Проведено дослідження впливу термічної обробки на структуру матеріалу було запропоновано новий варіант термічної обробки яка б забезпечувала найкращі співвідношення властивостей. Розглянуто основні процеси термічного оброблення, які відбуваються у відділенні і обладнання, яке для цього використовується: основне і допоміжне. Розрахунок собівартості термічних процесів в термічному відділенні. Аналіз та заходи по забезпеченню безпеки роботи в термічному відділенні.

АВІАЦІЙНИЙ ДВИГУН, ДИСК, ТЕРМІЧНА ОБРОБКА,  
ГАРТУВАННЯ, СТАРІННЯ, ТУРБІНА

## ЗМІСТ

Вступ.....	5
1 Аналітичний огляд .....	7
1.1 Умови експлуатації дисків турбіни ГТД. Основні вимоги до матеріалів дисків .....	8
1.2 Особливості хімічного складу сучасних матеріалів для виготовлення дисків ГТД.....	17
1.3 Вплив легувальних елементів на структуру та властивості сплавів на основі нікелю .....	19
1.4 Вплив термічної обробки на структуру та властивості матеріалів дисків	29
1.5 Перспективні технології виготовлення дисків ГТД.....	38
2 Матеріали та методи дослідження .....	41
2.1 Матеріали дослідження .....	41
2.2 Методи дослідження .....	45
2.2.1 Дослідження мікроструктури .....	45
2.2.2 Методи визначення механічних властивостей.....	45
3 Вплив термічної обробки на структуру та властивості нікелевих сплавів ..	49
3.1 Вибір найбільш серійного варіанта термічної обробки та обладнання.....	49
3.1.1 Номенклатура виробів та маршрутна технологія їх виготовлення.....	49
3.1.2 Розробка режимів та технологій термічної обробки .....	53
3.1.3 Вибір та розрахунки кількості обладнання .....	61
3.2 Аналіз структури та властивостей після різних варіантів термічної обробки.....	71
3.2.1 Структура сучасних деформівних нікелевих сплавів .....	71

3.2.2 Вплив режимів гартування на структуру і властивості штамповок дисків .....	77
3.2.3 Вплив попередньої термічної обробки на технологічну пластичність ..	82
3.2.4 Оптимізація режимів термічної обробки деформівних напівфабрикатів нікелевих сплавів.....	85
3.3 Контроль якості готової продукції .....	94
4 Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях.....	97
4.1 Аналіз потенційних небезпек.....	97
4.2 Заходи щодо забезпечення безпеки.....	98
4.3 Заходи щодо виробничої санітарії та гігієни праці .....	105
4.4 Заходи з пожежної безпеки .....	109
5 Економічна частина .....	115
5.1 Розрахунок капітальних вкладень в основні фонди .....	115
5.2 Матеріальне забезпечення.....	117
5.3 Праця і заробітна плата .....	118
5.4 Собівартість термообробки.....	121
Висновки .....	127
Використана література.....	128

## ВСТУП

На сучасному етапі розвитку техніки існує тісний взаємозв'язок між рівнем технології обробки матеріалу та конструктивними рішеннями, що реалізуються в певних галузях авіабудування. Розробка матеріалів повинна враховувати як технологічні можливості так і особливі вимоги, що висувуються до матеріалу певних виробів. Для виготовлення деталей ГТД, що працюють при підвищених температурах, застосовуються жароміцні сплави, при виборі яких необхідно враховувати специфіку напруженого стану та особливості експлуатації турбін різного призначення. ГТД відрізняються за конструкцією й типом робочих тіл (що працюють за рахунок згорання палива або за рахунок зовнішнього джерела тепла, наприклад, тепла газів, що отримують у виробничих процесах). До складу сучасного ГТД відкритого циклу можуть входити наступні основні вузли: компресори, камери згорання, турбіни, регенератори, різні статорні деталі, вузли керування й регулювання.

Жароміцні сталі та сплави як особливий вид конструкційних матеріалів отримали найбільш інтенсивного розвитку у зв'язку з розвитком турбобудування. Турбіна є джерелом або перетворювачем енергії та використовується в теплоенергетиці, судових, авіаційних двигунах. У конструкціях сучасних турбін жароміцні сплави складають 40-50 % за масою.

На початковому етапі розробки жароміцних матеріалів дисків турбін (як найбільш відповідального та напруженого елемента) їх виготовляли з високолегованих хромонікельмолібденових сталей. Наступним етапом було створення жароміцних матеріалів на основі нікелю – суперсплавів. Сьогодні, на підставі систематичних робіт у галузі дослідження та розробки жароміцних сталей та сплавів встановлено основні принципи легування сплавів на залізній, нікелевій, кобальтовій основах та розроблена велика група сплавів, що широко використовується в газотурбобудуванні.

Безперервне вдосконалення технології виготовлення заготовок, їх термічної обробки суттєво підвищує можливості сучасних газотурбінних установок, дозволяє враховувати особливості експлуатації та обирати оптимальні матеріали для виготовлення деталей.

Робочі температури дисків турбіни найчастіше не вище 780°C, ця температура відповідає зовнішньому ободові, на якому фіксуються робочі лопатки. Ближче до центральної частини диска температура значно нижче. У диску при обертанні виникають напруження понад 490 Мпа, окрім власної маси диска слід враховувати напруження розтягнення, що пов'язані з масою закріплених на диску лопаток. Від матеріалу дисків вимагається висока міцність при розтягуванні та опір повзучості в умовах робочих температур, опір руйнуванню від втоми.

Жароміцні сплави – це матеріали, що здатні працювати при високих температурах впродовж заданого часу під дією складних навантажень. Головною характеристикою, що визначає здатність сталі або сплаву працювати в зазначених умовах, є жароміцність. Надійність металу визначається також пластичністю, що зберігається до завершення експлуатації виробу. Бажано забезпечувати високі значення ударної в'язкості, опору втомним руйнуванням.

Одним зі способів покращення механічних властивостей є термічна обробка. Термообробку застосовують як проміжну операцію для покращення технологічних властивостей (оброблюваність тиском, різанням та інше) і як завершальну операцію для надання металу або сплаву такого комплексу механічних, фізичних і хімічних властивостей, який забезпечує необхідні експлуатаційні характеристики виробу.

## 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

ГТД широко застосовуються в авіаційній, наземній і морській техніці. На сьогодні у загальному обсязі світового виробництва ГТД у вартісному вираженні авіаційні двигуни становлять близько 70 %, наземні й морські - близько 30 %. Обсяг виробництва наземних і морських ГТД розподіляється в такий спосіб:

- енергетичні ГТД ~ 91 %;
- ГТД для приводу промислового устаткування й наземних транспортних засобів ~ 5 %;
- ГТД для приводу суднових двигунів ~ 4 %.

Газотурбінний двигун є одним з найбільш складних виробів сучасного машинобудування, що характеризується:

високими значеннями параметрів і досконалістю термодинамічного циклу робочого тіла;

надійною роботою в умовах впливу складного комплексу високих температур, динамічних, статичних, повторно-статичних, втомних, термомеханічних і інших навантажень;

ефективними методами захисту від високотемпературної газової корозії й теплозахисту;

системою охолодження гарячих деталей і вузлів; застосуванням нових перспективних матеріалів і технологій; високою експлуатаційною надійністю;

екологічною безпекою й іншими параметрами, що визначають показники якості й наукоємності продукції.

Створення газотурбінних двигунів п'ятого й шостого покоління, а також нових газотурбінних установок для енергетики, суднобудування й іншого застосування вимагає поряд з оригінальними конструкторськими й

технологічними рішеннями розробки матеріалів з більш високим, у порівнянні з існуючим, рівнем працездатності.

Перспективні газотурбінні двигуни допускають підвищені навантаження на кожний ступень турбомашини й, відповідно, на диски газових турбін.

Одними з найбільш критичних елементів газотурбінних двигунів є диски турбін і останніх ступенів компресорів, що виготовляються з нікелевих жароміцних сплавів.

Тому що дискові сплави працюють у жорстких температурно-силових умовах навантаження, що помітно відрізняються для різних частин диска (обід, полотно й маточина) за рівнем і характеру діючих напружень, у більшості випадків оптимізація робочих характеристик деталей здійснюється прийняттям компромісних рішень. Арсенал цих рішень включає, у першу чергу, вибір лігатури сплаву, а також реалізацію комплексної технології традиційної й гранульної металургії ( для гранульних сплавів): деформацію й термообробку (операції гомогенізації, гартування, старіння тощо) для формування необхідної мікроструктури сплаву в різних частинах диска.

### 1.1 Умови експлуатації дисків турбіни ГТД. Основні вимоги до матеріалів дисків

Диски належать до деталей ротора газотурбінного двигуна. Диски розміщуються на валу ГТД. На них закріплюються лопатки турбіни, які забезпечують перетворення енергії газового потоку в механічну. Вони також передають з лопаток на вал крутний момент та осьові зусилля.

Диски є найбільш відповідальними елементами конструкції роторної частини ГТД. Починаючи із входу в проточну частину ГТД і при виході газів з турбіни, діють силові й температурні навантаження, які сприймає

обертотвий ротор. У дисках компресора й турбіни закріплені лопатки, які забезпечують поступове стискання повітря в компресорі низького тиску (КНД), середнього тиску (КСД) і високого тиску (КВД). Потім суміш повітря й палива з камери згорання (КС) подається на турбіну. Потік газів, що мають високу температуру ( $T_{г.маx.}=1600$  К), надходячи на лопатки турбіни, створює обертання роторної частини ГТД. Реактивна сила, що виникає в роторі, забезпечує роботу виробу.

Диски турбіни ГТД працюють при дуже високих силових і температурних навантаженнях. Напруги, що виникають у дисках, досягають 500 МПа. З урахуванням температурного режиму експлуатації, диски турбін в основному виготовляють із хромонікелевих сплавів з високим вмістом нікелю (62 - 73 %).

Перепад температур за радіусом диска сягає 400 К, що викликає суттєві температурні напруження в матеріалі, що приводять до появи тріщин і в окремих випадках до руйнування диска. Такі умови роботи дисків при значних частотах обертання вимагають високої збалансованості елементів роторної частини й відсутності значних перетіканій газів у лабіринтових ущільненнях ГТД.

Отже диски турбіни ГТД являють собою рівноміцну конструкцію, що враховує вплив осьових, відцентрових і температурних напружень і нерівномірність їх впливу по всьому профілю (рис. 1.1).

Необхідно відзначити, що диски компресорів і турбіни, працюючи при значних частотах обертання, повинні мати мінімальні зсуви обертотвих неврівноважених мас. Для зменшення «схованої неврівноваженості» елементів роторів необхідно зменшувати джерела, що породжують цю неврівноваженість у процесі виготовлення й складання. У зв'язку із цим точність розташування поверхонь роторної частини двигуна, включаючи вільні поверхні, підвищена. Так, допуск на зсув вільних поверхонь контуру диска повинен бути не більш 0,06 мм.



Таким чином у процесі експлуатації на диски діють наступні напруження:

- високі напруження розтягу під дією відцентрових сил самого диску та лопаток, які на ньому розміщуються;
- напруження згину під дією потоку газів, які створюють різницю тисків перед дисками та за ними;
- динамічні напруження, які викликані вібраціями при роботі ГТД;
- температурні напруження, що обумовлені нерівномірністю його прогрівання за радіусом.

Напруження, що виникають під дією відцентрових сил, створюються радіальними силами  $P$  (рис. 1.2), які прагнуть розірвати диск по колу, та обертотними силами  $T$ , які намагаються розірвати диск за діаметром.

Ці сили й викликають розтяг матеріалу у двох взаємно перпендикулярних площинах.

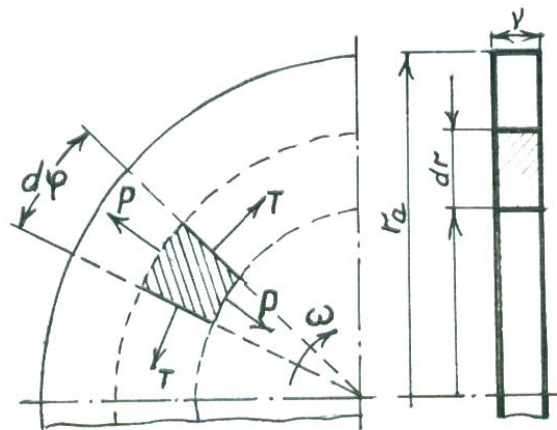


Рисунок 1.2 – Схема сил, що діють на елемент диску при його обертанні

У цьому випадку коефіцієнт м'якості  $\alpha$  схеми напруженого стану можна визначити як

$$\alpha = \frac{S_1 - S_3}{2S_1 - 0,5(S_2 + S_3)} = \frac{0 - S}{2 \cdot 0 - 0,5(S + S)} = 1$$

Тобто існує висока імовірність крихкого руйнування.

А коефіцієнт жорсткості  $\beta$  у свою чергу визначається

$$\beta = \frac{S_1 + S_2 + S_3}{3|S_{\max}|} = \frac{0 + S + S}{3S} = \frac{2}{3}$$

Таким чином можна сказати, що вказана схема навантаження є досить жорсткою.

Якщо розглядати суцільний диск, то в його центрі колові та радіальні сили є рівними й сягають свого максимального значення (рис.1.3).

Також можна бачити, що наявність центрального отвору зменшує радіальні напруження  $\sigma_{r0}$  в порівнянні з радіальними напруженнями суцільного диску  $\sigma_r$ . При цьому із збільшенням радіусу отвору радіальні напруження  $\sigma_{r0}'$  зменшуються. Але наявність отвору призводить до збільшення колових (тангенційних) напружень  $\sigma_t$ . Найбільшого значення колові напруження сягають на радіусі отвору. Ці напруження й визначають міцність диску з центральним отвором.

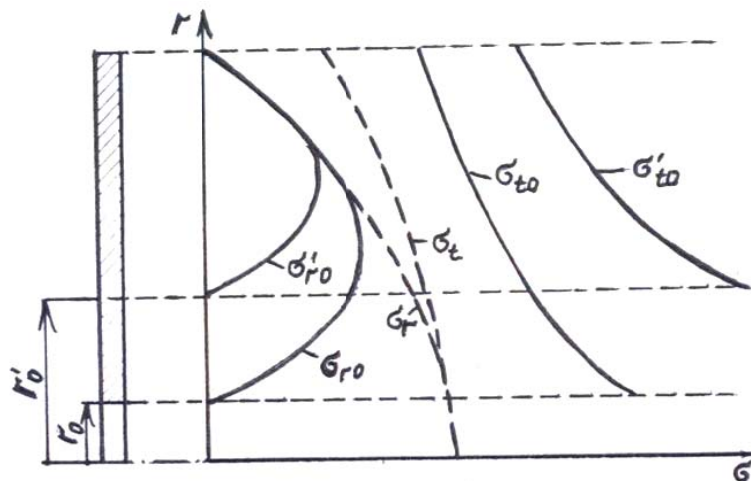


Рисунок 1.3 – Розподілення напружень у диску постійної товщини

А розподілення напружень від зовнішнього навантаження  $\sigma_a$  є рівномірним (рис.1.4).

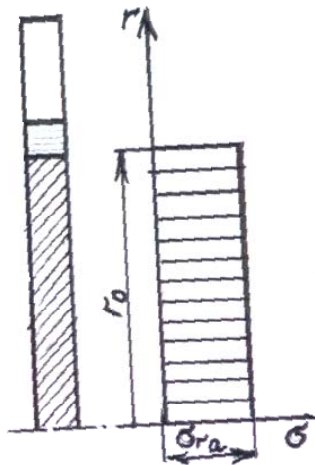


Рисунок 1.4 – Напруження в диску постійної товщини від зовнішнього навантаження

Диски постійної товщини є дуже важкими, тому не використовуються в ГТД. Як видно з графіків, напруження по радіусу диска зменшується від центру до ободу. Таким чином у цілях зменшення ваги дисків його товщину зменшують до ободу. Теоретично можна виконати диск з такою зміною форми його перетину, що напруження вздовж радіуса будуть постійними й дорівнюватимуть максимальному значенню. Такий диск називається диском рівного опору. Але в дійсності в таких дисках напруження не будуть рівними внаслідок впливу температурних напружень, які змінюються при зміні режиму роботи двигуна, а також на диску повинен бути обід, розміри якого визначаються розмірами робочих лопаток.

Температурні напруження, що виникають внаслідок нерівномірного нагрівання периферійної та центральної частини диска, сумуються з напруженнями від відцентрових сил, підвищуючи загальне навантаження деталі. Температура ободу диска сягає 500-700 °С, тоді як центральна частина розігрівається лише до 200-300 °С. Тобто при роботі двигуна спостерігається перепад температур між ободом та центром диска до 400 °С, а при пусках ця різниця може складати 600 °С.

При нагріванні в зовнішніх шарах диску виникають напруження стиснення в тангенційному (коловому) напрямі  $\sigma_t^{(T)}$  (рис. 1.5). У свою чергу зовнішня частина, що намагається розширитись, створює напруження розтягнення в центральній частині.

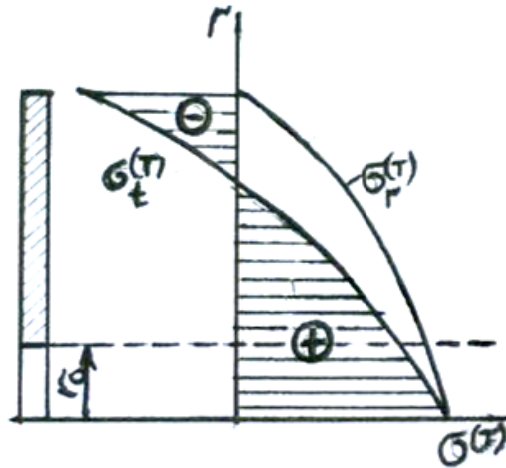


Рисунок 1.5 – Схема розподілення температури та температурних напружень за радіусом диска

Температурні напруження також діють і в радіальному напрямі. Радіальні напруження  $\sigma_r^{(T)}$  на ободі дорівнюють нулю, а в центрі мають максимальне значення.

Схему сумарної дії напружень у розігрітому диску постійної товщини, який обертається з лопатками, що закріплені на ньому, зображено на рисунку. 1.6.

У зв'язку із зазначеним матеріалом, з яких виготовляють диски ГТД, повинні мати достатній рівень міцності при підвищених температурах, жароміцності та жаростійкості (у випадку використання забрудненого палива), витримувати значні динамічні, термоциклічні та вібраційні навантаження, а також зберігати свої властивості при тривалому використанні.

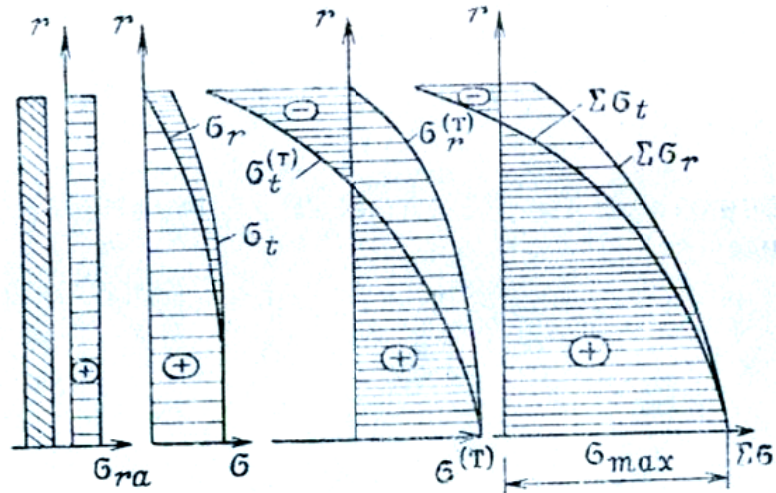


Рисунок 1.6 – Схема сумарного напруження в розігрітому диску постійної товщини, який обертається, з лопатками, що закріплені на ньому

Технологічний процес виготовлення дисків турбіни складний: матеріал диска зазнає значну деформацію, неодноразово піддається нагріву з подальшим охолодженням при різній швидкості. Великий розмір і особливість геометрії конструкції ускладнюють виготовлення деформівних заготовок з однорідними механічними властивостями матеріалу по всьому об'єму диска[1]. На рисунку 1.7 показані всі сили, що діють на робоче колесо.

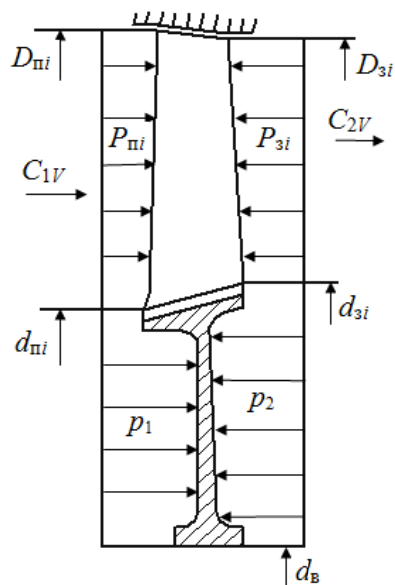


Рисунок 1.7 - Схема дій статичних сил на робоче колесо

На робоче колесо діють: осьове зусилля, обертовий момент.

Головним чином, виникають деформації розтягування диска в площині його обертання. На рисунку 1.8 показані сили, що діють на елементи з'єднання лопатки й диска.

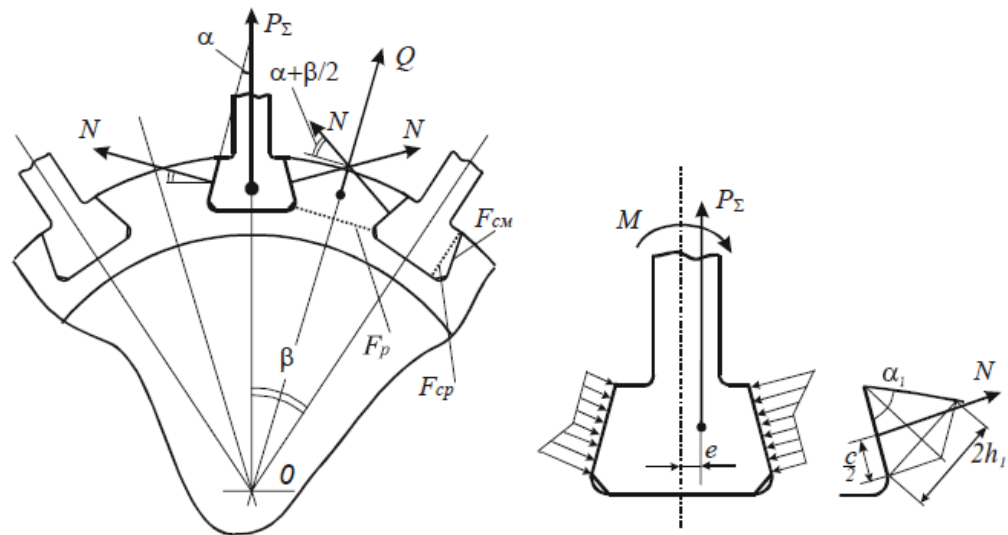


Рисунок 1.8 - Схема впливу сил на елементи з'єднання лопатки з диском

Наступна вимога - мінімальна імовірність руйнування диска від перегріву. Диски ТВТ зазвичай захищені від контакту з газом як конструктивно (дефлекторами й проміжними дисками), так і системою охолодження (потоками повітря, що охолоджує диски, дефлектори). Ефективна система охолодження, що забезпечує нижчий рівень температури диска, дає можливість для використання менш коштовних матеріалів або для зменшення маси. Для охолодження найбільш навантаженої й найбільш масивної частини диска – ступиці- може бути використане повітря.[1]

Таким чином, для забезпечення працездатності дисків, до матеріалу висуваються наступні вимоги [4, 6-8]:

- високий рівень характеристик міцності у всьому діапазоні робочих температур;
- відсутність чутливості до концентраторів напружень при статичному навантаженні;

- висока пластичність при тривалому й короткочасному навантаженні;
- досить високий опір малоцикловцїй втомі (МЦУ);
- стабільність структури, тобто відсутність фазових перетворень, що приводять до істотної зміни службових властивостей у процесі тривалоїексплуатації.

Практично всі перераховані вище властивості є структурно-чутливими [2, 3, 4]. Відповідно, на їх рівень можна впливати термічним обробленням

## 1.2 Особливості хімічного складу сучасних матеріалів для виготовлення дисків ГТД

Конструкції сучасних турбін базуються на найвищих технологіях в області матеріалознавства. Прогрес в області жароміцних сплавів у значній мірі визначає параметри газових турбін. Типові матеріали для турбіни авіаційного двигуна характеризуються високою питомою міцністю при високих температурах і задовільною відтворюваністю механічних властивостей у виробництві [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

Обираний для диска матеріал повинен відповідати наступним вимогам:

- висока статична й динамічна міцність при температурах до 750°C.
- оптимальні характеристики щодо мало циклової втоми;
- тріщиностійкість ;
- достатній обсяг бази даних відносно конструкційної міцності;
- низька чутливість до дефектів;
- досвід застосування в експлуатації;
- досвід виготовлення у виробництві;
- гарантія відсутності металургійних дефектів у заготовках;
- можливість контролю внутрішніх і зовнішніх дефектів;
- прийнятна вартість.

Для зменшення маси турбіни прагнуть вибрати матеріал для дисків з більш високою короткочасною й тривалою міцністю. Однак при підвищенні статичної міцності матеріалу падає його пластичність, що призводить до погіршення характеристик малоциклової втоми й тріщиностійкості. У цей час, враховуючи тенденцію до збільшення циклічного ресурсу, основними критеріями вибору матеріалу дисків поряд з міцністю вважають малоцикловоутому й опір росту тріщин.

В 1960-х роках у вітчизняному двигунобудуванні широке застосування для дисків турбін одержали сплави на нікелевій основі ЭИ437 БУ-ВД (поліпшений, вакуумно- дугової виплавки) і ЭИ698ВД. Ці диски виготовлялися традиційним методом деформації ізвиливків (двигуни Д-30, Д-30КУ/КП, НК-8 і інші). Внаслідок великого ( до 80%) вмісту нікелю, вартість цих сплавів досить висока.

За рубежом у цей період найбільшого поширення одержав сплав IN718. Максимальна температура застосування для згаданих сплавів становить 600-650°C.

Наступним поколінням дискових сплавів стали сплави ЭП742ИД, ЭК79В, ЭК151ИД, ЭП962. Це високоміцні нікелеві сплави, отримані ізвиливків із застосуванням ізотермічного штампування. Однак при виробництві заготовок складної форми із цих сплавів з'являються технологічні проблеми - їх важко деформувати.

Суперсплави на нікелевій основі — найбільш складні; їх частіше за все застосовують для виготовлення деталей, що працюють при найвищих температурах. Гомологічні робочі температури в них вище, ніж у кожної з розповсюджених систем, а у двигунах з підвищеними технічними характеристиками їх вагова частка перевищує 50 %. Металофізика цих сплавів складна, проте, залежність їх властивостей від структури вивчена краще, ніж у будь-яких матеріалів, призначених для використання в діапазоні 650-1100 °С.

На перший погляд розголушеністьність їх складуніби суперечить логіці. Він включає принаймні 12-13 важливих компонентів, вміст яких ретельно контролюють. Вміст "блукаючих" елементів — Si, P, S, O и N — також необхідно регулювати, звертаючись до відповідної до практики виплавки. Вміст малих домішок Se, Te, Pb і Bi повинен бути дуже низьким; щоб виконати цю вимогу, користуються оптимальними способами виплавки при ретельному відборі сировинних матеріалів. Слід, однак, пам'ятати, що відповідно до розробки більшості нікелевих сплавів, вони містять 10-12% Cr, до 8% Al і Ti, 5-10% Z і малі кількості B, Zr і C. За бажанням можуть бути введені й такі загальноживані добавки, як Mo, W, Nb, Ta й Hf[**Ошибка!** **Источник ссылки не найден.**].

### 1.3 Вплив легувальних елементів на структуру та властивості сплавів на основі нікелю

До теперішнього часу як у нас у країні, так і за рубежом розроблені й поширено застосовуються два покоління дискових Ni-Суперсплавів. До першого слід віднести сплави типу Nimonic 80, Inconel X750, а також ті, що використовуються вітчизняними підприємствами ЭИ435, ЭИ437 і ін., що відрізняються високим вмістом нікелю й відносно низкою об'ємною часткою зміцнювальної  $\gamma'$ -фази (близько 20%). До другого покоління сплавів можна віднести сплави типу Inconel, Rene 41, Rene 88, Rene 95, Astroloy, Udimet і Waspaloy, а також ЭИ698, ЭП742, ЭП741, ЭИ962 і ін., що мають у своєму складі великий вміст легувальних елементів Cr і Co, а також важкотопких елементів — Mo, W або Nb. У сплавах другого покоління отримується до 40 і більш об'ємних відсотків  $\gamma'$ -фази.

Третє покоління створених і розроблювальних у цей час дискових сплавів як елементів-зміцнювачів містить Ta й W, а також до 1-2% Re. В них

утримується 45 і більш об'ємних відсотків  $\gamma'$ -фази. Зокрема, у роботі [5] вказується, що компаніями Pratt & Whitney, GE і NASA була проведена спільна робота зі створення дискового сплаву 3-го покоління для високошвидкісного цивільного літака (High Speed Civil Transport — HSCT), якому була привласнена марка ME3 (Rene 104). Сплав додатково містить Та й за рахунок легування значною кількістю С має широкий інтервал  $\Delta T = T_{\text{звт}} - T_{\text{п.р.}\gamma'}$ , що дозволяє знизити можливість утворення пористості при нагріванні його для гомогенізації до температури вище ніж  $T_{\text{п.р.}\gamma'}$ . Сплав призначений для використання у двигуні фірми GE у якості силової установки літака Boeing 787.

Аналогічний підхід до легування був здійснений фірмою Rolls-Royce при створенні дискового сплаву третього покоління RR1000 — він також легований танталом. При цьому його вміст обмежено 2,15% (мас.). Цей сплав легований значною кількістю кобальту з метою збільшення діапазону термообробки, а концентрація хрому в ньому не перевищує 15% через небезпеку утворення крихкої  $\sigma$ -фази.

У цьому ж джерелі зазначено, що NASA розробила також гібридний дисковий сплав LSHR, характерною рисою якого є низьке значення  $T_{\text{п.р.}\gamma'}$ , але при цьому він має більш складне легування (в основному за рахунок W), ніж розроблений фірмою Honeywell спеціально для малих допоміжних двигунів сплав Alloy 10. Є відомості, що за рубежом розробляється четверте покоління жароміцних дискових Ni-Суперсплавів, комбінація легуючих елементів яких оптимізована для одержання градієнтного хімічного ( відповідно, і фазового) складу по різних перетинах деталі [7].

Накопичений до теперішнього часу досвід розробки Ni-супер-сплавів дозволяє систематизувати наявні дані про роль кожного елемента в композиції сплаву. Узагальнені дані представлені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 - Функції легуючих елементів у складі сучасних жароміцних дискових Ni-Суперсплавів

Елемент	Основні функції
Кобальт	Твердорозчинне зміцнення, розширення температурного інтервалу для здійснення термічної й деформаційної обробки, підвищення стійкості до сольової корозії
Хром	Твердорозчинне зміцнення, додаткове зміцнення карбідами, підвищення стійкості до високотемпературної газової й сульфідної корозії, збільшення опору росту втомної тріщини
Тантал	Утворення і підвищення стабільності $\gamma$ -фази, збільшення опору повзучості й опору росту втомної тріщини
Вольфрам	Твердорозчинне зміцнення й підвищення стабільності $\gamma$ -фази, збільшення опору високотемпературної повзучості, додаткове карбідне зміцнення
Молібден	Твердорозчинне зміцнення й зміцнення $\gamma$ -фази
Цирконій	Підвищення пластичності, зниження швидкості росту втомної тріщини ( при малій концентрації)
Ніобій	У невеликих кількостях підвищує опір повзучості
Титан + алюміній	Основні $\gamma'$ -утворюючі елементи, Ti — основний елемент, що утворює додаткову зміцнювальну фазу на основі карбідів типу MC
Вуглець	Карбідне зміцнення, контроль росту зерна при підвищених температурах
Бор	Зміцнення боридами, поліпшення міжфазних і міжзеренних границь
Гафній	Зниження швидкості росту втомної тріщини, удосконалювання морфології карбідів

Розглянемо більш докладно цю проблему, враховуючи її актуальність, з позицій подальшого вдосконалювання складу дискових жароміцних нікелевих сплавів.

Алюміній і титан. Аналіз складу сплавів другого й третього покоління показує, що їх більш висока працездатність забезпечується не тільки за рахунок збільшення частки цих елементів у матеріалі, але й шляхом збільшення концентрації в них легуючих елементів, що мають високу температуру плавлення й низькі дифузійні характеристики, таких як W, Mo, Ta, Nb, Hf і Re. Вони входять в основному як до складу  $\gamma'$ -фази (Nb, Hf, Ta), так і  $\gamma$ -матриці (Re, W, Mo). При цьому W і Mo в помітних кількостях розчинені в обох фазах —  $\gamma$  і  $\gamma'$ . У результаті забезпечується значне зміцнення й структурна термостабільність, поліпшуються можливості для досягнення оптимальних значень параметрів невідповідності кристалічних ґрат  $\gamma$ - і  $\gamma'$ -фаз і в цілому досягається поліпшення експлуатаційних характеристик сплавів.

Перевищення сумарного вмісту Al + Ti понад необхідний приводить не тільки до появи недостатньо ефективною  $\gamma'$ -фази на основі  $Ni_3(Al,Ti)$  евтектичного походження, але й до росту  $T_{п.р.\gamma'}$ , відповідно, до зменшення «вікна» термообробки.

Слід звернути увагу на те, що для забезпечення оптимального рівня механічних характеристик дискових жароміцних сплавів важливим є не тільки сумарний вміст Al+Ti, але й співвідношення між ними. Дослідження показали, що найбільш високий рівень короткочасної міцності й границі текучості матеріалів цього класу забезпечуються при відношенні масових часток  $Ti/Al \approx 1$  [6].

Титан у порівнянні з алюмінієм активніше впливає на зміцнювальний ефект  $\gamma'$ -фази й зменшення швидкості коагуляції  $\gamma'$ -часток, однак збільшення його концентрації в сплавах робить їх менш стабільними через можливе утворення  $\eta$ - і  $\delta$ -пластинчастих фаз.

У роботі [6] вказується, що, по-перше, пластинчаста  $\eta$ -фаза ( $Ni_3Ti$ ) починає виділятися, коли відношення вмістів (в атомних частках)  $Ti/Al > 1,45$ , а по-друге, навіть при наявності співвідношення  $Ti/Al$ , близького до 1, може виникнути локальне виділення пластинчастих фаз  $\eta(Ni_3Ti)$  і  $\delta(Ni_3Nb, Ta)$  при

співвідношенні атомних часток  $(Nb + Ta)/Al > 0,17$  і в повному обсязі, якщо це співвідношення перевищує 0,27.

Хром і кобальт. Вміст хрому й кобальту в сплавах, хоча й має тенденцію до деякого зниження, все-таки залишається досить високим. Це обумовлене наступними причинами:

зазначені елементи (у першу чергу хром) забезпечують значну стійкість сплавів в умовах високотемпературної газової корозії;

вони впливають на підвищення працездатності сплавів при впливі сульфідних і інших шкідливих з'єднань, що вкрай важливо для всіх рухових установок, особливо для морських ГТД і ГТУ; Cr і Co знижують  $T_{п.р. \gamma}$ -фази [8], що поліпшує технологічність дискових сплавів. Наявність Cr у сплавах сприяє підвищенню опору росту втомної тріщини.

Разом з тим, враховуючи, що Cr є присутнім в основному в  $\gamma$ -фазі (у якій його вміст істотно вище, ніж у сплаві), при ускладненні легування, пов'язаному зі збільшенням об'ємної частки зміцнювальної  $\gamma'$ -фази й, відповідно, відносним зменшенням кількості  $\gamma$ -матриці, та ж сама кількість Cr може привести до помітного збільшення його концентрації в  $\gamma$ -фазі, що, у свою чергу, викличе можливе утворення небажаних фаз на основі  $\alpha$ -Cr,  $\sigma$ - і  $\mu$ -фаз, карбідів типу  $M_{23}C_6$  і ін. і, відповідно, зниження механічних характеристик [9].

Дослідження системи легування сплаву Alloy 10 показали [6], що при вмісті Cr понад 12,5% (мас.) з'являються голчасті або пластинчасті виділення, типові для ТЦП-Фаз, і плівки фази  $\alpha$ -Cr на границях зерен, що приводить до зниження працездатності сплаву при температурі 760 °C і навантаженні 469 МПа.

Зазначені обставини необхідно враховувати при розробці нових дискових жароміцних нікелевих сплавів.

Вміст Co у складі сплавів підтримується на рівні 13-20%. Більш висока концентрація Co приводить до додаткового зниження  $T_{п.р. \gamma}$ -фази, що в принципі бажане для розширення технологічного інтервалу між  $T_{п.р. \gamma}$  і TS

Однак високий вміст Со збільшує вартість деталі й може знижувати її опір високотемпературної повзучості. Якщо ж вміст Со занадто малий,  $T_{п.р.\gamma}$  може значно зрости, що приведе до помітного ускладнення технологічного процесу, оскільки для термообробки (етап гомогенізації) буде потрібно більш висока температура. Це у свою чергу, з одного боку, пов'язане із застосуванням більш складного термічного устаткування, а з іншого, — можуть активізуватися процеси рекристалізації й відбудеться небажане укрупнення розміру зерен. Причому у випадку швидкого нагрівання вище даної температури виникне термічна пористість за рахунок появи локальних обсягів розплаву карбоборидних евтектичних утворень.

Вольфрам при вмісті 2-4% (мас.) входить до складу матриці як зміцнювальний елемент, він також входить до складу  $\gamma'$ -фази. Зниження концентрації вольфраму нижче 2% приводить, з одного боку, до зменшення швидкості росту втомної тріщини, а з іншого, — росту швидкості повзучості. При вмісті вольфраму, що суттєво перевищує зазначені рівні, відзначена поява мікроструктурної нестабільності, зниження пластичності й підвищення щільності сплаву.

Молібден є більш дешевим і легким заміником вольфраму, однак як твердорозчинний зміцнювач він менш ефективний, при цьому зниження його вмісту менш 3% приводить до істотного падіння опору повзучості; підвищення вмісту Мо понад 6%, веде до зниження стабільності й підвищенню щільності.

У цілому вольфрам і молібден позитивно впливають на властивості нікелевих жароміцних сплавів. Їхньою сприятливою особливістю є те, що обидва елементи входять до складу як  $\gamma'$ -фази (W — більшою мірою), так і  $\gamma$ -твердого розчину (більшою мірою Мо). Таким чином, вони зміцнюють одночасно обидві фази, сприяючи як збільшенню міцності сплавів, так і термостабільності структури. Вольфрам у порівнянні з молібденом виявляє більший зміцнювальний вплив. Молібден проте є бажаним елементом у дискових сплавах при вмісті в межах 2-6%. Він один з найпоширеніших і

дешевих металів, застосовуваних для легування жароміцних сплавів. Сплави, що містять молібден у невеликих кількостях, більш стійки до сульфідної корозії в порівнянні зі сплавами, у яких молібден відсутній [10].

Ніобій, що підвищує  $T_{п.р. \gamma}$  фази, зазвичай використовують у кількості не більш 3%. Він є одним з бажаних елементів при легуванні високожароміцних сплавів. Nb являє собою  $\gamma'$ -утворюючий елемент, який разом з тим у певній концентрації входить до складу  $\gamma$ -твердого розчину й карбідів. Його позитивна роль полягає не тільки в удосконалюванні  $\gamma'$ -зміцнення, але також і в тому, що він зміцнює твердий розчин. А одночасна наявність його у твердому розчині й зміцнювальних фазах крім підвищення жароміцності приводить до зниження схильності сплавів до перебудовування внаслідок ослаблення дифузійних процесів. Це поліпшує структурну стабільність і ресурс роботи.

Даний елемент сприятливо впливає на зменшення схильності до зональної ліквідації [10]. При концентрації його в сплаві більш 3% або менш 0,5% відбувається зниження опору повзучості. Наслідком високого змісту Nb є надмірний ріст  $T_{п.р. \gamma}$  погіршення технологічності сплаву, ріст щільності, зменшення пластичності, стійкості до циклічної втоми й наростання тенденцій до хімічної нестабільності сплаву. Nb дає більш сильний зміцнювальний ефект у порівнянні з Ti, однак його надлишковий вміст негативно впливає на опір розвитку тріщини й пластичність. Установлене що:

Nb і W підвищують границю текучості;

Al і Ti знижують швидкість росту втомної тріщини;

Co, Nb, Ta, Ti й W збільшують межу міцності й довговічність.

Гафній є сильним карбідоутворюючим елементом. Легування їм дозволяє підвищити робочі характеристики сплавів.

Слід особливо вказати на позитивний вплив гафнію в підвищенні найбільш важливих характеристик жароміцних сплавів. Як правило, міцність і пластичність зв'язані взаємно протилежним чином, тобто збільшення однієї

характеристики приводить до зниження іншої. Гафній виявився одним з тих рідких елементів, уведення якого в жароміцні нікелеві сплави дозволяє одночасно підвищити як їхню міцність, так і пластичність. Гафній збільшує частку евтектики ( $\gamma$ - $\gamma'$ ) і змінює морфологію карбідів МС, які в набагато меншій мері мають вигляд «китайських ієрогліфів» і більшою мірою здобувають форму округлих включень, що приводить до поліпшення механічних властивостей.

Оскільки одним з позитивних наслідків уведення гафнію до складу сплавів є дія, що покращує морфологію карбідів, що розташовуються значною мірою по границях зерен, це означає, що гафній помітно поліпшує стан зерених границь. Із цього погляду, особливо корисним є спільне введення його із РЗМ і іттриєм, які також виявляють значний зміцнювальний вплив на границі. Позитивна роль гафнію як зміцнювача границь пояснюється також і тим, що, перебуваючи в боридній фазі, він заміщає хром, роблячи борид більш тугоплавким; крім того, з'єднуючись із сіркою, він створює більш стійкі сульфідні [6].

Добавки Hf до 2% можуть знижувати швидкість росту втомної тріщини. Оптимальна концентрація Hf у сучасних дискових сплавах перебуває на рівні 0,25-0,75% (мас.).

Цирконій при вмісті 0,04-0,06% підвищує пластичність сплавів, знижує швидкість росту тріщини. Цирконій присутній у жароміцних сплавах у малих кількостях (~0,05%). Залежність пластичності від вмісту цирконію в межах 0,005-0,05% складна: максимальна пластичність спостерігається при вмісті цирконію 0,01%, при більшому або меншому його вмісті пластичність знижується. Спільне мікролегування (цирконій + бор) виявляє досить сприятливий вплив на властивості сплавів і може підвищувати час до руйнування зразків при випробуванні на повзучість у кілька разів.

Ванадій сприяє підвищенню жароміцності, однак цей елемент виявляє помітний негативний вплив на жаростійкість. Тому вводити його як легувальний компонент в сплави необхідно з достатньою обережністю.

Реній виявляє помітний позитивний вплив на властивості ливарних жароміцних нікелевих сплавів. Однак опубліковані результати досліджень його впливу на характеристики міцності дискових сплавів говорять про те, що при робочих температурах сучасних дисків (650-750 °С) позитивний вплив цього елемента практично відсутній [6].

У цей час реній додається до складу дискових сплавів у дуже незначних кількостях (0,5-1% або менш) з метою поліпшення характеристик повзучості [6]. Використання великої кількості Re в нинішніх дискових сплавах не практикується не тільки із причин, пов'язаних зі збільшенням їх щільності внаслідок високої питомої ваги цього елемента, різким зростанням вартості, але й не дуже помітним впливом його на збільшення тривалої міцності при сучасних робочих температурах.

Вуглець, як відомо, обмежує ріст зерна в процесі термообробки. Утворені ним карбідні частки округлої форми є додатковими дисперсними зміцнювачами  $\gamma$ -матриці ЖНС. Виділяючись у вигляді розрізаних включень, вони ефективно гальмують дифузійні потоки по границях зерен. Тому вуглець є елементом, що спеціально додається до складу дискових сплавів на нікелевій основі. Однак перевищення його вмісту більш 0,04-0,1% може стати причиною істотного збільшення швидкості росту втомної тріщини. Справа в тому, що в дискових жароміцних нікелевих сплавах зміцнюються карбіди на основі TiC, що кристалізуються в останню чергу в міждендритних просторах, що й мають тому (при розгляді шліфів під мікроскопом) форму китайських ієрогліфів. При невеликому вмісті вуглецю карбіди, що утворюються, мають порівняно глобулярну форму. Але якщо їх концентрація збільшується, вони не тільки зміцнюють, але й починають завдавати негативного впливу, особливо в місцях дії підвищених навантажень (у районі концентраторів напружень), а також при наявності багаторазових (втомних) навантажень. Цьому сприяє й можливе утворення по границях зерен суцільних тендітних каркасів з карбідів  $M_{23}C_6$ .

Бор при введенні його в сплави в незначній кількості утворює бориди, що розташовуються на границях зерен, що обмежує їхній ріст. Крім того, бор присутній і на межфазних ( $\gamma$ - $\gamma'$ ) границях, поліпшуючи їх стан і тим самим позитивно впливаючи на опір повзучості. Бор — особливий елемент у нікелевих жароміцних сплавах. Його атомний радіус ( у порівнянні з вуглецем) досить великий, щоб не утворювати розчини впровадження, і одночасно недостатньо великий для розчинів заміщення. У силу зазначених причин бор у сплавах на основі заліза й нікелю завжди розташовується по дефектних місцях ґрат, а саме по границях зерен або фаз [6]. Якщо вміст бору менше 0,005, може відбутися збільшення швидкості росту втоленої тріщини. У випадку перевищення його вмісту понад певний рівень з'являються тенденції щодо утворення легкоплавких боридних фаз, термічної пористості й зниженню опору повзучості.

Бор і РЗМ є обов'язковими елементами, що спеціально вводяться в дискові жароміцні сплави в малих кількостях. Оптимальний вміст бору становить 0,01—0,02%. Іттрій і РЗМ (La, Re й ін.) помітно підвищують стійкість до високотемпературного окиснення. При вмісті їх на рівні 0,01—0,05% суттєво знижується дифузія по границях зерен і, відповідно, зростає жароміцність. У сплаві з додаванням іттрію ( розраховуючи на 0,01%), як вказується в роботі [97], випадання карбідів МС у процесі їх кристалізації починається при більш високих температурах (близьких до ліквідусу), ніж у сплаві без іттрію, у якому «пик» випадання карбідів перебуває поблизу солідуса.

Відмінності в температурних інтервалах утворення карбідів МС приводять до диференціації їх морфології: округлої ( при мікролегуванні іттрієм) і шрифтової модифікації, обумовленої стиснутим ростом з рідини, що перебуває в міждендритних обсягах.

#### 1.4 Вплив термічної обробки на структуру та властивості матеріалів дисків

Термічна обробка не є окремою операцією, а являє собою частину технологічного циклу переділу заготовки від вилівка до готової деталі. Термічна обробка жароміцних нікелевих сплавів складається з відпалу на твердий розчин, загартування й старіння. Незважаючи на визначення «на твердий розчин», температура відпалу часто відповідає двофазній області. У зв'язку з тим, що нагрівання під загартування й відпалпоєднують, у виробничій практиці ці два поняття не розділяють. Перед загартуванням для підвищення однорідності структури сплаву можуть використовувати додатково попередній відпал при більш низькій температурі.

На рисунку 1.9 [1] представлені типи мікроструктур, які можуть бути отримані при різних умовах деформації й термообробки для дискових жароміцних нікелевих сплавів, і показаний їхній вплив на границю текучості й довговічність при різних температурах: А - дрібнозерниста структура з деформаційним зміцненням, В - дрібнозерниста рекристалізована, С - «намисто», В - грубозерниста. Видно, що кожний тип структури оптимальний при певній робочій температурі.

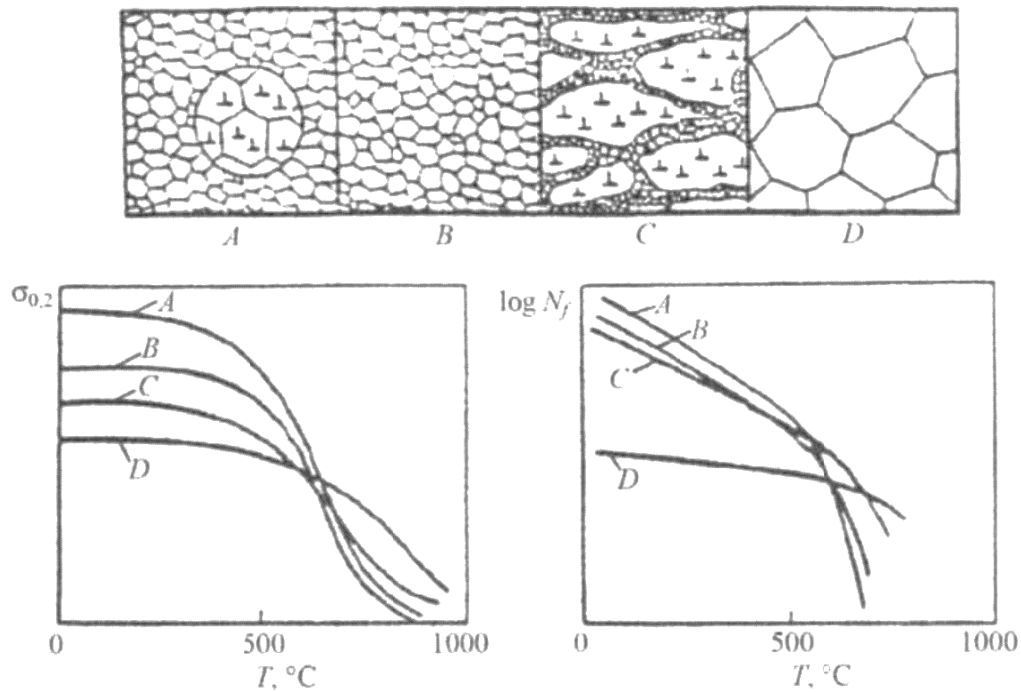


Рисунок 1.9 - Типи мікроструктури деформівних жароміцних нікелевих сплавів і їх вплив на границю плинності й довговічність при циклічних випробуваннях

Характеристики сплавів залежать як від сформованої структури, так і від хімічного складу. Результати аналізу залежності властивостей сучасних дискових сплавів від температури повного розчинення зміцнювальної  $\gamma'$ -фази представлені на рисунку 1.10. Сплави ЭП975, ЭП975А и ВЖ137 з більш високим вмістом (до 65%) і більшою стабільністю зміцнювальної  $\gamma'$ -фази, спеціально розроблені для експлуатації при високих температурах ( $>800^{\circ}\text{C}$ ), мають меншу міцність у порівнянні з високоміцними сплавами з 50%  $\gamma'$ -фази й робочою температурою до  $800^{\circ}\text{C}$ .

Режими загартування вибирають залежно від динаміки процесів рекристалізації й з урахуванням вирівнювання неоднорідності хімічного складу, у тому числі для розчинення надлишкових фаз.

Температура загартування є одним із ключових параметрів термічної обробки. Правильний вибір температури забезпечує максимальне зміцнення матеріалу за рахунок виділення  $\gamma'$ -фази різної дисперсності, карбідів і

боридів, а також створення структури, здатної перерозподіляти виникаючі напруги.

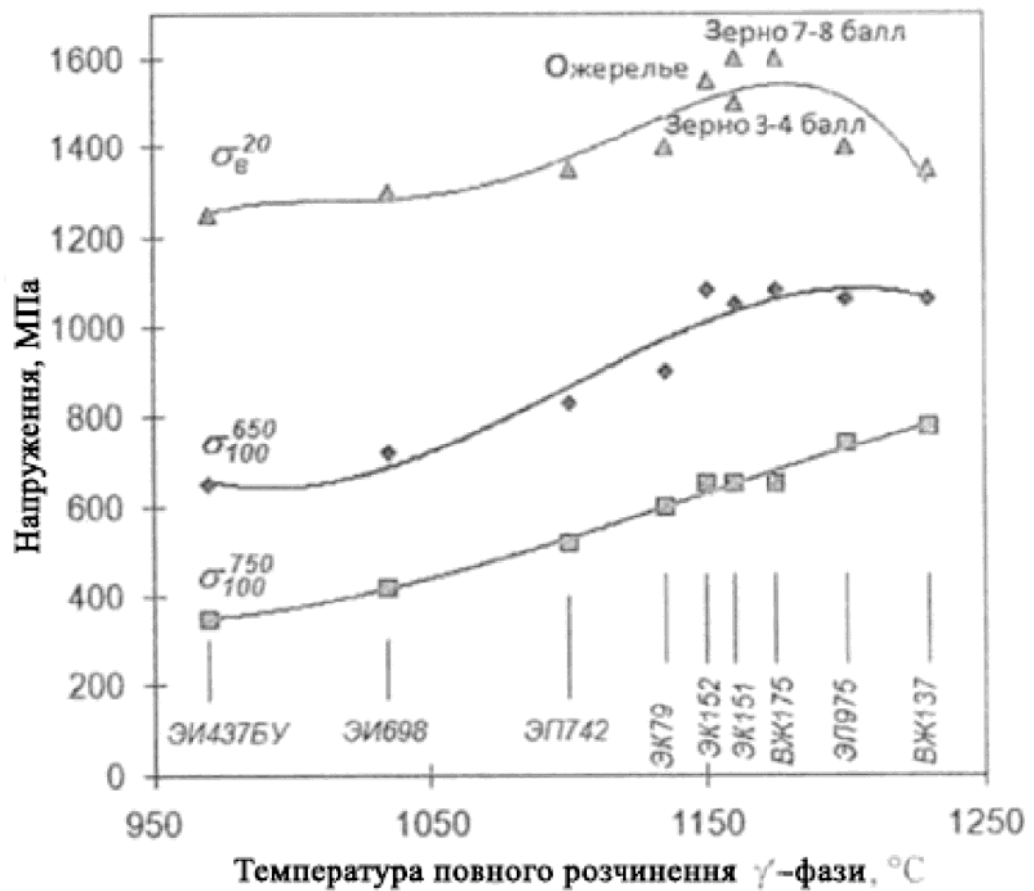


Рисунок 1.10 - Властивості дисккових жароміцних нікелевих сплавів залежно від температури повного розчинення зміцнювальної фази

Температура загартування залежить від розміру зерна. Характеристики міцності сплавів підкоряються відомому співвідношенню Холу-Петча, що визначає зворотну залежність міцності від квадратного кореня розміру зерна.

Залежності температури розчинення γ'-фази й загартування для промислових дисккових сплавів представлені на рисунку 1.11. Видне, що температури загартування й повного розчинення γ'-фази близькі. Це пов'язане з тим, що процес росту зерен обмежується в першу чергу частками γ-фази.

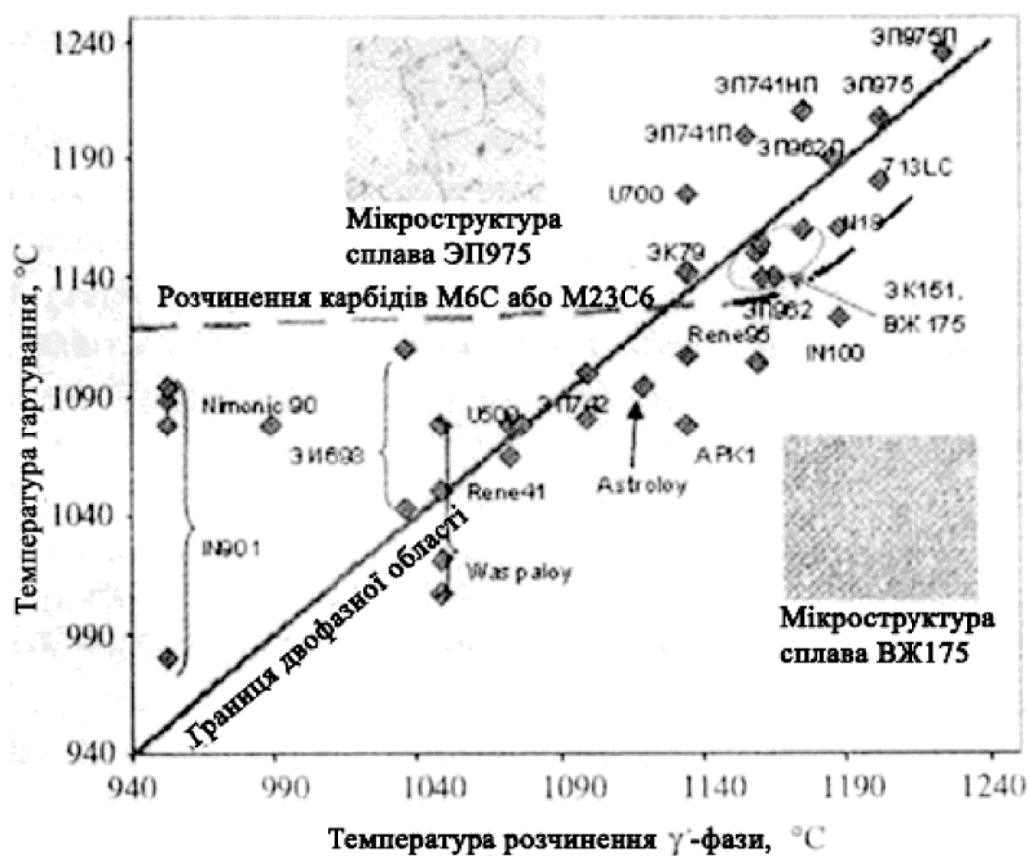


Рисунок 1.11 - Співвідношення температур загартування й повного розчинення  $\gamma$ -фази дискових жароміцних нікелевих сплавів

Загартування з однофазної області (температури повного розчинення в-фази) проводиться для гомогенізації твердого розчину й завершення процесів рекристалізації у всіх зонах штампування. Утворюються зерна матриці розміром 50-120 мкм (3-6 бал за ДСТ 5639). Чим вище температура роботи сплаву й вимоги до жароміцності, тем крупніше зерно.

Таку обробку застосовують для всіх серійних вітчизняних дискових сплавів, у тому числі для найбільш жароміцних ЭП975 і ЭП975А с ~60%  $\gamma$ -фази.

Ці сплави використовують для виробництва роторів типу «блиск» малорозмірних ГТД. Через те, що весь ротор - лопатки, диск і вал - роблять із однієї заготовки, максимальна робоча температура матеріалу може досягати 950°C. У зв'язку із цим для таких сплавів застосовується загартування з однофазної області з уповільненим охолодженням до температури нижче

$T_{п-р,\gamma}$  на 30-40°C. У результаті формується структура із зерном розміром 90-120 мкм і частками  $\gamma'$ -фази розміром 1-2 мкм і 80-300 нм. При регламентованому охолодженні формуються вихлясті границі зерен (рис. 1.12). Така структура забезпечує більш високу жароміцність і зниження швидкості розповсюдження тріщин втоми. Впровадження технології термічної обробки з уповільненим охолодженням у виробництво штампувань шифру А-142 (диск-вал) зі сплаву ЭП 975-ИД забезпечило більш високий рівень властивостей (табл. 1.2). Вихід придатного збільшився в 1,7 рази. Брак по тривалій міцності знизився більш ніж на 25%, повністю усунуті випадки по ударній в'язкості.

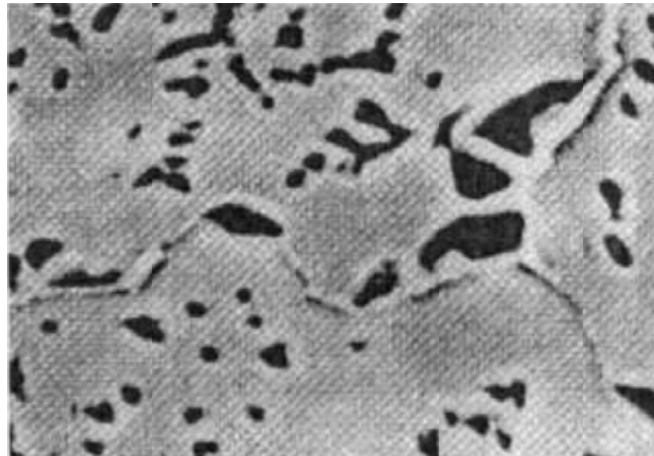


Рисунок 1.12 - Мікроструктура сплаву ЭП975А (х300)

Таблиця 1.2 - Вплив режиму загартування з регламентованим охолодженням на властивості штампувань роторів типу «блиск» зі сплаву ЭП975

Режим загартування	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ ,%	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>
Стандартний	1285±67	1006±46	16,6±3,0	43±9
Новий з регламентованим охолодженням	1313±42	966±31	18,1±3,7	49±10
Норми технічних умов	1226	932	14	39

Для сплавів, що працюють до  $700^{\circ}\text{C}$ , оптимальним вважають зерно від 15 до 40 мкм (7-11 бал) з великими первинними (2-7 мкм) і більш дрібними вторинними й третинними частками (менш 50 нм)  $\gamma'$ -фази, що досягається загартуванням із двофазної області (з температури на  $10\text{-}50^{\circ}\text{C}$  нижче  $T_{п.р.\gamma'}$ ) і забезпечує високу міцність і прийнятну жароміцність.

Таким чином, для промислових сучасних дискових сплавів застосовують режими обробки із загартуванням з температури як вище, так і нижче повного розчинення  $\gamma'$ -фази. У результаті цього формуються два типи мікроструктури залежно від умов роботи матеріалу: з великим і дрібним зерном [11]. Опублікований ряд робіт («Rolls-Royce Corp.», «General Electric» і NASA) відносно встаткування й технології термічної обробки заготовок дисків, що забезпечує в одній деталі дві різні структури - в ободі зерно 4-6 бала ASTM, у матриці - 10-11 бала ASTM. В ободі диска досягається високий опір повзучості, а в ступичній частині - високі міцність і опір МЦВ [12]. Однак у промисловому виробництві цей метод поки не знайшов застосування через складність контролю структури в готовому виробі (особливо в перехідній зоні) і внаслідок цього нестабільності властивостей.

Вплив розміру зерна на комплекс властивостей високолегованого сплаву можна простежити на прикладі промислового сплаву ЭК151. Для нього була розроблена технологія термічної обробки, що формує дрібнозернисту структуру. На відміну від стандартного загартування (СТО) серійних дискових сплавів з температури, близької до температури повного розчинення  $\gamma'$ -фази ( $T_{п.р.\gamma'}$ ), новий режим включає попередній східчастий відпал при температурах нижче й загартування із двофазної області. Властивості сплаву ЭК151 після стандартної (зерно 60-100 мкм) і експериментальної (зерно 15-30 мкм) обробки показані в табл. 1.3. Видне значне збільшення міцності й опору МЦВ, жароміцність - на рівні СТО.

Таблиця 1.3 - Властивості сплаву ЭК151 після різної термічної обробки

Термічна обробка	Короткочасний розрив					Жароміцність (650°C)		МЦВ: $\sigma_0$ , МПа (на базі 104 циклів)	
	20°C			650°C		$\sigma_{100}$ , МПа	чутливість до надрізу		
	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta, \%$	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа				
СТО	1500	1050	17	1323	902	1010	>1,1	1100	1019
ЦЕ	1600	1207	15	1501	1108	1010	>1,1	1176	1078

Для нових деформівних високожароміцних сплавів для дисків, (ВЖ175, LSHR, NR3, ME3, Alloy 10 і ін.), застосовують саме такі режими термічної обробки.

В умовах промислового виробництва контроль температури повного розчинення  $\gamma$ -фази для кожної плавки з коректуванням режиму загартування дозволяє підвищити властивості сплаву й вихід придатного. Для більш ніж 80 штампувань дисків зі сплаву ЭП 742-ИД, що пройшли загартування з урахуванням  $T_{\text{п-р},\gamma}$ , установлене підвищення в середньому на 11% границі текучості й на 5% межі міцності матеріалу, що зменшило витяжку дисків у процесі експлуатації й підвищило їхній ресурс в 2-3 рази. Інший приклад: при виробництві зі сплавів ЭК151 і ЭП742 штампувань дисків турбін малорозмірних ГТД у ФГУП «ВИАМ» для кожної плавки вибирали режим загартування за результатами металографічного дослідження, що дозволило підвищити на 100-50 МПа значення  $\sigma_B^{20}$  і  $\sigma_{0,2}^{20}$ , зазначені в технічних умовах.

Відомо значний вплив швидкості охолодження на структуру й властивості дискових жароміцних нікелевих сплавів. У сучасному промисловому виробництві для середньо- і великогабаритних штампувань дисків застосовують інтенсивне охолодження.

Для сучасного промислового виробництва нових сплавів при термічній обробці дуже важлива точність підтримки температури. При виробництві складнолегованих сплавів погрішність повинна бути не вище  $\pm 5^\circ\text{C}$ . Наприклад, аналіз впливу на тривалу міцність різниці між температурами

відпалу й вивантаження з печі при загартуванні сплаву ЭП975А показав, що зміна температури всього на 10°C приводить до зниження довговічності зразків на 40%.

Тривалість відпалу при загартуванні дискових жароміцних нікелевих сплавів вибирають із урахуванням вирівнювання неоднорідності хімічного складу, у тому числі для розчинення надлишкових фаз, а також залежно від динаміки процесів рекристалізації. Перевищення оптимального часу відпалу приводить до зниження рівня й стабільності властивостей, у тому числі й при обробці у двофазній області. Наприклад, при загартуванні сплаву ВЖ175 більш 16 год спостерігається розкид довговічності при випробуваннях на тривалу міцність через прояв різнозернистості, що встановлене металографічними дослідженнями (рис. 1.13).

З метою остаточного формування часток  $\gamma'$ -фази, карбідів і боридів необхідних розмірів і морфології після загартування проводять старіння.

Для сучасних жароміцних сплавів на нікелевій основі застосовують як одне-, так і багатоступінчасте старіння. Найбільше часто температура першого старіння вибирається в області початку розчинення  $\gamma'$ -фази, а наступної стадії - близької до максимальної робочої температури диска.

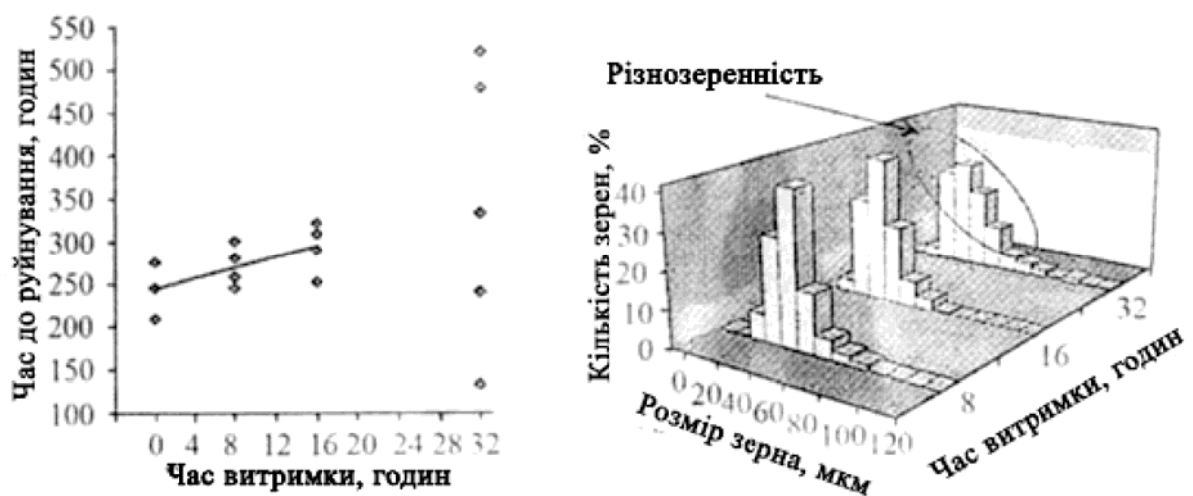


Рисунок 1.13 - Вплив тривалості витримки при загартуванні на довговічність і розмір зерна сплаву ВЖ175: а - довговічність при 650°C, 1050 МПа; б - розподіл зерен по розміру

При температурі першого старіння ростуть і коагулюють частки первинної  $\gamma'$ -фази, що виділилися при загартуванні; у тілі й на границях зерен і субзерен виділяються більш дрібні частки вторинної й третинної  $\gamma'$ -фази, а також формуються карбідні й боридні фази (рис. 1.14). При більш низькій температурі другого старіння відбувається коагуляція часток вторинної  $\gamma'$ -фази й з твердого розчину виділяються ще більш дрібні частки третинної  $\gamma'$ -фази.

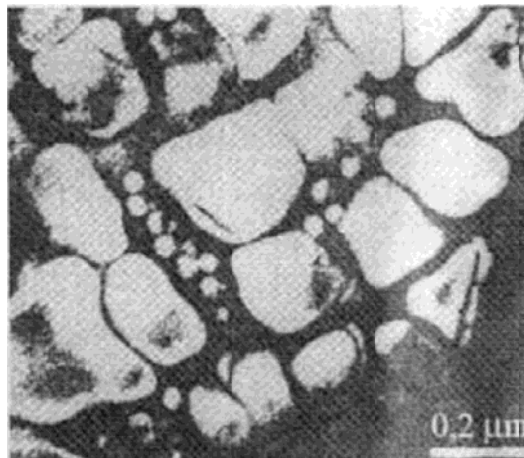


Рисунок 1.14 - Мікроструктура сплаву ВЖ175, частки  $\gamma'$ -фази - вторинні й третинні розміром менш 0,1-0,3 мкм і менш 100 нм відповідно (просвітлювана електронна мікроскопія)

Практика дослідження й виробництва деформівних жароміцних нікелевих сплавів для дисків ГТД показує, що при термічній обробці найбільш сильний вплив на властивості сплаву виявляють температура, час витримки й швидкість охолодження при загартуванні. Оптимізація параметрів загартування з урахуванням хімічного складу кожної плавки дозволяє значно поліпшити характеристики сплаву й підвищити вихід придатного.

Для більшості вітчизняних і закордонних сплавів нового покоління, створених за останні 10 років, застосовують загартування із двофазної області, формуючи структуру з розміром зерен 15-10 мкм і набором виділень

$\gamma'$ -фази від нанорозмірів до 7 мкм, у результаті чого забезпечується комплекс високої міцності, жароміцності й опору МЦВ.

Для досягнення високого рівня властивостей жароміцних нікелевих сплавів для дисків ГТД, відповідного до сучасних вимог ефективності виробництва, необхідно застосовувати інтенсивне охолодження заготовок стисненим повітрям, забезпечувати автоматичне регулювання швидкості нагрівання й охолодження садки й виконання заданих режимів з точністю по температурі до  $\pm 5^\circ\text{C}$ .

### 1.5 Перспективні технології виготовлення дисків ГТД

До теперішнього часу легування сплавів з метою підвищення експлуатаційних характеристик (жароміцність при більш високих температурах, малоциклова втома й ін.) досягло такої межі, що внаслідок дуже низької пластичності одержуваних виливків і вузького діапазону припустимих температур їх деформації формоутворення й пророблення структури заготовок цих матеріалів можливі тільки з дуже низькими економічними показниками [51, 80-82].

Різка погіршення деформівності виливків при ускладненні легування сплавів викликане зниженням ефективності гомогенізації ( внаслідок посилення дендритної й зональної неоднорідності виливка, виникнення пор, і мікротріщин). Це приводить до підвищення витрати металу й збільшенню трудомісткості виробництва. Зазначені обставини, незважаючи на використання новітніх методів лиття, стають перешкодою на шляху промислового освоєння нових, більш легованих, жароміцних сплавів з підвищеним комплексом властивостей.

Металургія гранул, що поєднує затвердіння розплаву у вигляді мікрозлитків-гранул з високою швидкістю охолодження (103-104 град/с) з

їхньою наступною консолідацією ( у тому числі гарячим ізостатичним пресуванням) і з досягненням щільної беспористої структури, дозволяє уникнути зазначених недоліків. При цьому технологія металургії гранул інваріантна до складності як хімічного складу сплаву, так і конфігурації заготовки диска. Усе залежить лише від досконалості конструкції капсули, проєктованої за допомогою спеціальних розрахункових методів [6].

Гранульна технологія забезпечує не тільки одержання жароміцних сплавів з високим вмістом легуючих елементів внаслідок диспергування фазових і структурних складових і утвору аномально пересичених розчинів, але й дозволяє здійснити твердофазне з'єднання різнорідних матеріалів із плавним переходом одного хімічного складу в іншій і із властивостями зони з'єднання не нижче, а в ряді випадків і вище, ніж в основних матеріалів [6].

До безсумнівних переваг методу металургії гранул слід віднести можливість виготовлення нетто-деталей досить складної конфігурації з мінімальною механічною обробкою. Деталі практично такі ж, як у випадку лиття по виплавлених моделях. Це знижує витрату шихтових матеріалів і в цілому витрату металу в 2- 3 рази, підвищує КІМ до 0,4-0,8, зменшує трудомісткість виготовлення деталей. При цьому основні характеристики міцності відповідають властивостям матеріалу, отриманого традиційною технологією. Крім того, деталі по перетину мають дрібнозернисту структуру й ізотропні властивості.

Саме гранульна металургія, як спеціальний розділ порошкової металургії, забезпечує одночасно високий КІМ, високий рівень характеристик міцності, високу рівномірність складу й, відповідно, властивостей, що є вкрай важливим для виробів відповідального призначення. Однак їх вартість виявляється вищою, ніж при реалізації методів традиційної порошкової металургії.

ГИП використовується для виготовлення деталей, застосовуваних в енергетиці, реактивних двигунах, і при виробництві біметалічних деталей або деталей із градієнтним складом, а також деталей, одержуваних методом

дифузійного зварювання. Їх припускають використовувати в силовій установці Boeing RS-83, призначеної для нового покоління космічних апаратів. Так, фірма Boeing розглядає можливість реалізації в Boeing RS-83 нікелевого сплаву (Inconel 625) для корпусу турбіни, який важить 163 кг. Передбачається, що інші деталі, зроблені методами ПМ і ГИП для Boeing RS-83, будуть мати масу до 500 кг.

При проектуванні й розробці складнонавантажених і габаритних деталей турбіни, таких як диски, до них пред'являються вимоги високої жароміцності в області обода й одночасно високої границі текучості в області матриці, а також високого опору росту втомної тріщини як в області маточини, так і обода.

Вирішення зазначеної проблеми може бути здійснене шляхом організації робіт із двом напрямкам:

створення заготовки диска зі змінним за радіусом складом — наявність у периферійній частині заготовки складу, що відповідає

найбільш жароміцному дисковому сплаву, а в ступичній частині — відповідного найбільш міцному при невисоких (300—500 °С) температурах сплаву;

застосування особливої термічної обробки, що забезпечує в ободній частині диска грубозеренну структуру (, що має більш високу жароміцність), а в районі маточини — дрібнозеренну структуру (, що дозволяє мати більш високі властивості міцності).

## 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1 Матеріали дослідження

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

- достатній запас пластичності без схильності до окрихчення з часом і низькою чутливістю до надрізу;
- достатній запас міцності, що необхідний для забезпечення опору деформації від лопаток;
- при робочих температурах не повинна відбуватись надмірна пластична деформація, яка пов'язана з повзучістю;
- високою термічною стійкістю, тобто матеріал не повинен бути чутливим до теплових змін;
- високим опором втомі в інтервалі робочих температур;
- однорідністю і стабільністю властивостей [2].

Важливою необхідністю є забезпечення правильної технології обробки диску турбіни. Саме тому обробка повинна забезпечити:

- відсутність різнозернистості у виробі;
- однорідність матеріалу виробу за хімічним складом в поверхневих і внутрішніх шарах. Тому необхідно видаляти за допомогою механічної обробки поверхневий шар, змінений при термічній обробці.
- відсутність наклепу, який залишився після механічної обробки.

Відповідно до вимог до матеріалів для дисків турбіни рекомендовано виготовляти їх зі сплавів ЭИ698-ВД, ЭК79-ИД, ЭП742-ИД. В таблиці 2.1 наведено хімічний склад цих сплавів.

Таблиця 2.1 - Хімічний склад сплавів ЭИ698-ВД, ЭК79-ИД, ЭП742-ИД [2]

Хімічний елемент	ЭП742-ИД	ЭК79-ИД	ЭИ698-ВД
	Масова частка елементів, %		
1	2	3	4
C	0,04-0,08	0,04-0,08	0,03-0,07
Cr	13,0-15,0	10,0-12,0	13,0-16,0
Ti	2,4-2,8	2,4-3,0	2,35-2,75
Al	2,4- 2,8	2,8-3,3	1,45-1,8
Nb	2,4-2,8	2,5-3,0	1,9-2,2
Mo	4,5-5,5	4,0-5,0	2,8-3,2
Co	9,0-11,0	12,5-16,0	-
Ni	Основа		
V	≤ 0,2	0,4-0,8	-
W	≤ 0,2	2,0-3,0	-
Mn	≤ 0,4	≤ 0,4	≤ 0,4
Fe	≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 2,0
Si	≤ 0,3	≤ 0,4	≤ 0,5
La	≤ 0,1	≤ 0,05	-
Ce	≤ 0,01	≤ 0,01	≤ 0,005
B	≤ 0,01	≤ 0,01	≤ 0,005
S	≤ 0,01	≤ 0,01	≤ 0,007
P	≤ 0,015	≤ 0,015	≤ 0,015
Cu	≤ 0,07	-	-
Nd	-	≤ 0,05	-
Mg	-	≤ 0,05	-
Pb	-	-	≤ 0,001

Легування жароміцних сплавів необхідно проводити елементами, що підвищують сили міжатомних зв'язків в твердому розчині та в надлишкових фазах (тобто зменшують дифузійну рухомість атомів розчинника та легувальних елементів), знижують рухомість дислокацій, гальмують процеси коагуляції фаз, підвищують температури рекристалізації та утворюють

дисперсні частинки зміцнювальних фаз. В жароміцних сплавах на основі нікелю основними легувальними елементами є Cr, Mo, W, Al, V, Nb, Ti та ін., які здатні розчинятися в твердому розчині або утворювати вторинні фази. Великий вміст хрому в основі жароміцних сплавів забезпечує не тільки необхідну міцність твердого розчину, але і жаростійкість сплавів. Вплив додаткових легувальних елементів на властивості жароміцних сплавів полягає в зміцненні  $\gamma$ - твердого розчину, утворенні при старінні дисперсних зміцнюючих фаз і підвищенні зерномежової міцності при робочих температурах.

Головною характеристикою, що визначає працездатність жароміцних сплавів, є жароміцність, тобто здатність матеріалу працювати при високих температурах ( $>0,3$  Тпл) впродовж тривалого часу в умовах складних механічних навантажень. При постійно діючому тривалому навантаженні, що нижче границі плинності, спостерігається повільне зростання пластичної деформації – повзучість. Розвиток повзучості може призвести до руйнування металу. Ефективні робочі характеристики нікелевих сплавів визначаються як високою термічною стабільністю, так і ступенем гетерофазності їх структури: кількістю  $\gamma'$ -фази, її дисперсністю, властивостями  $\gamma$  та  $\gamma'$ -фаз, оптимальною різницею параметрів їх кристалічних ґраток, дифузійною проникливістю поверхонь поділу тощо. Так, ступінь зміцнення жароміцного нікелевого сплаву буде тим вищий, чим більшою є об'ємна частка  $\gamma'$ -фази. Аналогічно впливають дисперсність її частинок та зменшення відстані між ними.

Механічні властивості сплавів визначаються технологією термічної обробки. Механічні властивості сплавів ЭИ698-ВД, ЭК79-ИД, ЭП742-ИД в термообробленому стані наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Механічні властивості сплавів: ЭИ698-ВД, ЭК79-ИД, ЭП742-ИД

Матеріал	Властивості після термічної обробки										
	t/o	t °C	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\Psi$ , %	НВ d <sub>відб.</sub>	$\sigma_{50}$ , МПа	$\sigma_{100}$ , МПа	$\sigma_{100}^{650}$ , МПа	$\sigma_{100}^{750}$ , МПа
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ЭП742-ИД	Гарт 1080±10 <sup>0</sup> С, 8год., повітря, старіння	20	770	1230	13	14	3.15-3.5	-	-	-	-
	780±10 <sup>0</sup> С, 16год., повітря,	650	-	-	-	-	-	845,0	830	-	-
ЭК79-ИД	Гарт 950±10 <sup>0</sup> С, 2год., повітря, старіння1	20	870 - 950	1340- 1380	15 - 18	17 - 19	3,4 - 3,45	-	-	900	600
	850±10 <sup>0</sup> С, 7год., повітря, старіння2	650	720 - 760	1170- 1220	13 - 14,5	15 - 16,5	-	-	-	-	-
ЭИ698-ВД	Гартування 1 1100±10 <sup>0</sup> С, 9год., повітря,	20	740 - 880	1180 - 1280	14 - 22	16 - 25	3,2 - 3,5	-	-	-	-
	Гартування 2 1000±10 <sup>0</sup> С, 5год., повітря, старіння	650	650 - 720	1040- 1150	13 - 23	14 - 23	-	-	830 - 890	-	-
	775±10 <sup>0</sup> С, 17год., повітря,										

Після термічної обробки необхідно мати структуру  $\gamma+\gamma'$ -фази. Для того, щоб не отримати небажаних змін у структурі таких, як коагуляція карбідної фази, необхідно дуже точно виконувати умови щодо режиму термічної обробки, а саме температур нагрівання, тривалість витримки.

Важливим чинником при виборі матеріалу є кількість  $\gamma'$ -фази, показники пластичності та жаростійкість. В сплавах наведених в таблиці 1.6 найбільшу кількість  $\gamma'$ -фази має ЭИ698-ВД. Але розглянувши хімічний склад, механічні та технологічні властивості наведених сплавів можна зробити висновок, що найбільш вигідним, для виготовлення дисків турбіни, із економічної точки зору та із урахування потрібних властивостей є сплав ЭП742-ИД.

## 2.2 Методи дослідження

### 2.2.1 Дослідження мікроструктури

Дослідження мікроструктури проводили на мікроскопі МІМ-8М при різних збільшеннях. Металографічний мікроскоп МІМ-8М призначений для дослідження мікроструктури металів в світлому полі при прямому та косому освітленні, а також в темному полі і в поляризованому світлі. Для візуального спостереження мікроскоп забезпечений монокулярною та бінокулярною насадками. Набір ахроматичних та апохроматичних об'єктивів і окулярів забезпечують збільшення мікроскопа при візуальному спостереженні від  $\times 100$  до  $\times 1350$ .

### 2.2.2 Методи визначення механічних властивостей

#### 2.2.2.1 Метод випробування твердості за Брінелем

При стандартному вимірюванні твердості за Брінелем (ГОСТ 9012 – 59 «Метод измерения твёрдости по Бринелю») сталева кулька діаметром  $D$  вдавлюють у випробуваний зразок під прикладеним деякий час навантаженням  $P$ . Після зняття навантаження вимірюють діаметр  $d$  зразка

відбитка, що залишився на поверхні. Для визначення твердості за Брінелем застосовують спеціальні прилади типу ТШ-2, що широко використовується в лабораторній практиці.

#### 2.2.2.2 Випробування на розтяг

Випробування на розтяг при кімнатних температурах проводиться за ГОСТ 1497 – 73 «Методыиспытания на растяжение», а при підвищених температурах відповідно ГОСТ 9651 – 73 «Методыиспытания на растяжение при повышенных температурах». Випробування проводиться на універсальних випробувальних машинах.

Величина навантаження при випробуванні повинна визначатися з точністю до 0,5 найменшого розподілу індикатора силовимірювального механізму. Діапазон навантажень вибирають таким чином, щоб сили опору зразка деформації, по яких будуть визначатися характеристики, були не менше 0,1 шкали обраного діапазону і не нижче 0,04 граничного навантаження випробувальної машини. При цьому бажано, щоб максимальна сила опору зразка знаходилася в другій половині шкали. Саме при такому виборі діапазону навантажень буде забезпечена найбільша точність розрахунку характеристик властивостей. Всі силовимірювальні механізми дозволяють в процесі випробування записувати криву зміни сили опору деформації в залежності від величини деформації (абсолютного видовження) зразка.

Випробування на розтяг дає змогу за результатами одного випробування оцінити декілька важливих характеристик матеріалу, які є критеріями його якості та необхідні для конструкторських розрахунків.

### 2.2.2.3 Випробування на ударну в'язкість

Випробування для визначення властивостей матеріалу в умовах динамічного навантаження проводиться відповідно ГОСТ 9454-78 «Методы испытаний на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах». Використовується стандартний зразок 8 типу довжиною  $L = 55$  мм, висотою  $H = 10$  мм, висотою робочого перетину  $H_1 = 5$  мм та шириною  $B = 10$  мм.

Випробування проводять на маятникових копрах із граничною енергією, що не перевищує 300 Дж

### 2.2.2.4 Випробування на повзучість

Основною метою стандартних випробувань на повзучість при розтягуванні (ГОСТ 3248-81 «Метод испытания на ползучесть») є визначення границі повзучості матеріалу  $\sigma$  при заданій температурі  $T$ , коли рівень деформації  $\delta$  досягається за період часу  $\tau$  ( $\sigma_{\delta/\tau}^T$ ). Випробування проводяться на плоских зразках з головками з розрахунковою довжиною 100 мм, а загальною довжиною 200 мм.

Оскільки характеристики повзучості дуже чутливі до температури, необхідно прийняті всі міри для забезпечення її сталості у всіх точках розрахункової довжини зразка впродовж всього випробування. Для вимірювання температури на зразку встановлюють дві термопари. За стандартом відхилення від заданої температури в процесі випробування не повинні перевищувати  $\pm (3 - 6)^\circ\text{C}$  (до 1473 K).

Видовження зразка заміряють з точністю не менш 0,002 мм, використовуючи спеціальні індикатори з ціною поділки 0,001 мм.

#### 2.2.2.5 Випробування на довготривалу міцність

В результаті випробування на довготривалу міцність (ГОСТ 10145-81 «Метод испытания на длительную прочность») визначають границю довготривалої міцності або довговічність матеріалу.

Методика проведення випробування близька до методики випробування на повзучість. Використовуються ті ж схеми навантаження (розтяг) і ті ж випробувальні машини.

#### 2.2.2.6 Дослідження мікроструктури

Мікроструктуру досліджували з допомогою оптичного мікроскопу МІМ-8. Оцінили особливості структури деформівних нікелевих сплавів після різних видів термообробки. Для дослідження зразки шліфували, полірували і піддавали щавленню в спеціально підготовлених розчинах кислот.

### 3 ВПЛИВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ

3.1 Вибір найбільш серійного варіанта термічної обробки та обладнання

3.1.1 Номенклатура виробів та маршрутна технологія їх виготовлення

Номенклатура – це перелік виробів, які обробляються у виробничому підрозділі, що проектується. Для розробки технології термічної обробки виробів, вибору обладнання для виробничого підрозділу необхідно мати креслення до кожного виробу із даними про форму, розміри, масу та основними вимогами до матеріалу.

В таблиці 3.1 наведено номенклатуру дисків.

Таблиця 3.1- Номенклатура для дисків турбіни із жароміцних нікелевих сплавів (дані отримано на заводі), що обробляються в термічному цеху.

Назва виробу	Матеріал виробу	Маса виробу	Розміри виробу, мм			Вимоги за кресленням
			D	d	h	
1	2	3	4	5	6	7
Диск ТВТ	ЭП742-ИД	112	819,5	200	120	302...388 HB5/750/10
Диск лабіринтовий	ЭП742-ИД	28,5	776,5	280	45,8 (25)	302...388 HB5/750/10
Диск ущільнювальний	ЭП742-ИД	3,65	822	699,5	8,2	302...388 HB5/750/10
Диск ТСД	ЭП742-ИД	63,2	905,8	380	91 (52)	302...388 HB5/750/10
Диск ущільнювальний передній	ЭП742-ИД	4,5	892	802	35,6	302...388 HB5/750/10

Продовження табл. 3.1

1	2	3	4	5	6	7
Диск 1 ступені ТВТ	ЭИ698-ВД	28,3	892,4	688	76,5 (28)	293...341 НВ5/750/10
Диск 2 ступені ТВТ	ЭИ698-ВД	32,0	844,4	640	138 (28)	293...341 НВ5/750/10
Диск 3 ступені ТВТ	ЭИ698-ВД	32,0	771,4	570	129,5 (38)	293...341 НВ5/750/10
Диск 4 ступені ТВТ	ЭИ698-ВД	27,0	694,4	490	68 (32)	293...341 НВ5/750/10
Диск 1 ступені ТВТ	ЭК79-ИД	21,0	480	222	93,5 (61)	331...388 НВ5/750/10
Диск 2 ступені ТВТ	ЭК79-ИД	25,7	488	248	96,5 (61)	331...388 НВ5/750/10
Диск 3 ступені ТВТ	ЭК79-ИД	25,6	465	56	97 (32)	331...388 НВ5/750/10

Для деталей даної групи була розроблена схема маршрутної технології виготовлення.

Технологія виготовлення виробу уявляє собою логічну послідовність технологічних операцій, виконання яких дозволяє отримати якісні вироби із відповідними характеристиками та властивостями матеріалу. Маршрутна технологія уявляє собою рух заготовок по цехам та відділенням 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. У таблиці 3.2 наведено маршрутну технологію виготовлення диску турбіни.

Таблиця 3.2-Маршрутна технологія виготовлення диску турбіни.

№ <sub>п/п</sub>	Назва операції (комплексу операцій)	Цех (дільниця), де виконується операція	Призначення операції
1	2	3	4
1	Вхідний контроль	Заготівельний цех	Контроль хімічного складу, розмірів, макроструктури, відсутності дефектів
2	Штапування	Ковальський цех	Надання необхідної форми, розмірів та створення сприятливої макроструктури
3	Основна термічна обробка	Термічне відділення	Отримання заданих робочим кресленням властивостей матеріалу, виконання вимог щодо геометрії заготовки.
4	Механічне оброблення	Механічний цех	Надання виробу остаточних розмірів, геометрії, шорсткості, відповідно робочому кресленню
5	Контроль	Механічне відділення	Контроль відсутності дефектів на поверхні готового виробу; перевіряється мікроструктура та механічні властивості на відповідність робочому кресленню
6	Завершальна термічна обробка	Термічне відділення	Формування кінцевого комплексу властивостей матеріалу відповідно до робочого креслення, виконання вимог щодо геометрії заготовки.
7	Механічне оброблення	Механічний цех	Надання виробу остаточних розмірів, геометрії, шорсткості, відповідно робочому кресленню
8	Контроль	Механічне відділення	Контроль відсутності дефектів на поверхні готового виробу; перевіряється мікроструктурата механічні властивості на відповідність робочому кресленню
9	Вихідний контроль	Механічний цех	Контроль відсутності дефектів на поверхні готового виробу; перевіряється мікроструктура та механічні властивості на відповідність робочому кресленню

На початковій стадії прокат проходить вхідний контроль. Це необхідно для контролю відповідності хімічного складу. Якщо є невідповідність роблять блокування руху заготовки заводом. Також перевіряють на наявність дефектів, відповідність розмірів та макроструктури.

Далі відбувається отримання заготовок із прокату для наступного штампування. Прокат піддають штампуванню у гарячому стані, тобто формоутворення заготовки відбувається у порожнині спеціального інструмента (штампа).

Гаряче штампування можуть здійснювати у наступний спосіб:

- штампування на молотах характеризується невисокою продуктивністю праці, невисокою точністю розмірів поковок, великими витратами металу на напуски від штампувальних нахилів внаслідок обмеженого застосування виштовхувачів;
- при штампуванні на кривошипних гарячештампувальних пресах (КГШП) – отримують поковки, більш близькі за формою до готової деталі з більш точними розмірами, ніж при штампуванні на молотах;
- при штампуванні на гвинтових пресах отримують поковки складної конфігурації, застосовують для штампування поковок з малопластичних сталей і сплавів;
- штампування на гідравлічних пресах використовують для штампування поковки з чорних і кольорових металів.

Після штампування заготовка має неоднорідну структуру, для якої характерна анізотропія властивостей, залишкові напруження, що можуть призвести до руйнування виробу. Тому після формування заготовки необхідно проводити термічну обробку.

Після термічної обробки формується більш однорідна структура. Основне механічне оброблення необхідно проводити після термічної обробки. Мета термічної обробки деталі – усунення дефектів, які виникли при нагріванні і обробці тиском (перегрів, залишкові напруження),

покращення обробки різанням, формування додаткового комплексу властивостей.

Особливість термічної обробки деталей полягає в тому, що через велику різницю поперечних перерізів в окремих ділянках можливе отримання відмінних структур. Окрім того, перепад температур по перерізу деталі може призвести до виникнення залишкових напружень. Вид і режим термічної обробки залежить від його призначення, хімічного складу матеріалу деталі, розмірів і форми оброблюваної деталі.

Наступна механічна обробка необхідна для надання виробу остаточних розмірів, геометрії, шорсткості, відповідно робочому кресленню. Далі проводиться контроль по відповідності деталі робочому кресленню і заданим властивостям.

Матеріали для виготовлення диску турбіни обирають, виходячи з умов їх роботи та технологічності виготовлення. Матеріал повинен забезпечити міцність, надійність, достатню пластичність, витривалість, мати достатню границю плинності, протидіяти корозії, температурі. Для виготовлення даної деталі можуть бути використані такі сплави як ЭИ698-ВД, ЭК79-ИД, ЭП742-ИД.

### 3.1.2 Розробка режимів та технологій термічної обробки

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

В залежності від функціонального призначення термічна обробка може бути попередньою й остаточною. Попередню термообробку проводять безпосередньо після штампування з метою зниження твердості для

полегшення наступної механічної обробки, а також зменшення залишкових напружень і підготовки структури під остаточну термообробку. В свою чергу остаточна термічна обробка для нікелевих сплавів полягає в гартуванні, що забезпечує формування пересиченого твердого розчину  $\gamma$ , та наступному старінні, яке проводиться з метою розпаду пересиченого твердого розчину і виділення  $\gamma'$ - фази з  $Ni_3(Al,Ti)$ .

До допоміжних операцій слід віднести: операції, які не пов'язані зі зміною температури та структури, в даному випадку це можуть бути: очищення поверхні від окалини(машини для промивання деталей), рихтування (механічна обробка, наприклад для отримання відповідної шорсткості, видалення окалини, отримання необхідних розмірів), контрольні операції (проводяться для перевірки хімічного складу; властивостей; розмірів; структури за допомогою мікроскопу).

Розробимо схему садки: садка – це сукупність виробів, які одночасно перебувають в печі. Розрахунок ведеться для гартування температура  $1080^{\circ}C$  та старіння  $-780^{\circ}C$  дисків турбіни. Термічну обробку пропонується здійснювати в печі СТЗ 12.70.4/12. Вироби розташовуються на піддонах на певній відстані один від одного. Розрахуємо кількість виробів, що розташується по ширині робочого простору (розміри піддона  $1000 \times 1000$ ).

Кількість деталей, що розташовується по ширині:

$$n_{ш}=1 \text{ шт.};$$

та по довжині:

$$n_{д}=(7000-50)/(1000)=6 \text{ шт.};$$

Кількість виробів в одному піддоні:

$$n_{я}=2 \text{ яруси};$$

$$n_c = n_n * n_d = 2 * 6 = 12 \text{ шт.};$$

Визначимо масу садки:

$$M_c = n_c * M_B = 12 * 112 = 1344 \text{ кг}$$

Розрахуємо загальну тривалість перебування виробів в печі.

Диск ТВТ (Гарт 1080 °С, повітря, старіння 780 °С, повітря)

Для проведення гарту необхідна камерна піч, а для охолодження на повітрі - стіл. Розрахунок тривалості нагрівання, витримки, охолодження:

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

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

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

$\tau_{\text{ох}}$  – час охолодження, хв.

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

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

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

$k$  – коефіцієнт форми;

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

$L_{\text{л}}$  – коефіцієнт легування сталі, хв/мм. При проведенні термічної обробки сплавів на основі нікелю, титану, алюмінію, магнію слід враховувати теплофізичні параметри цих матеріалів, застосовуючи при

розрахунках часу нагрівання поправочні коефіцієнти. Відоме значення коефіцієнта легування  $L$  для сталей замінити модифікованим коефіцієнтом легування:  $L=f(c/\lambda)$ ;

$$L_{ст} \cdot \lambda_{ст} / c_{ст} = L_{спл} \cdot \lambda_{спл} / c_{спл}$$

$$L_{спл} = L_{ст} \cdot c_{спл} \cdot \lambda_{ст} / c_{ст} \cdot \lambda_{спл} = 0,96 \cdot 0,528 \cdot 28,0 / 0,591 \cdot 64,1 = 0,37$$

Розміри диска ТВТ:  $D=819,5\text{мм}$ ;  $d=200\text{мм}$ ;  $h=120\text{мм}$ ;  $S=50\text{ мм}$ ;  
 $M_B=112\text{кг}$ ;

Гартування  $t=1080^{\circ}\text{C}$ :

Розрахуємо необхідний час для нагрівання:

$$\tau_H = S \cdot k \cdot f \cdot L_{д} = 50 \cdot 1,0 \cdot 1,7 \cdot 0,37 = 31,45 \text{хв.}$$

Відповідно до схеми легування сплаву, технологічний час витримки визначено експериментальним шляхом і становить  $\tau_B=8\text{год}$ .

Охолодження після гарту проводиться на повітрі, і буде відбуватися протягом:

$$\tau_{ох} = (1080 - 20) / 5^{\circ}\text{C} / c = 212\text{с} = 3,53 \text{хв.}$$

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

$$\tau_{заг} = 31,45 + 480 + 3,53 = 514,98 \text{хв}$$

Старіння  $t=780^{\circ}\text{C}$ :

$$L_{спл} = L_{ст} \cdot c_{спл} \cdot \lambda_{ст} / c_{ст} \cdot \lambda_{спл} = 0,96 \cdot 0,524 \cdot 26,7 / 0,57 \cdot 58,1 = 0,4$$

Розрахуємо необхідний час для нагрівання:

$$\tau_{\text{н}} = S * k * f * L_{\text{д}} = 50 * 1,0 * 1,7 * 0,4 = 34 \text{ хв.}$$

Відповідно до схеми легування сплаву, технологічний час витримки визначено експериментальним шляхом і становить:

$$\tau_{\text{в}} = 16 \text{ год.}$$

Охолодження після старіння проводиться на повітрі, і буде відбуватися протягом:

$$\tau_{\text{ох}} = (780 - 20) / 5^{0\text{C}} / c = 152 \text{ с} = 2,53 \text{ хв.}$$

Таким чином загальний час, що було затрачено на старіння складає:

$$\tau_{\text{заг}} = 34 + 960 + 2,53 = 996,53 \text{ хв}$$

На рисунку 3.1 наведено графік термічної обробки дисків турбіни, а в таблиці 3.3 представлена технологічна карта процесу

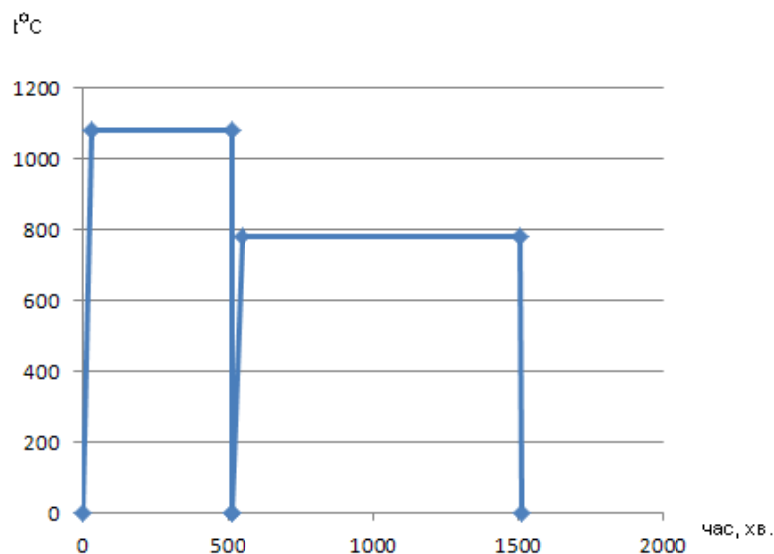
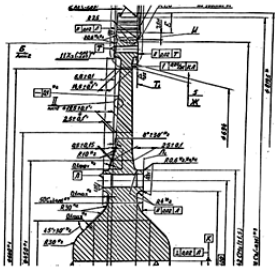


Рисунок 3.1 – Графік термічної обробки дисків турбіни

Таблиця 3.3 - Технологічна карта процесу

Ескіз виробу			Технічні умови			
			Матеріал	Твердість		Мікроструктура
			ЭП742-ИД	70HRC		$\gamma+\gamma'$
№	Найменування операції	Обладнання	Режим нагрівання: температура, °C; тривалість, хв.; середовище	Режим охолодження: середовище, температура, °C; тривалість, хв.	Найменування пристосування, кількість пристосувань, шт.; кількість деталей на пристосуванні, шт.	Умови контролю
1	2	3	4	5	6	7
1	Вхідний контроль	Стилоскоп, штангенциркуль, мікрометр.				Хімічний склад, розміри, відсутність поверхневих дефектів, гострих крайок.
2	Гартування $t=1080^{\circ}\text{C}$					
2.1	Нагрівання	СТЗ - 12.70.4/12	$t_{\text{п}}=20^{\circ}\text{C}; t_{\text{к}}=1080\pm 10^{\circ}\text{C};$ Захисне середовище - азот $t_{\text{н}}=31.45\text{хв}$		Піддон 6шт Деталей 2шт	Температура нагрівання, тривалість нагрівання, кількість виробів в садці, середовище.

Продовження табл. 3.3

1	2	3	4	5	6	7
2.2	Витримка	СТЗ - 12.70.4/12	$t_v$ = $1080 \pm 10^\circ\text{C}$ ; $t_v=480\text{хв}$ ; Захисне середовище - азот;		Піддон 6шт Деталей 2шт	Температура, тривалість витримки, кількість виробів, маса садки, середовище.
2.3	Охолоджен ня	Стіл		$V_{ох} =$ $5^\circ\text{C}/\text{с}$ до $t=20^\circ\text{C}$ . $t_{ох}=3,53\text{х}$ в повітря;		Температура початкова та кінцева, тривалість та швидкість охолодження.
3	Контроль	Твердомір ТШ2М (допустима похибка $\pm 5\%$ ), Мікроскоп МПБ2 (допустима похибка $\pm 0,01\text{ мм}$ ).				Контролюється НВ на деталі. ( $NB_{\text{доп.}} \geq$ 3,3мм). Вимірювання твердості ГОСТ 9012-59 МИТ- довільне. При отриманні твердості НВ повідомити в термічне бюро для прийняття рішень про подальшу т/о.
4	Старіння $t=780^\circ\text{C}$					
4.1	Нагрівання	СТЗ - 12.70.4/12	$t_n=20^\circ\text{C}$ ; $t_k=780 \pm 10^\circ\text{C}$ ; Захисне		Піддон 6шт Деталей	Температура нагрівання, тривалість

Продовження табл. 3.3

1	2	3	4	5	6	7
			середовище - азот; $t_H=34\text{хв}$		2шт	нагрівання, кількість виробів в садці, середовище.
4.2	Витримка	СТЗ - 12.70.4/12	$t_B=780^\circ\text{C}$ ; $t_B=960\text{хв}$ ; Захисне середовище - азот;		Піддон 6шт Деталей 2шт	Температура, тривалість витримки, кількість виробів, маса садки, середовище.
4.3	Охолодження	Стіл		$V_{ох}=5-^\circ\text{C}/\text{хв}$ до $t=20^\circ\text{C}$ . $t_{ох}=2,53\text{хв}$ ; повітря		Температура початкова та кінцева, тривалість та швидкість охолодження.
5	Контроль вихідний	Твердомір ТШ2М (допустима похибка $\pm 5\%$ ), Мікроскоп МПБ2 (допустима похибка $\pm 0,01\text{ мм}$ ).				Контролюються: структура, $\sigma_B=1230\text{МПа}$ , $\sigma_T=770\text{ МПа}$ , $\delta=13\%$ , $\psi=14\%$ , $KCV=30\text{Дж/м}$ , $НВ=302-388$ (Температура випробування $650^\circ\text{C}$ , напруження $830\text{МПа}$ , час до руйнування 100год.)

### 3.1.3 Вибір та розрахунки кількості обладнання

Вибір типу обладнання для термічної обробки виробів визначається характером виробництва, технологічним процесом, геометрією та розмірами виробів.

При крупносерійному виробництві використовують універсальне механізоване обладнання. Це збільшує продуктивність праці, зменшує виробничу площу, скорочує чисельність працівників, знижує собівартість продукції, скорочує до мінімуму ручну працю.

До річної програми входить: номенклатура виробів, маса та габаритні розміри виробів, кількість та загальна маса кожного виробу, який проходить обробку. Ці дані наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Річна виробнича програма

Назва виробу	Матеріал	Маса 1 шт., кг	Габаритні розміри, мм	Виробнича програма	
				шт.	кг
1	2	3	4	5	6
Диск ТВТ	ЭП742-ИД	112	D=819,5 h=120	3714	415968
Диск лабіринтовий	ЭП742-ИД	28,5	D=776,5 h=45,8	3714	105849
Диск ущільнювальний	ЭП742-ИД	3,65	D=822 h=8,2	3714	13556.1
Диск ТСТ	ЭП742-ИД	63,2	D=905,8 h=91	3714	234724.8
Диск ущільнювальний передній	ЭП742-ИД	4,5	D=892 h=35,6	3714	16713
Диск 1 ступені ТВТ	ЭИ698-ВД	28,3	D=892,4 h=76,5	3714	105106.2

Продовження табл. 3.4

1	2	3	4	5	6
Диск 2 ступені ТВТ	ЭИ698-ВД	32,0	D=844,4 h=138	3714	118848
Диск 3 ступені ТВТ	ЭИ698-ВД	32,0	D=771,4 h=129,5	3714	118848
Диск 4 ступені ТВТ	ЭИ698-ВД	27,0	D=694,4 h=68	3714	100278
Диск 1 ступені ТВТ	ЭК79-ИД	21,0	D=480 h=93,5	3714	77994
Диск 2 ступені ТВТ	ЭК79-ИД	25,7	D=488 h=96,5	3714	95449,8
Диск 3 ступені ТВТ	ЭК79-ИД	25,6	D=465 h=97	3714	95078,4
				44568	1307885.1

Режим роботи термічного підрозділу визначає кількість змін на дільниці, у відділенні, цеху. Він залежить від характеру виробництва, об'єму продукції, використаного обладнання, його продуктивності, від прийнятих технологічних процесів термообробки.

При крупногабаритному виробництві з використанням агрегатного обладнання, а саме штовхальних печей, економічно доцільно застосування тризмінну п'ятиденну роботу із зупинкою на вихідні та святкові дні.

Розрахуємо річний фонд часу роботи обладнання. Календарний річний фонд часу  $\Phi_k$ , год., визначається із урахуванням кількості днів в році та тривалості доби:

$$\Phi_k = 365 * 24 = 8760 \text{ год};$$

Дійсний фонд часу роботи обладнання  $\Phi_d$  залежить від прийнятого режиму роботи, тривалості зміни, втрат часу:

$$\Phi_{\text{д}} = (365 - \text{Двих} - \text{Дсв}) * \text{Кзм} * \text{Тзм} * \text{Квик},$$

де Двих- кількість вихідних днів за рік;

Дсв –кількість святкових днів за рік;

Кзм –кількість змін за добу;

Тзм – тривалість однієї зміни, год.;

Квик – коефіцієнт використання часу роботи обладнання(для механізованого обладнання  $\text{К вик} = 0,90 \dots 0,94$ ).

$$\Phi_{\text{д}} = (365 - 104 - 10) * 3 * 8 * 0,92 = 5542 \text{ год}$$

Розрахунок кількості обладнання по завантажувальним відомостям.

За допомогою цього методу необхідних 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.

Завантажувальна відомість для розрахунку кількості печей штовхальних безперервної дії наведено в таблиці 3.5.

Для диска ТВД розрахуємо:

Темп штовхання:

$$T_{\text{шт}} = \tau_{\text{заг}} / \gamma = 514,98 / 6 = 85,83 \text{ хв}$$

Продуктивність :

$$Q_{\text{г1}} = n_i * m_i / T_{\text{шт}} = 2 * 112 * 60 / 85,83 = 156,5886 \text{ кг/год}$$

Необхідний час роботи печі:

$$T_i = M_{p_i} / Q_{г_i} = 415968 / 156,5886 = 2656,4385$$

Таблиця 3.5 – Завантажувальна відомість для печей штовхальних безперервної дії. Термічна обробка гартування та старіння.

Назва виробу	Матеріал	Маса 1 шт, кг	Річна програма $M_{p_i}$		Кількість деталей в передаточній партії $n_i$ , шт.	Кількість $\gamma$ передаточних партій в печі, шт	Загальний час обробки $\tau_{заг_i}$ , год	Темп штовхання $T_{шт_i}$ , хв	Продуктивність $Q_{г_i}$		Необхідний час роботи печі $T_i$ , год.
			шт	кг					шт/год	кг/год	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Гартування $t=1080^{\circ}\text{C}$											
Диск ТВТ	ЭП742-ИД	112	3714	415968	2	6	514,98	85,83	1	156,58	2656,43
Диск лабіринтовий		28,5		105849	6	6	499,25	83,21	4	123,30	858,45
Диск ущільнювальний		3,65		13556.1	39	6	488,68	81,45	28	104,86	129,27
Диск ТСТ		63,2		234724.8	3	6	516,238	86,04	2	132,21	1775,39
Диск ущільнювальний передній		4,5		16713	8	6	505,92	84,32	5	25,62	652,34
Усього $T_3$											6071,90 532

Продовження табл. 3.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Гартування 1 t=1100 <sup>0</sup> C											
Диск 1 ступені ТВГ	ЭИ698-ВД	28,3	3714	105106. 2	4	6	561,21	93,53	2	72,61	1447,46
Диск 2 ступені ТВГ		32,0		118848	2	6	561,21	93,53	1	41,05	1270,62
Диск 3 ступені ТВГ		32,0		118848	2	6	567,50	94,58	1	40,59	2927,34
Диск 4 ступені ТВГ		27,0		100278	4	6	563,72	93,95	2	68,96	1453,94
Усього Тз											7099,38
Гартування 2 t=1000 <sup>0</sup> C											
Диск 1 ступені ТВГ	ЭИ698-ВД	28,3	3714	105106. 2	4	6	320,87	53,47	4	127,0 04	827,58
Диск 2 ступені ТВГ		32,0		118848	2	6	320,87	53,47	2	71,80	1655,16

Продовження табл. 3.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Диск 3 ступе ні ТВТ		32,0		118848	2	6	327,50	54,58	2	70,35	1689,18
Диск 4 ступе ні ТВТ		27,0		100278	4	6	323,38	53,898	4	120,2 3	834,071
Усього Тз											5006,005
Гартування t=950 <sup>0</sup> C											
Диск 1 ступе ні ТВТ	ЭК79-ИД	21,0	3714	77994	6	6	852,06	142,01	2	53,23	1465,086
Диск 2 ступе ні ТВТ		25,7		95449,8	6	6	852,06	142,01	2	65,14	1465,086
Диск 3 ступе ні ТВТ		25,6		95078,4	4	6	833,82	138,97	1	44,21	2150,584
Усього Тз											5080,756 6
Старіння t=780 <sup>0</sup> C											
Диск ТВТ	ЭП742-ИД	112	3714	415968	2	6	996,53	166,08	0,7	80,92	5140,23

Продовження табл. 3.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Диск лабіринтовий		28,5		105849	6	6	979,53	163,25	2	62,84	1684,25
Диск ущільнювальний		3,65		13556.1	39	6	968,10	161,35	14	52,93	256,094
Диск ТСТ		63,2		234724.8	3	6	997,89	166,31	1	68,40	3431,65
Диск ущільнювальний передній		4,5		16713	8	6	986,73	164,45	2	13,13	1272,47
Усього Тз											11784,70
Старіння t=775 <sup>0</sup> C											
Диск 1 ступені ТВТ	ЭИ698-ВД	28,3	3714	105106.2	4	6	1041,55	173,59	1	39,12	2686,34
Диск 2 ступені ТВТ		32,0		118848	2	6	1041,55	173,59	0,6	22,12	5372,68
Диск 3 ступені ТВТ		32,0		118848	2	6	1048,35	174,72	0,68	21,97	5407,78
Диск 4 ступені ТВТ		27,0		100278	4	6	1044,27	174,04	1	37,23	2693,3618
Усього Тз											16160,1669

Продовження табл. 3.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Старіння 1 t=850 <sup>0</sup> C											
Диск 1 ступені ТВТ	ЭК79-ИД	21,0	3714	77994	6	6	461,13	76,85	4	98,36	792,89
Диск 2 ступені ТВТ		25,7		95449,8	6	6	461,13	76,85	4	120,38	792,89
Диск 3 ступені ТВТ		25,6		95078,4	4	6	442,89	73,81	3	83,23	1142,29
Усього Тз											2728,1
Старіння 2 t=780 <sup>0</sup> C											
Диск 1 ступені ТВТ		21,0		77994	6	6	2914,16	485,69	0,74	15,56	5012,46
Диск 2 ступені ТВТ		25,7		95449,8	6	6	2914,16	485,69	0,74	19,05	5010,75
Диск 3 ступені ТВТ		25,6		95078,4	4	6	2897,92	482,98	0,49	12,72	7474,71
Усього Тз											17497,93
Усього ΣТз											71428,94

Після визначення кількості печей, устаткування, засобів механізації, обладнання для контролю, допоміжного обладнання для обробки річної програми складається зведена відомість для усіх видів обладнання. Зведену відомість обладнання наведено в таблиці 3.6

Таблиця 3.6 - Зведена відомість обладнання для термічної обробки дисків турбіни з нікелевих сплавів

Назва та індекс обладнання	Назва технологічної операції	Річний випуск виробів на даному обладнанні, кг (шт)	Середня продуктивність Qг, кг/год (шт/год)	Кількість обладнання, шт		Коефіцієнт завантаження Кз
				Пр	Ппр	
СТЗ 12.70.4/12	Гартування	115134	3,145588	4,196	5	0,8392
СТЗ 12.70.4/9	Старіння			8,69	9	0,96
СНЗА- 5.10.5,5/12	Гартування Відпуск	1448460	18,121895	0,35	1	0,35

Розрахунок кількості обладнання СТЗ 12.70.4/12. Однією з вихідних даних є годинна продуктивність. Визначимо загальну тривалість роботи обладнання Тз для обробки деталей, передбачених річною програмою:

Для гартування

$$T_{z1} = \sum T_i = 2656,4385 + 858,45322 + 129,2780 + 1775,3936 + 652,34192 = 6071,905$$

$$T_{z2} = \sum T_i = 447,46461 + 1270,6218 + 2927,3483 + 1453,9474 = 7099,382$$

$$T_{z3} = \sum T_i = 827,5818 + 1655,1627 + 1689,1893 + 834,07158 = 5006,005$$

$$T_{z4} = \sum T_i = 1465,086 + 1465,0865 + 2150,5841 = 5080,757$$

$$\sum T_z = T_{z1} + T_{z2} + T_{z3} + T_{z4} = 6071,905 + 7099,382 + 5006,005 + 5080,757 = 23258,049$$

Після цього розрахуємо кількість однотипного обладнання для гартування Пр, шт:

$$Pr = T_z / \Phi_d = 23258,049 / 5542 = 4,196$$

Прийнята кількість обладнання складає

$$P_{пр} = 5 \text{ шт}$$

Далі визначимо коефіцієнт завантаження обладнання:

$$K_z = P_r / P_{пр} = 4,196 / 5 = 0,84$$

Для старіння:

$$T_{z1} = \sum T_i = 5140,2303 + 1684,2492 + 256,094 + 3431,6491 + 1272,4794 = 11784,7$$

$$T_{z2} = \sum T_i = 2686,338 + 5372,6809 + 5407,7862 + 2693,3618 = 16160,17$$

$$T_{z3} = \sum T_i = 792,89591 + 792,8957 + 1142,2969 = 2728,089$$

$$T_{z4} = \sum T_i = 5012,4678 + 5010,7512 + 7474,7169 = 17497,94$$

$$\sum T_z = T_{z_i} = 2728,089 + 17497,94 + 16160,17 + 11784,7 = 48170,899$$

Після цього розрахуємо кількість однотипного обладнання  $P_r$ , шт:

$$P_r = T_z / \Phi_d = 48170,899 / 5542 = 8,69$$

Прийнята кількість обладнання складає

$$P_{пр} = 9 \text{ шт}$$

Далі визначимо коефіцієнт завантаження обладнання:

$$K_z = P_r / P_{пр} = 8,69 / 9 = 0,96$$

Розрахунок кількості обладнання СНЗА-5.10.5,5/12. Тз для обробки деталей, передбачених річною програмою:

$$T_z = \sum T_i = 975,43 + 1274,25 + 1185,9 + 2044,24 + 1274 + 2782,514 + 1384,46 + 380,56 + 665,98 + 1382,796 + 1766,906 + 2017,104 + 4622,946 + 2099,44 + 2873,25 + 2544,9 + 4249,256 + 2643,872 + 5849,669 + 2929,1152 + 789,9328 + 1382,3824 + 4347,72 + 5555,42 + 6024 + 13897,5 = 76943.546 \text{ хв}$$

Після цього розрахуємо кількість однотипного обладнання Пр, шт:

$$Pr = T_z / \Phi_d = 76943.546 / 221700 = 0,35$$

Прийнята кількість обладнання складає

$$P_{пр} = 1 \text{ шт}$$

Далі визначимо коефіцієнт завантаження обладнання:

$$K_z = Pr / P_{пр} = 0,35 / 1 = 0,35$$

3.2 Аналіз структури та властивостей після різних варіантів термічної обробки

3.2.1 Структура сучасних деформівних нікелевих сплавів

Жароміцні нікелеві сплави є дисперсійно-твердіючими. При охолодженні з  $\gamma$ -твердого розчину, що має ГЦК ґратку, виділяється когерентна  $\gamma'$ -фаза (інтерметалідне з'єднання на основі  $Ni_3Al$ ), додатково зміцнююча матрицю. Вміст  $\gamma'$ -фази в найбільше складнолегованих сплавах доходить до 55-65%. Гетерофазна структура сплавів є одним з основних

факторів, що забезпечують їх жароміцність [1]. Тому ключовими в загальній проблемі забезпечення жароміцності є питання легування й термостабільності  $\gamma'$ -фази.

Основними методами дослідження структури й локального складу жароміцних нікелевих сплавів, що деформуються є: оптична металографія, електронна мікроскопія (растрова й просвічувальна), мікрорентгеноспектральний аналіз (МРСА) і фрактографічний аналіз.

Структура сучасного деформівного жароміцного нікелевого сплаву (рис. 3.2, а) уявляє собою зерна  $\gamma$ -твердого розчину 4-6 бала, усередині яких спостерігаються дрібнодисперсні виділення  $\gamma'$ -фази розміром 0,2-0,4 мкм, когерентно пов'язані з  $\gamma$ -твердим розчином; по границях зерен розташовані великі частки  $\gamma'$ -фази розміром 5-8 мкм. У сплаві також знаходиться близько 0,5% карбідів МС на основі Nb і Ta. Дрібнодисерсні частки  $\gamma'$ -фази мають кубічну форму (рис. 3.2, б).

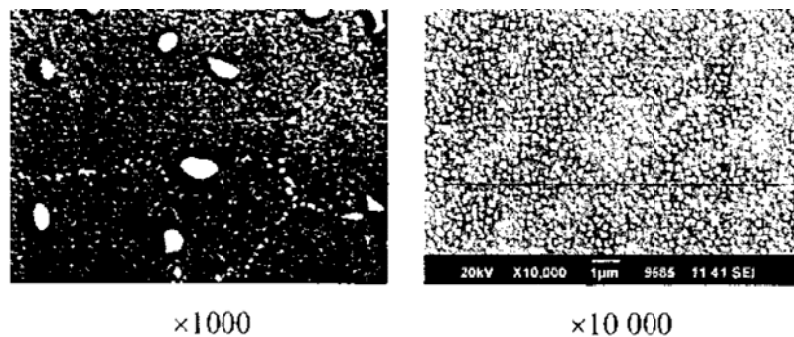


Рисунок 3.2 - Структура сучасного жароміцного нікелевого сплаву, що деформується ЭК151ИД після повної термічної обробки

Основною причиною ефекту сильного впливу на властивості сплавів малих, порядку тисячних часток вагових відсотків, добавок є нерівномірний розподіл елементів, що вводяться, в об'єм матеріалу, коли локальна концентрація їх може досягати десятків відсотків. У деформівних жароміцних нікелевих сплавах поверхневоактивні рідкісноземельні елементи зв'язують шкідливі домішки (сірку, фосфор, миш'як і ін.) у глобулярні фази

розміром не більш 10 мкм, які не зазнають змін на всіх стадіях виробництва штамповок і не виявляють впливу на властивості сплавів. Відбувається рафінування границь зерен і підвищення їх когезивної міцності, що позитивно позначається на жароміцності сплавів.

Для досягнення високих міцностних властивостей проводили дослідження зміни структури сплаву ВЖ175ИД, створеного на базі сплаву ЭК151ИД, залежно від мікролегування гафнієм і цирконієм, а також РЗМ. Поряд із традиційно використовуваним для мікролегування лантаном у матеріал вводили неодим і празеодим. Два інших складу містили лантан і гафній або цирконій.

Мікроструктура сплаву після повної термічної обробки представлена на рис. 3.3. Границі зерен  $\gamma$ -твердого розчину й первинної  $\gamma'$ -фази декоровані виділеннями вторинних карбідів і боридів. Сплав також містить первинні карбіди МС на основі Nb і Ti й інтерметалідну фазу на основі з'єднання нікелю з лантаном, що містить кобальт, лантан, празеодим і неодим. При цьому структура границь зерен при введенні празеодиму й неодиму поліпшується: границя стає більш вузькою (рис. 3.4, а), причому при мікролегуванні одним лантаном (рис. 3.4, б), а глобулярні зернограничні карбіди й бориди розподілені рівномірно.

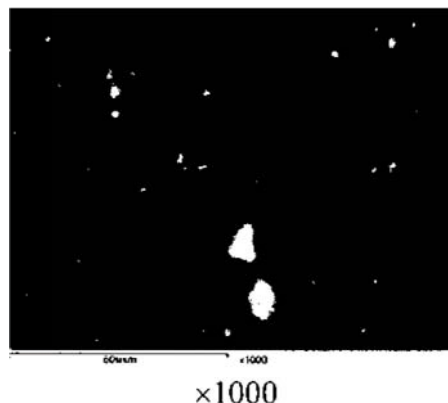
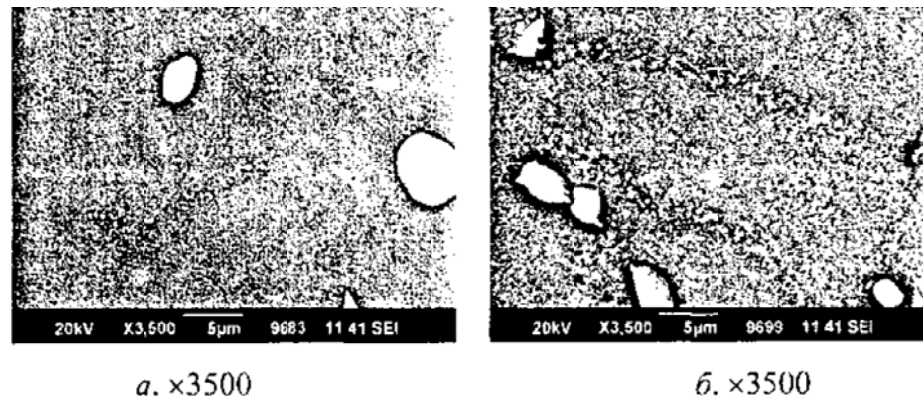


Рисунок 3.3 - Мікроструктура сплаву ВЖ175ИД з мікролегуванням лантаном, неодимом і празеодимом



а - мікролегування лантаном, неодимом і празеодимом; б - мікролегування лантаном

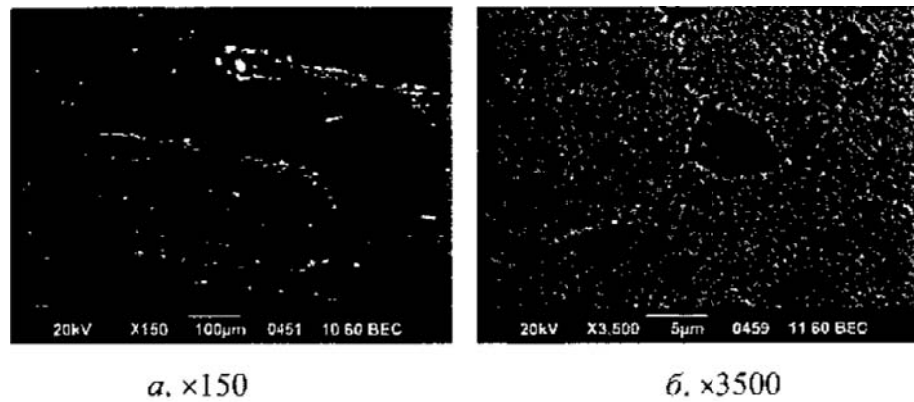
Рисунок 3.4 - Будова границь зерен у сплаві ВЖ175ИД після повної термічної обробки

При додатковому мікролегуванні сплаву ВЖ175ИД, що містить лантан, гафнієм або цирконієм відбувається зниження жароміцності сплаву.

При введенні гафнію в сплав ВЖ175ИД він входить до складу фаз, що утворюються при кристалізації матеріалу (литий стан): первинних карбідів MeC і евтектичної  $\gamma'$ -фази. При подальших переділах (гомогенізація, деформація, термічна обробка) первинна евтектична  $\gamma'$ -фаза, як правило, розчиняється. У сплаві ВЖ175ИД, додатково легованому гафнієм, виявлені частки, що не розчинилися, первинної  $\gamma'$ -фази, що містить гафній, розмір і морфологія яких негативно позначається на механічних властивостях сплаву (рис. 3.5, а).

Відомо [1], що при термічній обробці жароміцних нікелевих сплавів, що деформуються на стадії нагрівання й витримки під загартування первинні карбіди MeC частково розчиняються, атоми вуглецю, що вивільняється, дифундують до границь зерен (області зі зниженою енергією). У ході наступних операцій старіння на границях зерен утворюються карбіди й бориди, що їх зміцнюють. Гафній є сильним карбідоутворювачем. Він стабілізує первинні карбіди MeC, які в ході наступних операцій одержання штамповок практично не розчиняються, що приводить до недовиділення

вторинних карбідів на границях зерен і зниженню жароміцності сплаву на зразках з надрізом (рис. 3.5, б).



а - нерозчинені включення первинної  $\gamma'$ -фази, що містять гафній; б - границі зерен, на яких відсутні виділення зміцнювальних карбідів

Рисунок 3.5 - Мікроструктура сплаву ВЖ175ИД з мікролегуванням лантаном і гафнієм

При введенні в сплав цирконію на границях зерен при термічній обробці відбувається виділення пластин інтерметалідів що так само негативно позначається на їх когезивній міцності (рис. 3.6).

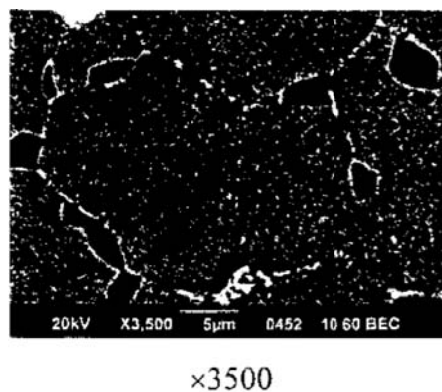


Рисунок 3.6 - Будова границь зерен у сплаві ВЖ175ИД з мікролегуванням лантаном і цирконієм

Таким чином, показано, що при введенні РЗМ (лантану, празеодиму, неодиму) відбувається рафінування границь зерен від шкідливих домішок,

що позитивно позначається на жароміцності сплавів, а кількість, морфологія і склад зерномежових виділень не змінюються, структура границь зерен залишається оптимальною. Додаткове мікролегування гафнієм і цирконієм змінює кількість, морфологію і склад зерномежових виділень, структура границь зерен стає неоптимальною (недостатньо зміцнювальних вторинних карбідів при введенні гафнію й виділення пластинчастого інтерметаліду  $Ni_xZr_y$ , який окрихчує границі зерен, при введенні цирконію), що негативним чином позначається на жароміцності - тривала міцність сплаву ВЖ175ИД при  $650^{\circ}C$  і навантаженні 1055 МПа знижується вдвічі (з 359 до 180 ч).

Деформівний нікелевий жароміцний сплав ВЖ175ИД є самим високоміцним із сучасних вітчизняних жароміцних нікелевих сплавів і не має світових аналогів. Його міцність при  $20^{\circ}C$  становить 1600 МПа ( $\delta=14\%$ ). Підвищенню конструкційної міцності сприяють виділення третинної нанорозмірної (20-50 нм)  $\gamma'$ -фази в прошарках  $\gamma$ -фази (рис. 3.7).

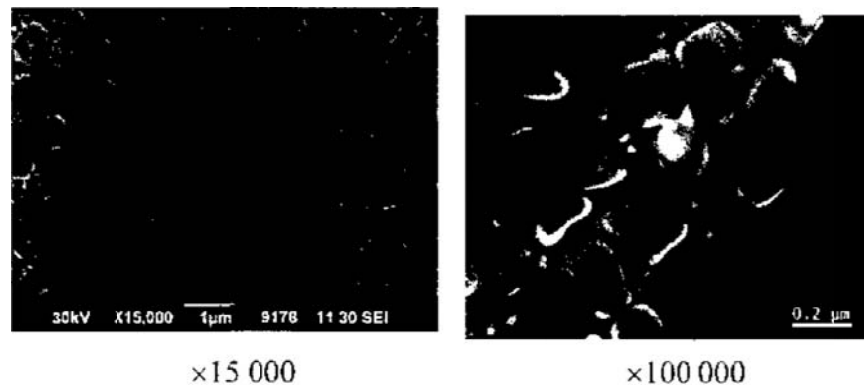
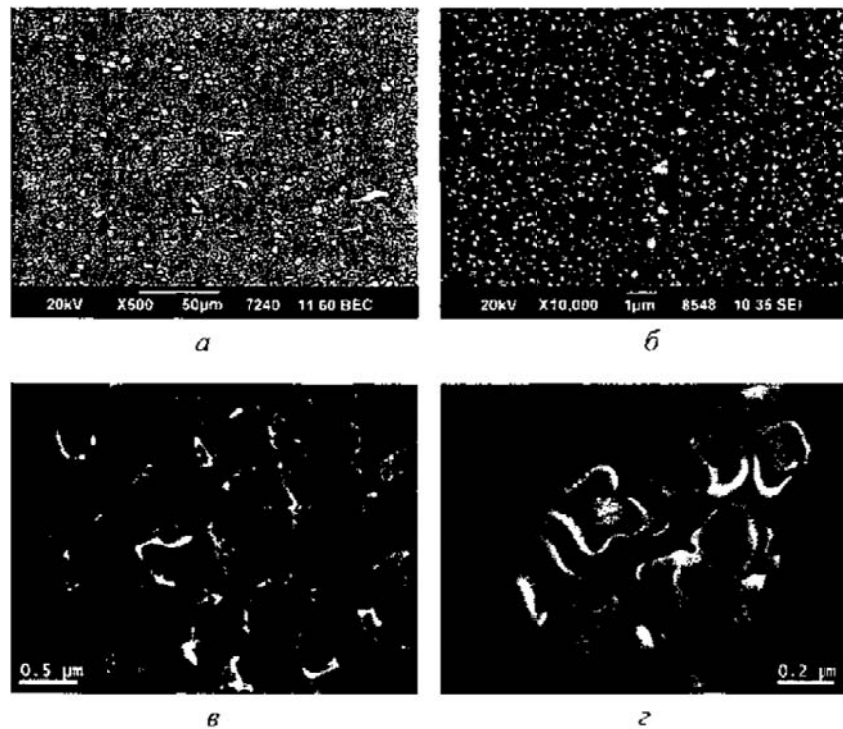


Рисунок 3.7 - Нанорозмірна  $\gamma'$ -фаза в сплаві ВЖ175ИД

На підставі проведених структурних досліджень сформульовані основні вимоги до стандартних зразків, складу й параметрів структури наноструктурованих деформівних жароміцних нікелевих сплавів: у термообробленому стані структура сплаву ВЖ175 являє собою зерна твердого розчину розміром 20-40 мкм (рис. 3.8, а). У структурі спостерігається рівномірний розподіл великих (2,0-5,0 мкм) часток  $\gamma'$ -фази по границях зерен.



а - загальний вид; б, в - морфологія вторинної  $\gamma'$ -фази; г - нанорозмірна  $\gamma'$ -фаза

Рисунок 3.8 - Мікроструктура сплаву ВЖ175

У середині зерна твердий розчин зміцнений дрібними (100-300 нм) частками вторинної  $\gamma'$ -фази, товщина прошарків  $\gamma$ -твердого розчину - 50-130 нм (рис. 3.8, б, в). Розмір часток нанорозмірної  $\gamma'$ -фази, розташованих у прошарках  $\gamma$ -твердого розчину, становить 10-70 нм (рис. 3.8, г). Границі зерен зміцнені частками зернограничної  $\gamma'$ -фази й вторинними карбідами й борідами на основі Мо (по даним МРСА).

### 3.2.2 Вплив режимів гартування на структуру і властивості штамповок дисків

При виробництві штамповок дисків зі складнолегованого сплаву ЭК 151-ИД, однією з найважливіших технологічних операцій є гартування. Вона

містить у собі відпал на твердий розчин і охолодження заготовки за регламентованим режимом. Особливістю гартування таких сплавів, як ЭК 151-ИД є необхідність урахування температури повного розчинення ( $T_{\text{пр}}$ ) зміцнювальної  $\gamma'$ -фази індивідуально для кожної плавки. Об'ємна частка  $\gamma'$ -фази й температура її повного розчинення варіюються в межах 5% і  $15^{\circ}\text{C}$  відповідно залежно від фактичного хімічного складу. У зв'язку із цим для термічної обробки таких сплавів необхідно застосовувати устаткування з точністю підтримки температури не нижче  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  з можливістю автоматичного регулювання швидкості нагріву і охолодження. Серійна термічна обробка вітчизняних сплавів, що містять менше 45%  $\gamma'$ -фази (ЭИ 698-ВД, ЭП 742-ИД, ЭК 79-ИД), припускає гартування з однофазної області. Для більш легovanого сплаву ЭК 151-ИД, освоєного в промисловому виробництві в 80-х роках, застосовується гартування поблизу температури  $T_{\text{пр}} - \gamma'$ - фази.

Відповідно до діючої в серійному виробництві технології, гартування заготовок дисків зі сплаву ЭК 151-ИД проводиться з температури  $(1140-1160) \pm 10^{\circ}\text{C}$  з урахуванням  $T_{\text{пр}}$   $\gamma'$ -фази і для оптимальної комбінації характеристик повинна бути рівна  $T_{\text{пр}} \pm 10^{\circ}\text{C}$ .

Установлено, що зі збільшенням температури нагрівання при гартуванні відбувається ріст середнього розміру зерен у межах від 27 до 86 мкм. На рис. 3.9 урахувалися плавки й штампування різних шифрів, де по осі абсцис відкладена різниця температур  $T_{\text{пр}\gamma'}$  і загартування ( $T_{\text{зак}}$ ).

Залежність механічних властивостей від розміру зерна показана на рис. 3.10. Штампування зі сплаву ЭК 151-ИД з розміром зерен від 60 до 113 мкм мають найбільш низькі з вибірки значення міцності й пластичності, а для деяких заготовок із крупним зерном характеристики ударної в'язкості й відносного звуження перебувають на нижній межі норм технічних умов. При цьому для всіх досліджуваних заготовок значення тривалої міцності відповідають вимогам ТУ: при температурі  $650^{\circ}\text{C}$  и постійно прикладеному

напружені 1010 МПа всі зразки були зняті без руйнування після 110 годин випробувань.

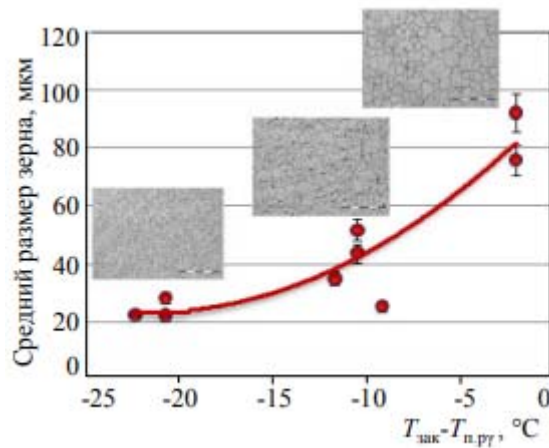


Рисунок 3.9 - Вплив температури загартування на розмір зерна сплаву ЭК 151-ИД

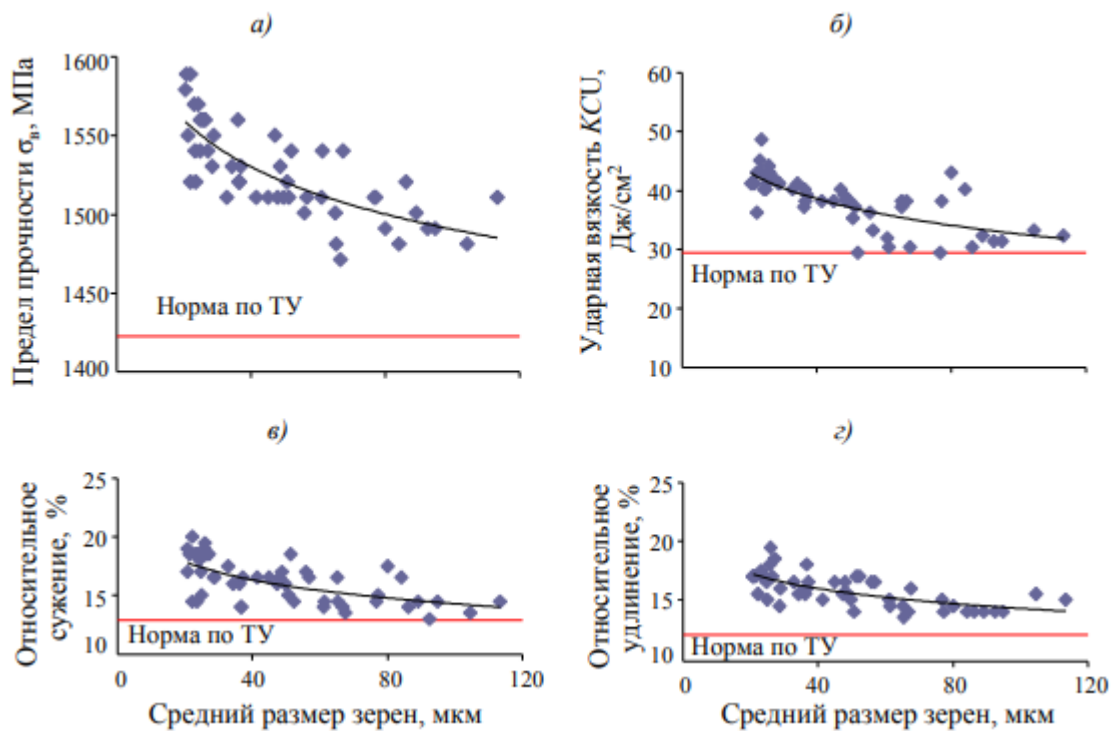


Рисунок 3.10 - Вплив розміру зерна на властивості штампувань дисків зі сплаву ЭК 151-ИД

На рис. 3.11 показано, як залежать межа міцності при розтязі та ударна в'язкість сплаву від температури гартування  $T_{зак}$  (ураховувалася різниця цієї температури й  $T_{пр}$   $\gamma'$ -фази - див. рис. 3.9).

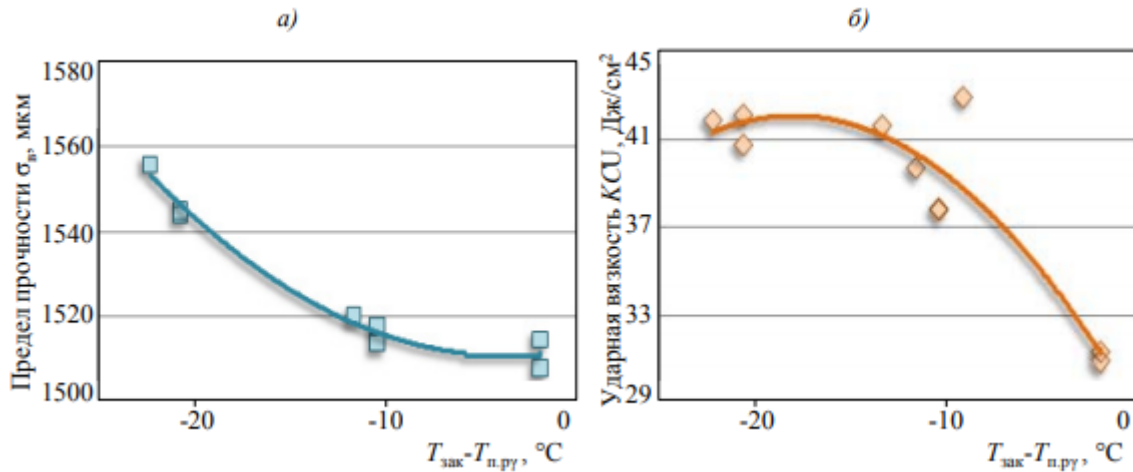


Рисунок 3.11 - Вплив температури гартування на властивості сплаву ЭК 151-ИД

Зі збільшенням довжини границь, тобто при більш дрібному зерні, границі плинності й міцності, а також опір МЦУ підвищуються.

Відомо, що при зменшенні розмірів зерен знижуються характеристики повзучості й тривала міцність [4-6]. Для сплаву Udimet 720 ці залежності представлені на рис. 3.12 [18]. У випадку сплаву ЭК 151-ИД необхідно не допустити зниження тривалої міцності нижче вимог ТУ.

Температурна залежність росту зерен носить складний характер, залежить не тільки від температури  $T_{пр}$   $\gamma'$ -фази, але й від хімічного і фазового складу сплаву, від технології його виробництва.

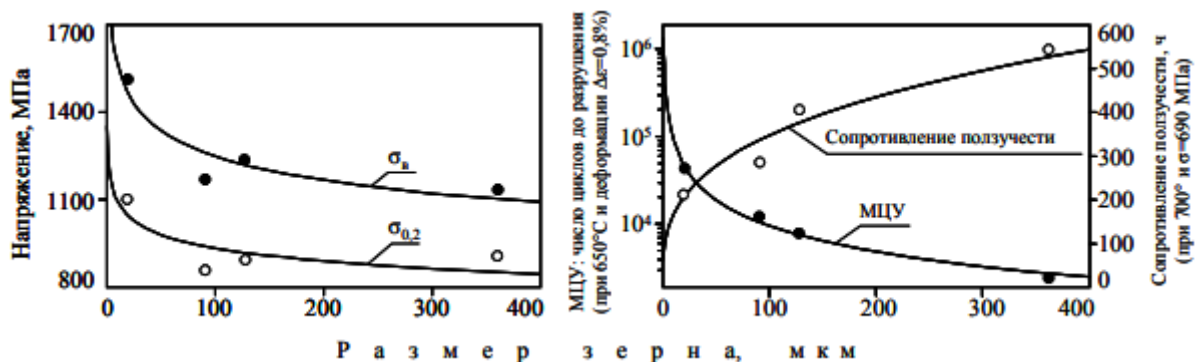


Рисунок 3.12 - Вплив розміру зерна при гартуванні вище й нижче температури  $T_{пр\gamma'}$  на властивості сплаву Udimet 720

На рисунку 3.13 показаний вплив температури гартування (різниця з температурою розчинення  $\gamma'$ -фази) на розмір зерна й кількість  $\gamma'$ -фази для жароміцного нікелевого сплаву NR3, близького по легованості до сплаву ЭК 151-ИД [18, 19]. Хоча залежність така ж, як і для сплаву ЭК 151-ИД, видно, що зростання зерен у сплаві NR3 відбувається повільніше, ніж у сплаві ЭК 151-ИД. Аналогічні дані отримані в роботі [20] для гранульованого дискового сплаву ВВ751П: гартування з температури на  $10^\circ\text{C}$  вище  $T_{\text{пр}}$   $\gamma'$ -фази формує мікроструктуру із середнім розміром зерен 35 мкм. Можливо, це пов'язано з тим, що сплави NR3 і ВВ751П виготовляються методами порошкової металургії.

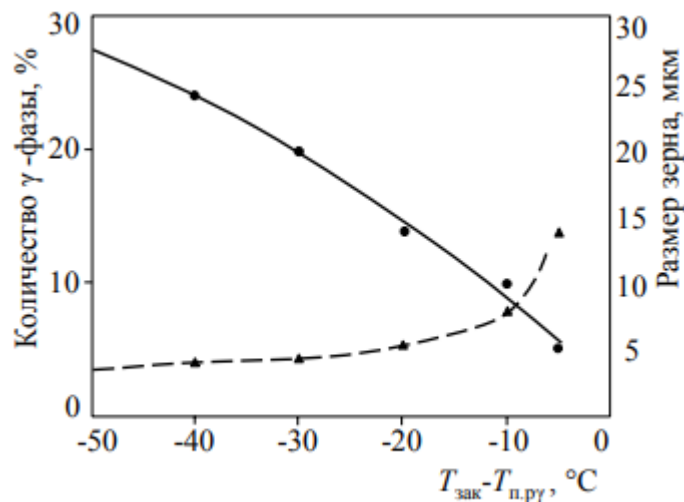


Рисунок 3.13 - Вплив температури гартування на кількість зміцнювальної  $\gamma'$ -фази (\_\_\_\_) і розмір зерна (- - - -) сплаву N113

Отримані в роботі результати показують, що температурний інтервал нагрівання під загартування для сплаву ЭК 151-ИД повинен бути звужений, перед вибором температури гартування повинна виконуватися оцінка мікроструктури сплаву на зразках. Це дозволить підвищити якість продукції, збільшити стабільність властивостей.

Виявлені закономірності зміни структури й властивостей від температури загартування штампувань дисків з високолегованого жароміцного нікелевого сплаву ЭК151- ИД. Установлено, що зі збільшенням

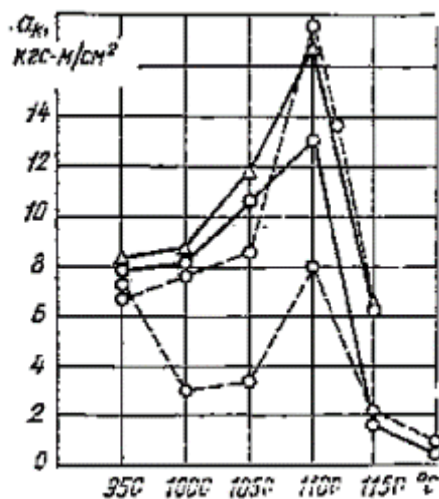
температури гартування та ростом середнього розміру зерна 60 мкм знижуються механічні характеристики, окремі значення яких перебувають на нижній границі норм технічних умов. Найбільш оптимальним для одержання високої міцності й пластичності (при збереженні жароміцності) є гартування в більш вузькому температурному інтервалі, що формує дрібнозернисту структуру з розміром зерен 20-50 мкм.

### 3.2.3 Вплив попередньої термічної обробки на технологічну пластичність

У серійному виробництві успішно застосовується попередній відпал злитків зі сплаву ЖС6КП, що дозволив значно підвищити вихід придатного для напівфабрикатів у вигляді прутків. Необхідно було дослідити вплив відпалу на зразки зі сплаву ЭП 742-ИД. Випробувані різні варіанти відпалу: при 1050-1140°C з витримками 4, 8, 12 год; швидкість охолодження з піччю до 850, 800°C, далі - на повітрі.

Більш високі температури нагрівання при відпалюванні не використовувалися, тому що це призводить до значного нерівномірного росту зерна внаслідок схильності сплаву ЭП 742-ИД до різнозеренності.

Дослідженнями встановлено: пластичність шайб після відпалювання, що проявляється при випробуванні на ударну в'язкість при підвищених температурах, значно зростає. Немає різкого падіння ударної в'язкості в інтервалі температур 950-1100°C, спостережуваного при випробуванні зразків без відпалу. Збільшення часу витримки сприятливо позначається на пластичності (рис. 3.14). Шайби з досліджуваного матеріалу масою від 160 до 270 кг мають різну твердість за перетином: з поверхні  $d_{\text{отп}}=3,1-3,2$  мм; у центрі  $d_{\text{отп}}=3,4-3,5$  мм. У результаті відпалу твердість вирівнюється ( $d_{\text{отп}}=3,55-3,65$  мм).



o- - - o- у стані постачання (нижня крива); o\_\_\_o - після відпалу 1140°C, 4 год; o\_\_\_o - після відпалу 1140°C, 8 год; Δ\_\_\_Δ - після відпалу 1140°C, 12 год; охолодження з піччю зі швидкістю не вище 1°/хв до 800°C, далі - на повітрі

Рисунок 3.14 - Ударна в'язкість при підвищених температурах сплаву ЕП 742-ИД

Дослідження структури шайб показало, що після відпалу відбувається дуже незначне рівномірне укрупнення зерна (рис. 3.15, а-в).

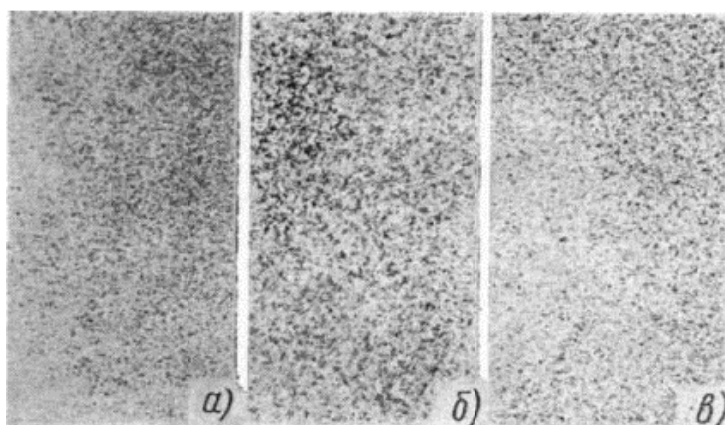


Рисунок 3.15 - Макроструктура шайби сплаву ЕП 742-ИД у стані постачання (а), після відпалу 1140°C, 8 год (б), після відпалу 1140°C, 12 год (в)

При аналізі мікроструктури встановлене, що відпалприводить до укрупнення виділень  $\gamma$ -фази (рис. 3.16, а). Витримка 4-8 год не забезпечує повного розчинення  $\gamma'$ -фази у твердому розчині, що при повільному охолодженні (з піччю) призводить до появи в окремих ділянках грубих пластинчастих виділень  $\gamma'$ -фази (рис. 3.16, б).

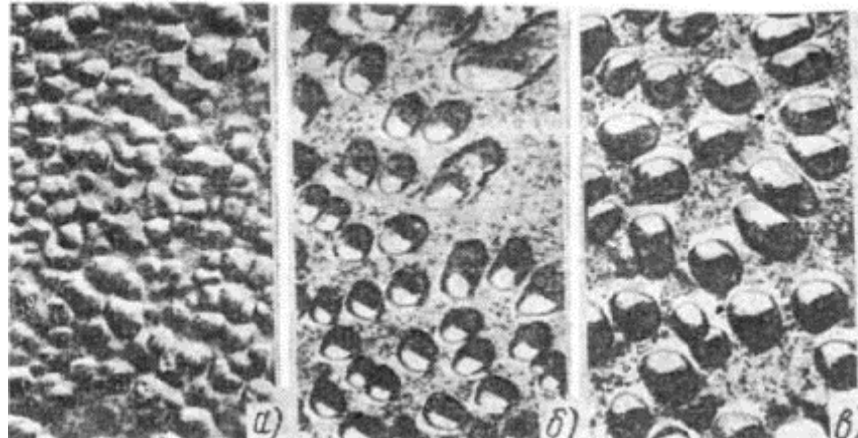


Рисунок 3.16 - Мікроструктура шайби сплаву ЭП 742-ИД (x10000) у стані постачання (а), після відпалу 1140°C, 4-8 год (б), після відпалу 1140°C, 12 год (в)

Найбільш рівномірний розподіл  $\gamma$ -фази спостерігається після відпалу при 1140°C і витримці 12 год (рис. 3.16, в). У таблиці 3.7 наведені порівняльні дані механічних властивостей при кімнатній температурі ( за середніми значенням) кувань дисків, відштампованих із шайб без відпалу і з відпалом при 1140°C, витримці 4, 8, 12 год, охолодження з піччю до 800°C, далі на повітрі, після стандартного режиму термічної обробки: загартування 1150°C, 8 год, повітря; гартування 1050°C, 4 год, повітря; старіння 850°C, 8 год, охолодження на повітрі.

Результати підтверджують доцільність проведення відпалу шайб протягом 12 ч. Тривала міцність при всіх варіантах відпалу перевищує вимоги технічних умов і перебуває в межах 170-200 год (за середніми значенням).

Таблиця 3.7 - Механічні властивості кувань дисків зі сплаву ЭП 742-ИД, виготовлених із шайб без відпалу й з відпалом при 1140°C з різними витримками

Стан шайб	Кількість	$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$	$\delta$	$\psi$	$a_n$ , кгс·м/см <sup>2</sup>
		кгс/мм <sup>2</sup>		%		
Без відпалу	12	117,0	77,0	18,0	18,0	5,4
Відпалена, витримка 4 год	12	123,0	81,5	19,2	18,3	5,9
Відпалена, витримка 8 год	12	123,0	81,0	18,5	17,6	5,2
Відпалена, витримка 12 год	12	124,4	83,2	20,2	20,4	6,0

Впровадження гомогенізуючого відпалювання шайб зі сплаву ЭП 742-ИД перед штампуванням по режиму: 1140°C, витримка 8-12 год, охолодження з піччю до 800°C зі швидкістю не вище 1°/хв, потім на повітрі дозволило підвищити вихід придатних штамповок дисків до 90%.

### 3.2.4 Оптимізація режимів термічної обробки деформівних напівфабрикатів нікелевих сплавів

Особливістю технологічного процесу формоутворення штамповок з жароміцних нікелевих сплавів є їх нерівномірна деформація в зонах зміни товщини деталі. Це обумовлює ймовірність формування грубозернистої структури в цих зонах у процесі нагрівання під перше гартування при стандартній термічній обробці. При вмісті горофільних елементів (В, С, Рb) і шкідливих домішок (Р, S), відповідно верхній межі марочного складу, зі збільшенням розміру зерна знижуються механічні властивості сплавів, зокрема ударна в'язкість, спостерігається каменеvidний злам.

Зниження температури нагрівання під перше гартування сприяє одержанню дрібнозернистої структури, підвищенню міцності й пластичності сплавів.

Слід зазначити також, що при призначенні температурного режиму другого гартування сплаву ХН73МБТЮ не були враховані температура повного розчинення  $\gamma'$ -фази ( $T_{\text{пр}\gamma'}$ ), температурний інтервал існування вторинних карбідів різних плавов і, отже, зміна кількості великих часток  $\gamma'$ -фази й вторинних карбідів у структурі.

У зв'язку із цим необхідне коректування стандартного режиму термічної обробки, в основному - режиму другого загартування.

В роботі досліджували структури й механічні властивості штамповок зі стандартних сплавів ХН73МБТЮ й ХН77ТЮР (табл. 3.8). після низькотемпературної термічної обробки (НТО), що включає відпал, гартування від температур, приблизно рівних  $T_{\text{пр}\gamma'}$ , і старіння при 750°C, 16 годин. Крім того, проводили коректування стандартного режиму термічної обробки дисків зі сплаву ХН73МБТЮ (зокрема, режиму другого гартування).

Таблиця 3.8 – Хімічний склад досліджуваних сплавів

Сплав	Вміст елементів*, %										
	Cr	Ti	Mo	Nb	Al	Fe	Mn	Si	C	B	Рс
ХН73МБТЮ (ЭИ698ВД)	13-16	2,35- 2,75	2,8- 3,2	1,8- 2,2	1,3- 1,7	<2,0	<0,4	<0,6	<0,08	<0,005	<0,005
ХН77ТЮР (ЭИ437БУВД)	19-22	2,5- 2,9			0,6- 1,0	<1,0	<0,4	<0,6	<0,7	<0,01	0,02

\* Решта - Ni.

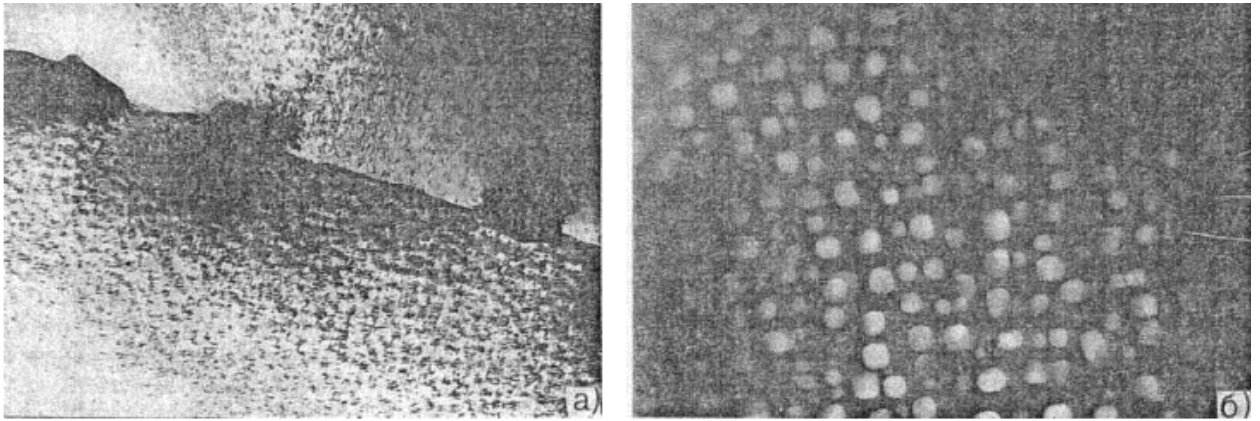
У процесі попереднього відпалу при НТО відбувається зняття залишкових напружень. Це сприяє створенню сприятливих умов протікання рекристалізації при нагріванні під загартування й одержання однорідного зерна. Нагрів під гартування здійснювали при температурах на 5-10°C вище

$T_{\text{пр}\gamma'}$ , але не менш чим на  $80^{\circ}\text{C}$  нижче температури максимального виділення вторинних карбідів.

Дослідження структури штамповок зі сплаву ХН73МБТЮ показали, що після НТО за зазначеним режимом формується рівномірна дрібнозеренна рекристалізована структура: у всіх зонах розмір зерна відповідає №4-5, а в середині не перевищує №3.

Слід зазначити, що після НТО границі зерен відрізняються за будовою від границь зерен у сплаві, підданому стандартної термічній обробці. При НТО, що включає витримку під гартування при  $T_{\text{зак}}=1040-1050^{\circ}\text{C}$ , спостерігається більш інтенсивне виділення вторинного карбиду, ніж в процесі витримки при  $T_{\text{зак}}=1000^{\circ}\text{C}$  при стандартній термічній обробці, коли дифузійні процеси вповільнюються й карбідів виділяється менше. При  $1040-1050^{\circ}\text{C}$  виділення карбідів, імовірно, відбувається інтенсивніше, ніж процес збірної рекристалізації, тому що ця температура залежно від хімічного складу плавки або рівна, або не більше ніж на  $10^{\circ}\text{C}$  перевищує  $T_{\text{пр}\gamma'}$ . Отже карбіди, що виділяються, гальмують ріст зерна й сприяють формуванню дрібнозернистої структури з розміром зерна 60-100 мкм.

Дискретні виділення по границях зерен (вторинні карбіди) (рис. 3.17, а) перешкоджають розвитку міжзеренного ковзання. У структурі зразків зі сплаву ХН73МБТЮ після НТО спостерігаються однорідні виділення  $\gamma'$ -фази розміром  $d=0,08-0,1$  мкм (рис. 3.17, б), що трохи вище, чим розміри часток  $\gamma$ -фази, одержуваних після стандартної термічної обробки ( $d=0,03-0,07$  мкм). Незважаючи на це, зберігається висока зміцнювальна дія часток  $\gamma'$ -фази з  $d=0,08-0,1$  мкм, тому що при впливі навантаження частки взаємодіють із дислокаціями за механізмом перерізання. Наявність таких великих виділень обумовлює високу релаксаційну здатність сплавів і відсутність чутливості до надрізу.



а - дискретні виділення карбідів по границях зерен,  $\times 18500$ ; б - темнопольне зображення в рефлексії  $\gamma'$ -фази,  $\times 30000$

Рисунок 3.17 - Структура зразка зі сплаву ХН73МБТЮ після низькотемпературної обробки

У таблицях 3.9 і 3.10 наведені механічні властивості штамповок валів зі сплаву ХН73МБТЮ після термічної обробки по різних режимах, у таблиці 3.11 - результати випробувань на малоциклову втому. Видно, що характеристики міцності, пластичності й опір малоцикловій втомі зразків, підданих НТО, значно вище, ніж після стандартної термічної обробки. Випробування на тривалу міцність при 650 і 750°C показали, що довговічність зразків після НТО задовольняє вимогам ТУ. Результати контрольних механічних випробувань досвідченої партії штамповок (табл. 3.9) свідчать про те, що НТО забезпечує високий і стабільний рівень міцностних і пластичних властивостей сплаву ХН73МБТЮ, а також підвищення опору малоцикловій втомі при 650°C на 10%.

Таблиця 3.9 - Результати всебічних (у трьох зонах штамповки) випробувань зразків сплаву ХН73МБТЮ

Термічна обробка	Плавка	$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$	$\delta$	$\psi$	$a_n$	$\tau_{720}^{650}$	$\tau_{420}^{750}$
		Н/мм <sup>2</sup>		%		Дж/см <sup>2</sup>	ч	
Стандартна	1	1150-	800-820	17,6-	21,5-	83,7-	116-288	-
		1250 (1220)	(800)	27,2 (23,4)	31,4 (26,6)	133,5 (104)	-	-
	2	1130-	740-770	15,6-	17,5-	43-85	50*	-
		1220 (1175)	(760)	24,0 (21,2)	25,2 (21,6)	(63)	-	-
НТО	1	1270-	820-910	25,2-	26,3-	60-	80-165	-
		1300 (1290)	(870)	28,0 (26,0)	39,3 (32,9)	112,5 (80)	-	-
	2	1250-	805-960	16,0-	18,3-	49-89	92-259	83-313
		1350 (1290)	(860)	27,2 (23,3)	31,1 (26,4)	(72)	401-496	390-493

\* Зразок знятий з випробувань після  $\tau=50$  ч.

Примітка. 1. У дужках дане середнє значення характеристик. 2. У чисельнику дана довговічність  $\tau_{720}^{650}$  і  $\tau_{420}^{750}$  гладких зразків, у знаменнику - зразків з надрізом,  $\tau_{720}^{650}$  - довговічність зразків при випробуванні під навантаженням 720 Н/мм<sup>2</sup> при 650°С,  $\tau_{420}^{750}$  - під навантаженням 420 Н/мм<sup>2</sup> при 750°С.

Таблиця 3.10 - Результати стандартних контрольних випробувань зразків, вирізаних зі штамповок сплаву ХН73МБТЮ

Штамування	$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$	$\delta$	$\psi$	$a_{H_2}$	$d_{отп}$ , мм	$\tau_{420}^{750}$ , ч
	Н/мм <sup>2</sup>		%		Дж/см <sup>2</sup>		
1	1265-	890-835	28,0-	29,6-	92-53	3,40-	>50
	1250		20,0	21,0		3,30	
2	1340-	890-830	25,6-	26,6-	112-62	3,40-	>50
	1235		20,4	21,4		3,30	
3	1290-	890-840	24,8-	23,5-	108-81	3,35-	>50
	1210		19,2	18,1		3,30	
Згідно ТУ	>1080	>720	>13	>14	>40	3,30- 3,55	>50

Таблиця 3.11 – Результати випробувань на малоциклову втому

Сплав	Термічна обробка	$T_{исп}$ , °С	МЦУ, Н/мм <sup>2</sup> , при N, цикл	
			5000	10000
ЭИ698ВД	Стандартна НТО	650	860/520	810/460
			910/550	870/490
ЭИ437БУВД	Стандартна НТО	550	850/610	820/520
			960/640	950/530

Примітка. У чисельнику наведені значення МЦУ для гладких зразків, у знаменнику - для зразків з надрізом.

Аналогічна зміна структури й механічних властивостей після НТО спостерігається у штамповок зі сплаву ХН77ТЮР (табл. 3.12).

Таблиця 3.12 – Результати випробувань штамповок зі сплаву ХН77ТЮР

Термічна обробка	$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$	$\delta$	$\psi$	$a_{нз}$	$\tau_{620}^{650}$ , Ч
	Н/мм <sup>2</sup>		%		Дж/см <sup>2</sup>	
Стандартна	1130-1010	730-680	26,0-14,4	24,3-16,5	60-35	50
	(1070)	(705)	(19,8)	(20,4)	(44)	11
НТО	1240-1135	830-720	31,2-24,0	45,8-22,2	105-56	186
	(1190)	(770)	(22,4)	(35,0)	(88)	50

Позначення.  $\tau_{620}^{650}$  - довговічність зразків сплаву ХН77ТЮР після випробувань при 650°C під навантаженням 620 Н/мм<sup>2</sup>.

На рис. 3.18 показана залежність  $T_{прг}$  від сумарної атомної частки Al, Ti, Nb і  $T_{прг}$  кількості  $\gamma'$ -фази. Збільшення  $\Sigma Al+Ti+Nb$  приводить до росту кількості  $\gamma'$ -фази й підвищенню температури її повного розчинення. Для  $\Sigma Al+Ti+Nb \leq 8,21\%$  (атомна частка)  $T_{прг} \leq 1040^\circ C$ , а для  $\Sigma Al+Ti+Nb > 8,21\%$   $T_{прг} > 1040^\circ C$ . Отже, для того щоб забезпечити оптимальне співвідношення об'ємних часток великих і дрібних часток  $\gamma'$ -фази (5-7% великих і 16-20% дрібних виділень), необхідно коректувати температуру другого загартування. Для плавок з  $\Sigma Al+Ti+Nb > 8,21\%$  друге загартування потрібно проводити при температурі, відповідної до верхнього рівня настановного температурного інтервалу - 1010°C, а для плавок з  $\Sigma Al+Ti+Nb \leq 8,21\%$  - при 990°C, що відповідає нижньому рівню настановного температурного інтервалу.

При термічній обробці, що включає відкоректований режим другого гартування, відбувається зміна співвідношення об'ємної частки великих і дисперсних виділень  $\gamma'$ -фази. Як показали електронікроскопічні дослідження штамповок зі сплаву ХН73МБТЮ, при зниженні температури гартування до 990°C частка великих виділень  $\gamma'$ -фази зростає, а дисперсних часток - зменшується (рис. 3.19, а), що сприяє підвищенню пластичних властивостей сплаву. При підвищенні температури другого гартування до

1010°C зменшується кількість великих виділень, при цьому частка дисперсних часток збільшується (рис. 3.19, б), підвищуються міцнісні властивості й жароміцність.

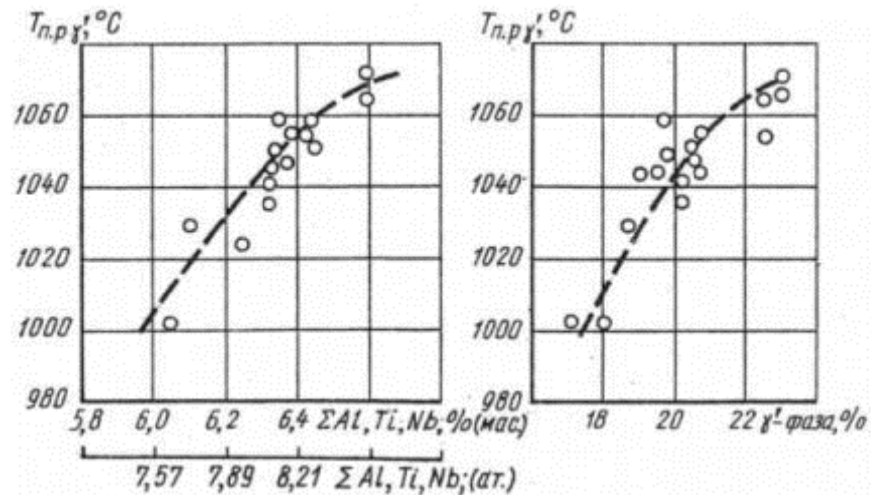
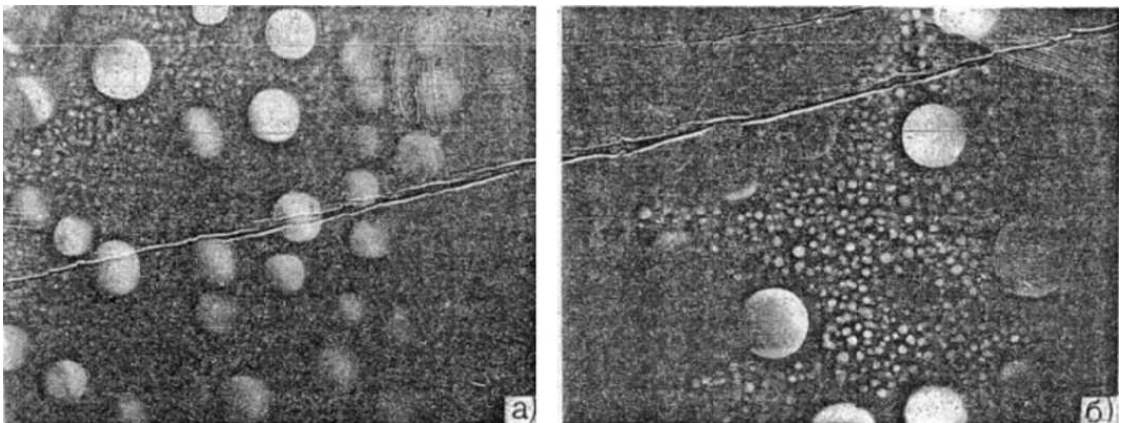


Рисунок 3.18 - Залежність температури повного розчинення  $\gamma'$ -фази від сумарного вмісту Al, Ti, Nb (а), кількості  $\gamma'$ -фази (б)



а - від 990°C (4 ч) на повітрі; б- від 1010°C (4 ч) на повітрі

Рисунок 3.19 - Структура зразків зі сплаву ХН73МБТЮ після стандартної термічної обробки з відкоректованим режимом другого гартування (темнопольне зображення в рефлексі  $\gamma'$ -фази),  $\times 30000$

У табл. 3.13 наведені середні значення механічних властивостей штамповок зі сплаву ХН73МБТЮ після стандартної термічної обробки, що включає різні режими другого загартування. Видно, що зниження

температури другого гартування до 990°C сприяє підвищенню пластичних властивостей досліджуваного матеріалу, а підвищення цієї температури до 1010°C - підвищенню міцності й жароміцності.

Таблиця 3.13 – Механічні властивості й довговічність зразків після стандартної термічної обробки з різним режимом другого гартування

Температура другого гартування, °С	$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$	$\delta$	$\psi$	$a_n$	$\tau_{720}^{650}$	$\tau_{420}^{750}$
	Н/мм <sup>2</sup>		%		Дж/см <sup>2</sup>	ч	
1010±10	1260	820	24,7	27,1	77	250	179
990±10	1240	780	28,3	30,6	98	144	141
1000±10	1270	810	25,1	27,0	88	186	142

Примітка. Наведені механічні властивості й довговічність  $\tau_{720}^{650}$  і  $\tau_{420}^{750}$  зразків після стандартної термічної обробки з різним режимом другого загартування. Режими першого загартування й старіння не змінювалися.

Застосування пропонованої низькотемпературної обробки замість стандартної забезпечує підвищення й стабілізацію механічних властивостей і підвищення опору МЦУ (на 10%) штамповок зі сплавів ХН73МБТЮ й ХН77ТЮР за рахунок формування рівномірної дрібнозеренної рекристалізованої структури, більш інтенсивного виділення по границях зерен карбідів і утворення однорідних часток  $\gamma'$ -фази.

При використанні стандартної термічної обробки сплаву ХН73МБТЮ рекомендується коректувати режим другого гартування з урахуванням температури повного розчинення  $\gamma'$ -фази конкретних плавок. При цьому досягається стабільний рівень механічних властивостей сплаву.

### 3.3 Контроль якості готової продукції

При якісно розробленій технології термічної обробки та відповідному здійсненні цієї обробки, не повинно виникати відхилень від технічних вимог до виробу. Проте, у виробництві нерідко виникають випадки, коли технолог вимушений з'ясувати причини виникнення тих чи інших дефектів. На підставі цих досліджень, технолог розробляє заходи по усуненню дефектів. Технічний контроль включає в себе роботи на всіх стадіях виробництва: контроль якості вихідних матеріалів, контроль технологічних процесів термічної обробки, контроль продукції термічного цеху.[6]

Слід зважити на те, що дефекти можуть бути виправними та невиправними. Виправні дефекти – дефекти, котрі усуваються термічною обробкою, або іншими технологічними операціями. Невиправні дефекти – дефекти, які не дозволяють отримувати задовільну поверхню. Заготовки із такими дефектами утилізуються (переплавляються).[6]

В технологічній карті передбачено три види контролю:

а) Вхідний контроль:

- хімічний склад – є обов'язковою операцією, так як перевіряється відповідність матеріалу виробів. Використовуються експресні методи контролю (спектральний, хроматографічний). Приладом є стилоскоп.
- розмір та геометрія виробів, що перевіряють штангенциркулем, а стан поверхні (на поверхні не повинно бути грубих подряпин, вдавлень і тріщин) за допомогою мікроскопу.
- мікроструктура шару перевіряють рентгеноструктурними, рентгеноспектральними, оптичними мікроскопами).

б) Поточний контроль – здійснюється після виконання основних та додаткових операцій. Після гартування контролюється твердість та розмір зерна. Випробування здійснюються на твердомірі Роквела (ТК),

металографічний метод використовують для визначення структури сталі або сплаву.

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); на твердість – ТК (твердомір Роквела). Контролюється час та температура гартування, старіння, відпуску. Контролюється вміст захисної атмосфери (прилади непрямого та прямого регулювання атмосфери).

Для з’ясування причин виникнення різноманітних дефектів аналіз необхідно здійснювати по операційно.

В таблиці 3.14 наведено можливі дефекти після термічної обробки для дисків турбіни із нікелевих сплавів.

Таблиця 3.14 - Можливі дефекти після термічної обробки для дисків турбіни.

№ п\п	Вид дефекту	Причини виникнення дефекту	Заходи по запобіганню появи дефекта	Заходи по усуненню дефекта
1	2	3	4	5
Гартування				
1.	Гартівні тріщини	1)Нагрівання із високими швидкостями в наслідок яких виникає великий перепад температур за перетином; 2)Різде охолодження із завищеною швидкістю; 3)Конструкційні особливості виробів	1)Дотримання технології підігріву; 2)Використання м’яких гартівних середовищ; 3)Аналіз технологічності виробу при конструкційній розробці	1,2,3) невірні дефекти

Продвження табл. 3.14

1	2	3	4	5
2.	Порушення геометрії	1)Нераціональне розташування виробів в садці; 2)Завищені температури гартування та швидкість охолодження	1)Формування раціонального розташування виробів в садці гартівного пристрою; 2)Використання гартівних машин, пресів(охолодження в заневоленому стані)	1,2) Рихтування виробів і наступна термічна обробка за раціональним режимом
3.	Занижені показники жароміцності	1)Низька температура гартування (занижений час витримки); 2)Висока температура гартування (завищений час витримки); 3)Відсутність захисної атмосфери (вигорання в поверхневих шарах сплаву таких елементів як Ti, Al, Cr, V)	1,2) Термічна обробка із дотриманням раціональних температур витримки; 3) Використання захисної атмосфери	1) Термічна обробка за раціональним режимом; 2,3) Невиправні дефекти термічною обробкою
Старіння				
1.	Занижені показники жароміцності	1)Коагуляція частинок $\gamma'$ -фази; 2)Недостатня кількість частинок $\gamma'$ -фази	1,2) Термічна обробка виробів із дотриманням раціональних температур витримки	1,2) Термічна обробка за раціональним режимом

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

В розділі надані основні заходи із охорони праці, при дослідженні впливу легувальних елементів на отримання різних зміцнювальних фаз у сплавах із дисперсійним твердінням.

### 4.1 Аналіз потенційних небезпек

а) небезпеки які пов'язані, з порушенням вимог ергономіки стосовно, організації робочих місць дослідів в приміщенні дослідницької лабораторії;

б) можливість ураження електричним струмом, внаслідок порушення правил з електричної безпеки, що може привести до електричних травм, або летального наслідку;

в) небезпеки які пов'язані із проведенням випробувань механічних властивостей дослідницьких зразків, зокрема можливості отримання механічних травм;

г) небезпеки які пов'язані із дослідженням мікроструктури на електронному мікроскопі «Tesla BS 540», зокрема негативний вплив іонізуючих випромінювань, що може привести до розвитку тяжких захворювань.

д) небезпеки які пов'язані із дослідженням структури на оптичному мікроскопі МИМ-8, зокрема пошкодження органів зору внаслідок хибного вибору світлофільтрів;

е) небезпеки які пов'язані із обробкою результатів досліджень із використанням ПК, зокрема ушкодження кістково-м'язового апарату внаслідок довготривалої роботи в однотипній позі;

є) незадовільні параметри повітряного середовища в приміщенні

дослідницької лабораторії, внаслідок неефективної роботи систем опалення та повітря обміну;

- ж) незадовільне освітлення робочих зон, дослідницької лабораторії;
- з) можливість загоряння внаслідок порушень правил пожежної безпеки, що може привести до пожежі;
- к) небезпеки які пов'язані із умовами праці у надзвичайних ситуаціях;

#### 4.2 Заходи щодо забезпечення безпеки

а) Згідно ГОСТ 12.2.032-78. «СС. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования» конструкція робочого місця повинна забезпечувати оптимальне положення співробітника, що досягається за рахунок регулювання висоти сидіння та підставки для ніг. Підставка для ніг повинна регулюватися по висоті. Ширина повинна бути не менше 300 мм, довжина – не менш 400 мм. Поверхня підставки повинна бути рифленою. По передньому краю слід передбачити борти висотою 10 мм. Важливим фактором є простір під столом, його має бути досить, що можна було зручно згинати та розгинати коліна. Стіл повинен мати криволінійну форму. Крісло повинно забезпечити фізіологічно раціональну робочу позу, при якій порушується циркуляція крові і не було іншого шкідливого впливу. Для цього необхідно, щоб у крісла була пружна спинка анатомічної форми, яка зменшить навантаження на хребет. Також крісло обов'язково повинно бути з підколінниками і мати можливість повороту, зміни висоти і кута нахилу сидіння й спинки. Монітор повинен розташовуватися на робочому столі прямо, і віддаленням від очей мінімум на 50-60 см. Верхня границя екрану повинна бути на рівні очей або не нижче 15 см від рівня очей. Клавіатура повинна розташовуватися в 10-15 см (в залежності від довжини ліктя) від краю стола. Глибина стола повинна дозволяти повністю положити

лікті на стіл, відсунути клавіатуру до монітора.

б) З метою забезпечення електробезпеки, необхідним є знання основних заходів, для попередження уражень електричним струмом.

Організаційні заходи – до виконання робіт допускаються особи не молодше 18 років, які пройшли навчання, та перевірку знань з електробезпеки. Основним нормативним актом є ПУЄ ( правовий устрій з електроустанов). Ремонт обладнання повинен здійснювати тільки спеціальний підготовлений персонал. Для кожного електроспоживного обладнання повинні бути складені експлуатаційні схеми нормальної і аварійної роботи.

Технічні заходи – розташування струмоведучих частин на недоступній висоті ( до 1000 В ), не менше 3,5 м ( більше 1000 В – 6 м ). Всі не ізольовані струмопровідні лінії повинні бути надійно огороженні суцільними огорожами. Відкриття яких можливі тільки за допомогою спеціальних пристроїв. Опір ізоляції електричних дротів повинен бути не менше 0,5 Ом. Обов'язковим є захисне заземлення або занурення. Обов'язковим є використання індивідуальних засобів захисту, зокрема гумовий діелектричний килимок, опір якого слід періодично перевіряти. Обов'язковим є встановлення автоматичних блокуючих пристроїв, які запобігають небезпечним діям людини. Блокуючі пристрої розподіляють на механічні, електричні, та електромеханічні.

в ) При випробуванні на механічні властивості дослідницьких зразків негативно на стан працездатності людини впливають різні шуми. Шум – сукупність звуків різної частоти та інтенсивності. Негативно впливає на організм людини, викликає психологічні та фізіологічні порушення, знижує працездатність та сприйнятливості зовнішньої інформації. Шум підвищує ступінь ризику травматизму та нещасних випадків пов'язаних з порушенням сприйняття людиною попереджувальних сигналів, змін в роботі обладнання та технологічного процесу. Шум нормується ГОСТом 12.1.003-83 «Шум. Загальні вимоги безпеки», ДСТУ 2325-93 «Шум. Терміни

та визначення» та ДСН 3.3.6-037-99 «Державні санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку». Основою нормування є обмеження звукової енергії, яка діє на людину протягом робочої зміни значеннями, безпечними для її здоров'я і працездатності.

Методи захисту від шуму:

Зниження шуму в джерелі виникнення:

- підвищення якості балансування обертових деталей, класу точності їх виготовлення;

- недопущення перекосів деталей і вузлів, люфтів і зазорів;

Зниження шуму на шляху його поширення.

Досягається будівельно-акустичними заходами, за рахунок застосування звукоізолюючих облицювань.

Акустична обробка приміщень (ефективна в зоні відбитого звуку).

Передбачає вкривання стелі та верхньої частини стін звукопоглинальними матеріалами. Ефективність методу незначна (зниження шуму на 4-7 дБ) і проводиться в поєднанні з іншими методами.

Звукоізоляція.

Застосовується для захисту від шуму, що проникає зовні. Досягається створенням герметичних перепон, стін, кожухів, екранів. Застосовують матеріали, що мають високий коефіцієнт відбиття, наприклад: метал, скло, залізобетон, бетон та інші. В залежності від герметичності, товщини та властивостей матеріалів звукоізоляція дає можливість зменшити шум на 30-50 дБ.

Звукопоглинання.

Застосовують пористі матеріали з великим коефіцієнтом поглинання, наприклад: паропласт, войлок, базальтове волокно та інші.

Для попередження механічних травм, зони випробувань повинні огорожувати спеціальними прозорими екранами з триплексу.

г) Для електронного мікроскопа «Tesla BS 540» можливі 3 варіанти аварійної ситуації:

- відключення електроживлення;
- відключення води;
- прорив повітря в вакуумну систему.

У таких ситуаціях першочерговим завданням вважається охолодження печі дифузійного насоса і, по можливості, збереження вакууму в системі. У всіх випадках слід спочатку відключити високу напругу, піч диф. насоса і вимкнути головний автомат на стінці. При відмові водопостачання поста ратися обмотати мокрими ганчірками піч диф. насоса і включити вентилятор для обдування. Гарячі мокрі ганчірки слід міняти, поки вакуум в системі не почне падати. після охолодження приступити до усунення несправності.

При прориві повітря в колону мікроскопа, як правило, спрацьовує автоматика, відсікаючи дифузійний насос від решти обсягу, і вимикається напруження катода і висока напруга. Треба тільки простежити, щоб форвакуумний насос не працював «на повітря», а переключити його на закритий обсяг, наприклад на відкачку боксу з фотопластинками.

В цьому випадку найнебезпечнішим для мікроскопа випадком може з'явитися тріщина в керамічному ізоляторі високовольтного введення. Тому найкраще буде якомога швидше усунути протікання.

Електронний мікроскоп «Tesla BS 540», має потужне джерело іонізуючих випромінювань, що як наслідок негативно впливає на організм людини при зовнішньому опромінюванні. Зовнішнє опромінення — це дія на організм іонізуючих випромінювань від зовнішніх відносно нього джерел випромінювання. Під дією іонізуючих випромінювань в організмі людини відбувається іонізація молекул і атомів тканини, порушується хімічна структура сполук, утворюються сполуки, не властиві живій клітині, що в свою чергу призводить до її відмирання. Зміни фізичних і біологічних процесів в організмі залежно від дози опромінювання.

Для попередження шкідливої дії іонізуючих випромінювань необхідно усувати всяку можливість опромінювання організму дозами, які перевищують гранично допустимі. Ступінь ураження радіоактивними

речовинами організму людини залежить від ряду чинників: виду випромінювання (альфа-, бета-, гамма-промені і т. ін.); кількості ізотопу (активності); його властивостей (енергії частинок в період піврозпаду та ін.); шляхів попадання в організм людини та його індивідуальної чутливості.

Для захисту від зовнішнього опромінювання, яке має місце при роботі із закритими джерелами випромінювання, основні зусилля необхідно направити на попередження переопромінення персоналу шляхом:

- збільшення відстані між джерелом випромінювання і людиною (захист відстанню);
- скорочення тривалості роботи в зоні випромінювання (захист часом);
- екранування джерела випромінювання (захист екранами).

д) Горизонтальний металографічний мікроскоп МИМ-8 призначений для дослідження мікроструктури металів і інших непрозорих об'єктів в світлому полі при прямому і косому освітленні, а також в темному полі і в поляризованому світлі. Для візуального спостереження об'єктів мікроскоп забезпечений монокулярної і біноккулярної насадками. Власне збільшення біноккулярної насадки - 2,5 х.

Набір ахроматичних і апохроматичних об'єктивів і окулярів забезпечує збільшення мікроскопа при візуальному спостереженні - від 100х до 1350х. Предметний столик мікроскопа забезпечений механізмами для координатного переміщення об'єкта. Освітлення здійснюється від електролампи розжарювання потужністю 170 Вт, 17 В, живиться від освітлювальної мережі 220 В через понижуючий трансформатор, забезпечений секційним перемикачем для регулювання яскравості напруження лампи. Сам мікроскоп і все його частини встановлені на станині, що представляє собою оптичну лаву довжиною 1,8 м. Станина встановлюється на чотири демпфера, призначених для запобігання мікроскопа від вібрації. демпфери вмонтовані в стіл, який має з боків дві тумби з висувними ящиками для зберігання приладдя.

Правильне використання мікроскопа виходить тільки за умови раціональної комбінації об'єтивів, окулярів. При вживанні їх треба пам'ятати, що збільшення повинно знаходитися в межах від 500 до 1000 апертур. Об'єктиви апохромати в поєднанні з компенсаційними окулярами для візуального спостереження дають збільшення.

Крім правильної комбінації об'єтивів 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 нечіткими 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.

е) Персонал, що працює на комп'ютері зобов'язаний дотримуватися вимог інструкції, розробленої на підставі Санітарних норм і правил СанПин 2.2.2.542-96 «Гігієнічні вимоги для відео дисплейних терміналах, персональними електророзрахунковими машинами і організації робіт», а також нести особисту відповідальність за дотримання вимог безпеки своєї парці і за створення небезпечного чи шкідливого виробничого фактора для інших працюючих і поломку комп'ютера.

При роботі з комп'ютером шкідливими і небезпечними чинниками є :

- електростатичні поля;
- електромагнітне випромінювання;
- локальне стомлення, загальна втома;

Режими праці та відпочинку при роботі з комп'ютером повинні організовуватися в залежності від виду та категорії трудової діяльності.

Види трудової діяльності поділяються на 3 групи:

Група А – робота із зчитуванням інформації з екрану комп'ютера з попереднім запитом;

Група Б – робота з введенням інформації;

Група В - творча робота в режимі діалогу;

За основну роботу з комп'ютером слід приймати таку, яка займає не менше 50 % роботи протягом часу роботи комп'ютера.

Для видів трудової діяльності встановлюється 3 категорії тяжкості і напруженості роботи з комп'ютером, які визначаються:

- для групи А – по сумарному числу опрацьованих знаків за час роботи з комп'ютером, але не більше 60 000 знаків;

- для групи Б – по сумарному числу зчитуються або вводяться знаків за час роботи з комп'ютером, але не більше 40 000 знаків;

- для групи В – по сумарному часу безпосередньої роботи з комп'ютером, але не більше 6 годин за час роботи з комп'ютером;

Для забезпечення оптимальної працездатності і збереження здоров'я протягом часу роботи необхідно переконатися, що монітори комп'ютера мають анти блокове покриття (окрім групи А) з коефіцієнтом відбиття не більше 0,5. Покриття повинне також забезпечувати зняття електростатичного заряду з поверхні екрана, іскріння і накопичення пилу. Корпус монітора повинен забезпечувати захист від іонізуючих та неіонізуючих випромінювань. Необхідно перевірити робоче положення комп'ютера від стань між стіною з віконними прорізами і столом має бути не менше 0,8 м. При невеликій кількості робочих місць бажано розташувати столи біля протилежної стіни щодо віконних прорізів. Відстань між робочими столами повинно бути не менше 1,2 м. Не допускається знаходження другого робочого місця з боку задньої стінки комп'ютера. Оптимальними параметрами температури в кабінеті є 19-21 °С, допустимі 18-22 °С, відносна вологість повітря 62-55 %.

Тривалість безперервної роботи з комп'ютером без регламентованої перерви не повинна перевищувати 2 годин. Під час

регламентованої перерви з метою зниження нервово-емоційного напруження, стомлення зорового аналізатора, усунення впливу гіподинамії, запобігання розвитку втоми доцільно виконувати комплекси вправ. Рівень шуму в приміщенні під час роботи комп'ютерів не повинен перевищувати 50 дБ. Конструкція відео монітора повинна передбачати заходи, що забезпечують хорошу розбірливість зображення, незалежну від зовнішнього освітлення

#### 4.3 Заходи щодо виробничої санітарії та гігієни праці

є) Для нормалізації параметрів повітряного середовища в виробничих приміщеннях передбачається використовувати технічні засоби по забезпеченню нормованих параметрів. До них відноситься водяне або парове опалення, природна вентиляція. У адміністративних приміщеннях використовуються кондиціонери.

Розрахунок надходження теплоти у приміщення,  
та визначення кондиціонера.

Визначаємо надходження теплоти в приміщення о 18 год. Орієнтування будівлі на ПівдЗ. Площа приміщення складає  $35 \text{ м}^2$ , висота 4 м. Розміри вікна  $2 \times 1,2 \text{ м}^2$ , площа тіні  $0,33 \text{ м}^2$ , подвійне скління. Вікна без сонцезахисних пристроїв. Атмосфера району – незабруднена. Кількість робочих місць 6: 4 жінки та 2 чоловіки. Освітлення здійснюється за допомогою люмінесцентних ламп, загальна потужність яких в приміщенні складає 1,75 кВт. Температура в приміщенні складає  $38 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Визначаємо значення прямої ( $q_{в.п.}$ ) та розсіяної ( $q_{в.р.}$ ) сонячної радіації о 18 годині:

$$q_{в.п.} = 344 \text{ ккал}/(\text{год} \cdot \text{м}^2)$$

$$q_{в.р.} = 95 \text{ ккал}/(\text{год} \cdot \text{м}^2)$$

Таблиця 4.1 Максимальні значення кількості теплоти прямої ( $q_{в.п.}$ ) та розсіяної ( $q_{в.р.}$ ) сонячної радіації

Показник	Кількість теплоти при заповненні світлових прорізів в залежності від часу доби та орієнтування світлових прорізів, ккал/(год*м <sup>2</sup> )							
	До полудня							
	Пі	ПівнС	Сх	ПівдС	Пів	ПівдЗ	З	ПівнЗ
	Після полудня							
	Пів	ПівнЗ	З	ПівдЗ	Півд	Півд	Сх	Півн
$q_{в.п.}$	80	426	423	344	257	96	-	-
$q_{в.р.}$	64	93	112	95	75	66	56	54

Кількість теплоти, що знаходиться до приміщення через подвійне скління для розрахункової години розраховуємо:

$$Q_{с.пр.} = (q_0 F_n + q_1 F_p) K_{відн} \quad \text{ккал/год} \quad (4.1)$$

де  $q_0$  та  $q_1$  – кількість теплоти, яка надходить до приміщення через світлові прорізи, які опромінюються та не опромінюються прямою сонячною радіацією;

$F_n$  та  $F_p$  – площа заповнення світлового прорізу, яка опромінюється прямою та розсіяною сонячною радіацією відповідно, м<sup>2</sup>;

$K_{відн}$  – коефіцієнт відносного проникнення сонячною радіації через заповнення світлового прорізу.

$$q_0 = (q_{в.п.} + q_{в.р.}) K_1 K_2 \text{ ккал/(год*м}^2) \quad (4.2)$$

Площа віконного прорізу, яка опромінюється сонячною радіацією складає:

Площа віконного прорізу, яка опромінюється сонячною радіацією складає:

$$F_{о.с.} - F_p \quad (м^2) \quad (4.3) \quad F_{пр} =$$

Таблиця 4.2 Коефіцієнт  $K_1$ , який враховує затінення скління світлових прорізів перепльотами та забруднення атмосфери

Скління	Значення коефіцієнту для світлових прорізів $K_1$ та атмосфери		
	Незабрудненої (незалежно від опромінення)	Забрудненій в промислових районах	
		Які опромінюються сонцем в розрахункову годину	Які в розрахункову годину перебувають в тіні
Одинарне без перепльотів	1	0,75	1,75
Подвійне без перепльотів	0,9	0,68	1,58

Таблиця 4.3 Коефіцієнт  $K_2$ , який враховує забруднення скла

Забруднення скла	Значення коефіцієнту
Значне	0,85
Помірне	0,9
Незначне	0,95
Чисте скло	1

Загальна кількість теплоти, яка надходить до приміщень через віконний проріз, визначається формулою:

$$Q_{с.пр.} = (q_0 F_n + q_1 F_p) K_{відн} \quad \text{ккал}/(\text{год} \cdot \text{м}^2) \quad (4.4)$$

$K_{відн}$  - коефіцієнт відносного проникнення сонячної радіації через заповнення світлового прорізу. При одинарному склінні  $K_{відн} = 0,9 \dots 1,0$ ; при подвійному  $K_{відн} = 0,8 \dots 0,9$ .

Виділення теплоти від штучного освітлення розраховують за формулою:

$$Q_{осв} = 860 * n * N_{осв} \quad \text{ккал}/\text{год} \quad (4.5)$$

де  $n$  – коефіцієнт переходу електричної енергії в теплову; для люмінесцентних ламп  $n = 0,5$ ;

$N_{\text{осв}}$  – сумарна потужність джерел освітлення, кВт.

При розрахунках слід пам'ятати правила переведення енергетичних одиниць:

$$1 \text{ кВт} = 860 \text{ ккал/год};$$

$$1 \text{ ккал/год} = 1,163 \text{ Вт};$$

$$1 \text{ Вт} = \text{Дж/с};$$

Розрахунок виділеної теплоти людьми, відповідно до табл.4.4, за умовою, що в приміщенні знаходяться 2 чоловіки, та 4 жінки, температура в приміщенні  $38 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Таблиця 4.4 Кількість теплоти, яка виділяється дорослими людьми (чоловіками)

Кількість теплоти, ккал/год, яка виділяється однією людиною при температурі повітря в приміщенні, $^{\circ}\text{C}$					
10	15	20	25	30	35
130	105	85	55	35	5

$$Q_{\text{л}} = 5*2+5*4*0,85 = 27 \text{ ккал/год} \quad (4.6)$$

Загальна кількість теплоти в розрахункову годину в липні, яку необхідно відвести за допомогою кондиціонування, визначається сумою теплоти джерел тепло надходження:

$$Q_{\text{заг}} = Q_{\text{спр}} + Q_{\text{осв}} + Q_{\text{л}} = 642,4 + 752,5 + 27 = 1421 \text{ ккал/год.} \quad (4.7)$$

Оскільки площа приміщення складає  $35 \text{ м}^2$ , то найбільш доцільним є використання кондиціонера типу COOPER&HUNTERCH-S12LHA з холодопродуктивністю  $3100 \text{ ккал/год}$ . Тоді, за формулою (5.8) знаходимо

час, який необхідний для охолодження приміщення за допомогою цього кондиціонера:

$$\begin{aligned} \tau &= C * \gamma * V * (t_{\text{вид}} - t_{\text{норм}}) / 3600 * 1,163 * Q_{\text{конд}} = \\ &= 1000 * 1,2 * 140 * (27 - 22) / 3600 * 1,163 * 3100 = 0,0647 \text{ год.} \end{aligned} \quad (4.8)$$

де  $C$  – масова теплоємність припливного повітря (складає 1000 Дж/кг °С);

$\gamma$  – густина припливного повітря (складає 1,2 кг/м<sup>3</sup>);

$V$  – об'єм приміщення, м<sup>3</sup>;

$t_{\text{вид}}$  – температура повітря, що складається з приміщення, °С;

$t_{\text{норм}}$  – нормована (оптимальна) температура в приміщенні, яку необхідно досягти шляхом кондиціонування (прийняти ріною 22 °С);

ж) З метою організації нормованого освітлення виробничого приміщення доцільним є використовувати систему загального штучного освітлення, що поєднане із природним освітленням.

Нормоване освітлення складає 300 люкс.

До складу системи входять люмінесцентні лампи моделі ЛД 40-60, встановлені у світильники типу ЛПП.

#### 4.4 Заходи з пожежної безпеки

з) Для попередження пожеж передбачається використовувати первинні засоби пожежогасіння. До них відносяться: вогнегасники, пожежний інвентар (покривала з негорючого полотна, ящика з піском, бочки з водою, пожежні відра, совкові лопати, ломи, сокири тощо), системи автоматичного пожежогасіння.

Первинні засоби пожежогасіння, в залежності від категорії приміщень,

можуть розташовуватись як окремо, так і в складі пожежних щитів.

Також необхідно періодично проводити протипожежні інструктажі, навчання та тренування персоналу.

Визначення категорії приміщення в конструкторському бюро

За вибухо-пожежною небезпекою приміщення й будівлі поділяють на п'ять категорій: А,Б,В,Г,Д.

Встановлення категорії приміщення виконується шляхом послідовної перевірки належності приміщення до категорій від найвищої (А) до найнижчої (Д) з урахуванням характеру технологічних процесів і пожежо-небезпечних властивостей речовин, що в них застосовується, з метою виявлення можливих обставин і причин виникнення вибухів і пожеж та їх наслідків.

Приймаємо категорію Д, так як ця категорія більш підходить по характеристиці речовин і матеріалів, що зберігаються в приміщенні, а саме знаходяться незаймісті речовини і матеріали в холодному стані, а також кабельні електропроводки до устаткування, окремі предмети меблів на місцях.

#### Визначення класу пожежі

Залежно від агрегатного стану й особливостей горіння різних горючих речовин й матеріалів пожежі за ДБНВ.1.1.7-2002 «Пожежна безпека об'єктів будівництва» поділяються на відповідні класи та підкласи:

- клас А – пожежі твердих речовин, переважно органічного походження, горіння яких супроводжується тлінням (деревина, текстиль, папір);

- клас В – пожежі горючих рідин або твердих речовин, які розтоплюються;

- клас С – пожежі газів;

- клас D – пожежі металів та їх сплавів;

- клас E (додатковий) – пожежі, пов'язані з горінням електроустановок.

Обираємо клас E (додатковий) пожежі, пов'язані з горінням електро

установок.

### Вибір типу та визначення необхідної кількості первинних засобів пожежогасіння

Визначення видів та кількості первинних засобів пожежогасіння слід проводити з урахуванням фізико-хімічних та пожежо-небезпечних властивостей горючих речовин, їх взаємодії з вогнегасними речовинами, а також розмірів площ виробничих приміщень, відкритих майданчиків та установок.

Необхідну кількість первинних засобів пожежогасіння визначають окремо для кожного поверху та приміщення, а також для майданчиків та установок.

Для виробничих приміщень правила розташування та вибору засобів пожежогасіння є такими:

Пожежний інвентар з пожежним інструментом і вогнегасниками розміщується на спеціальних пожежних щитах (стендах). Такі щити (стенди) відповідно до "Правил пожежної безпеки в Україні" встановлюють на території об'єкта з розрахунку один щит (стенд) на площу 5000 м<sup>2</sup>. До комплекту засобів пожежогасіння, які розміщують на стенді, слід включити: вогнегасники – 3 шт.; ящик із піском – 1 шт.; пожежне покривало розміром 2×2 м – 1 шт.; гаки – 3 шт.; лопати – 2 шт.; ломи – 2 шт.; сокири – 2 шт. Ящик із піском, який є елементом конструкції пожежного щита (стенда), повинен мати місткість не менше 0,1 м<sup>3</sup> та виключати потрапляння в нього опадів.

Серед первинних засобів пожежогасіння особливе місце займають вогнегасники, які відзначаються високою ефективністю дії.

Вибір типу та визначення потрібної кількості вогнегасників здійснюється згідно вогнегасної здатності вогнегасників, граничної площі, класу пожежі горючих речовин та матеріалів у захищуваному приміщенні, або на об'єкті (стандарт ISO 3941–77). Крім перерахованих

параметрів береться до уваги також категорія приміщень за вибухопожежною та пожежною небезпекою.

Вибір типу вогнегасника (пересувний чи переносний) зумовлений розмірами можливих осередків пожеж; у разі збільшених їх розмірів рекомендується використовувати пересувні вогнегасники.

Відстань від можливого осередку пожежі до місця розташування вогнегасника не має перевищувати: 20 м – для громадських будівель та споруд; 30 м – для приміщень категорій А, Б, В (горючі гази та рідини); 40 м – для приміщень категорій В, Г; 70 м – для приміщень категорії Д.

Для гасіння великих загорянь у приміщеннях категорій А, Б, В застосовують стаціонарні установки водяного, газового, хімічного та повітрянопінного гасіння.

#### 4.5 Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях

к) Інженерно-технічні заходи, спрямовані на підвищення стійкості виробничих об'єктів до впливу ударної хвилі.

Ударною хвилею називається область різкого стиску середовища, що поширюється у вигляді сферичного шару від місця вибуху з надзвуковою швидкістю. Ударні хвилі класифікуються в залежності від середовища поширення. Ударна хвиля в повітрі виникає за рахунок передачі стиснення і розширення шарів повітря. Зі збільшенням відстані від місця вибуху хвиля слабшає і перетворюється на звичайну акустичну. Хвиля при проходженні через дану точку простору викликає зміни в тиску, що характеризуються наявністю двох фаз: стиснення та розширення. Період стиснення настає відразу і триває порівняно невеликий час в порівнянні з періодом розширення. Руйнівна дія ударної хвилі характеризують

надлишковий тиск у її фронті (передній межі), тиск швидкісного напору, тривалість фази стиснення.

Вражаюче дія ударної хвилі характеризується величиною надлишкового тиску. Надмірний тиск – це різниця між максимальним тиском у фронті ударної хвилі і нормальним атмосферним тиском перед ним. При надлишковому тиску 20-40 кПа незахищені люди можуть одержати легкі поразки (легкі забиті місця і контузії). Вплив ударної хвилі з надлишковим тиском 40-60 кПа призводить до поразок середньої важкості: втраті свідомості, ушкодженню органів слуху, сильним вивихів кінцівок, кровотечі з носа і вух. Важкі травми виникають при надлишковому тиску понад 60 кПа. Вкрай важкі поразки спостерігаються при надлишковому тиску понад 100 кПа. Ударна хвиля ядерного вибуху може на значній відстані від центра вибуху завдавати поразки людям, руйнувати споруди і ушкоджувати бойову техніку. Ударна хвиля являє собою область сильного стиснення повітря, що розповсюджується з великою швидкістю у всі сторони від центра вибуху.

Швидкість поширення її залежить від тиску повітря у фронті ударної хвилі; поблизу центра вибуху вона в декілька разів перевищує швидкість звуку, але із збільшенням відстані від місця вибуху різко падає. Вражаюча дія ударної хвилі на людей і руйнуючу дію на бойову техніку, інженерні споруди і матеріальні кошти передусім визначаються надмірним тиском і швидкістю рушення повітря в її фронті. Незахищені люди можуть, крім того поранитися осколками скла, що летять з величезною швидкістю і обломками будівель, що руйнуються, падаючими деревами, а також частинами бойової техніки, що розкидаються, камінням і іншими предметами, що приводяться в рушення швидкісним натиском ударної хвилі.

Найбільші

непрямі поразки будуть спостерігатися в населених пунктах і в лісі; в цих випадках втрати військ можуть виявитися більшими, ніж від безпосередньої дії ударної хвилі. Ударна хвиля здатна завдавати поразки і в

закритих приміщеннях, проникаючи туди через щілини і отвори. Поразки, що наносяться ударною хвилею, поділяються на легкі, середні, важкі і надто важкі. Легкі поразки характеризуються тимчасовим пошкодженням органів слуху, загальною легкою контузією, ударами і вивихами кінцівок. Важкі поразки характеризуються сильною контузією всього організму; при цьому можуть спостерігатися пошкодження головного мозку і органів черевної порожнини, сильна кровотеча з носа і вух, важкі переломи і вивихи кінцівок.

Механічне вплив ударної хвилі оцінюється за ступенем руйнувань, викликаних дією хвилі (виділяються слабке, середнє, сильне і повне руйнування). Енергетичне, промислове і комунальне обладнання в результаті дії ударної хвилі може отримати пошкодження, також оцінюються за їх тяжкості (слабкі, середні і сильні). Вплив ударної хвилі може призвести також до пошкоджень транспортних засобів, гідровузлів, лісових масивів. Як правило, шкода, яка завдається впливом ударної хвилі, дуже великий, він наноситься як здоров'ю людей, так і різним спорудам, устаткуванню і т.д.

## 5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

### 5.1 Розрахунок капітальних вкладень в основні фонди

Економічна частина розраховується в дипломному проекті відділення термообробки деталей при впровадженні нових технологічних процесів.

Розрахунок капітальних вкладень в основні фонди. До складу основних фондів відділення входять:

- а) будівля;
- б) виробниче обладнання;
- в) інструменти та пристосування;
- г) виробничий і господарський інвентар.

Внутрішній об'єм відділення визначають за формулою:

$$V=1,1 \cdot F \cdot h=1,1 \cdot 3285 \cdot 10=36135 \text{ м}^3,$$

де  $F$  - внутрішня площа ділянки (по плануванню),  $\text{м}^2$ ;

$h$  – висота споруди.

$$K_{\text{об}}=36135 \cdot 230=8311050 \text{ грн.}$$

Капітальні вклади в обладнання ( $K_{\text{об}}$ ) визначають як суму балансової вартості різних видів обладнання:

$$K_{\text{об}}=K_{\text{о.т.}}+K_{\text{о.е.}}+K_{\text{о.п.т.}}+K_{\text{о.к.у.}}$$

де  $K_{\text{о.т.}}$ ,  $K_{\text{о.е.}}$ ,  $K_{\text{о.п.т.}}$ ,  $K_{\text{о.к.у.}}$  - балансова вартість відповідно технологічного, енергетичного, підйомно-транспортного устаткування, контрольно - вимірювального і регулюючих приладів, грн. Дані вихідних даних отримано з методичних вказівок до лабораторних робіт з дисципліни «Наукові основи вибору матеріалів та технологій» 2006р. ЗНТУ. Прайс-лист на термічне обладнання, матеріали.

Розрахунки балансової вартості обладнання зводяться в таблицю 5.1.

Таблиця 5.1 - Балансова вартість виробничого обладнання

Обладнання	Марка	Кількість обладнання, од.		Коефіцієнт використання обладнання	Балансова вартість, грн		Потужність встановлених двигунів, кВт	
		Розрахунок	Прийнята		Один.	Усього	Усього	Один.
1. Технологічне обладнання								
Піч для гартування	СТЗ12.7 0.4/12	4,196	5	0,8392	3924 40	1962200	250	50
Піч для старіння	СТЗ12.7 0.4/9	8,69	9	0,96	2805 00	2524500	450	50
Усього						4486700		
ТЗВ 10%						448670		
Монтаж 10%						448670		
Усього						5384040		
Енергетичне обладнання						538404		
Підйомно-транспортне обладнання						323042,4		
Контрольно-вимірвальне обладнання						1076,808		
Усього						6246563, 208		

Вартість інструментів приймається в розмірі 3% від балансової вартості технологічного обладнання і становить 161521,2 грн.

Вартість виробничого інвентарю приймається у розмірі 2% від балансової вартості виробничого обладнання і становить 107680,8 грн.

Склад основних фондів наведено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 - Склад і структура основних фондів

Назва груп основних фондів	Початкова балансова вартість, тис. грн.	Відсоток до підсумку	Норма амортизації, %	Сума річної амортизації тис. грн.
1.Будівля	8311,05	56,05	2	166,221
2.Обладнання	6246,563208	42,13	3,34	208,635
3.Інструмент	161,5212	1,09	14,3	23,097
4.Виробничий і господарський інвентар	107,6808	0,73	14,3	15,398
Усього	14826,8152	100		413,351

Норма амортизації розраховується лінійним методом пропорційно строку експлуатації: будівля – 50 років; обладнання – 30 років; інструменти, виробничий і господарський інвентар – 7 років.

## 5.2 Матеріальне забезпечення

До найважливіших допоміжних матеріалів, які використовуються на технологічні цілі, відносяться: гартівна олія, аргон, солі, та інші.

До допоміжних матеріалів для утримання устаткування відносяться: жароміцні сплави для виготовлення пристроїв, піддонів, корзин.

Розрахунки основних (технологічних) і допоміжних матеріалів зведено в таблицю 5.3.

Таблиця 5.3 – Розрахунок витрат основних і допоміжних матеріалів

Найменування матеріалів	Витрат матеріалів			
	На 1 тону деталей, кг	На програму, т	Ціна за тону, грн..	Вартість на програму, тис. грн.
На технологічні цілі				
2. Азот	50-100	85876,97	258	23607, 68
3. Вода	5-10	1310	358(за 1000 м <sup>3</sup> )	59725,14
Усього				83332,82
ТЗВ 10%				8333,28
Усього				91666,1

### 5.3 Праця і заробітна плата

Розрахунок чисельності працюючих. Чисельність працюючих розраховується за наступними нормами: чисельність, трудомісткість, обслуговування. Метод розрахунку за нормами чисельності використовується для визначення чисельності робітників, що виконують роботи по керуванню печами, машинами та контролю за технологічним процесом.

Явочна чисельність робітників:

$$R_{я} = \sum n_i * H_i * S_i$$

де  $S_i$  – кількість змін роботи обладнання;

$n_i$  – кількість обладнання і-го типу, шт.;

$H_i$  – норма чисельності обслуговування робітників для обслуговування одиниці обладнання, чол.;

Явочна чисельність робітників приведена в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 - Явочна чисельність робітників

Операція	Обладнання	Кількість обладнанн я	Норма обслуговування (одиниць устаткування на 1 робітника в зміну)	Кількість робітників в в 1 зміну	Кількість змін роботи обладнанн я
Гартування	СТЗ - 12.70.4/12	5	3	2	3
Старіння	СТЗ - 12.70.4/9	9	3	3	3
Усього		14	6	5	6

$$R_{я}=2*3+3*3=15 \text{ (чол.)}$$

На основі встановленої явочної чисельності виробничих робітників розраховується їх спискова чисельність за формулою:

$$R_{сп.}=R_{я} / K_{сп}$$

де  $R_{сп.}$  – спискова чисельність виробничих робітників, чол.;

$K_{сп}$  – коефіцієнт, який показує співвідношення дійсного річного фонду часу робітника до номінального, дорівнює 0,9.

Він означає, що ~ 10% спискової чисельності відсутні на роботі із-за відпусток, за хворобою або за іншими поважними причинами

$$R_{сп.}=15/0,9 = 17 \text{ (чол.)}$$

Чисельність допоміжних робочих, інженерно-технічних працівників (ІТП), спеціалістів визначається за нормами обслуговування термічного відділення. Зведену чисельність працівників наведено в таблиці 5.5.

Розрахунок фонду заробітної плати. Уся сума заробітної плати, виплачувана працівникам відділення (без премії з фонду матеріального споживання), утворює фонд заробітної плати. Цей показник розраховують окремо по категоріях працюючих і в цілому по відділенню. Річний фонд заробітної плати складається з тарифного фонду (чи окладу) і додаткової заробітної плати.

Таблиця 5.5 – Зведена чисельність працюючих за категоріями

Категорія персоналу	Чисельність працюючих, чол.	% до спискової чисельності основних виробничих робітників	% від усієї чисельності
1. Робітники, усього:	25		77,15
виробничі	17	100	
допоміжні	8	42,10	
2. ІТП	5	26,31	14,28
3. Спеціалісти	3	15,80	8,57
Усього за п.1,2,3	33		100

Тарифний фонд заробітної плати робітників визначається за формулою:

$$Z_T = \sum C_i * \Phi_d * R_i,$$

де  $C_i$  – годинна тарифна ставка  $j$ -робітника, год.;

$\Phi_d$  – дійсний річний фонд часу робітника, год.;

$R_i$  – чисельність робітників, чол.

Розрахунок тарифного фонду заробітної плати робітників зведений у табл.5.6.

Таблиця 5.6 – Розрахунок тарифного фонду заробітної плати робітників

Категорія робітників, професія	Розряд роб-ка	Чисельність роб-ків, чол.	Дійсний річний фонд часу, год.	Годинна тарифна ставка, год.	Тарифний фонд заробітної плати, грн.
1	2	3	4	5	6
1. Виробничі роботи					
1.1 Терміст на печач	5	15	71428	50	3571400
1.2 Рихтувальник	4	4	35200	40	1408000
Усього		19			4979400

Фонд додаткової заробітної плати робітників включає премії і доплати. Сума премій визначається укрупнено, для виробничих робітників у розмірі

40 %:

$$ЗД = ЗО \cdot \frac{K_d}{100} = 4979400 \cdot 0,4 = 1991760 \text{ грн.}$$

де  $K_d$  – процент додаткової заробітної плати.

#### 5.4 Собівартість термообробки

Собівартість термообробки розраховується по наступним калькуляційним статтям витрат:

1. Допоміжні матеріали на технологічні цілі;
2. Паливо і енергія на технологічні цілі;
3. Основна заробітна плата виробничих робітників;
4. Додаткова заробітна плата виробничих робітників;
5. Відрахування на соціальне страхування виробничих робітників;
6. Відрахування на утримання і експлуатацію устаткування;
7. Загальновиробничі витрати;
8. Адміністративні витрати;
9. Витрати на тару

Стаття 1. Вартість допоміжних матеріалів представлені в таблиці 6.3 і складає 934,626 тис. грн..

Стаття 2. Витрати на технологічну електроенергію:

$$C_{TE} = H_e \cdot O_r \cdot C_e$$

де  $H_e$  – норма витрат електроенергії на технологічні цілі, (кВт год.)/т;

$O_r$  – річна виробнича програма, т/рік;

$C_e$  – ставка за 1 кВт год. спожитої електроенергії

$C_e = 2,75$  грн/(кВт·год.).

$$C_{те} = 450 * 1310 * 2,75 = 1621125 \text{ грн}$$

Стаття 3. Основна заробітна плата робітників 4979,4 тис. грн.

Стаття 4. Додаткова заробітна плата виробничих робітників 1991,8 тис. грн.

Стаття 5. Відрахування на соціальні заходи являють собою форму перерозподілу доходу на фінансування суспільних потреб, розраховуються згідно діючого законодавства і складають 22% від фонду оплати праці. Відрахування на соціальні заходи розраховуються за формулою:

$$BC = (ZO + ЗД) \cdot \frac{K_{bc}}{100} = (4979400 + 1991760) \cdot 0,22 = 1533655 \text{ грн.}$$

$K_{bc}$  – % відрахування на соціальні заходи.

Розрахунок витрат на утримання і експлуатацію устаткування

Ця стаття (стаття 6) є комплексною і визначається по окремому кошторису (табл. 5.7):

$$ВУЕО = 500\%ZO = 5 * 4979400 = 24897000 \text{ грн.}$$

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

$$ЗВВ = ZO \cdot \frac{\alpha}{100} = 4979400 * 4 = 1917600 \text{ грн.}$$

де  $\alpha$  – % загальновиробничих витрат.

Таблиця 5.7 – Кошторис витрат на утримання і експлуатацію устаткування

Найменування статей
1. Експлуатація обладнання: а) силова енергія; б) допоміжні матеріали
2. Заробітна плата допоміжних робітників, які обслуговують обладнання
3. Амортизація обладнання та інструменту
4. Знос малоцінних інструментів і пристосувань
5. Інші витрати
Усього 24897000 грн

Таблиця 5.8 – Кошторис загальновиробничих витрат

Найменування статей
1. Утримання цехового персоналу: а) ІТП
б) допоміжні робітники, які не зайняті обслуговуванням устаткування
2. Утримання будинків і інвентарю: а) електроенергія для освітлення
б) опалення
в) вода на побутові потреби
г) допоміжні матеріали
3. Поточний ремонт будинків і інвентарю
4. Амортизація будинків і інвентарю
5. Витрати на іспити, дослідження, раціоналізацію
6. Охорону праці
7. Знос малоцінного інвентарю
8. Інші витрати
Усього 19917600грн.

Адміністративні витрати вміщують витрати, пов'язані з утриманням адміністративно-управлінського персоналу підприємства, а також утриманням та експлуатацією основних засобів загального виробничого призначення, охорону праці, техніку безпеки персоналу та інші. Адміністративні витрати складають в середньому 400% від основної заробітної плати основних виробничих робітників та розраховуються за формулою:

$$AB = 30 \cdot \frac{\beta}{100} = 4979400 \cdot 4 = 19917600 \text{ грн.}$$

де  $\beta$  – % адміністративних витрат, 400%.

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

$$BЗ = C_v \cdot \frac{\gamma}{100} = 148524300 \cdot \frac{2}{100} = 2970486 \text{ грн.}$$

де  $C_v$  – собівартість виробнича, грн.;

$\gamma$  – % витрат на збут .

Калькуляція собівартості продукції складається за формою табл. 5.9.

Економічний ефект від впровадження нової технології термообробки розраховується за такою формулою:

$$E = (C_6 \cdot K) - C_n = (113380 \cdot 1,4) - 163050 = -4318 \text{ грн./т;}$$

Де  $C_6$  – собівартість базового виробу, грн./т;

$C_n$  – собівартість нового виробу, грн./т;

$K$  – коефіцієнт експлуатаційного ресурсу (коефіцієнт приведення).

Таблиця 5.9 – Собівартість обробки в термічному відділенні термічного цеху

Найменування калькуляційних статей витрат	По проекту			
	На 1 т, грн.	%	Усього, тис. грн.	%
1	2	3	4	5
1. Допоміжні матеріали на технологічні цілі	69.97	61.72	91666.10	61.72
2. Технологічна енергія	1.24	1.09	1621.10	1.09
3. Основна заробітна плата виробничих робітників	3.80	3.35	4979.40	3.35
4. Додаткова заробітна плата виробничих робітників	1.52	1.34	1991.80	1.34
5. Відрахування на соціальне страхування виробничих робітників	1.17	1.03	1533.70	1.03
6. Витрати на утримання і експлуатацію устаткування	19.01	16.76	24897.00	16.76
7. Загально-виробничі витрати	1.46	1.29	1917.60	1.29
8. Адміністративні витрати	15.20	13.41	19917.60	13.41
Σ Собівартість обробки	113.38	100.00	148524.30	100.00

Таким чином, після економічних розрахунків визначено, що собівартість термообробки дисків дещо підвищиться, проте з огляду на те, що запропонована термообробка приведе до зростання експлуатаційних властивостей дисків очікується збільшення їх міжремонтного періоду і економічний ефект буде отримано на цьому.

Обсяг виробництва при незмінній вартості матеріальних і трудових ресурсів збільшується тільки в результаті зниження собівартості.

Розробка плану організаційно-технічних заходів щодо використання внутрівиробничих резервів ґрунтується на результатах аналізу їхніх джерел і факторів, що впливають на техніко-економічні показники. До найбільш важливих джерел резервів варто віднести зниження матеріальних витрат і підвищення продуктивності праці.

З усього різноманіття факторів, що впливають на техніко-економічні показники, до укрупнених груп можна віднести:

- підвищення технічного рівня виробництва;
- поліпшення організації виробництва.

Зниження матеріалоємності, чи матеріальних витрат — одне з найважливіших джерел розвитку економіки.

Продуктивність праці, тобто його результативність і ефективність, виміряється трудомісткістю (часом, витраченим на виробництво одиниці продукції) і виробленням (кількістю продукції, зробленої за визначений проміжок часу). У результаті зниження трудомісткості економія досягається за рахунок зменшення витрат на оплату праці з обліком додаткової заробітної плати і відрахувань на соціальне страхування в розрахунку на одиницю продукції, скоректованих на новий обсяг виробництва.

Для зменшення собівартості необхідно підвищити технічний рівень засобів праці, вдосконалити організацію праці, використовувати орендовані будівлю та обладнання.

## ВИСНОВКИ

Мета даної роботи – дослідження особливостей структури та термічної обробки дисків турбіни з деформівних сплавів на основі нікелюта проектування технології термічної обробки дисків зі сплавів ЭИ698-ВД, ЭК79-ИД, ЭП742-ИД.

В аналітичному розділі вивчені особливості впливу легування та термічної обробки на структуроутворення деформівних нікелевих сплавів та його вплив на експлуатаційні властивості виробів. Також було обрано матеріали та методи дослідження. На основі проведеної оцінки впливу термічної обробки на структуру матеріалу було запропоновано варіанти термічної обробки яка б забезпечувала найкращі співвідношення експлуатаційних властивостей властивостей.

В розділі з охорони праці і навколишнього середовища були проаналізовані потенційні небезпеки в технологічному відділенні механічного цеху машинобудівного заводу та заходи по забезпеченню безпеки.

Робоче приміщення повинно бути оснащено штучним освітленням, яке рівномірно має заповнювати весь простір. В проекті передбачено визначення необхідного світлового потоку світильників для забезпечення нормованого значення мінімальної освітленості робочої площини.

В економічній частині дипломного проекту розрахована кількість працюючих, вартість основних фондів, собівартість розглянутої термічної обробки і заходи по її зменшенню. Найбільш ефективним способом зменшення собівартості є зниження собівартості продукції шляхом впровадження економних технологій виробництва і використання світового досвіду щодо її зменшення.

## ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Кузнецов Н. Д. Обеспечение надежности двигателей для гражданской авиации. *Основные вопросы теории и практики надежности*. М.: Сов. радио, 1975. С. 27-42.
2. Ломберг Б.С., Моисеев С.А. Жаропрочные деформируемые сплавы для дисков ГТД и перспективы их развития. *Авиационные материалы: науч.-технич. сб.* М.: ВИАМ. 1982. С. 119–123.
3. Ломберг Б.С., Моисеев С.А. Жаропрочные деформируемые сплавы для современных и перспективных ГТД. *Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2002: Юбилейный науч.-технич. сб.* М.: МИСИС–ВИАМ. 2002. С. 82–93.
4. Ломберг Б.С., Бакрадзе М.М., Чабина Е.Б., Филонова Е.В. Взаимосвязь структуры и свойств высокожаропрочных никелевых сплавов для дисков газотурбинных двигателей. *Авиационные материалы и технологии*. 2011. №2. С. 25–30.
5. Reed R.C. *The superalloys. Fundamentals and Applications*. Cambridge: University Press, 2006. 372 p.
6. Логунов А.В., Шмотин Ю.Н. Современные жаропрочные никелевые сплавы для дисков газовых турбин (материалы и технологии). М.: Наука и технологии, 2013.-264 с.
7. Pat. 6974 508 USA. Nickel base superalloy turbine disk / T.P. Gabb, J. Gayda, I. Telesman, P.T. Kantzos //publ. date: 13.12.2005.
8. Gayada J., Gabb T.P. Timothy Fatigue Behavior of a Third Generation PM Disk Superalloy. NASA-TM, 2008. 120 p.
9. CuY., CuiC., Harada H., Fukuda T., PingD., MitsuhashiA., KatoK. Development of Ni-Co-Base Alloys for High-Temperature Disk Applications. *Superalloys*. 2008. IMS. P. 53-62.

10. Кишкин С.Т., Строганов Г.Б., Логунов А.В. Литейные жаропрочные сплавы на никелевой основе. М.: Машиностроение, 1987. 112 с.
11. Назаров Е.Г., Масленков С.Б. Термическая обработка аустенитных жаропрочных сталей и сплавов. *Металловедение и термическая обработка металлов*, 1970. № 3. С. 20-31
12. Овсепян С.В. Термическая обработка деформируемых жаропрочных никелевых сплавов для дисков ГТД. *Авиационные материалы и технологии*. 2004. № 1. С. 3-21.
13. Биргер И.А. Надежность и ресурс авиационных газотурбинных двигателей // под ред. АН СССР Г.П. Свищева и И. А. Биргера. М.: Машиностроение, 1969. 537 с.
14. Масленков С. Б. Жаропрочные стали и сплавы : справочник. Москва : Металлургия, 1983. 192 с.
15. Каблов Е. Н., Голубовский Е. Р. Жаропрочность никелевых сплавов : учеб. пособ. Москва : Машиностроение, 1998. 464 с.
16. Суперсплавы 2: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок / по ред. Ч. Т. Симса., Н. С. Столоффа, У. К. Хагеля. Москва : Металлургия, 1995. 384 с.
17. Иванов С. А., Рыбников А. И., Кузнецов В. Г. Влияние длительной эксплуатации на усталостную прочность лопаток газовых турбин. *Металлообработка*. 2006. № 6. С. 68-70.
18. Современные технологии в производстве газотурбинных двигателей / под ред. А.Г. Братухина. Москва : Машиностроение, 1997. 416с.
19. ГОСТ 9454-78 : 1978. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. [Действующий от 1979-01-01]. Изд. офиц. Москва : Издательство стандартов, 1994. 11 с.
20. ГОСТ 1497-84 : 1984. Металлы. Методы испытания на растяжение. [Действующий от 1984-07-16]. Изд. офиц. Москва : Издательство стандартов, 1997. 28 с.

21. ГОСТ 10145-81 : 1981. Металлы. Метод испытания на длительную прочность. [Действующий от 1981-09-02]. Изд. офиц. Москва : Издательство стандартов, 1987. 11 с.

22. ГОСТ 3248-81 : 1981. Металлы. Метод испытания на ползучесть. [Действующий от 1981-07-01]. Изд. офиц. Москва : Издательство стандартов, 1988. 10 с.

23. Круглікова В.В. Методичні вказівки до виконання економічного розділу науково-дослідницьких дипломних проектів для студентів спеціальності : метод. вказ. Запоріжжя : ЗНТУ, 2018. 32 с.

24. Нестеров О.В. Методичні вказівки до виконання розділу «Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях» в магістерських дипломних роботах зі спеціальності 132 Матеріалознавство спеціалізацій «Прикладне матеріалознавство», «Композиційні та порошкові матеріали, покриття» зі спеціальності 136 Металургія спеціалізації «Ливарне виробництво чорних та кольорових металів і сплавів, усіх форм навчання : метод. вказ. Запоріжжя : ЗНТУ, 2018. 40 с.