

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Інженерно-фізичний факультет
(повне найменування факультету)

Кафедра фізичного матеріалознавства
(повне найменування кафедри)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломного проекту (роботи)
Магістр
(ступінь вищої освіти)

на тему: Дослідження можливостей застосування металургії гранул для
виробництва дисків авіаційних двигунів з жароміцного нікелевого сплаву

ЕП741НП
(назва теми)

Виконав: студент ІІ курсу, групи ІФ-212м

Спеціальності 132 Матеріалознавство
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)
Прикладне матеріалознавство

Студент БІЛІОНОК Денис Іванович
(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник ТКАЧ Дар'я Володимирівна
(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент ПАВЛЕНКО Дмитро Вікторович
(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет Інженерно-фізичний
Кафедра Фізичного матеріалознавства
Ступінь вищої освіти Магістр
Спеціальність 132 Матеріалознавство
(код і найменування)
Освітня програма (спеціалізація) Прикладне матеріалознавство
(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Вадим ЮХИМОВИЧ
«21» грудня 2023 року

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

БІЛІОНКА Дениса Івановича
(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи): Дослідження можливостей застосування металургії гранул для виробництва дисків авіаційних двигунів з жароміцного нікелевого сплаву ЕП741НП.

керівник проєкту (роботи) к.т.н., доцент ТКАЧ Дар'я Володимирівна,
(науковий ступінь, вчене звання, ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «__» _____ 2023 року № _____

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 13 грудня 2023 р.

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) Розробити технологію виготовлення авіаційних дисків із порошкового жароміцного сплаву ЕП741НП методом металургії гранул для забезпечення необхідних характеристик, що відповідають технічним умовам.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити

Літературний огляд; Матеріали та методи досліджень; Експериментальна частина; Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях; Економічна частина; Висновок; Перелік посилань, Додаток А; Додаток Б.

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

20 слайдів.

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1	к.т.н., доцент ТКАЧ Дар'я Володимирівна		
2	к.т.н., доцент ТКАЧ Дар'я Володимирівна		
3	к.т.н., доцент ТКАЧ Дар'я Володимирівна		
Охорона праці	к.т.н., доцент НЕСТЕРОВ Олександр Васильович		
Економічна частина	к.т.н., доцент КРУГЛІКОВА Валентина Володимирівна		
НК			

7. Дата видачі завдання «20» вересня 2023 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Ознайомлення з темою дипломного проєкту. Пошук та аналіз відповідної літератури	06.10.2023	
2	Розробка та написання Вступу, Реферату	12.10.2023	
3	Розробка та написання розділу «Літературний огляд»	20.10.2023	
4	Розробка та написання розділу «Матеріали та методи досліджень»	31.10.2023	
5	Розробка розділу «Експериментальна частина»	10.11.2023	
6	Консультація та написання розділу «Охорона праці»	01.12.2023	
7	Консультація та написання розділу «Економічна частина»	01.12.2023	
8	Написання висновків та переліку посилань	06.12.2023	
9	Оформлення дипломного проєкту у відповідності до норм	13.12.2023	

Студент(ка)

_____ (підпис)

Денис БІЛІОНОК

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи)

_____ (підпис)

Дар'я ТКАЧ

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської роботи: 98 с., 21 рис., 17 табл., 3 дод., 29 джерел.

МЕТАЛУРГІЯ ГРАНУЛ, ДИСКИ ТУРБІНИ, ГАРЯЧЕ ІЗОСТАТИЧНЕ ПРЕСУВАННЯ, ТЕРМІЧНА ОБРОБКА, МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ, МІКРОСТРУКТУРА

Проведено дослідження технології виготовлення дисків турбіни методом металургії гранул. Досліджено хімічний склад, структуру та механічні властивості виготовлених дисків. Проведено економічний аналіз та визначено економічний ефект від впровадження даної технології у технологічний ланцюжок виробництва авіаційних двигунів.

Метою роботи є визначення механічних характеристик дисків виготовлених із гранульного сплаву ЕП741НП, оцінка макро- та мікроструктури, хімічного складу.

Наукова новизна роботи полягає у визначенні впливу гранульної технології на структуру та властивості авіаційних дисків турбіни й встановленню даних, котрі свідчать, що гранульні диски володіють підвищеними короткочасними властивостями, жароміцністю та опором малоцикловій втомі, тим самим забезпечуючи більший ресурс роботи двигуна в цілому й відповідний економічний ефект.

Практична цінність результатів роботи полягає в тому, що виготовлення авіаційних дисків методом металургії гранул дозволяє отримувати суттєвий економічний ефект від їх впровадження у виробництво авіадвигунів, й, відповідно, збільшувати тривалість міжремонтного обслуговування та зменшувати кількість циклів ремонту двигуна до повної заміни дисків при

закінчені ресурсу роботи. Покращені механічні властивості дозволяють отримати високий запас конструктивної міцності дисків турбіни авіаційного двигуна.

ЗМІСТ

	С.
Вступ.....	8
1 Літературний огляд	9
1.1 Умови роботи дисків ГТД та вимоги до них.....	9
1.2 Матеріали та технології дисків турбін.....	13
1.2.1 Критерії вибору матеріалів та технологій для виготовлення дисків ГТД.....	13
1.2.2 Хімічний склад гранульних жароміцних нікелевих сплавів та роль легувальних елементів	14
1.3 Технологія виготовлення дисків турбін ГТД методом металургії гранул з жароміцного нікелевого сплаву ЕП741НП	24
1.4 Особливості формування та структура гранул отримуваних за технологією відцентрового розпилення	30
1.4.1 Механізм крапле-утворення.....	30
1.4.2 Охолодження краплі при польоті в інертному газі	32
1.4.3 Кристалізація гранули	33
2 Матеріали та методи досліджень.....	35
2.1 Характеристики матеріалу	35
2.2 Технологія отримання та обробки авіаційних гранульних дисків.....	36
2.3 Методи досліджень властивостей гранульних дисків	40
2.3.1 Визначення хімічного складу	40
2.3.2 Металографічні дослідження.....	41
2.3.3 Визначення механічних властивостей	43
3 Експериментальна частина.....	46

3.1 Дослідження механічних властивостей дисків	49
4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	51
4.1 Аналіз потенційних небезпек	51
4.2 Заходи забезпечення безпеки.....	52
4.3 Заходи забезпечення виробничої санітарії та гігієни праці.....	58
4.4 Заходи з пожежної безпеки	60
4.5 Заходи по забезпеченню безпеки у надзвичайних ситуаціях.....	61
5 Економічна частина	62
Висновки	72
Додаток А.....	77
Додаток Б.....	78

ВСТУП

Перспективні матеріали для дисків є основною частиною створення та роботи авіадвигунів, а також мають найвищий клас відповідальності. Оснащення ГТД високоміцними жароміцними матеріалами дозволяє покращувати такі показники двигунів, як потужність та ресурс роботи, тим самим підвищуючи ефективність та надійність авіаційної техніки.

Ріст світового виробництва деталей способом металургії гранул складає приблизно 10% в рік. Важливі переваги даної технології в тому, що вона забезпечує отримання коефіцієнту використання матеріалу на рівні 95%, високу рівномірність хімічного складу та відповідність властивостей. Для отримання покращених характеристик дисків турбін використовується технологія виготовлення шляхом металургії гранул. Вона дає можливість покращувати міцність та пластичність матеріалів, мікроструктуру виробів та має кращі характеристики ніж литі вироби. Для виробництва дисків використовують перспективну технологію гарячого ізостатичного пресування для отримання заготовок дисків з гранульних сплавів, а також використовують перспективні технології виготовлення якісних гранульних сплавів за допомогою плазмового плавлення та відцентрового розпилення литої пруткової заготовки, що швидко обертається.

На території України повністю не реалізовано технологічний цикл отримання гранульних дисків, тому в роботі буде розглянуто можливість реалізації повного закритого циклу виготовлення дисків турбін з жароміцного нікелевого сплаву методом металургії гранул на українських авіабудівних підприємствах.

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Умови роботи дисків ГТД та вимоги до них

Під час розробки сплавів для авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД) в першу чергу враховуються особливості умов навантаження деталей в радіальному напрямку. В результаті обертання диску ці навантаження виникають в його тілі безпосередньо та через передачу від лопаток. Обід диску піддається більш жорсткій температурній дії, а також термічним напруженням, довгим статичним та циклічним навантаженням. Додатковий вплив на створення напружень додає суттєве коливання температур. Температурний режим останнього визначається дією повітря, що охолоджує та повітря, що рухається в потоці робочих газів, а також будь-якими витоками робочого потоку в простір над та під ободом диску.

У зв'язку із цим до матеріалів та технологій, що використовуються висувається комплекс вимог, які включають опір високотемпературній повзучості та руйнуванню, високотемпературну міцність та опір росту втомних тріщин, високу міцність при розтягненні в умовах помірних температур, пластичність та стійкість до впливу концентраторів напружень, а також опір мало цикловій втомі.

В роботі [1] вказується, що при проектуванні дисків необхідно забезпечувати достатній запас міцності на розрив для будь-яких можливих умов експлуатації, через те, що руйнування диску завжди призводить до катастрофічних наслідків та не може бути локалізовано в межах корпусу турбіни чи компресору.

Ще одна вимога до дисків ГТД – забезпечення мінімальної швидкості руйнування диску від перегріву. Його конструкція повинна надійно здійснювати передачу крутного моменту з диску на вал. Зазвичай ці елементи диску є найбільш напруженими та важкими у забезпеченні необхідного циклу роботи. Крім того, висока надійність та довговічність з позиції стійкості та міцності до циклічних навантажень повинні бути реалізовані в замковому з'єднанні ободу диску з лопатками. Гранульний диск зображено на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 - Диск ГТД зі сплаву ЕП741НП виготовлений методом металургії гранул.

Забезпечення необхідного запасу міцності диску за малоцикловою втомою є однією з найважливіших задач при розробці матеріалу для диску, технології виробництва та термічної обробки, а також при його конструюванні.

Матеріал диску повинен володіти високим рівнем міцності при багато цикловому втомному навантаженні, яке, як показано в роботі [2], обумовлено високочастотними збуреннями потоку, що виникає через нестаціонарну взаємодію лопаток статора та ротора.

При наближенні лопатки робочого колеса до соплового апарату відбувається звуження проточної частини [2], потік прискорюється, а тиск робочого тіла падає. При взаємному розходженні лопаток ротора та статора відбувається зменшення конфузорності проточної частини, потік гальмується, тиск росте. Таке взаємне зближення та розходження лопаток сусідніх решіток носить періодичний характер. Така періодична зміна поля потоку веде до нестаціонарного навантаження лопаткових вінців.

Термічні напруження в диску з'являються не тільки від дії стаціонарних нерівномірних температурних полів, але й при змінних режимах роботи двигуна (пуск та зупинка двигуна, збільшення або зниження оборотів з ціллю регулювання тяги).

Головна вимога, що висувається до сучасних газотурбінних двигунів, заснована на забезпеченні їх високою конкурентоздатністю, одним із напрямків досягнення якої є зменшення маси двигуна [4, 5]. Це в свою чергу визначається ефективними конструкторськими рішеннями, а також використанням більш досконалих матеріалів, які повинні задовольняти наступні вимоги.

- Диски повинні надійно працювати протягом усього назначеного ресурсу. Однак в матеріалі в процесі його роботи під навантаженням при високій температурі відбуваються структурні зміни (складу та морфології зміцнювальної γ -фази, карбідів, боридів і т.д., утворення нових фаза разом з тими, що окрихчують, збільшення щільності дефектів кристалічної ґратки – вакансії та дислокації, поява пор, надривів, виникнення корозії). Все це призводить до зниження характеристик міцності матеріалу. В залежності від призначеного при проектуванні ресурсу роботи диску необхідно враховувати зниження характеристик міцності матеріалу, яке буде мати місце в процесі його роботи при заданій температурі. З іншої сторони, легування матеріалу диску повинно здійснюватися таким чином, щоб структурні зміни в ньому при дії високих температур та напружень були б мінімальні.

- Характеристики міцності нікелевих жароміцних сплавів знижуються не тільки в процесі довготривалої роботи при високих температурах, а й при збільшенні самих робочих температур. У сплавів різного рівня та характеру легування вказане зниження показників міцності починає відбуватися при різних температурах, різним також є темп зміни властивостей. Цю обставину також необхідно враховувати як при проектуванні, так і при розробці нових композицій дискових сплавів.

- Сплав для дисків повинен володіти високою міцністю та жароміцністю. Проте присутність в дисках великої кількості концентраторів

напружень потребує достатньо високої пластичності матеріалу. Пластична деформація забезпечує розподілення максимальних напружень, що виникають в місцях їх підвищеної концентрації це й дозволяє зробити навантаження більш рівномірними та підвищити працездатність відповідального вузла.

- Діскові сплави повинні одночасно володіти необхідними властивостями стійкості проти газової корозії, високі тріщино- та ударостійкість та іншими характеристиками.

Високотемпературна газова корозія обумовлена реакцією, що відбувається на поверхні дисків при взаємодії з продуктами згоряння палива – у першу чергу з вільними O_2 , N_2 , H_2 , окислами азоту, а також з'єднаннями на основі натрію, ванадію, сірки та інших елементів. Підвищення температури викликає різку активізацію цих процесів та передчасний вихід з ладу дисків. Для боротьби з такими явищами важливе значення мають: використання палива підвищеної якості, що не містить шкідливі елементи та з'єднання; застосування максимально можливих заходів для недопущення контакту згоряння палива з поверхнею диску; забезпечення підвищеної високотемпературної газової корозійної стійкості та стійкості до сульфідної корозії дискового нікелевого жароміцного сплаву шляхом оптимізації легування.

Ударна в'язкість є одним з важливих критеріїв, що дозволяють оцінити якість металу – ступінь його схильності до крихкого руйнування в умовах обмеженої можливості пластичної деформації. Цей критерій дозволяє також оцінити якість термічної обробки, яка при певних режимах може не тільки забезпечити підвищення міцності, але при цьому привести до окрихчування матеріалу.

Суттєве значення для оцінки працездатності сплаву має критерій тріщиностійкості. Останні дослідження показали, що існують багато причин для виникнення початкової тріщини в диску. У зв'язку з цим для оцінки часу його надійної роботи до руйнування потребували вивчення умови роботи розвитку тріщин та факторів, що гальмують процес розповсюдження тріщин в матеріалі. У 80-х роках 20 століття була розвинена (в першу чергу в США та Англії)

«концепція допустимих пошкоджень», що дозволяю обґрунтовано оцінити безпечний ресурс роботи диску. На швидкість розвитку тріщин впливає величина коефіцієнту інтенсивності напружень у зоні зародженні тріщин, а на супротив руху «в'язкої тріщини» - коефіцієнту в'язкості руйнування.

Існує ще одна важлива особливість, яка існує при роботі з дисковими сплавами. Диск на відміну від зразка для іспитів є доволі габаритною деталлю, що досягає в діаметрі 1000 мм та більше та можуть важити до 100 кг та більше. У ньому (враховуючи складне легування) значно розвинена зональна та дендритна ліквіація. Наявність певної нерівномірності температурних полів в термічних печах, нерівномірність охолодження при термообробці, нерівномірність протікання металу при деформації в різних частинах заготовки може призвести до того, що зеренна структура, розмір, морфологія та кількість зміцнювальних фаз, карбідні, боридні та інші виділення у ободній частині диску, його полотна та ступінчата частина не будуть однакові [10]. Через це різними стають й властивості в різних елементах диску. При цьому навіть в одному елемента властивості в радіальному, осьовому та тангенціальному напрямках також відрізняються.

1.2 Матеріали та технології дисків турбін

1.2.1 Критерії вибору матеріалів та технологій для виготовлення дисків ГТД

Вирішення задач створення перспективного матеріалу для дисків забезпечується оптимізацією системи легування сплавів, що розробляються, технології виготовлення деталей та її заключним етапом – термічною обробкою.

Матеріали дисків ГТД вибираються в залежності від призначення, оскільки, наприклад, військові двигуни працюють в більш жорстких температурних та силових умовах, але протягом більш короткого часу ніж двигуни цивільної авіації. В наш час ціллю розробок в області дискових супер сплавів, що

використовуються в газотурбінних двигунах для перспективних військових силових установок є забезпечення робочих температур не менше 815°C , для громадянських – $700 - 760^{\circ}\text{C}$. Основні експлуатаційні критерії вибору матеріалів та технологій для виготовлення дисків ГТД наведено нижче:

- для частин диску: ободу та полотна необхідна низька повзучість при високотемпературному навантаженні сплаву, високе значення довготривалої міцності, наявність необхідної пластичності та ударної в'язкості, стійкість до дії високих термічних напружень, активний супротив росту втомної та термовтомної тріщини, висока працездатність в умовах дії концентраторів напружень;
- для ступиці необхідні високий рівень міцності та пластичності при середніх температурах, активний супротив росту втомної тріщини в умовах мало циклового навантаження та висока працездатність в умовах дії концентраторів напружень;
- критерії для наступних силових установок:
 - а) громадянських – висока довготривала міцність та низька повзучість при високотемпературному навантаженні, а також стійкість до циклічної втоми й повторному навантаженні;
 - б) військових – пріоритетом є супротив високотемпературній повзучості та термічним навантаженням при задовільній стійкості до циклічної втоми в умовах дії більш високих температур роботи ГТД у порівнянні з громадянськими.
- для технологічності необхідно збільшення інтервалу ($T_S - T_{п.р.}$ γ -фази) та зменшення інтервалу ($T_L - T_S$).

1.2.2 Хімічний склад гранульних жароміцних нікелевих сплавів та роль легувальних елементів

На сьогоднішній день існує три покоління дискових нікелевих жароміцних сплавів. До першого можна віднести сплави типу Nimonic 80, Inconel X750, а також EI435, EI437, вони відрізняються високим вмістом нікелю та відносно низькою об'ємною часткою зміцнювальної γ' -фази (менше 20%). До другого покоління відносяться сплави типу Inconel, Rene 41, Rene 88, Rene 95, Udimet, EP742, EP74, що легуються хромом та кобальтом, а також молібденом, вольфрамом або ніобієм. В цих сплавах вміст зміцнювальної γ' -фази сягає 40 та більше відсотків об'ємної частки.

Третє покоління створених сплавів та тих що ще знаходяться у розробці мають в якості легувальних елементів тантал та вольфрам, а також 1-2% ренію. В них міститься від 45% γ' -фази. В роботі [3] вказується, що компаніями Pratt & Whitney, GE та NASA було проведено спільна робота зі створення дискового сплаву третього покоління для високошвидкісного громадянського літака (High Speed Civil Transport - HSCT), якому було присвоєно марку ME3. Сплав додатково містить тантал [14] та за рахунок легування значною кількістю кобальту має широкий інтервал $\Delta T = T_{\text{свт}} - T_{\text{п.р.}\gamma}$, що дозволяє знизити можливість утворення пористості при нагріві його для гомогенізації до температури вище ніж $T_{\text{п.р.}\gamma}$. Сплав призначений для використання в двигуні фірми GE в якості силової установки літака Boeing 787.

1.2.2.1 Вибір матеріалу для виготовлення гранульних дисків

Велика кількість жароміцних нікелевих сплавів для гранульної металургії, що відрізняються дають змогу аналізу хімічного складу, механічних властивостей та економічної вигідності сплавів. Тому для виготовлення гранульних дисків розглянемо 3 спеціально розроблені сплави, що можна використовувати EI698П, EP741НП та BV750П.

Розглянемо та порівняємо хімічний склад обраних сплавів. Вимоги до хімічного складу гранульних жароміцних нікелевих сплавів відображено у ГОСТ Р 52802-2007. У додатку А наведено хімічний склад гранульних жароміцних нікелевих сплавів. Для виготовлення дисків найкраще підходять сплави EI698П, EP741НП, BV750П.

Розглянемо докладно вплив легувальних елементів на властивості обраних жароміцних нікелевих сплавів.

Алюміній та титан. Аналіз складів сплавів другого та третього покоління показує, що їх більш висока працездатність забезпечується не тільки за рахунок зростання частки цих елементів в матеріалі, а й шляхом збільшення концентрації в них легувальних елементів, які мають високу температуру плавлення на низькі дифузійні характеристики, такі як W, Mo, Ta, Hf, Nb, Re. Вони входять в основному як у склад γ' -фази (Hf, Nb, Ta) так і у γ -матриці (Re, W, Mo). При цьому W та Mo у великій кількості розчинені в обох фазах γ та γ' . В результаті забезпечується значна міцність та структурна термостабільність, покращуються можливості для досягнення оптимальних значень параметрів невідповідності кристалічних ґраток γ - та γ' – фаз та в цілому досягається покращення експлуатаційних характеристик сплавів.

Перевищення сумарного вмісту Al + Ti більше необхідного призводить не тільки до появи недостатньої ефективності γ' – фази та основі $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ евтектичного характеру, але й до росту $T_{\text{п.р.}\gamma'}$ й відповідно до зменшення «вікна» термообробки.

Варто 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 та границі текучості матеріалів цього класу забезпечуються при співвідношенні масових часток $\text{Ti}/\text{Al} \approx 1$ [3, 9, 10]. В обраних сплавах можна побачити наступне співвідношення Ti/Al : EI698П $\approx 1,6$ – співвідношення завищене; EP741НП $\approx 0,35$ – співвідношення занижене; BV750П ≈ 1 – має теоретично найкраще співвідношення Ti до Al.

Титан у порівнянні з алюмінієм активніше впливає на зміцнювальний ефект γ' – фази та зменшення швидкості коагуляції γ' – частинок, але збільшення його концентрації в сплавах робить їх менш стабільними через можливе утворення η -, δ -пластинчастих фазових утворень.

В роботі [8] вказується, що, по-перше, пластинчаста η -фаза (Ni_3Ti) починає виділятися, коли відношення вмісту (в атомних долях) $\text{Ti}/\text{Al} > 1,45$, оскільки співвідношення, у сплаву ЕП698П, $\text{Ti}/\text{Al} < 1,45$ він може мати схильність до виділення пластинчастих фаз. А по друге, навіть при наявності співвідношення Ti/Al близьким до 1 може виникнути локальне виділення пластинчастих фаз $\eta(\text{Ni}_3\text{Ti})$ та $\delta(\text{Ni}_3\text{Nb}, \text{Ta})$ при співвідношенні атомних часток $(\text{Nb} + \text{Ta})/\text{Al} > 0,17$ та по всьому об'єму, якщо це співвідношення перевищує 0,27.

Хром та кобальт. Вміст хрому та кобальту в сплавах, хоча і має тенденцію до деякого зниження все ж залишається достатньо високим. Це обумовлено наступними причинами: вказані елементи забезпечують значну стійкість сплавів в умовах високотемпературної газової корозії; вони мають суттєвий вплив на підвищення працездатності сплавів при взаємодії сульфідних та інших шкідливих з'єднань, що вкрай важливо для усіх газотурбінних двигунів; ці елементи також знижують $T_{\text{п.р.}}$ γ' – фази [10], що покращує технологічність дискових сплавів. В даній роботі наводиться отримання залежності при оптимізації складу сплаву LSHR, яка пов'язує цей важливий технологічний параметр з концентрацією елементів, що мають сильний вплив на нього. Негативний вплив кобальту на величину $T_{\text{п.р.}}$ γ' – фази підтверджується також для області легування нового сплаву NF [6].

Також наявність хрому в сплавах підвищує супротив росту втомним тріщинам. Разом з тим хром присутній в основному у γ' – фазі при ускладненні легування, що пов'язано зі збільшенням об'ємної частки зміцнювальної γ' – фази і відповідно відносним зменшенням величини γ – матриці, та ж сама кількість хрому може призвести до суттєвого збільшення його концентрації γ – фази, що викликає можливе утворення небажаних фаз на основі α -Cr, σ - та μ -фаз, карбідів типу M_{23}C_6 та інше й відповідно зниження механічних характеристик.

Вміст кобальту в складі сплавів підтримується на рівні 13 – 20%. Більш висока концентрація кобальту призводить до додаткового зниження $T_{п.р. \gamma'}$ – фази, що в принципі бажано для розширення технологічного інтервалу. Однак високий вміст кобальту збільшує вартість деталі та може знижувати її супротив високотемпературній повзучості. Якщо вміст кобальту замалий, $T_{п.р. \gamma'}$ може значно зрости, що призводить до утруднення технологічного процесу, оскільки для термообробки буде необхідна більш висока температура. Це в свою чергу пов'язано з використанням більш складного обладнання, але може призвести до активації процесів рекристалізації та укрупнення зерна. Причому у випадку швидкого нагріву вище певної температури виникає термічна пористість за рахунок появи розплавлень карбоборидних евтектичних утворень у локальних об'ємах. Найбільша кількість хрому наявна в сплаві ЕП698П $\approx 14,5\%$, найменша кількість в ЕП741ЕП $\approx 9\%$, при цьому у сплаві ЕІ698П відсутній кобальт, а інші два сплави мають приблизно однаковий його вміст – 15%.

Вольфрам при вмісті 2-4% входить у склад матриці як зміцнювальний елемент, він також входить до складу γ' – фази. Зниження концентрації вольфраму нижче 2% призводить не тільки до зменшення швидкості росту втомної тріщини, але й до збільшення швидкості росту повзучості. У сплаві ЕІ698П вольфрам відсутній у складі. При вмісті вольфраму, що суттєво перевищує 4% відбувається поява мікроструктурної нестабільності, зниження пластичності та підвищення густини сплаву. Сплави ЕП741НП та ВВ750П мають вміст вольфраму на рівні 5,5%.

Молібден є більш дешевим та легким замінником вольфраму, але як твердорозчинний зміцнювач він менш ефективний, при цьому зниження його вмісту менше 3% призводить до суттєвого падіння супротиву повзучості, перевищення допустимого вмісту молібдену веде до зниження стабільності та підвищення його густини. Молібден входить до складу усіх трьох сплавів та його вміст знаходиться на рівні 3%.

В цілому вольфрам та молібден позитивно впливають на властивості нікелевих жароміцних сплавів. Їх гарною властивістю є те, що обидва елементи

входять у склад як γ' – фази (W – в більшій мірі), так і до γ – твердого розчину (в більшій мірі Mo). Таким чином, вони зміцнюють одночасно обидві фази, що покращує характеристики міцності сплаву та термостабільність структури. Вольфрам у порівнянні з молібденом створює великий зміцнювальний вплив, тому він має перевагу. Молібден також є бажаним елементом в дискових сплавах при вмісті в межах 2 – 6%. Він один з найбільш розповсюджених та дешевих металів, що використовується для легування жароміцних сплавів. Сплави, що містять молібден в невеликих кількостях, більш стійкі до сульфідної корозії у порівнянні зі сплавами в яких молібден відсутній [13]. При оптимізації складу нового дискового сплаву RR1000 в якості основного зміцнювального елементу було обрано саме молібден. Аналогічний підхід було реалізовано при створенні сплаву N18, в якому молібден присутній у кількості 6,5 % мас., в той час як вольфрам в його складі відсутній. Разом з тим високі концентрації хрому та молібдену призводять до відсутності структурної стійкості.

Ніобій, підвищує $T_{п.р. \gamma'}$ – фази та зазвичай використовується у кількості не більше 3%. В сплаві ЕП741НП ніобій наявний у складі в концентрації приблизно 2,5%, у двох інших сплавах – 2%. Від є одним з бажаних елементів при легуванні жароміцних сплавів. Ніобій являє собою γ' – утворюючий елемент, який разом з тим в певній концентрації входить у склад γ – твердого розчину та карбідів. Його позитивна роль є не тільки у вдосконаленні γ' - зміцнення, але й в тому, що він зміцнює твердий розчин. А одночасна наявність його в твердому розчині та зміцнювальних фазах, окрім підвищення жароміцності, призводить до зниження схильності сплавів до перебудови внаслідок послаблення дифузійних процесів. Це покращує структурну стабільність та ресурс роботи.

Даний елемент добре впливає на зменшення схильності до зональної ліквідації. При концентрації його в сплаві більше 3% або менше 0,5% відбувається зниження опору повзучості. Наслідком високого вмісту ніобію є надмірний ріст $T_{п.р. \gamma'}$, погіршення технологічності сплаву, ріст густини, зменшення пластичності, стійкості до циклічної втоми та зростання тенденції до хімічної нестабільності сплаву. В роботі [8] вказується, що ніобій володіє більш сильним зміцнювальним

ефектом ніж титан, але його надлишковий вміст негативно впливає на опір розвитку тріщин та пластичність.

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

Особливо позитивний вплив гафнію є на я найбільш важливі характеристики жароміцних сплавів. Як правило, міцність та пластичність взаємно пов'язані протилежним чином, тобто збільшення однієї характеристики призводить до зменшення іншої. Гафній є одним з тих рідкісних елементів, що дозволяє одночасно підвищити міцність та пластичність. Гафній збільшує долю евтектики ($\gamma - \gamma'$) та змінює морфологію карбідів MC, які в більшій мірі набувають форму круглих включень, що приводить до покращення механічних властивостей.

Гафній впливає на морфологію карбідів, що приводить до утворення останніх на межах зерен, в свою чергу це покращує стан меж зерен.

Було встановлено що гафній позитивно впливає на структуру при введенні його у склад дискових жароміцних нікелевих сплавів, що отримуються технологією гранул. Гафній присутній у складі сплавів ЕП741НП та ВВ750П на рівні 0,25%.

При утворенні гранул карбіди, що кристалізують в останню чергу з'являються на поверхні. При консолідації гранул в процесі ГПП карбіди залишаються на поверхні гранул, декоруючи їх межі та визначаючи негативну спадковість сплавів, оскільки навіть після рекристалізації границь гранул, що відбувається в результаті термічної обробки, карбіди залишаються на їх поверхні. Вони значно послаблюють матеріал та є причиною його передчасного руйнування при високотемпературному навантаженні. Введення гафнію забезпечує утворення карбідів при більш високій температурі, ніж T_s . Тому їх концентрація на границях гранул стає суттєво нижче, явище негативної спадковості зникає, а також значення ударної в'язкості (як зазначено в роботі [11]) зростає у 1,5 рази – з 23 до 32 Дж/см². Додавання гафнію до 2% може знижувати швидкість росту втомних тріщин.

Цирконій при вмісті 0,04 – 0,06% підвищує пластичність сплавів, знижує швидкість росту тріщин. Цирконій присутній в жароміцних сплавах в малій кількості. Залежність пластичності від вмісту цирконію в межах 0,005 – 0,05% складна: максимальна пластичність спостерігається при вмісті – 0,01% при більшому або меншому його вмісті пластичність знижується. В сплавах ЕП741НП та ВВ750П цирконій присутній на рівні 0,01%. Спільне мікролегування (цирконій + бор) створює достатньо гарний вплив на властивості сплаву та може підвищувати час до руйнування зразків при дослідях на повзучість в декілька разів.

Ванадій допомагає підвищенню жароміцності, але цей елемент має суттєвий негативний вплив на жаростійкість. Тому вводити його в якості легувального компоненту в сплави необхідно з достатньою обережністю.

Реній має суттєвий позитивний вплив на властивості литих жароміцних нікелевих сплавів. Однак опубліковані результати досліджень його впливу на характеристики міцності дискових сплавів кажуть про те, що при робочих температурах сучасних дисків (650 – 750°C) позитивний вплив цього елемента практично відсутній [6, 7].

Вуглець як відомо, обмежує ріст зерна в процесі термічної обробки. Карбідні частинки круглої форми є додатковими дисперсійними зміцнювачам γ – матриці. При виділенні у вигляді розрізнених включень, вони ефективно гальмують дифузійні потоки крізь границі зерен. Тому вуглець є елементом, що спеціально вводиться до складу таких сплавів на нікелевій основі. Але перевищення його вмісту більше 0,04 – 0,1% може стати причиною суттєвого збільшення швидкості росту втомної тріщини. В жодному зі сплавів вуглець не перевищує вміст, що може призвести до суттєвого збільшення швидкості росту втомної тріщини. В жароміцних нікелевих сплавах утворюються карбіди на основі TiC, що кристалізуються в останню чергу у міждендритних просторах. При невеликому вмісті вуглецю карбіди мають порівняно глобулярну форму, що з'являється на їх місці в результаті перетворення карбіди M_6C та $M_{23}C_6$ також є округлими, через їх невелику кількість відбувається зміцнення сплаву. Але при

більшій їх концентрації вони мають негативний вплив в місцях дії підвищених навантажень, а також при наявності багатократних втомних навантажень.

Бор при введенні його в сплави в незначній кількості утворює бориди, що розташовуються на границях зерен та обмежують їх ріст. Крім того, бор присутній і на міжфазних ($\gamma - \gamma'$) границях покращуючи їх стан тим самим позитивно впливаючи на опір повзучості. Бор – особливий елемент в жароміцних сплавах на нікелевій основі, його радіус (у порівнянні з вуглецем) достатньо великий, щоб не утворювати розчини втілення та одночасно недостатньо великий для утворення розчинів заміщення. В силу вказаних причин бор в сплавах на основі заліза та нікелю завжди розташовується по дефектним місцям ґраток, а саме по границям зерен або фаз [14]. У випадку перевищення вмісту бору вище необхідних значень з'являються тенденції до утворення легкоплавких боридних фаз, термічної пористості та зниженню опору повзучості.

Розглянувши хімічний склад обраних сплавів можна зробити висновок, що найкращий вміст легуючих елементів має BV750П, але й ЕП741НП також має достатньо гарний рівень легуючих елементів у складі, сплав ЕІ698П має меншу кількість легуючих елементів, що позитивно впливають на структуру та властивості виробів.

Також важливою характеристикою для вибору сплаву є його механічні властивості, що отримані шляхом проведення випробувань. Основними характеристиками для вибору сплавів є: σ_b – границя міцності або умовна границя міцності. Це напруження, що відповідає найбільшому зусиллю яке передуює руйнуванню зразка при статичних механічних випробуваннях; $\sigma_{0,2}$ – границя текучості, це напруження, при якому кінцеве подовження досягає заданої величини у 0,2%, границя текучості характеризує напруження при якому відбувається більш повний перехід до пластичної деформації; δ – відносне подовження, яке показує величину подовження матеріалу перед руйнуванням, після руйнування характеризує пластичність матеріалу; ψ – відносне звуження, що є відношенням абсолютного зменшення площі поперечного перетину в шийці на початкову площу, як і відносне подовження характеризує пластичність

матеріалу; КСУ – ударна в'язкість, характеризує здатність матеріалу поглинати відносно швидку механічну енергію в процесі деформації та руйнування під дією ударного навантаження; МЦВ – малоциклова втома, що характеризує руйнування при повторних пружних та пластичних деформаціях, оцінюється у кількості повторних однакових циклів, які витримав матеріал. В таблиці 1.1 наведено порівняння механічних характеристик сплавів EI698П, EP741НП, BV750П із необхідними характеристиками для гранульних дисків, які визначаються технічними умовами.

Таблиця 1.1 – Порівняння механічних характеристик матеріалів з гранульних жароміцних нікелевих сплавів.

Сплав	Механічні властивості при 20°C					Довготривала міцність при 650°C, не менше 100 год	σ_N , при 650°C на базі $5 \cdot 10^3$ циклів
	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	КСУ		
	МПа		%		Дж/см ²		
EI698П	1226	785	14,0	17,0	34,0	706	941
EP741НП	1475	1060	22,6	14,4	66,0	1020	980
BV750П	1471	1060	13,0	15,0	29,4	1080	1080
ТУ	1420	1000	18,0	18,0	39,0	1000	980

Проаналізувавши хімічний склад та основні механічні характеристики порошкових жароміцних нікелевих сплавів можна зробити висновок, що сплав EI698П має недостатню кількість легувальних елементів, що забезпечували б необхідні механічні властивості у відповідності до технічних умов. Сплави EP741НП та BV750П мають достатній хімічний склад для забезпечення гарного рівня механічних властивостей згідно до технічних умов. При виборі сплаву необхідно також спиратися на економічну складову кожного сплаву. Оскільки сплав BV750П знаходить у розробці і вважається новим перспективним сплавом з покращеною структурою та механічними властивостями він має більшу вартість

ніж сплав ЕП741НП, а відповідно і більші витрати на виробництво. Виходячи з наведених даних кращим сплавом для виготовлення дисків турбін можна вважати ЕП741НП. Він буде використаний для подальшого виготовлення авіаційних дисків.

1.3 Технологія виготовлення дисків турбін ГТД методом металургії гранул з жароміцного нікелевого сплаву ЕП741НП

Технологія виробництва дисків турбін з жароміцного нікелевого сплаву ЕП741НП наведено у додатку Б.

Першим етапом технології виготовлення дисків є отримання злитків-електродів за однією з трьох технологій: вакуумно-індукційний переплав + вакуумно-дуговий переплав (ВІП + ВДП); вакуумно-індукційний переплав + електронно-променевий переплав (ВІП+ЕПП); вакуумно-індукційний переплав + вакуумно-дуговий переплав + електрошлаковий переплав (ВІП+ВДП+ЕШП). До отриманих прутків висуваються вимоги за розмірами (діаметр – 79 мм $\pm$ 0,5 мм; довжина – 695 мм $\pm$ 5мм) та за дефектами: пори з діаметром менше 5 мм, довжиною менше 10 мм, відстанню між двома отворами менше 25 мм – допускаються.

Після отримання злитків відбувається виробництво гранул шляхом відцентрового розпилення на установці відцентрового розпилення (типу УВР-9), які засновані на принципі відцентрового розпилення заготовок з використанням в якості нагрівача плазмового струменя, який генерується дуговим плазмотроном.

При нагріві заготовки з торця діаметр плазмового струменя повинен складати 0,3 – 0,4 діаметра заготовки. Так, при розпиленні стрижнів діаметром $(50 - 80) \cdot 10^{-3}$ м діаметр сопла плазмотрона складає $(16 - 22) \cdot 10^{-3}$ м. Для генерування плазмового потоку такого діаметру необхідна сила току близько 1000 А. Якщо,

врахувати, що при цьому анодом є сопло плазмотрона, то для зменшення ерозії електродів треба шукати шляхи зменшення струму плазмотрону.

Для реалізації плазмо-дугового розпилення запропонована наступна схема. Розпиленню піддається заготовка у вигляді циліндра, до краю якого підводиться плазмотрон, при цьому анодом слугує заготовка. За допомогою плазмотрону генерують плазмову дугу 3 та оплавляють торець заготовки, що швидко обертається навколо своєї осі. Частинки розплаву, які видаляються із зони плавлення під час кристалізації за рахунок відцентрових сил формують сферичні гранули діаметром $(10 - 1000) \cdot 10^{-6}$ м [16].

Третім етапом відбувається розсіювання гранул на фракції та їх магнітна сепарація від металевих домішок. Забруднення гранул продуктами зношування механізму обертання заготовки відбувається через необхідність обертання зі швидкістю приблизно 1000 рад/с, яка при отриманні гранул діаметром менше 10^{-4} м збільшується майже в 3 рази. Реалізація такої швидкості являє дуже складну задачу.

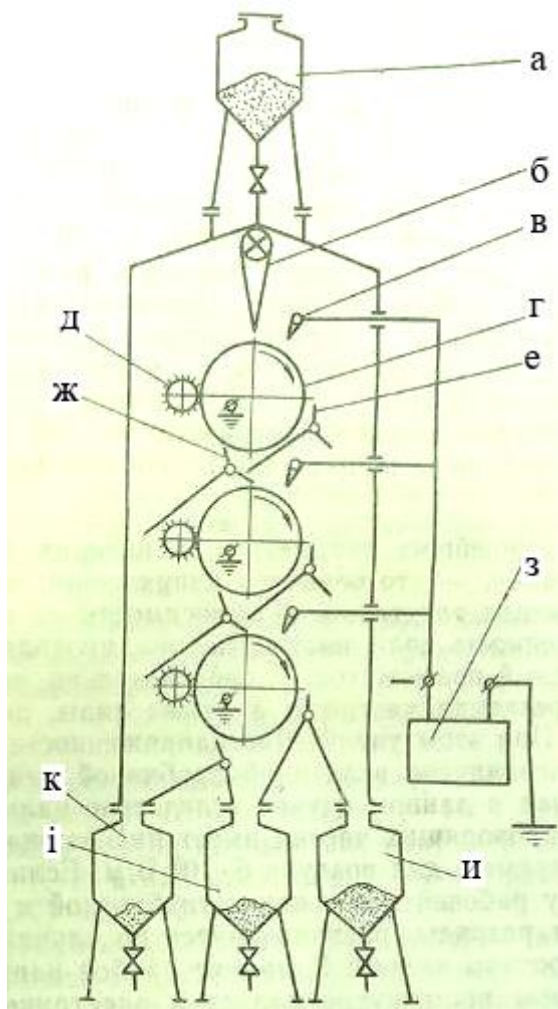
Четвертим етапом відбувається очищення отриманих гранул від неметалевих частинок шляхом електричної сепарації. Зазвичай неметалевими включеннями є частинки шлаку, окисних плівок та кераміки, возгони. Для очищення використовують метод електро-статичної сепарації, вона є надійною, стабільною та безперервною у порівнянні з іншими методами очищення.

В електросепараторі, що зображено на рисунку 1.2, частинки матеріалу з ємності 1 поступають в живлювач 2 і далі в міжелектродний проміжок, що утворено коронуючими електродами 3 та заземленим осаджуючим електродом 4.

Коронуючі електроди – це металеві штанги з впаяними в них сталевими голками, що повернуті в бік барабану, голчасті електроди або ніхромові дроти, що натягнуті паралельно осі барабану.

Щітка 5 слугує для знімання частинок які налипають на барабан, а відсікачі 6, 7 – для регулювання виходу матеріалу у відповідну ємність. Один полюс генератору високої напруги 0 – 20 кВ під'єднаний до коронуючих електродів 3.

Після три разового очищення в ідентичних блоках, що розташовані один під одним, матеріал потрапляє в ємності 9, 10, 11, які призначені для очищеного порошку, неметалевих частинок та проміжного продукту.



а) – бункер з порошком; б) – живильник; в) – коронуючий електрод; г) – металевий барабан (електрод, що осаджує); д) – щітка, що обертається для очищення барабану; е), ж) – відсікачі; з) – високовольтний випрямляючий прилад; и), і), к) – ємності для очищеного порошку, промпродукту та неметалевих включень відповідно.

Рисунок 1.2 - Схема барабанного електросепаратору

В проміжний продукт потрапляють частинки з проміжним значенням електропровідності, тобто такі металеві частинки, які покриті слабопровідними окислами. Один з важливих параметрів, що впливає на електросепарацію – величина напруги, що подається на коронуючі електроди. В залежності від неї змінюється напруженість поля, щільність струму і відповідно величина заряду, що набувається частинкою, а також сили, що на неї діють. В якості робочої атмосфери в камері електросепаратору використовується суміш інертних газів – аргону та гелію (Ar – 80%, He – 20%). Збитковий тиск в камері електросепаратору складає приблизно 15 кПа.

Одночасно з цими етапами відбувається виготовлення капсул для засипки гранул, їх виготовляють або штампуванням, або ротаційним викочуванням листового металу та зварюють, після чого капсули піддаються відпалу у печі СШВЕ-8.12/13 у вакуумі для очищення внутрішньої поверхні капсул.

Наступним етапом є засипка гранул в капсули на вакуумній установці, оснащений нагрівачами та електронно-променевою пушкою з наступною дегазацією та герметизацією капсул.

Далі для виготовлення заготовок дисків, герметизовані капсули з гранулами сплаву ЕП741НП направляють на гаряче ізостатичне пресування (ГІП) де під дією високої температури та тиску гранули компактуються утворюючи суцільний монолітний матеріал. Попередньо, перед проведенням пресування, важливим методом контроль зварних швів капсул є перевірка на герметичність. Вона полягає у зануренні капсул у гарячу воду з температурою 75 – 90°C та витримкою протягом 30 хв. Основною задачею є перевірка зварних швів капсул на герметичність та запобігання можливому відкриттю швів під час ГІП, що призводить до заповнення капсул аргоном під тиском та може призвести до вибуху капсули. Капсули, що не пройшли перевірку на герметичність не допускають до подальшого проведення ГІП та є браком.

Метою ГІП є отримання безпористого компактованого матеріалу та формування зеренної структури, яка визначає необхідний рівень експлуатаційних властивостей. Кінцеве формування структури відбувається при наступній

термічній обробці. Режим ГП складається з нагріву садки до $1030 \pm 10^\circ\text{C}$ при тиску 25 МПа та витримкою, а потім остаточним нагрівом до $1200 \pm 10^\circ\text{C}$ з тиском 140 МПа з наступною витримкою 4 - 4,5 години та охолодженням до 800°C з пришвидшеним охолодженням й подальшим довільним охолодженням нижче 800°C .

ГП створює компактний безпористий матеріал, в структурі якого чітко видно гранули. Електронно-мікроскопічні дослідження показують, що в ділянках гранул спостерігається субструктура, яка характерна для високотемпературного деформованого стану. В таких ділянках частинки γ' – фази виділяються найбільше вздовж дендритних осей. В міждендритних областях виділяються дисперсні частинки γ' – фази розміром до 0,3 мкм. Такий характер розподілення обумовлено нерівноважними умовами кристалізації гранул та пов'язану з цим хімічну неоднорідність структури гранул. При ГП можуть утворюватися і ділянки з дрібним рекристалізованим зерном, до того ж чим більше витримка під тиском в двофазній області тим більше рекристалізованих ділянок.

В процесі нагріву гранул при ГП відбувається їх гомогенізація з розчиненням найбільш дисперсних частинок γ' -фази. Ділянки, які зайняті гранулами меншого розміру, які кристалізуються з великою швидкістю, мають більш пересичений твердий розчин та відповідно меншу міцність й таким чином в процесі ГП піддаються великій пластичній деформації, ніж ділянки, які зайняті більш крупними гранулами. При цьому останні практично не змінюють своєї форми, тобто не зазнають пластичної деформації. Разом з тим відомо, що швидкість кристалізації та ступень пластичної деформації прискорюють процеси гомогенізації та розчинення вторинних фаз [17].

В результаті після ГП отримуються компактовані капсули, що направляються на механічну обробку для зрізання капсули з вуглецевої сталі та отримання заготовок для виготовлення диску.

Наступним етапом проводять попередню механічну та термічну обробку заготовок під диски для отримання необхідних характеристик. Процес термічної обробки складається з гомогенізації заготовок з наступним триразовим старінням.

Температура гомогенізації, є першою ланкою термообробки, швидкість нагріву до цієї температури та час витримки у більшості випадків визначають структуру та оптимальну морфологію і розподілення зміцнювальних фаз.

Через габаритність дисків час витримки варіюється від 4 до 8 годин для реалізації бажаних структурних змін, а також для вирівнювання температури за всім об'ємом. Для отримання рекристалізованої структури з оптимальним розміром зерна, а також для утворення однорідного пересиченого твердого розчину з рівномірним розподіленням зміцнювальної γ' -фази температура гомогенізації повинна бути вище температури розчинення γ' -фази на 10 - 30°C та витримкою від 4 годин для проходження усіх дифузійних процесів.

Для підвищення структурної стабільності сплавів при робочих температурах всі етапи старіння повинні здійснюватися в області температур вищих за робочі температури диску.

Перше старіння реалізується при температурах, що відповідають температурі початку розчинення γ' -фази. Такий вибір температури відбувається через те, що при ній відбувається практично повне виділення γ' -фази, швидкість розпаду γ - твердого розчину максимальна, а розмір фаз, що виділилися невеликий – (10, 25) мкм. Разом з тим, час витримки при цих температурах протягом 6 – 16 годин недостатній для повного виділення γ' -фази. При цьому збільшувати час витримки недоцільно через значне укрупнення частинок γ' -фази.

Тому реалізується друге та третє старіння при температурі нижче на 50-100°C за попереднє, але вище робочої температури диску. Час витримки при більш низькій температурі збільшується до 24 – 36 годин.

Третє старіння використовується для задоволення жорстких вимог до забезпечення найбільш високих границь міцності та текучості. При третьому старінні виділяються надмірно дрібні частинки γ' -фази, їх розмір залежить від рівня легування сплаву та температури старіння.

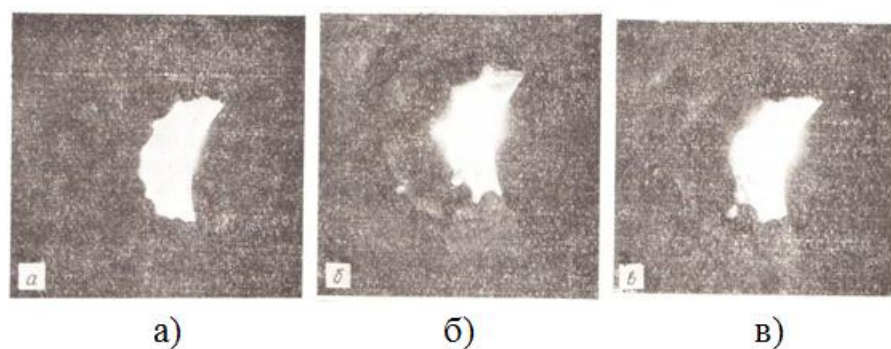
Після термообробки заготовки направляються на останній етап технологічного процесу виготовлення дисків – остаточну механічну обробку. Під

час цієї обробки диск набуває остаточних розмірів та необхідних технологічних частин, що відповідають кресленням.

1.4 Особливості формування та структура гранул отримуваних за технологією відцентрового розпилення

1.4.1 Механізм крапле-утворення

Швидкісною фото- та відео зйомкою встановлено механізм утворення краплі з розплавленого вінця заготовки, що обертається, який зображено на рисунку 1.3.



а) – утворення вінця; б) – утворення сферичних головок; в) – утворення краплі.

Рисунок 1.3 - Послідовність крапле-утворення при відцентровому розпиленні твердої заготовки

Цей механізм декілька відрізняється від подібного при відцентровому розпиленні звичайних рідин. Крапле-утворення з розплаву відбувається за першим режимом розпилення (рис. 1.4): при оплавленні торця заготовки, що швидко обертається з'являється тонка плівка розплаву товщиною 20 – 50 мкм (при частоті обертання заготовки діаметром 50 – 75 мм в межах 3000 – 10000

об/хв), переміщуючись по спіралеподібним кривим до периферії торця. Тут відбувається утворення вінця та накопичення маси розплаву, яка утримується на заготовці силами поверхневого натягу. Товщина вінця на порядок перевищує товщину плівки розплаву в кратері розпилення – II стадія процесу.

Під впливом збудження окремі ділянки вінця збираються в сферичні головки – III стадія процесу. По мірі перетікання розплаву в сферичну головку збільшується її маса, а відповідно і відцентрова сила, яка прагне відірвати головку від вінця. Коли ця сила перевищує сили поверхневого натягу відбувається відрив краплі від заготовки, що обертається - IV стадія процесу. При цьому внаслідок того, що поверхневий натяг розплавлених металів в 20 – 50 разів перевищує поверхневий натяг звичайних рідин, не з'являється тонка довга перемичка між краплею та вінцем, яка в звичайних рідинах руйнується на краплі-супутники різних розмірів, обумовлюючи широкий спектр розмірів крапель, що утворюються. У випадку розпилення металів коротка перемичка після відриву краплі під дією сил поверхневого натягу втягується назад в венець, де слугує матеріалом для утворення наступної краплі [18].

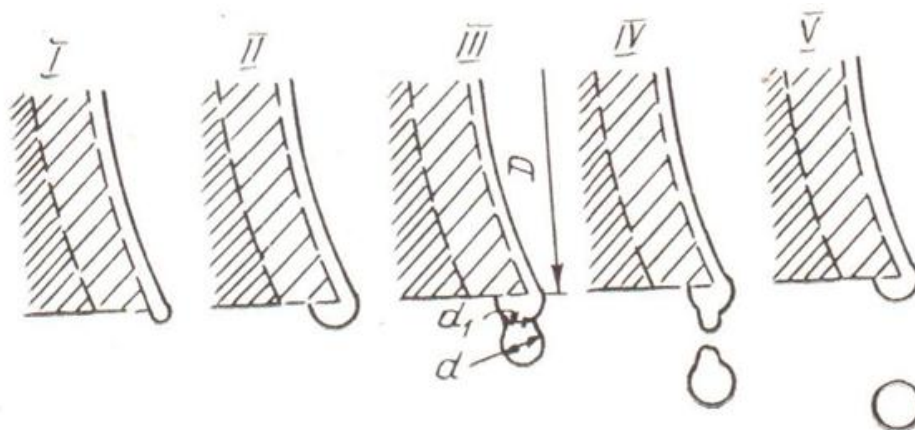
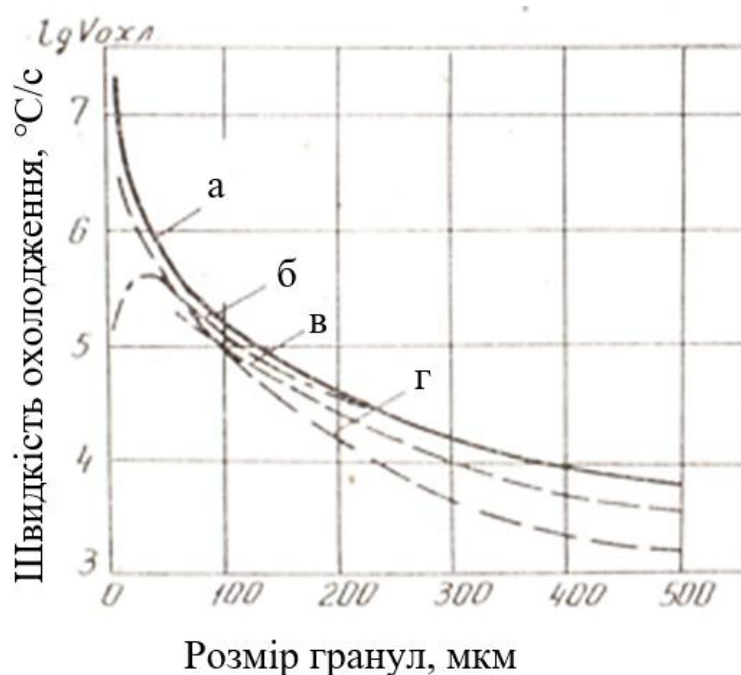


Рисунок 1.4 - Схема утворення гранул при відцентровому розпиленні заготовки, що обертається

1.4.2 Охолодження краплі при польоті в інертному газі

За допомогою теплотехнічного розрахунку швидкості охолодження краплі розплаву при польоті в середовищі інертного газу вдалося встановити, що основний вплив на цей параметр має величина краплі та склад газової атмосфери. Наприклад швидкість охолодження гранул діаметром 250 мкм при розпиленні в гелії в 3 рази вища ніж при розпиленні в атмосфері аргону.

Графік швидкості охолодження при кристалізації гранул нікелевих сплавів в атмосфері гелію в залежності від їх розміру наведено на рисунку 1.5.



а) – швидкість охолодження гранул в атмосфері гелію при рівномірному розподіленні температури газу в камері розпилення, б) - швидкість охолодження гранул в атмосфері гелію при дійсному розподіленні температури газу в камері розпилення, в), г) – швидкість охолодження гранул за даними робіт.

Рисунок 1.5 - Залежність швидкості охолодження при кристалізації від розміру гранул

З нього видно, що при зміні діаметру гранул в 3 рази швидкість охолодження змінюється на порядок. Крім того, за розрахунком середньої швидкості охолодження гранул в інтервалі температури при якій гранула долітає до стінки камери розпилення, виявилось, що середня швидкість охолодження приблизно в 2 рази менша, ніж при кристалізації гранул розміром до 300 мкм середня розрахункова швидкість становить $7,8 * 10^3$ град/с, титанові гранули цього ж розміру охолоджуються з середньою швидкістю $1,1 * 10^4$ град/с [15].

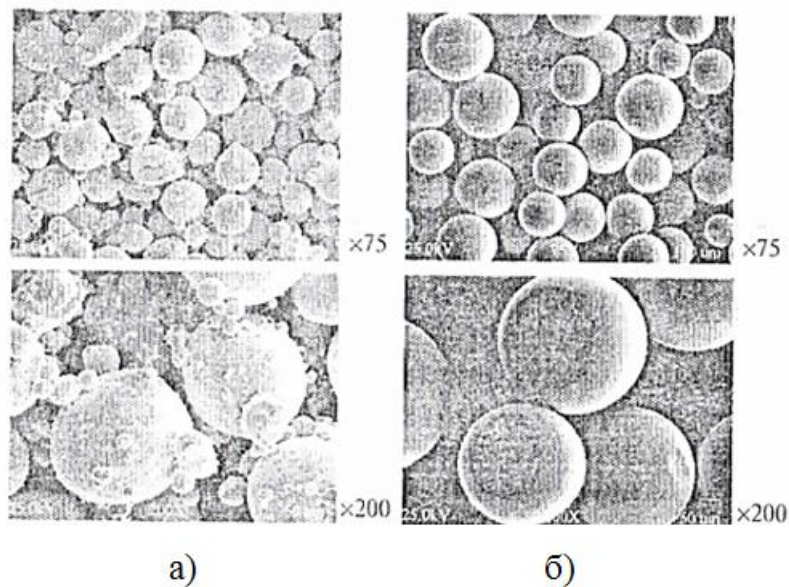
Якщо швидкість охолодження при кристалізації обумовлює структурні параметри гранул: величину зерна, відстань між гілками дендритів, величину частинок вторинних фаз і т. д., то середня швидкість охолодження впливає досить корисно при конструюванні апаратури для отримання гранул цим способом.

1.4.3 Кристалізація гранули

Крапля розплаву, яка перетворюється на гранулу при польоті в газовому середовищі охолоджується від поверхні до центру. При цьому, якщо кристалізація відбувається послідовно, за охолодженням, треба очікувати появи зональної ліквідації вздовж радіусу частинки, а також виникнення дефектів усадкового характеру у вигляді усадочної раковини, пустот і т. п. Крім того, при послідовній кристалізації можливе різнозерність в об'ємі гранули: наявність дрібних стовпчастих кристалів у поверхні та більш крупних рівновісних – в центрі. При цьому розмір дендритів у поверхні та в центрі гранул також повинен бути різним.

Методами оптичної мікроскопії було встановлено, що характерною особливістю гранул є відсутність на периферії зони стовпчастих однаково орієнтованих кристалів. Не знайдено також закономірної зміни відстані між дендритними гілками вздовж радіусу гранули. В крупних гранулах (більше 400 мкм) може спостерігатися розсіяна мікроскопічна пористість, але немає ніяких показів на утворення концентрованої усадочної порожнини або раковини. Все це

дозволяє зробити висновки, що процес кристалізації гранул має об'ємний, а не послідовний характер. Звідси також випливає, що до початку твердіння крапля розплаву значно переохолоджується. Отримані гранули зображені на рисунку 1.6.



а) – гранули, що отримано шляхом газоструменевого розпилення рідкого металу, б) - гранули, що отримано шляхом плазмового оплавлення торця електроду, що обертається

Рисунок 1.6 - Гранули сплаву

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Характеристики матеріалу

Для виготовлення авіаційних дисків із застосуванням технології металургії гранул обрано порошковий жароміцний нікелевий сплав ЕП741НП, що має наступний хімічний склад, що наведено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Хімічний склад сплаву ЕП741НП, мас. %

Елемент	Ni	C	Cr	Ti	Al	Mo	Nb	Co	W	B	Zr	Si	Fe	P
Масова доля	Осн	0,02- 0,06	8,0- 10,0	1,6- 2,0	4,8- 5,3	3,5- 1,2	2,4- 2,8	15,0- 16,5	5,2- 5,9	0,015	0,015	0,5	0,5	0,015

Підприємством розробником (ПР) авіадвигунів закладено гарантований мінімальний рівень властивостей дисків турбіни, що забезпечує достатній експлуатаційну довговічність, що відображено у «Вимогах ПР». Вимоги підприємства розробника наведено у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Рівень властивостей, що висувається підприємством розробником до гранульних авіаційних дисків турбіни

Механічні властивості, не менше					Твердість за Бринелем (діаметр відбитку) d, мм
Тимчасовий опір розриву $\sigma_{\text{в}}$, МПа	Границя текучості $\sigma_{0,2}$, МПа	Відносне		Ударна в'язкість КСУ, Дж/см ²	
		Подовження δ , %	Звуження ψ , %		
1450	1020	18	18	40	1,50 – 1,75
Довготривала міцність					
Температура випробування, °С		Постійно прикладене навантаження σ , МПа		Час до руйнування зразків, не менше, год	
650		1020		100	
Малоциклова втома					
Температура випробування, °С	Максимальне напруження циклу σ , МПа		Частота прикладання навантаження, Гц		Число циклів до руйнування, не менше, ц.
650	1000		1,0		5000

У відповідності до вимог підприємства розробника було підібрано технологію виготовлення гранульних дисків із герметизованих заготовок зовнішнього постачання на технічній базі підприємства.

2.2 Технологія отримання та обробки авіаційних гранульних дисків

Підприємством постачальником виконано отримання злитків-електродів шляхом вакуумно-індукційного переплаву + вакуумно-дугового переплаву. Надалі виготовлено гранули шляхом відцентрового розпилення на установці плазмового відцентрового розпилення з наступним розсіюванням гранул на фракції та їх магнітною сепарацією від металевих домішок й подальшою електростатичною сепарацією для очищення отриманих гранул від неметалевих частинок. Останнім етапом була засипка гранул в капсули з наступною дегазацією та герметизацією капсул шляхом електронно-променевого зварювання. Усі процеси від отримання злитків до засипки гранул та герметизації капсул відбуваються у вакуумі або захисній атмосфері аргону. Наступним на підприємство були поставлені герметизовані заготовки, з котрих було виготовленні гранульні диски.

Отримання заготовок гранульних дисків із герметизованих заготовок заповнених порошками сплаву ЕП741НП відбувається у гарячому ізостатичному пресі Quintus, що зображено на рисунку 2.7, за наступним технологічним процесом:

- а) нагрів садки до $1030 \pm 10^\circ\text{C}$ при тиску 25 МПа та витримкою;
- б) остаточний нагрів до $1200 \pm 10^\circ\text{C}$ з тиском 140 МПа з наступною витримкою 4 - 4,5 години;
- в) охолодження до 800°C у прискореному режимі та подальше довільне охолодження нижче 800°C .



Рисунок 2.7 – Гарячий ізостатичний прес Quintus.

Установка складається з сосуду високого тиску, нагрівальних елементів; систем високого тиску, розрідження та охолодження, системи газопідготовки, завантажувально-розвантажувальними пристроями, ділянкою обслуговування.

Сосуд високого тиску (СВТ) має шість конструктивних елементи (рис. 2.8). В склад сосуду високого тиску входять циліндр СВТ, піч або нагрівальні елементи, верхня та нижня кришки, рама та дротова обмотка.

В зазначеній конструкції при підготовці системи до циклу за допомогою завантажувального приладу в СВТ спочатку розміщують донний нагрівач, потім на ньому встановлюють об'єкт обробки, після чого розміщують боковий нагрівач та закривають СВТ верхньою заглушкою.

В закритому СВТ об'єкт обробки повністю ізолюється та піддається дії аргону при відповідних тисках та температурі. Герметизація робочого об'єму відбуваються резиновими кільцевими прокладками круглого перерізу, які розташовані у верхній та нижній кришках СВТ. Охоплююча рамка з каретками переміщується за допомогою гідравлічної системи уздовж СВТ для переходу до операції пресування. В цьому положенні СВТ встановлений в раму, яка приймає

осьові напруження з рухомих верхніх і нижніх заглушок. Після закінчення циклу для переходу до операції завантажування-розвантажування запірна рама зсувається в бік від СВТ [15].

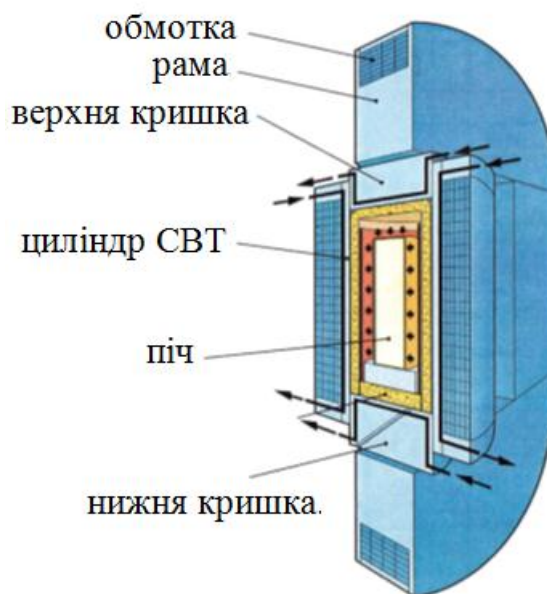


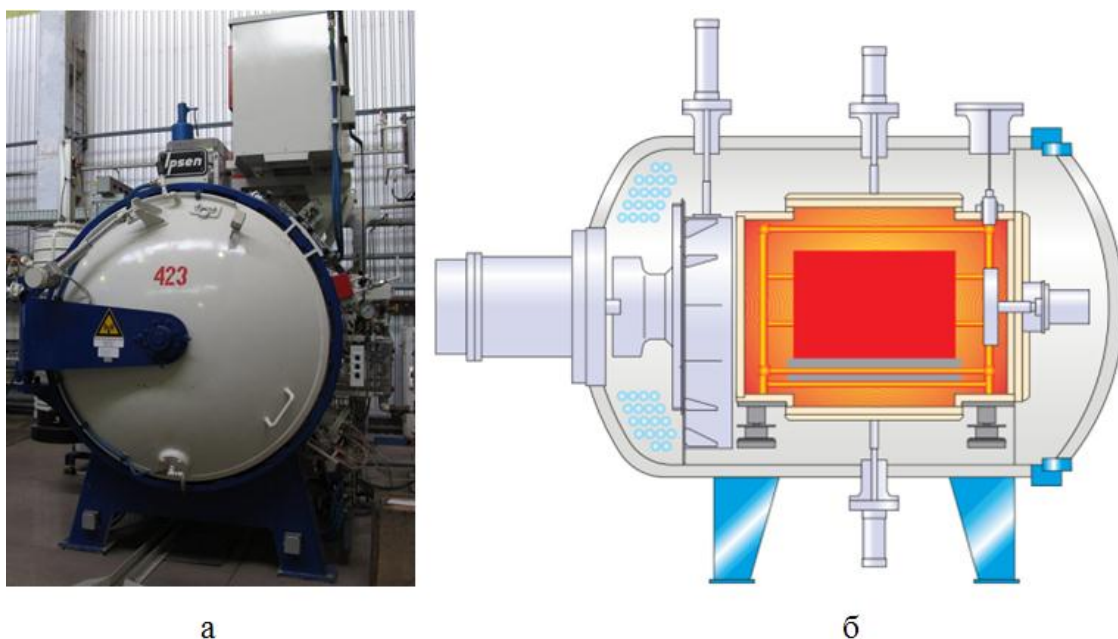
Рисунок 2.8 – Сосуд високого тиску

Автоматичне гідравлічне устаткування для підйому масивної верхньої заглушки забезпечує швидке відкривання та закривання СВТ з високою точністю позиціонування. При цьому на стадії підготовки циклу спочатку відбувається підйом, потім переміщення заглушки в сторону разом з запірною рамою в положення завантаження (СВТ відкритий) та в зворотному порядку при приведенні СВТ в положення пресування (СВТ закритий). Гідравлічна система забезпечує також необхідний гідравлічний тиск для поздовжнього переміщення запірної рами на каретці, а також для підйому та переміщення верхньої заглушки в сторону.

Для нагріву об'єкту, що оброблюється до необхідної температури використовують резистивні змінні молібденові нагрівачі з максимальною температурою до 1450 °С. Електричний опір кожного набору бічних та донних нагрівачей практично співпадає, що дозволяє використовувати один і той же

силовий трансформатор живлення бічних та донних нагрівачів незалежно від термопари нагрівачів, що використовується. Контрольні термопари у поєднанні з електронними приладами керування та еталонними елементами, що забезпечують точне виконання температурних циклів, які передбачені програмою.

Заготовки гранульних дисків після компактування піддаються попередній механічній обробці й надалі термічній обробці у вакуумній печі IPSEN T²T, що зображена на рисунку 2.9.



а) – зовнішній вигляд печі; б) – вигляд печі у розрізі

Рисунок 2.9 – Вакуумна піч IPSEN T²T

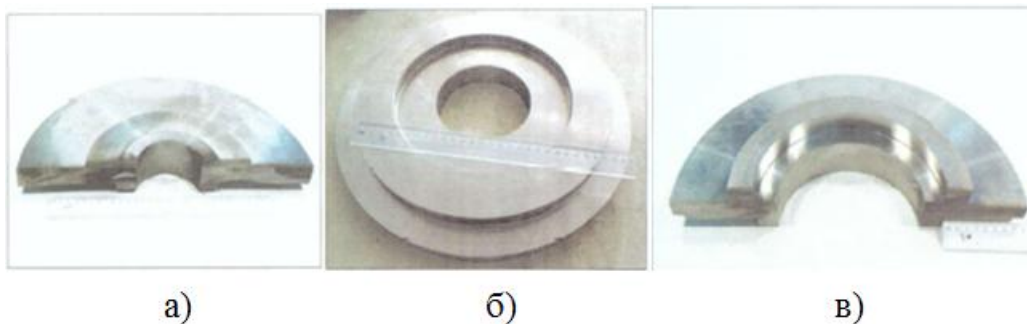
Гартування та старіння №1 у динамічному вакуумі з наступним охолодженням в потоці аргону обумовлено запобіганням сублімації легувальних елементів з поверхні виробів. Процес витримки при гартуванні забезпечували шляхом використання закладної термопари, що закарбована у зразок з того ж матеріалу, що й деталі та з тією ж товщиною.

Було забезпечено охолодження в потоці аргону зі швидкістю 80°C/хв при тиску аргону 5 бар та швидкістю обертання вентилятора – 3000 об/хв. Старіння

№2 та №3 проводили у повітряній атмосфері з охолодженням на повітрі. Термообробку проводили за наступними режимами:

- а) гартування при температурі $1200 \pm 10^\circ\text{C}$ протягом 4 год.;
- б) старіння №1 при температурі $910 \pm 10^\circ\text{C}$ протягом 3 год.;
- в) старіння №2 при температурі $750 \pm 10^\circ\text{C}$ протягом 8 год.;
- г) старіння № 3 при температурі $700 \pm 10^\circ\text{C}$ протягом 17 год.

Механічна обробка проводилася після термічної обробки капсул у відповідності до креслень. Зовнішній вигляд заготовок після механічної обробки представлено на рисунку 2.10.



а) – $\frac{1}{2}$ заготовки «Диск ТВД»; б) – заготовка «Диск ТНД»; в) – $\frac{1}{2}$ заготовки «Диск лабіринтний»

Рисунок 2.10 – Зовнішній вигляд заготовок після механічної обробки

2.3 Методи досліджень властивостей гранульних дисків

2.3.1 Визначення хімічного складу

Хімічний склад визначали за допомогою спектрального фотоелектричного контролю значень масової частки елементів в сплавi. Визначали масову частку

основних елементів на відповідність ОСТ 1 92111. Дослідження проводили на установці ARL-4460.

2.3.2 Металографічні дослідження

Дослідження мікроструктури проводили на нетравлених та травлених мікрошліфах за допомогою мікроскопу «Axio Observer. Dml» (рис. 2.11) та методом растрової електронної мікроскопії (електронний мікроскоп «JEOL JSM 63602LA») (рис. 2.12).



Рисунок 2.11 - Мікроскоп «Axio Observer. Dml»

Шліфи виготовляли зі зразків, що пройшли випробування на ударну в'язкість. Виготовлення відбувалося за допомогою прорізного електрокорундового диску на бакелітовій основі зернистістю від 16 до 20 або вулканітовими дисками тієї ж зернистості при швидкості обертання дисків 800-1200 об/хв та швидкістю подачі зразка 16-22 мм/хв. Площа шліфу для контролю мікроструктури визначається перерізом зразка. Площина, що призначена для приготування шліфу обробляється абразивним керамічним кругом зернистістю 25

та 40 розміром Д250х32х32 або іншими, що близькі за розмірами та зернистістю. Підготовлена площа шліфується на шліфувальній шкурці різної зернистості з поступовим переходом від більш крупної до більш дрібної зернистості шкурки. Полірування зразка відбувається на горизонтальному диску розміром $D=250$ мм або іншому близькому за розміром, що покритий щільним м'яким сукном до якого подається водна суспензія хімічно чистого окису хрому (5-15 г на 1 л води).



Рисунок 2.12 – Електронний мікроскоп «JEOL JSM 6360LA»

Мікроструктура на зразках виявляється шляхом травління в реактиві складу CuSO_4 – 5 г; H_2SO_4 – 5 мл; HCl – 50 мл; H_2O – 40 мл. Полірована поверхня шліфу піддається травлінню як методом занурення шліфу в реактив, так і методом втирання ватю. Чіткість виявлення мікроструктури досягається шляхом багаторазового полірування з наступним травлінням.

Контроль мікроструктури відбувається при збільшенні $100\times$ шляхом порівняння з еталонами. Мікроструктура не повинна мати залишкової мікропористості, мікропористості внаслідок перегріву. Мікроструктура з внутрішньогранульною мікропористістю допускається. На поверхні шліфу

площею $2,5 \text{ см}^2$ не допускається більше 6-ти скупчень або одиничних мікропор 5-го балу. Мікроструктура не повинна мати сітки гранул. Допускається мікроструктура з наявністю границь окремих гранул.

2.3.3 Визначення механічних властивостей

Механічні властивості (σ_b , $\sigma_{0,2}$, δ , ψ) виготовлених зразків випробовували на розривній машині Instron 8801 (рис. 2.13), зразки виготовлялися згідно ГОСТ 1497.



Рисунок 2.13 – Зовнішній вигляд розривної установки Instron 8801

Ударну в'язкість визначали на ударних зразках типу І у відповідності до ГОСТ 9454, випробуваних на маятниковому копрі Instron SI-1M (рис. 2.14).



Рисунок 2.14 – Зовнішній вигляд маятнікового копра Instron SI-1M

Твердість заготовок визначали за Бринелем на одній частині ударних зразків після їх випробувань – сталлюю кулькою діаметром 5 мм та навантаженням 7350Н відповідно до ГОСТ 9012 на твердомірі LECO AMH-43 (рис. 2.15).



Рисунок 2.15 – Твердомір LECO AMH-43

Довготривалу міцність зразків визначали на комбінованому зразку, що мав гладку та надрізану частину у відповідності до ГОСТ 10145 на універсальній випробувальній машині Instron 8862 (рис. 2.16) при температурі 650°C та постійно прикладеному навантаженні 1000 МПа (102 кгс/мм^2).



Рисунок 2.16 – Зовнішній вигляд універсальної випробувальної машини Instron 8862

Випробування малоциклової втоми (МЦВ) проводили на універсальній випробувальній машині Instron 8862, на циліндричному зразку типу II – за ГОСТ 25.502 при температурі 650°C , частоті прикладеного навантаження 1 Гц та максимальному напруженні циклу 980 МПа (100 кгс/мм^2).

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Методом металургії гранул з жароміцного нікелевого сплаву ЕП741НП було виготовлено та досліджено «Диск ТВД», «Диск ТНД» та «Диск лабіринтний». На відповідність технічним умовам проведено наступні дослідження:

а) дослідження мікро- та макроструктури;
б) випробування короточасних властивостей при кімнатній температурі з визначенням σ_B , $\sigma_{0,2}$, δ , ψ ;

в) довготривалої міцності;

г) малоциклової втоми;

Після механічної обробки було виконано контроль неруйнівними методами – люмінесцентний ЛЮМ1-ОВ та ультразвуковий УЗК на відповідність технічним вимогам. При виконанні неруйнівного контролю методом ЛЮМ1-ОВ під джерелом ультрафіолетового світла на поверхні заготовок, що досліджуються дефектів виявлено не було. За результатами проведення неруйнівного ультразвукового контролю повздовжніми та зсувними хвилями в заготовках, сигналів, що перевищують допустимий рівень не виявлено. Наступним було проведено всебічні дослідження заготовок.

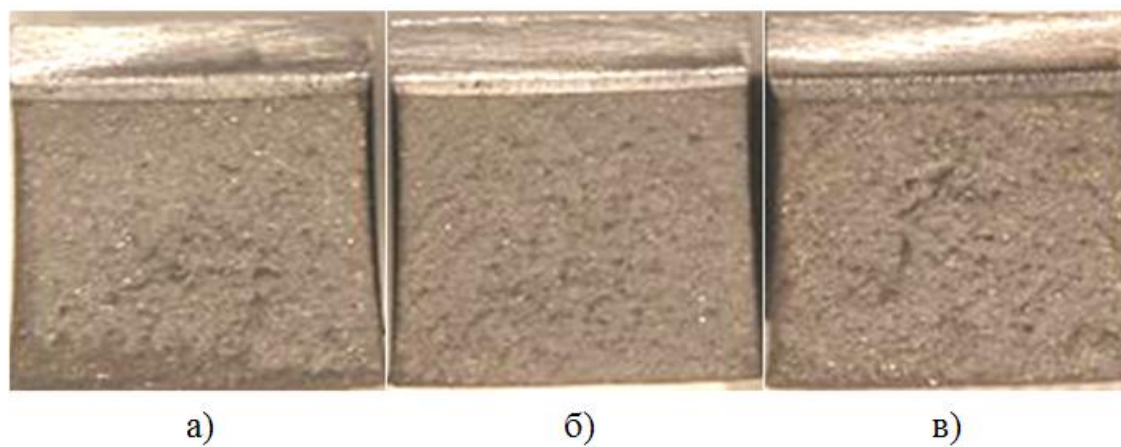
За результатами дослідження хімічного складу заготовка виготовлена із жароміцного нікелевого сплаву ЕП741НП відповідає вимогам ОСТ1 92111-85.

Макроструктура заготовки після проходження вакуумної термообробки, після травлення в реактиві Васильєва, характеризувалась рівномірною, дрібнозернистою будовою, величина макрозерна не перевищувала 1 мм. Дефектів металургійного походження, що видно неозброєним оком, знайдено не було.

Злами, досліджені на зруйнованих ударних зразках, внутрішньогранульні, ознак міжгранульного руйнування в зламах не виявлено (рис. 3.17).

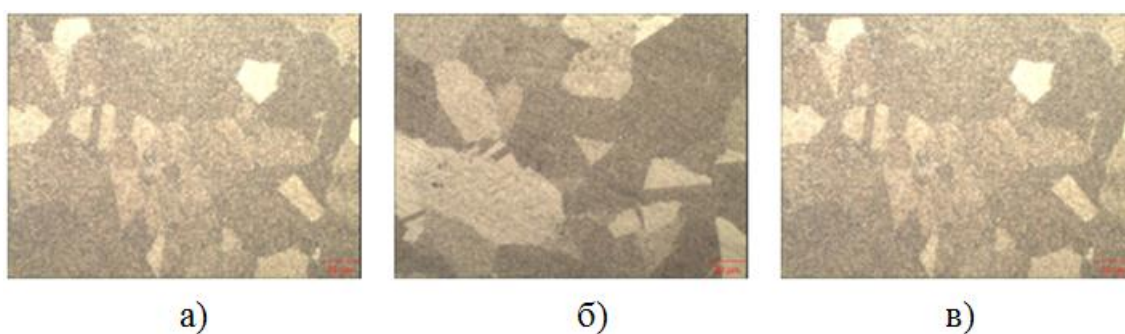
Мікроструктура сплавів після травління являла собою γ -твердий розчин, що зміцнений інтерметалідною γ' -фазою з наявністю карбідів та карбонітридів, яка

характерна для термообробленого жароміцного сплаву ЕП741НП. Структура характеризувалась дрібним, рівномірним зерном (рис. 3.18).



а) – Диск ТВД, б) – Диск Лабіринтний, в) – Диск ТНД

Рисунок 3.17 – Структура зламів ударних зразків, що вирізані з технологічного припуску досліджуваних дисків



а) – Диск ТВД, б) – Диск Лабіринтний, в) – Диск ТНД

Рисунок 3.18 – Мікроструктура заготовок дисків після ГП та термообробки;
×500

Аналізом мікроструктури зразків у нетравленому вигляді встановили відсутність мікропористості внаслідок перегріву при ГП та термообробці.

Мікроструктурним аналізом виявлені границі окремих гранул, що допускається НТД (рис. 3.19). Суцільної сітки гранул не виявлено.



Рисунок 3.19 – Границі окремих гранул в структурі заготовок після ГП та термообробки

На границях гранул виявили скупчення дрібнодисперсних карбідів та карбонітрідів титану, молібдену, вольфраму, ніобію, гафнію, що утворилися внаслідок процесу ГП та які залишилися й після проведення термообробки (рис. 3.20).

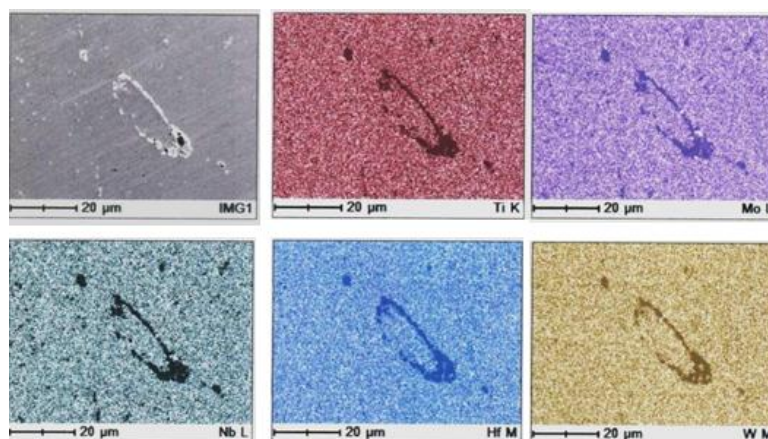


Рисунок 3.20 – Розподілення елементів у включеннях по границям гранул в структурі заготовок після ГП та термообробки (РСМА)

Більшій інтенсивності відповідає більша концентрація елементу. Варто відмітити, що ці карбіди рівномірно розподілені тілом та границями зерен. Результати фрактографічного та мікроструктурного аналізу в цілому свідчать про проходження повноцінного компактування гранул в процесі ГП.

3.1 Дослідження механічних властивостей дисків

Дослідження механічних властивостей дисків було проведено на зразках при 20°C та 650°C. Результати випробувань наведено у таблиці 4. Усі отримані результати порівнюються з вимогами підприємства розробника гранульних дисків, що наведено у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – результати дослідження механічних властивостей, тривалої міцності, малоциклової втоми заготовок «Диск ТВД», «Диск ТНД» та «Диск лабіринтний».

Шифр заготовк и	Механічні властивості						τ_{102}^{650} , ч.	$N_{1/100}^{650}$
	σ_b , МПа	σ_{02} , МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, Дж/ см ²	НВ, ($d_{від.}$), мм		
ТВД	1553	1159	24,0	23,2	50,1	1,60	1510,0	13267
ТНД	1560	1155	20,0	19,4	45,0	1,55	726,0	11355
ЛАБ	1512	1116	18,4	19,3	41,3	1,60	1319,0	9865
Норми НТД	≥ 1450	≥ 1020	≥ 18	≥ 18	≥ 40	1,50- 1,75	≥ 100	≥ 5000

У вимогах підприємства розробника наведені необхідні механічні властивості при 20°C. За результатами випробувань тимчасовий опір розриву, границя текучості, відносне звуження та подовження відповідають вимогам, жоден з дисків не має випадіння та занижених властивостей.

Випробування на довготривалу міцність проводили на гладких зразках згідно технічних умов при температурі 650°C та навантаженні $\sigma = 102$ кгс/мм² та

мінімальним часом до руйнування $\tau = 100$ год. Отримані результати для трьох дисків «Диск ТВД», «Диск ТНД» та «Диск лабіринтний» наведено в таблиці 5.

Порівнюючи отримані дані з вимогами ПР (табл. 3) можна відзначити, що рівень тривалої міцності сплаву ЕП741НП суттєво (у 7-15 разів) перевищував рівень вимог. Завдяки використанню металургії гранул вдалося отримати достатній рівень властивостей та забезпечити достатній запас часу до руйнування. Випробування зразків на малоциклову втому показали результат, що більше ніж у 2 рази краще норм, які висунуті підприємством розробником на даний тип випробувань.

Отже, за результатами контролю механічних властивостей, довготривалої міцності, МЦВ та металографічного дослідження структури матеріалу «Диску ТВД», «Диску ТНД», та «Диску лабіринтного», що виготовлені із жароміцного нікелевого сплаву ЕП741НП методом металургії гранул, встановлено повну відповідність технічним умовам, відмічено тенденцію до забезпечення значно більшого рівня характеристик дослідних властивостей, зокрема:

а) Результати випробувань короточасних властивостей при кімнатній та підвищеній температурах показують їх задовільний рівень як для характеристик міцності, так і пластичності для усіх досліджених дисків.

б) Показники довготривалої міцності визначені при випробуваннях на гладких зразках при температурі 650°C , результати випробувань показали, що матеріал задовольняє технічні умови.

в) Випробування на малоциклову втому при температурі 650°C рівень напружень відповідає заданим нормам ПР, здебільшого перевищуючи їх у декілька разів.

Результати випробувань «Диск ТВД», «Диск ТНД», «Диск лабіринтний», що виготовлені з порошкового жароміцного нікелевого сплаву ЕП741НП металургією гранул є задовільними, що дозволяє впроваджувати та використовувати дану технологію для наступних партій дисків турбін для авіаційних двигунів.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

В розділі надані основні заходи з охорони праці при дослідженні механічних властивостей зразків диску виготовлених з гранульного жароміцного нікелевого сплаву ЕП741НП.

4.1 Аналіз потенційних небезпек

а) Небезпеки які пов'язані з порушеннями роботодавцями вимог НПАОП 0.00 – 7.11 – 12 «Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників», а саме вимог щодо організації та забезпечення безпеки на робочих місцях, що може бути пов'язано з не проведенням організаційних заходів щодо навчання та перевірки знань з охорони праці, інструктажів, не наданням інформації про можливі небезпеки.

б) Можливість ураження електричним струмом внаслідок порушення правил електробезпеки, несправності електроспоживаючого обладнання, що може призвести до електричних травм або летального наслідку.

в) Можливість отримання механічних травм при підготовці зразків для подальшої обробки або випробувань. В більшості випадків використовується абразивний (відрізні та шліфувальні круги) та полірувальний інструмент. Основними причинами отримання пошкоджень може бути використання не атестованого інструменту, порушення правил експлуатації обладнання, порушення методики виготовлення зразків для випробувань.

г) Можливість отруєння хімічними сполуками при виконання операції травлення зразків для дослідження структури, основними причинами є порушення правил з охорони праці, відсутність або відмова від використання засобів індивідуального захисту.

д) Можливість отримання механічних травм при випробуванні механічних властивостей на випробувальних машинах фірми Instron, внаслідок порушення правил з охорони праці, методики проведення досліджень, правил експлуатації дослідних машин.

е) Наявність в повітряному просторі в дослідній лабораторії азбестових частинок при виконанні дослідження довготривалої міцності внаслідок відсутності або відмови від використання засобів індивідуального захисту, відсутність або недостатня ефективність системи обміну повітря, порушення методики проведення досліджень.

ж) Небезпеки пов'язані з використанням ПК при обробці отриманих при дослідженні даних.

з) Незадовільні параметри мікроклімату в приміщенні дослідницької лабораторії в наслідок не ефективної роботи систем опалення та обміну повітря, що може призвести до загальних захворювань.

и) Можливість загорянь в наслідок порушень правил пожежної безпеки, що може призвести до масштабних пожеж, а також відсутність або непрацездатність первинних засобів пожежогасіння щоб могло би дати можливість ліквідувати загоряння на первинних стадіях.

і) Небезпеки, які пов'язані з умовами праці при надзвичайних ситуаціях.

4.2 Заходи забезпечення безпеки

а) Згідно вимог НПАОП 0.00 – 7.11 – 12 «Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників» передбачено, що усі працівники повинні пройти навчання та перевірку знань з питань охорони праці відповідно до «Типового положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці», затвердженого наказом Держнаглядохоронпраці (Держпраці) від 26.01.2005 №15.

Роботодавець повинен забезпечити повну і вичерпну інформацію працівників з питань охорони праці як відносно підприємства в цілому так і відносно специфіки виконуваних робіт на робочих місцях, де зазначені можливі небезпечні ситуації та заходи для їх запобігання. Найбільш ефективним є проведення відповідних інструктажів (вступний, первинний, повторний, позаплановий та цільовий).

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

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

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

- забезпечення неможливості випадкового дотику до струмоведучих частин, що перебувають під напругою;
- електричний розподіл мережі;
- усунення небезпеки ураження з появою напруги на корпусах, кожухах та інших частинах електроустановки, що досягається захисним заземленням, зануленням і захисним відключенням;
- використання малих напруг;
- захист від випадкового дотику до струмоведучих частин кожухами, огороженням або подвійною ізоляцією;
- захист від небезпек можливих при переході напруги з вищої сторони на нижчу;
- контроль і профілактика пошкоджень ізоляції;

- компенсація ємнісної складової струму замикання на землю;
- застосування спеціальних електрозахисних засобів, блокувань, сигналізації та запобіжних пристроїв.

Використання захисного заземлення:

- Робоче заземлення – це заземлення струмоведучих частин електроустановки, яке виконане для забезпечення роботи електроустановки (не з метою електробезпеки), наприклад, робоче заземлення нейтралі трансформатора;
- Заземлення блискавкозахисту – це заземлення блискавкоприймача, з метою захисту об'єкта від прямого удару блискавки;
- Захисне заземлення – це заземлення, яке виконане з метою електробезпеки, тобто з'єднання відкритих провідних частин (ВПЧ) із заземлювачем для захисту від непрямого дотику та від наведеного напруги.

На практиці, у більшості випадків, це той же самий заземлювач до якого приєднують і ВПЧ, і нейтралі трансформаторів, і блискавкоприймачи. Тільки при яких-небудь обґрунтуваннях (технологічних, з погляду безпеки і т.п.) застосовують три різні заземлювача, що обходиться значно дорожче.

Заземлення використовують також для захисту від статичної електрики, що накопичується при терті діелектриків для захисту від електромагнітних випромінювань, підключаючи екрани до заземлювача і т.п.

Захисне заземлення може бути ефективним тільки в тому випадку, якщо струм замикання на землю не збільшується зі зменшенням опору заземлення. Це можливо в мережах з ізолюваною нейтраллю, де при глухому замиканні на землю або на заземлений корпус струм не залежить від провідності (або опору) заземлення, а також у мережах, напругою вище 1000 В з заземленою нейтраллю. В останньому випадку замикання на землю є коротким замиканням, при цьому спрацьовує максимальний струмовий захист.

У мережі із заземленою нейтраллю напругою до 1000 В заземлення неефективне, тому що навіть при глухому замиканні на землю струм залежить від опору заземлення та зі зменшенням останнього струм зростає.

в) Згідно з вимогами ГОСТ 21.3.028-82 «Процес обробки абразивним та ельборовим інструментом» при роботі на абразивних та полірувальних верстатах працівник повинен дотримуватися правил безпеки та інструкцій, своєчасно проходити інструктажі. Використовувати захисне обладнання для обличчя (окуляри, щитки), захисні рукавички та захисний одяг. Забезпечити ефективну вентиляційну систему для видалення абразивного пилу та частинок з робочого простору задля уникнення потрапляння в дихальні шляхи, використовувати ЗІЗ для дихальних шляхів. Працівнику необхідно зберігати безпечну відстань між руками та обертовими частинами верстату, використовувати захисні відокремлювані пристрої. Перевіряти стан та відповідність абразивних та полірувальних кругів до верстату та надійність їх закріплення, перевіряти технічний стан верстату перед початком роботи та проводити планові технічні огляди та ремонт.

г) При роботі з леткими хімічними сполуками необхідно використовувати засоби індивідуального захисту (рукавички, окуляри, щитки) в особливості ЗІЗ для захисту органів дихання. Використання справної та потужної витяжної шафи для видалення їдких парів хімічних сполук. Проходження технічних інструктажів для забезпечення своєчасного поновлення інформації та здобуття працівниками нової.

д) Перед початком роботи з випробувальними машинами Instron всі відповідальні за обладнання особи повинні уважно ознайомитися з інструкцією. Всі працівники, що працюють на випробувальних машинах повинні пройти навчання з проведення випробувань та супутнє навчання з техніки безпеки. Повне виключення ризиків при роботі неможливе, тому під час роботи необхідно зберігати обережність. Умови експлуатації обладнання є унікальною системою, що визначається рядом змінних параметрів до яких відносяться:

- умови експлуатації (виробниче приміщення, атмосфера, інженерні комунікації);
- самостійне втручання в конструкцію установки;
- досвід та кваліфікація працівників;

- характеристики зразків.

В процесі експлуатації ці фактори разом з іншими, можуть призводити до виникнення непередбачуваних обставин і, як наслідок, раніше не визначених факторів небезпеки.

Перед ввімкненням живлення необхідно перевірити загальний стан обладнання, наявність необхідних вузлів та їх готовність до роботи. Забороняється наближуватися та наближувати інструмент до усіх потенційно небезпечних та відкритих місць обладнання. Заборонено стояти на шляху слідування рухомих частин обладнання. Не експлуатувати машини без встановлених бокових кришок або гофрованих труб, що закривають рухомі деталі обладнання. Не класти частини тіла на шляху переміщення машини, не торкатися рухомого обладнання, шлангів, кабелів, зразків. Працівники зобов'язані знати місця розташування кнопок аварійного вимкнення для запобігання настання надзвичайних ситуацій. Наявність сторонніх осіб поблизу обладнання суворо заборонено, працівникам, що ведуть спостереження за ходом випробувань, забороняється наближуватися до зразків та обладнання.

е) Захист від шкідливих газів, паро- та пило-виділень передбачає обладнання місцевої витяжної вентиляції для відсосу отруйних речовин безпосередньо від місць їх утворення. Місцеві відсоси влаштовують конструктивно вбудованими та заблокованими з обладнанням так, що агрегат не можна запустити при виключеному відсосі.

- при роботі з отруйними і забруднюючими речовинами використовують спецодяг

- комбінезони, халати і фартухи;
- для захисту від лугів і кислот – гумове взуття і рукавички;
- для захисту шкіри рук, обличчя та шиї застосовують захисні пасти: антитоксичні, маслостійкі та водостійкі;
- очі від можливих опіків і подразнень захищають окулярами з герметичною оправою, масками та шоломами;

- для захисту органів дихання використовують фільтруючі та ізолюючі прилади (протигази і респіратори).

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

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

Світлотехнічна специфіка обумовлена світлотехнічною різноманітністю об'єктів зорової роботи користувача ПК: екрана, документації і клавіатури, розташованих у різних зонах спостереження, що вимагає багаторазового переміщення лінії зору від одного об'єкта до іншого. Об'єкти відмінності мають як негативний (темні об'єкти на світлому фоні) так і позитивний (світлі об'єкти на темному фоні) контраст. Тому відбувається постійна переадаптація від яскравих об'єктів з позитивним контрастом на темні з негативним контрастом. За восьмигодинний робочий день за монітором користувач кидає приблизно 30000 поглядів на екран, око працює з перевантаженням і не може достатньо адаптуватися до цієї ситуації. Такі особливості призводять до напруження м'язового та світло-сприймаючого апарату очей, що є однією з причин виникнення астенопічних явищ (різь в очах, біль в очах, ломить у надбрівній ділянці, розпливчастість контурів, нечіткість зображення). Постійний погляд на матове скло екрана монітора зменшує частоту кліпання очей, що призводить до висихання та викривлення роговиці ока, погіршує зір (синдром Сікка). Робота користувача за пульсуючим екраном монітора, що не відповідає нормативним вимогам щодо обмеження пульсації (блмання), викликає дискомфорт і втому (загальну і зорову). Робота з дзеркальною відбиваючою і неплоскою зовнішньою поверхнею екрана монітора, на якій з'являються численні відбиті відблиски, призводить до виникнення у користувача астенопічних явищ та функціональних змін ока.

Неправильний розподіл яскравості в полі зору, тобто поверхні периферії (стеля, стіни, меблі і т.п.) висвітлені краще ніж центр поля зору, призводить до

порушення основних зорових функцій ока. Засліплююча дія світильників у приміщенні, на робочому місці з ПК викликає не тільки астенопічні явища, але й функціональні порушення очей користувача. Кольоровий шрифт збільшує навантаження на зір, оскільки складові кольорів мають різні довжини хвиль і видимі на різній віддалі. Око потребує точнішої адаптації, ніж при чорно-білому зображенні.

4.3 Заходи забезпечення виробничої санітарії та гігієни праці

з) Заходи з виробничої санітарії і гігієни праці визначаються відповідно до вимог Державних санітарних норм і правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу», зареєстрованих МЮ України 06.05.2014 р. за № 472/25249, з урахуванням виявлених, в процесі аналізу потенційних небезпек, небезпечних і шкідливих виробничих факторів.

Санітарний клас виробництва і розміри його санітарно-захисної зони визначаються з урахуванням наявних шкідливих виробничих факторів, згідно вимог ДСП 173-96 «Державні санітарні правила планування та забудови населених пунктів».

Параметри мікроклімату і чистоти повітря визначають згідно вимог ДСН 3.3.6-042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень», в залежності від категорії фізичних робіт, для певних робочих місць (постійних і непостійних).

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

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

Необхідно враховувати, що:

- для постійних робочих місць визначаються оптимальні та допустимі параметри мікроклімату в холодний та теплий період року;

- для непостійних робочих місць визначаються тільки допустимі параметри мікроклімату в холодний та теплий період року.

- в холодний період року на постійних робочих місцях: температура оптимальна 18-20 °С, допустима 17-23 °С; відносна вологість: оптимальна 40-60 %, допустима 75 %; швидкість переміщення повітря: оптимальна не більше 0,2 м/с, допустима не більше 0,3 м/с;

- в холодний період року на непостійних робочих місцях допустима температура: 15-24 °С; допустима відносна вологість: 75 %; допустима швидкість переміщення повітря: не більше 0,3 м/с;

- в теплий період року на постійних робочих місцях: температура оптимальна 21-23 °С, допустима 18-27 °С; відносна вологість: оптимальна 40-60 %, допустима 40-60 %; швидкість переміщення повітря: оптимальна не більше 0,3 м/с, допустима не більше 0,2-0,4 м/с;

- в теплий період року на непостійних робочих місцях допустима температура 17-29 °С; допустима відносна вологість: 65 % при температурі 26 °С; допустима швидкість переміщення повітря: 0,2-0,4 м/с.

Далі, відповідно до вимог ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування», визначається оптимальний склад і тип систем вентиляції, кондиціонування та опалення, які забезпечують підтримку передбачених параметрів мікроклімату і чистоти повітря.

Захист від шкідливих газів, паро- та пило-виділень передбачає обладнання місцевої витяжної вентиляції для відсосу отруйних речовин безпосередньо від місць їх утворення. Місцеві відсоси влаштовують конструктивно вбудованими та зблокованими з обладнанням так, що агрегат не можна запустити при виключеному відсосі.

4.4 Заходи з пожежної безпеки

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

Категорію виробництва за пожежною небезпекою (А, Б, В, Г, Д) споруд (приміщень) цеху (ділянки, підстанції) визначають на основі аналізу речовин і матеріалів, що використовуються у виробництві, відповідно до вимог ДСТУ Б В.1.1-36:2016 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою» і СНиП 2.09.02-85* «Производственные здания».

Відповідно до категорії виробництва з пожежної небезпеки та вимогами ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги», визначають ступінь вогнестійкості приміщення цеху (дільниці, підстанції).

Шляхи евакуації працівників на випадок пожежі (переходи, евакуаційні виходи) передбачають згідно вимог ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги». Максимальну відстань від найбільш віддаленого робочого місця до найближчого евакуаційного виходу визначають згідно п. 2.29 (табл. 2) СНиП 2.09.02-85* «Производственные здания».

Відповідність обладнання, силових і освітлювальних мереж вимогам пожежної безпеки в першу чергу залежить від відповідності ступеня захисту їх оболонки (ІР) класу пожежанебезпечної зони (П-І, П-ІІ, П-ІІа и П-ІІІ) визначених згідно НПАОП 40.1-1.32-01 «Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок». Засоби виявлення займань та пожеж передбачаються згідно вимог ДБН В.2.5-56:2014 «Системи протипожежного захисту».

В даний час можуть використовуватися:

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

4.5 Заходи по забезпеченню безпеки у надзвичайних ситуаціях

і) Для запобігання небезпек які пов'язані з умовами праці в надзвичайних ситуаціях необхідно забезпечити сховища, протирадіаційні укриття, швидкомонтовані захисні споруди цивільного захисту. Для вирішення питань укриття населення в захисних спорудах створюється фонд захисних споруд. Цей фонд створюється завчасно Державною службою України з надзвичайних ситуацій, місцевими державними адміністраціями, органами місцевого самоврядування та об'єктами господарської діяльності. Порядок створення та утримання фонду захисних споруд, а також його облік визначається Кабінетом Міністрів України. Проектування, будівництво, обладнання та розміщення захисних споруд та об'єктів подвійного призначення здійснюють за нормами, розробленими відповідно до Закону України «Про будівельні норми».

Вимоги до змісту і експлуатації захисних споруд визначається Державною службою України з надзвичайних ситуацій. Зміст захисних споруд здійснюється об'єктами господарської діяльності, на балансі яких вони знаходяться, за рахунок власних коштів. З моменту виключення захисної споруди з фонду захисних споруд воно втрачає статус захисної споруди цивільного захисту. Захисні споруди цивільного захисту можуть використовуватися в мирний час для господарських, культурних, побутових потреб у порядку визначеному Кабінетом Міністрів України. Тому вони можуть передаватися в оренду, зі збереженням їх цільового призначення, за винятком, захисних споруд, що знаходяться в постійній готовності, а саме: в яких розташовані пункти управління, призначених для укриття працівників об'єктів, що мають виробництво підвищеної небезпеки, розташовані в зонах ймовірного радіоактивного зараження і призначених для укриття населення при радіаційних аваріях.

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Використання порошкової металургії для виготовлення дисків авіаційних двигунів із жароміцного нікелевого сплаву ЕП741НП полягає у покращенні механічних властивостей дисків. Зокрема підвищення часу до руйнування виробу при робочих температурах. Даний показник можливо простежити під час випробування дисків на довготривалу міцність та малоциклову втому. Використання даної технології виготовлення дозволяє збільшити ресурс роботи дисків, відповідно і підвищити ресурс роботи двигуна. Збільшення часу роботи диску дозволяє зменшити кількість необхідних ремонтів двигуна, а також повної заміни диску. У таблиці 5.7 наведено опис ідеї та напрямки її застосування.

Таблиця 5.7 – Опис ідеї

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для споживачів
Застосування порошкової металургії для виготовлення дисків для авіаційних двигунів	1. Цивільна авіація	Збільшення ресурсу експлуатації двигунів та часу до руйнування виробу. Зменшення кількості необхідного технічного обслуговування двигуна у зв'язку із закінченням ресурсу диску. Зменшення кількості замін диску.
	2. Військова авіація	

У таблиці 5.8 наведено попередню характеристику потенційного ринку, проаналізовано головних конкурентів, динаміку ринку та інших характеристик ринку.

Таблиця 5.8 – Попередня характеристика потенційного ринку

№ з/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	2	3
1	Головні конкуренти	КНР Туреччина США
2	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Динаміка у виготовленні та застосуванні дисків виготовлених за допомогою порошкової металургії є актуальною та зростаючою
3	Наявність обмеження для входу (вказати)	Сертифікаційні вимоги Високі стандарти якості

Продовження таблиці 5.8

1	2	3
	характер обмежень)	Великі витрати на дослідження та впровадження
		Необхідність у ліцензії
		Конкуренція у виробництві
		Високі технічні вимоги до виробів
4	Специфічні вимоги до сертифікації	Сертифікація продукції повинна відповідати всім міжнародним стандартам та/або стандартам покупця

Визначення потенційних груп клієнтів, їх характеристик та формування орієнтованого переліку вимог до товару (робіт чи послуг) для кожної групи – проведено, інформація наведена у таблиці 5.9.

Таблиця 9 – Попередня характеристика потенційних клієнтів

№ з/п	Потреба, що формує ринко	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги користувача
1	2	3	4	5
1	Відсутність дешевих вітчизняних аналогів дисків з задовільним ресурсом роботи	Виробники цивільної авіації/двигунів	Комерційна вигода з порівняно задовільним ресурсом роботи.	Помірні навантаження з постійною періодичністю, важливим є ресурс та збільшена кількість годин польоту
2	Відсутність необхідних підходящих дисків на машини через агресію на державу Україну та закриття для торгівлі великого ринку авіації	Виробники цивільної авіації/двигунів	Комерційна вигода з порівняно задовільним ресурсом роботи.	Помірні навантаження з постійною періодичністю, важливим є ресурс та збільшена кількість годин польоту
3	Відсутність дешевих вітчизняних аналогів дисків з задовільним ресурсом роботи	Військово-оборонний сегмент ринку	Основною характеристикою є технічні характеристики, надійність роботи, високі навантаження з порівняно низьким ресурсом роботи	Можливість перенесення граничних та різких навантажень, велика кількість годин роботи не є важливим показником
4	Відсутність необхідних підходящих дисків на машини через	Військово-оборонний сегмент ринку	Основною характеристикою є технічні характеристики,	Можливість перенесення граничних та різких навантажень, велика кількість годин

Продовження таблиці 5.9

1	2	3	4	5
	агресію на державу Україну та закриття для торгівлі великого ринку авіації		надійність роботи, високі навантаження з порівняно низьким ресурсом роботи	роботи не є важливим показником

Здійснено SOWT-аналіз середовища реалізації проекту та наведено у таблиці 5.10.

Таблиця 5.10 – SOWT-аналіз

Сильні сторони:	Слабкі сторони:
- доступність матеріалів - якість виробу - аналог іноземних виробів - дешевше ніж іноземні вироби - широкий спектр застосування - внутрішній ринок – дешева доставка	- відсутність повного спектру необхідного обладнання - відсутність можливості використання внутрішнього ресурсу для ремонту - недостатня фінансова ємність внутрішнього ринку - високі вимоги до якості продукту
Можливості:	Загрози:
- збільшення доступності виробів - нові робочі місця - збільшення кількості кваліфікованих кадрів - налагодження партнерських відносин на внутрішньому ринку - вихід на міжнародний ринок - наявність високотехнологічного виробництва - перекваліфікування на виготовлення подібної продукції	- підвищена кількість браку - нестабільність ринку - нестабільність зовнішньої ситуації - дороге імпортозаміщення - проблеми в логістиці

Розробка ринкової стратегії проекту передбачає визначення стратегії охоплення ринку, опис цільових груп потенційних споживачів, було проведено вибір цільових груп потенційних споживачів, інформацію наведено у таблиці 11.

Таблиця 11 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ з/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтований попит в межах цільової групи	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Машинобудування	Висока	Десятки штук	Середня	Складна
2	Авіабудування	Висока	Десятки штук	Середня	Середня

Створено карту стейкхолдерів наступним чином: ідентифіковано стейкхолдерів, здійснено їх пріоритизацію та на основі отриманих даних побудовано карту стейкхолдерів, що зображено на рисунку 5.21. Карта дозволяє візуалізувати картину стейкхолдерів та дати розуміння їх взаємодії.



Рисунок 5.21 – Карта стейкхолдерів

Визначено витрати на оплату праці з урахуванням балансу робочого часу одного працівника, який необхідний при виконанні певного етапу виготовлення авіаційних дисків, визначено суму ЄСВ, отримані дані наведено в таблицях 5.12, 5.13.

Таблиця 5.12 – Склад, чисельність та фонд заробітної плати виробничих працівників

Категорії працівників	Наявна чисельність осіб		Тарифна ставка за розрядом виконуваних робіт, грн/год	Ефективний фонд робочого часу, год	Тарифний заробіток, грн	Преміальний відсоток до тарифного заробітку, %	Розмір премії, грн	Річний фонд заробітної плати, грн	ЄСВ, грн
	За зміну	На добу							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Гаряче ізостатичне пресування									
1. Основні працівники, в тому числі:									
Спікальник	1	3	76,0	1872	13072	15,0	1960,8	180393,6	39686,6
Оператор	1	3	81,8	1872	14069,6	15,0	2110,5	194160,4 8	236875, 8
Майстер	1	3	90,2	1872	15514,4	15,0	2327,2	214098	47101,6
2. Допоміжні працівники									
Контролер	1	2	70,4	1872	12108,8	15,0	1816,3 2	167101,4 4	36762,3
Плановик	1	2	72,1	1872	12401,2	15,0	1860,1 8	171136,5 6	37650,0
3. Черговий та ремонтний персонал									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Електрик	1	3	79,7	1872	14040	15,0	2106	193752	42625,4
Механік	1	3	74,09	1872	13040	15,0	1956	179952	39589,4
Термічна обробка									
1. Основні працівники, в тому числі:									
Терміст	1	3	86,6	1872	14895,2	15,0	2234,2 8	205553,7 6	45221,8
Майстер	1	3	90,5	1872	15566	15,0	2334,9	214810,8	47258,4
2. Допоміжні працівники									
Пірометрист	1	3	79,9	1872	13742,8	15,0	2061,4 2	189650,6 4	41723,1
Контролер	1	3	70,4	1872	12108,8	15,0	1816,3 2	167101,4 4	36762,3
Плановик	1	3	72,1	1872	12401,2	15,0	1860,1 8	171136,5 6	37650,0
3. Черговий та ремонтний персонал									
Електрик	1	3	79,7	1872	14040	15,0	2106	193752	42625,4
Механік	1	3	74,09	1872	13040	15,0	1956	179952	39589,4
Механічна обробка									
1. Основні працівники, в тому числі:									
Токар	1	2	76,55	1872	12675,4	15,0	1901,3 1	174920,5 2	38482,5
Шліфувальник	1	2	74,00	1872	12253,17	15,0	1838	169094,0 4	37200,7

Продовження таблиці 5.12

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Майстер	1	2	89,7	1872	15428,4	15,0	2314,2 6	212911,9 2	46840,6
2. Допоміжні працівники									
Контролер	1	2	70,4	1872	12108,8	15,0	1816,3 2	167101,4 4	36762,3
Плановик	1	2	72,1	1872	12401,2	15,0	1860,1 8	171136,5 6	37650,0
3. Черговий та ремонтний персонал									
Електрик	1	2	79,7	1872	14040	15,0	2106	193752	42625,4
Механік	1	2	74,09	1872	13040	15,0	1956	179952	39589,4
Разом ВП	21	54	X	X	X	X	42298, 07	3801420	863312, 4

Таблиця 5.13 – Склад, чисельність та фонд заробітної плати адмінперсоналу

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

Визначаємо матеріальні витрати та вартість споживчих послуг на одиницю виготовленої продукції – одного диску турбіни, дані наведено в таблиці 5.14. Розрахунок проводиться на річну програму випуску двигунів у кількості 100 шт., на один двигун необхідно 3 диски: ТНД, ТВД, лабіринтний.

Таблиця 5.14 – Розрахунок матеріальних витрат

Матеріальні витрати	Норматив у розрахунку на один. продукт	Виробнича програма, шт.	Обсяг сировини/робіт	Ціна, грн	Сума, грн
1	2	3	4	5	6
Диск ТНД					
Капсула	1 шт.	100	100 шт.	4900,00	49000,00

Продовження таблиці 5.14

1	2	3	4	5	6
Порошок	62,3 кг		623 кг	11100,00	6915300,00
ГПІ капсули	3 шт./садка		34 садки	85000,00	2890000,00
Термічна обробка заготовки	8 шт./садка, 4 оп.		52 садки	96360,00	5010720,00
Механічна обробка заготовки	5 оп.		500 оп.	7430,00	3715000,00
Диск ТВД					
Капсула	1 шт.	100	100 шт.	4900,00	49000,00
Порошок	72,5 кг		725 кг	11100,00	8047500,00
ГПІ капсули	3 шт./садка		34 садки	85000,00	2890000,00
Термічна обробка заготовки	6 шт./садка, 4 оп.		68 садок	96360,00	6552480,00
Механічна обробка	5 оп.		500 оп.	7430,00	3715000,00
Диск лабіринтний					
Капсула	1 шт.	100	100 шт	4900,00	49000,00
Порошок	52,5 кг		525 кг	11100,00	5827500
ГПІ капсули	3 шт./садка		34 садки	85000,00	2890000,00
Термічна обробка заготовки	16 шт./садка, 4 оп.		24 садок	96360,00	2312640,00
Механічна обробка заготовки	5 оп.		500 оп.	7430,00	3715000,00
Разом	X	300	X	614370,00	48075660,00

Таблиця 5.15 – Розрахунок вартості спожитих послуг

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

Визначили річну суму амортизації з урахуванням норм амортизації та витрати на поточний ремонт у розмірі 2% від балансової вартості основних засобів, інформація наведена в таблиці 5.16.

Таблиця 5.16 – Розрахунок амортизації

Група основних засобів	Нормативний термін експлуатації	Первісна вартість ОЗ на 01.01	Надійшло ОЗ		Вибуло ОЗ		Сума, грн
			Дата	Первісна вартість	Дата	Первісна вартість	
Прес Quintus	20 років	320000000	01.02	320000000	-	-	320000000
Вакуумна піч IPSEN T ² T	10 років	200000000	09.02	200000000	-	-	200000000
Токарний верстат	45 років	150000000	09.02	150000000	-	-	150000000
Шліфувальний верстат	50 років	150000000	15.02	150000000	-	-	150000000
Разом	X	X	X	X	X	X	550000000

Таблиця 5.17 – Кошторис витрат

Калькуляційні статті	Витрати	
	у розрахунку на одиницю продукції, грн	у розрахунку на весь обсяг продукції, грн
Сировина та матеріал	614370,0	48075660,0
Електропостачання	6640,2	1997640,0
Заробітна плата основних виробничих працівників	1828,7	548609,6
Заробітна плата допоміжних працівників	1431,5	429444,4
Заробітна плата чергового та ремонтного персоналу	1573,88	472164,0
Заробітна плата адмін. персоналу	1824,1	547230,5
ЄСВ 22%	138087,05	41426115,0
Витрати на утримання та експлуатацію основних засобів/поточний ремонт	157480,00	47244000,0
Загальновиробничі витрати	443110,0	132933000,0
Виробнича собівартість	1356345,43	406903629
Адміністративні витрати	52555,0	157666500
Повна собівартість	1408900,43	422670129,0

Розрахуємо очікуваний економічний ефект від застосування порошкової металургії для виготовлення авіаційних дисків.

В технічних умовах наведено норма часу до руйнування матеріалу ($\tau = 100$ год). За допомогою випробувань отримано результати довготривалої міцності, що впливає на час до руйнування виробу. Диск ТВД, Диск ТНД, Диск лабіринтний було досліджено згідно ТУ при температурі 650°C та навантаженні 102 кгс/мм². Отримані данні наведено в таблиці 2.3.

Час до руйнування «Диск ТВД» = 667 год., «Диск ТНД» = 493 год, «Диск лабіринтний» = 566 год. Якщо враховувати, що норма до руйнування матеріалу 100 год, то ресурсу «Диску ТВД» збільшується у $667/100 = 6,67$ раз, «Диску ТНД» - у $493/100 = 4,93$ раз, «Диску лабіринтного» - у $566/100 = 5,66$ раз.

Отже, при використанні порошкової металургії для виготовлення авіаційних дисків один диск може замінити певну кількість дисків, які працюють за нормами часу до руйнування відповідно до ТУ, тому можна розрахувати економічний ефект за формулою 5.1.

$$E = \frac{T_{\text{ПД}}}{T_{\text{ТУ}}} * C_{\text{Д}} \quad (5.1)$$

де $T_{\text{ПД}}$ – термін служби порошкового диску, год,

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

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

$$E_{\text{ТВД}} = \frac{667}{100} * 1408900,43 = 9397365,9 \text{ грн};$$

$$E_{\text{ТНД}} = \frac{493}{100} * 1408900,43 = 6945879,1 \text{ грн};$$

$$E_{\text{ЛАБ}} = \frac{566}{100} * 1408900,43 = 7974376,4 \text{ грн}.$$

Оскільки в двигуні використовуються 3 типи дисків, то візьмемо середнє значення економічного ефекту для 3 типів дисків та розрахуємо економічний ефект для партії в 100 двигунів за формулою 5.2.

$$E = \frac{E_{\text{ТВД}} + E_{\text{ТНД}} + E_{\text{ЛАБ}}}{3} * 100 \quad (5.2)$$

де $E_{\text{ТВД}}$ – економічний ефект Диску ТВД,

$E_{\text{ТНД}}$ – економічний ефект Диску ТНД,

$E_{\text{ЛАБ}}$ – економічний ефект Диску Лабіринтного.

$$E = \frac{9397365,9 + 6945879,1 + 7974376,4}{3} * 100 = 810587380,0 \text{ грн.}$$

Отже, при використанні порошкової металургії для виготовлення дисків авіаційних двигунів значно покращується час до руйнування матеріалу, а також значно підвищується ресурс роботи. На партії в 100 двигунів економічний ефект складає 810 мільйонів 587 тисяч 380 гривень. Економічний ефект для одного двигуна, тобто на комплектів з трьох дисків економічний ефект складає 8 мільйонів 105 тисяч 883 гривні.

ВИСНОВКИ

Було розглянуто технологію виготовлення авіаційних двигунів з жароміцного нікелевого сплаву ЕП741НП виготовлених технологією металургії гранул. Важливою частиною технологічного процесу для отримання необхідних властивостей є гаряче ізостатичне пресування, що дозволяє використовувати металургію гранул для виготовлення монолітного матеріалу та вакуумна термічна обробка, яка забезпечує задовільний стан поверхні заготовок, поверхневих дефектів, мінімізує жолоблення і є екологічно безпечною. Після виконання усіх технологічних процесів було проведено всебічні дослідження дисків. Визначено хімічний склад, що відповідає технічним умовам, досліджено макро- та мікроструктуру дисків: мікроструктура складалася із γ -твердого розчину, що зміцнений інтерметалідною γ' -фазою з наявністю карбідів та карбонітрідів, виявлені границі окремих гранул, що допускається ТД, суцільної сітки гранул не виявлено.

Проведено випробування короточасних властивостей, ударної в'язкості, довготривалої міцності, малоциклової втоми. При експлуатації дисків критичними параметрами, що визначають ресурс є довготривала міцність та малоциклова втома. За результатами досліджень усі показники задовольняють НТД, а критичні показники суттєво перевищують норми технічної документації.

Було проведено аналіз потенційних небезпек, що можливі при дослідженні властивостей диску, а також проаналізовано заходи безпеки для запобігання виникнення можливих небезпек та зменшення ризиків травмування.

Проведено аналіз економічного ефекту використання авіаційних дисків виготовлених за допомогою металургії гранул. На партії в 100 двигунів економічний ефект складає 810 мільйонів 587 тисяч 380 гривень. Економічний ефект для одного двигуна, тобто на комплектів з трьох дисків економічний ефект складає 8 мільйонів 105 тисяч 883 гривні. Тобто дана технологія дозволяє зменшити частоту технічного огляду, технічного ремонту двигунів завдяки

підвищенню ресурсу роботи дисків. А також зменшує частоту повної заміни дисків, яка пов'язана з закінченням ресурсу роботи.

За результатами випробувань механічних властивостей, довготривалої міцності, а також малоциклової втоми гранульна технологія для виготовлення дисків з жароміцного нікелевого сплаву ЕП741НП за усіма аспектами досліджень відповідає нормам, що задані підприємством розробником. Отримані результати, що в декілька разів перевищують норми має гарний запас міцності та ресурсу для проведення подальших досліджень і введення технології металургії гранул у масове та серійне виробництво.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Furrer D. Ni-Based Superalloys for Turbine Disks / D. Furrer, H. Frecht. - JOM. 1999. №1. 14 – 17 p.
2. Верин Дж. Д. Микроструктура и свойства жаропрочных сплавов. Стойкость сплавов к перегревам / Дж. Д. Верин // Жаропрочные сплавы: книга / [Ч. Симс и др.]. - М., Металлургия, 1976. - 217 – 240 с.
3. Reed R.C. The superalloys. Fundamentals and Applications /R.C. Reed. - Cambridge: University Press, 2006. 372 p.
4. Химушин Ф. Ф. Жаропрочные стали и сплавы / Ф. Ф. Химушин. - М.: Металлургия, 1969. - 749 с.
5. Gu Y. Development of Ni-Co-Base Alloys for High-temperature disk applications / Y. Gu, C. Cui, H. Harada // Superalloys 2008. - TMS.- 2008. - 53 – 62 p.
6. Superalloy optimized for high-temperature performance in high-pressure turbine disks : pat. 6521 175 USA / D.P. Mourer, E.S. Huron, K.R. Bain E.E. Montero. - publ. date: 18.02.2003.
7. High strength powered metallurgy nickel base allow : pat. 6468 368 USA / M. Howard, B.C. Raymond, B. Prabirю - publ. date: 22.10.2002.
8. Guedou J. Development of a New Fatigue and Greep Resistant PM Nikel-Base Superalloy for Disk Applications / J. Guedou, I. Augustins-Lecallier, P. Caron // Superalloys 2008. - TMS.- 2008. - 21 – 30 p.
9. Guedou J., Superalloy for disk: Development and applications, Materials and Processes Deparment / J. Guedou, Lautriaou, Honnorat // Superalloys. - Snecma. - 1992. – 267 p.
10. Ломберг Б.С. Жаропрочные сплавы и материалы для дисков ГТД: Авиационные материалы на рубеже XX – XXI веков / Б.С. Ломберг. - М.: ВИАМ, 1994. 258 – 273 с.

11. Гарибов Г.С. Современный уровень развития порошковой металлургии жаропрочных никелевых сплавов / Г.С. Гарибов // Технология легких сплавов. - 2000. – вып. 6. - 149 – 155 с.
12. Кишкин С.Т. Литейные жаропрочные сплавы на никелевой основе / С.Т. Кишкин, Г.Б. Строганов, А.В. Логунов. - М.: Машиностроение, 1987. - 112 с.
13. Беликов С.В. О влиянии тантала на характеристические точки жаропрочных никелевых сплавов / С.В. Беликов, С.В. Гайдук, В.В. Кононов // Вісник двигунобудування. - 2004. – вып. 3. - 99 – 102 с.
14. Падалко А. Г. Практика горячего изостатического прессования неорганических материалов / А. Г. Падалко. - М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 267 с.
15. Асонов А. Н. Получение гранул методом плазменно-дугового распыления / А. Н. Асонов // Металлургия гранул : сборник / [б.а.]. – М., ВИЛС, 1989. - 158 с.
16. Еременко В. И. Формирование структуры гранулируемых никелевых сплавов при горячем изостатическом прессовании / В. И. Еременко. - ВИЛС, 1989. - 218 с.
17. Мусиенко В. Т. Закономерности образования гранул при центробежном распылении вращающейся заготовки / В. Т. Мусиенко // Металлургия гранул : сборник / [б.а.]. – М:ВИЛС, 1983. - 41 с.
18. Окмянский Ю. А. Влияние параметров центробежного распыления расплава на размер гранул титановых и никелевых сплавов / Ю. А. Окмянский // Металлургия гранул : сборник / [б.а.]. – М: ВИЛС, 1983. - 49 с.
19. Garibov G. S. Current trends of PM superalloys discs production technology for gas turbine engines / G. S. Garivov, A. V. Vostrikov // proc. of the 2005 International Conference on Hot Isostatic Pressing., [Paris], May 22 – 25. - 2005. - P. 86 – 91.
20. Radavich J. Effect of processing and composition on the structure and properties of PM EP741NP type alloys / J. Radavich, T. Carneiro, D. Furrer // Chinese Journal of Aeronautics. – 2007 . – vol. 20. - 97 – 106 p.

21. Schafrik R. Superalloy technology – A Perspective on Critical Innovations for Turbine Engines / R. Schafrik, R. Schrague // Key Engineering Materials. - 2008. - vol. 380. - 113 -134 p.
22. Козлов А. А. Обработка нержавеющей сталей и жаропрочных никелевых сплавов в печах Seco/Warwick 10.0 VPT 4035/36HV и IPSEN T²T / А. А. Козлов, А. А. Педаш, В. В. Мурашко // Молодежь в авиации: новые решения и передовые технологии: тезисы докладов VI Международной молодежной научно-технической конференции авиастроительной отрасли. – Запорожье, АО «Мотор Сич», 2012. - С. 199.
23. Gayada J. The effect of Dual Microstructure Heat Treatment on an Advanced Nickel-base Alloy / J. Gayada, T.P. Gabb, P. Kantozos // Superalloys 2004. - USA, Warrendale PA. – TMS. – 2004. - 323 – 329 p.
24. Razumovskii I. M. Hot isostatic pressing improves the quality of the blades from Ni-base superalloys for turbine engines / I. M. Razumovskii, A. A. Tikhonov, S.F. Marinin // Advanced Materials Research. – 2011. - vol. 278. - 295 – 300 p.
25. Симс Ч. И. Жаропрочные сплавы / Ч.И. Симс. - М.: [б.в.], 1976. 568 с.
26. Белов А. Ф. Структура и свойства гранулируемых никелевых сплавов / А.Ф. Белов. – М.: [б.в.], 1984. - 63 -65 с.
27. Hu Z. Role of P, S and B on creep behavior of alloy 718 / Z. Hu H. Song, S. Guo // Materials science and technology. - 2001. – vol. 4. - 399 – 402 p.
28. Кононов И.А. Технологическое оборудование для производства новых конструкционных материалов методом металлургии / И.А. Кононов // Металлургия гранул : сборник. / [б.а.]. – М., ВИЛС, 1983. – 226 - 237 с.
29. Мусиенко В.Т. Порошковая металлургия / В.Т. Мусиенко. - Киев: ИПМ АН УССР, 1979. 1 – 7 с.

ДОДАТОК А

Хімічний склад гранульних жароміцних нікелевих сплавів, мас. %

Марка сплаву	Масова доля																						
	Елементів																	Домішок					
	Нікель	Вуглець	Хром	Титан	Алюміній	Молібден	Ніобій	Ванадій	Кобальт	Вольфрам	Магній	Бор	Церій	Гафній	Лантан	Цирконій	Ніобій+тантал	Кремній	Марганець	Залізо	Сірка	Фосфор	Свинець
ЕІ698П (ХН71МТЮБ)	Осн	0,03-0,07	13,0-16,0	2,35-2,75	1,45-1,80	2,8-3,2	1,9-2,2	-	-	-	-	0,015	0,01	-	-	-	-	0,5	0,4	2,0	0,007	0,015	0,001
ЕІ698МП (ХН66ВМТЮБ)	Осн	0,04	15,5-17,5	0,8-1,2	2,0-2,4	3,8-4,4	2,2-2,6	0,8-1,5	-	0,8-1,5	0,03	0,005	0,01	-	-	0,005	-	0,45	0,4	1,5	0,007	0,015	-
ЕП741П (ХН53КВМТЮБ)	Осн	0,06	8,0-10,0	1,3-1,7	4,7-5,2	2,2-3,0	1,2-1,6	-	15,0-16,5	6,5-7,2	0,02	0,015	0,01	-	-	0,015	-	0,5	0,5	0,5	0,009	0,015	-
ЕП741НП (ХН51КВМТЮБ)	Осн	0,02-0,06	8,0-10,0	1,6-2,0	4,8-5,2	3,5-4,2	2,4-2,8	-	15,0-16,5	5,2-5,9	0,02	0,015	0,01	0,1-0,4	-	0,015	-	0,5	0,5	0,5	0,009	0,015	-
ЕП962П (ХН54КВМТЮБ)	Осн	0,04-0,08	12,0-15,0	2,4-3,0	3,6-4,0	3,9-5,0	-	0,1-0,6	8,0-10,0	2,4-3,0	0,02	0,015	-	0,1-0,4	0,01	-	3,2-3,7	0,5	0,5	0,5	0,009	0,015	-
ЕП975П (ХН52КВМТЮБ)	Осн	0,04-0,08	8,0-10,0	1,6-2,2	5,0-5,4	2,4-3,2	1,6-2,2	-	10,0-12,0	9,1-9,8	0,02	0,02	0,02	0,5-0,9	0,01	0,05	-	0,5	0,5	0,5	0,009	0,015	-
ВВ750 (ХН50КВМТЮБ)	Осн	0,03-0,08	9,0-11,0	3,5-3,9	3,4-4,0	3,0-3,6	1,6-2,0	-	14,0-16,0	5,4-6,2	0,02	0,015	-	0,1-0,4	-	0,01	-	0,5	0,5	0,5	0,009	0,015	-

ДОДАТОК Б

Технологія виробництва дисків турбін з жароміцного нікелевого сплаву ЕП741НП
методом металургії гранул

