

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Редиско - механізм, Інженерно - будівельно - конструкторський
(спеціальність інженерів, факультет)
Навчальна програма спеціалізації
(спеціальна навчальна програма)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

Майстер

(спеціальність освіти)

на тему Конструктивний вибір методів будівництва споруди
та визначення матеріальних витрат на будівництво ПД

Виконав: студент(ка) Є курсу, групи ІІ-ІІІМ

Спеціальності ІІІІ „Матеріалознавство“
(спеціальна навчальна програма)

Освітня програма (спеціалізація)

„Применение материалов“

Величенко К. П.

(прізвище та ініціал)

Керівник Кучко С. О.

(прізвище та ініціал)

Рецензент

(прізвище та ініціал)

Форма № 25

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
(Сторінка заповнюється викладачем вищої освіти)

Інститут, факультет Фізико-технічний факультет, спеціальності - проєктування
Кафедра енергетичної інженерії та енергозбереження
Ступінь вищої освіти магістр
Спеціальність ЕЕД - менеджменту енергетики

Освітня програма (спеціалізація) Проектне менеджменту енергетики
(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

« » 20 року

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

Викладач: Катерина Романівна
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Висвітлення внутрішньої структури на
виготовленні матеріальних елементів для бетону ГТД

керівник проекту (роботи) Ковалів Олександр Васильович
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, в.о. заступника)

затверджені наказом закладу вищої освіти від « 10 » грудня 20 13 року №

2. Сроок подання студентом проєкту (роботи)

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) Завдання виконати з матеріальних елементів
на М. основі, - матеріал бетону до нього, вказати умови експлуатації,
орієнтація виробів, Основні вказівки призначення: при експлуатації згідно
додатків. Крім того додатковий сенс до виконання матеріальних

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналітичний етап; 2. Матеріальні та методичні засоби виконання
матеріальних елементів бетону ГТД; 3. Аналіз вироблення
бетону; 4. Оцінка умов експлуатації матеріальних елементів;
5. Висновки та рекомендації.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним вказуванням обов'язкових креслень)

1. Матеріальні елементи бетону на М. основі. 2. Витрати матеріальних елементів
на виготовлення матеріальних елементів бетону ГТД. 3. Аналіз вироблення
бетону ГТД. 4. Експлуатація матеріальних елементів бетону ГТД.
7/8. 6. Матеріальні елементи бетону. 7. Крім того додатковий сенс до виконання
матеріальних елементів бетону ГТД. 8. Висновки та рекомендації.

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Роз.ш.	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання виконан	прийняв оцінку завдання
1	Климов О.В.		
2	Климов О.В.		
3	Климов О.В.		
Головний інженер	Нестеров О.В., Звонимир О.М.		
Розробник	Климов О.В., Звонимир О.М.		
Керівник проекту	Пилип Р.В.		

7. Дата видачі завдання « 04 » вересня 2019 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дослідження проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітки
1	Судженням комісії факультету з оцінки наукової роботи	16.09.19	
2	Наданням з матеріалами роботи	8.10.19	
3	Наданням з матеріалами роботи	15.11.19	
4	Скорочення часу на виконання роботи	04.12.19	
5	Виконання роботи	05.12.19	

Студент(ка)

Керівник проекту (роботи)

Виконано Р.В.
Климов О.В.

РЕФЕРАТ

ПЗ:98 с.,23 рис.,14 табл., 11джерел, ГЧ

Об'єкт дослідження – жароміцні нікелеві сплави ЖС6У-ВІ та ЖС32-ВІ для виготовлення лопаток ГТД.

Мета дослідження – вплив легування та структури на властивості жароміцних сплавів.

Проведено аналіз хімічного складу та структури сплавів для лопаток ГТД, а саме ЖС6У-ВІ та ЖС32-ВІ. Описано методики проведення досліджень, вплив структури на властивості та методи отримання цих структур, а також вплив легувальних елементів на властивості. Проаналізовано вплив структури та фазового складу на властивості жароміцних сплавів.

Розглянуто види термічних обробок для сплавів та методи підвищення їх властивостей за допомогою додаткових обробок таких як: нанесення захисних покриттів, механічна обробка та проведення ГП для даних сплавів.

ЖАРОМІЦНІСТЬ, МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ, ЛОПАТКА ГТД, СТРУКТУРА, ФАЗОВИЙ СКЛАД, ЛЕГУВАЛЬНІ ЕЛЕМЕНТИ, ТЕРМІЧНА ОБРОБКА, ГАРУВАННЯ, ГОМОГЕНІЗАЦІЯ, ЗАХИСНІ ПОКРИТТЯ, МЕТОДИКА, КАРБІДИ, ІНТЕРМЕТАЛІДНА ФАЗА.

ЗМІСТ

Вступ.....	9
1 Аналітичний огляд.....	13
1.1 Особливості хімічного складу матеріалів для виготовлення лопаток ГТД	13
1.2 Вплив оброблення на структуру та властивості матеріалів	20
2 Матеріали та методики дослідження матеріалів для виготовлення лопаток ГТД	24
2.1 Матеріали для виготовлення лопаток ГТД.....	24
2.2 Методики проведення досліджень	28
3 Аналіз проведених досліджень	32
3.1. Вплив структури та фазового складу на властивості жароміцних сплавів.....	36
3.2. Вплив легувальних елементів на механічні властивості жароміцних сплавів	40
3.3 Термічна обробка ливарних жароміцних сплавів.....	45
3.4 Отримана структура та властивості відливок лопаток турбіни з нікелевих сплавів після ГПП	57
4. Охорона праці і безпека у надзвичайних ситуаціях	65
4.1. Аналіз потенційних небезпек.....	65
4.2. Заходи по забезпеченню безпеки.....	67
4.3 Заходи забезпечення виробничої санітарії та гігієни праці.....	72
4.4. Заходи по забезпеченню пожежної безпеки.....	73
4.5 Заходи з безпеки у надзвичайних ситуаціях	75
5 Економічна частина	79
5.1 Тенденції розвитку світового ринку технологій.....	79
5.2 Техніко-економічні розрахунки.....	80
5.2.1 Характеристика продукції.....	80
Висновки	87
Перелік посилань.....	91
Додаток А.....	93

ВСТУП

Основною тенденцією авіаційного машинобудування є безперервне підвищення температури газів перед турбіною, що передбачає підвищення вимог до конструкції, надійності та ресурсу лопаток, дисків, валів та інших деталей, які відчувають високі термомеханічні циклічно змінні навантаження. Тому темою даної дипломної роботи є дослідження особливостей хімічного складу та структури жароміцних нікелевих сплавів для виготовлення деталей ГТД.

Зростаючі вимоги до надійності та ресурсу ГТД та безпеки польотів літаючих апаратів зумовлюють розробку, створення та використання в їх виробництві якісно нових технологій, які забезпечують значне підвищення надійності і ресурсу найбільш відповідальних деталей.

До таких технологій у виробництві лопаток турбіни можуть бути віднесені виготовлення лопаток на основі аналітичних систем монокристалічного лиття, обробки робочих поверхонь хвостовика та бандажних полок методом глибинного шліфування, захист проточних та внутрішніх поверхонь охолоджувальних каналів лопаток від газовою корозії, окислення та впливу підвищених робочих температур за рахунок використання сучасних методів нанесення покриттів.

Тому основною задачею являється систематизація, аналіз та вивчення впливу прогресивних технологій виготовлення лопаток турбіни з нікелевих жароміцних сплавів на їх надійність та ресурс.

Один із способів підвищення механічних властивостей є отримання спрямованої та монокристалічної структури робочої охолоджувальної лопатки ГТД, що дозволяє підвищити робочу температуру лопаток на 80...120С° в порівнянні з лопатками, які мають рівновісну структуру. При цьому температура газу перед робочою лопаткою першого ступеня на сумісних двигунах може підвищуватися до 1800С°.

Перевагою виробів, отриманих спрямованою кристалізацією, в порівнянні зі звичайним литтям полягає в тому, що вибудовування границь зерен вздовж осі діючих навантажень (спрямована структура) або усунення границь зерен (моноструктура) збільшує пластичність металу при підвищених температурах, також підвищує довготривалу міцність сплавів. Контролювання процесу спрямованої кристалізації дозволяє задавати необхідну аксіальну та азимутальну орієнтування кристалічної ґратки сплаву і за рахунок цього значно збільшити опір термічної втоми, що принципово є важливим для деталей при підвищених температурах.

Розвиток технології, який покращує отримання монокристалічних відливків лопаток турбіни з жароміцних нікелевих сплавів, безперервно пов'язано з використанням високоефективних метало-фізичних методів дослідження на основі сучасних уявлень про кристалічну природу металів, дислокаційному механізмі їх деформації, кінетиці фазових перетворень при високих температурах та механіки руйнування.

До формування високої якості механічних властивостей жароміцних сплавів наряду з легуванням найважливіша роль належить структурному фактору, на який суттєво впливає металургійні методи. До останніх, в першу чергу, треба віднести отримання однорідного розплаву після його високотемпературної обробки, оптимальні режими кристалізації та термічна обробка відливок. Суттєвий інтерес уявляє вивчення модифікованих нікелевих жароміцних сплавів бором, гафнієм, цирконієм як окремо, так і комплексно з точки зору отримання більш сприятливих форм та розмірів зерна металевої матриці і впорядкованих фаз, що забезпечує підвищення експлуатаційних характеристик відповідального лиття. Високі економічні затрати при виробництві відливків з монокристалічною структурою ставлять задачу подальшого підвищення фізико-механічних властивостей більш економічного лиття з рівновісною структурою.

Анізотропія фізико-механічних властивостей монокристалічних нікелевих жароміцних сплавів потребує враховувати їх залежність від

кристалографічного орієнтування при визначенні експлуатаційних характеристик робочих лопаток турбіни.

Проблема зниження високотемпературної корозії (ВТК) лопаток газотурбінних двигунів (ГТД) особливо відзначились при використанні авіатехніки в умовах польотів над пустелями та океанами (морями), а також при використанні у наземних ГТД низькосортних палив, забруднених сіркою та ванадієм. Високотемпературна корозія визвала деградацію найбільш навантажених елементів турбіни ГТД, що суттєво знижує ресурс його роботи. Широко використовуючі нікелеві сплави, які мають високу жароміцність, показали незадовільну високотемпературну корозійну стійкість, що призвело до необхідності проведення комплексних досліджень по встановленню закономірностей корозійного пошкодження та створення спектру сплавів, стійких в умовах ВТК, та які мають достатні механічні та жароміцні характеристики.

Ефективним способом захисту проточної поверхні лопаток турбіни від високотемпературного окислення, корозійного пошкодження, втомного руйнування є нанесення захисних покриттів.

Тому розробка технологічних процесів формування високо-стійких покриттів, а також дослідження впливу складу, структури та розподілення хімічних елементів у їх шарі нанесення на експлуатаційні властивості та характеристики лопаток турбіни і в сучасному часі є важливою та актуальною задачею авіадвигунобудування.

Вивчення процесів трансформації мікроструктури жароміцного сплаву, фазових перетворень, високотемпературної релаксації, руйнування захисних покриттів та проточної поверхні пера, процесів окислення внутрішньої поверхні охолоджувальних каналів при експлуатації робочих лопаток є важливим етапом у вирішенні задачі забезпечення їх високого ресурсу та надійності.

Жароміцні сталі та сплави використовують для виготовлення деталей, які працюють при підвищених температурах у напруженому стані,

спричиненому розтягом, стиском, крученням і вібрацією при наявності концентраторів напружень. Зокрема, з досліджуваних жароміцних матеріалів виготовляють кріпильні деталі (нормалі) для вузлів газотурбінних двигунів (ГТД) літаків, які до того ж ще працюють під навантаженням при високих температурах в агресивних середовищах – продуктах згоряння палива та мастильних матеріалів. Досвід роботи підприємств, які займаються ремонтом авіаційних двигунів, свідчить, що передчасний вихід із ладу кріпильних деталей ГДТ, спричиняє відмову двигуна в цілому і створює аварійну ситуацію. Скорочення часу роботи двигуна до чергового ремонту не вигідно в зв'язку із високою вартістю ремонту та кріпильних деталей і необхідністю проведення стендових випробувань двигуна.

У зв'язку з відсутністю адекватної заміни жароміцним матеріалам, з яких виготовляють деталі ГТД, виникла необхідність вивчити причини передчасної відмови (руйнування) деталей у процесі їх експлуатації та виявити можливості підвищення їх надійності та продовження технічного ресурсу.

Наявність у жароміцних сталях та сплавах високого вмісту легуючих елементів спричиняє виділення вторинних зміцнювальних фаз як при термічній обробці під час виготовлення деталей, так і в процесі їх експлуатації. Оскільки певна дисперсність, форма, об'ємна доля та розміщення частинок цих фаз може забезпечити максимальну довготривалу міцність матеріалів, а також спричинити їх підвищену крихкість. Тому вивчення морфології виділень частинок зміцнювальних вторинних фаз, їх оптимізації в структурі аустенітних жароміцних сталей та сплавів, їх впливу на формування властивостей жароміцних сталей та сплавів, які сприяють підвищенню експлуатаційних характеристик аустенітних жароміцних сталей та сплавів і розширенню області використання, є актуальною задачею дослідження.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1 Особливості хімічного складу матеріалів для виготовлення лопаток ГТД

Останні винаходи в галузі металургії, це ливарні жароміцні корозійностійкі сплави на основі нікелю, які можуть бути використані для виготовлення литтям деталей гарячого тракту газотурбінних установок, наприклад робочих лопаток газової турбіни з рівновісною або монокристалічною структурою, що працюють в агресивних середовищах при робочих температурах 750-900 °С. Жароміцний сплав на основі нікелю для лиття робочих лопаток газотурбінних установок містить, мас. %: вуглець 0,05-0,10; хром 11,8-12,6; кобальт 8,4-9,2; вольфрам 4,2-4,8; молібден 1,0-1,5; алюміній 3,0-3,4; титан 3,7-4,15; тантал 4,0-4,5; цирконій 0,01-0,025; бор 0,005-0,02; гафній 0,06-0,15; залізо 0,08-0,3; мідь $\leq 0,05$; сірка $\leq 0,005$; азот ≤ 30 ppm; кисень ≤ 20 ppm; ніобій 0,05-0,15; церій 0,002-0,012; кремній 0,002-0,012; марганець 0,002-0,012; фосфор $\leq 0,005$; нікель інше. Сумарний вміст ніобію і гафнію становить $\leq 0,20$ мас. %, Церій, кремній і марганець містяться в рівних кількостях, а сумарний вміст алюмінію і титану становить 7,0-7,5 мас. % При відношенні вмісту титану до вмісту алюмінію $\geq 1,2$. Сплав характеризується високими значеннями тривалої міцності, опору окисленню і корозійних впливів, а також підвищеної структурної стабільністю на ресурс (табл.1.1).

Таблиця 1.1-Службові характеристики сплавів для лиття робочих лопаток ГТУ з монокристалічною структурою.[1]

Характеристики сплаву	Відомі сплави		Сплав за винаходом
	IN792-5A	RU2443792	
1.Зміцнювальна γ' -фаза 1.1.Об'єм γ' -фази, ат%	53,4	55,2	54,4
1.2.Сумарний вміст Ti та Al, мас.%	7,43	8,5	7,2
1.3.Сольвус $T_{\gamma'}$, °C	1173	1198	1170
1.4.Ступінь легованості γ' -фази	1,118	1,083	1,091
1.5.Відношення Ti/Al	1,14	1,43	1,2
1.6.Mismatch при 850°C	-0,004	-0,006	-0,001
1.7.Кіль-ть нерівновісної евт.фази, %	4,5	7	1,5
2.Енергія дефектів пакування у γ' -фазі	1,632	1,137	1,876
3.Щільність т/м ³	8,35	8,22	8,40
4.Структурна стабільність ФАКОМП, 4.1. $M_{du \text{ крит}} \leq 0,928$ з ТО	0,933 σ -фаза~4,5%	0,933 σ -фаза~4,5%	0,928 σ -фази немає
4.2. $N_{\gamma\gamma'}$ (крит. $\leq 2,31$)	2,387	2,392	2,29
5.Довготривала міцність			
1) $\sigma^{750^\circ\text{C}}_{10^3}$	568	572	567*
2) $\sigma^{850^\circ\text{C}}_{10^3}$	279	270	277*(341**)

Продовження таблиці 1.1

3) $\sigma_{10}^{870^{\circ}\text{C}}$	243	233	241*(292**)
6.Порівняльна корозійна стійкість			
lg Metall loss (JN792= -0,26)	-0,161	-0,369	-0,249
lg corros Rate (JN792= -0,1)	0,131	-0,014	0,075

Відмінні характеристики таких сплавів досягаються за рахунок значної кількості (50-60 об.%) зміцнювальної γ' -фази (Ni_3Al), легованої ніобієм, титаном, танталом і т.ін., а також зміцненням твердого розчину (γ -фази) кобальтом, хромом, молібденом і вольфрамом. Підвищену корозійну стійкість забезпечують високим вмістом хрому (10-15% мас.%) При відносному вмісту титану до алюмінію $\text{Ti}/\text{Al} \geq 1,0$; а також введенням рідкоземельних елементів. Опір окисленню при підвищених температурах забезпечують підвищеним вмістом алюмінію, танталу і, в першу чергу, зниженням вмісту молібдену, а також введенням рідкоземельних елементів.

Відомий жароміцний сплав на основі нікелю (IN792-5A) для лиття лопаток газотурбінних установок з рівноважною структурою, що містить вуглець, хром, кобальт, вольфрам, молібден, алюміній, титан, тантал, цирконій, бор, ніобій, кремній, залізо сірку, фосфор і нікель при наступному співвідношенні компонентів, мас. %: вуглець 0,08; хром 12,5; кобальт 8,91; вольфрам 4,01; молібден 1,9; алюміній 3,42; титан 4,01; тантал 4,0; цирконій 0,020; бор 0,018; ніобій 0,03; кремній $\leq 0,02$; залізо 0,22; сірка $\leq 0,001$; фосфор $\leq 0,005$ і нікель - інше.

Відомий сплав має задовільну жароміцність і корозійну стійкість, а також значний об'єм (~5%) нерівноважної евтектичною фази, що при литті робочих лопаток газової турбіни призводить до підвищеної пористості виливки і зниження службових характеристик виробу. На евтектичних виділеннях і на голкоподібних за формою σ -фазі при експлуатації виробів

зароджуються тріщини, які поширюються по межах зерен, знижуючи рівень короточасної і тривалої міцності на 15-20%.

Найбільш близьким є жароміцний сплав на основі нікелю для виготовлення робочих лопаток газових турбін з рівноважною і спрямованою структурою. Відомий сплав включає співвідношення компонентів, мас. %: вуглець 0,04-0,12; хром 11,5-12,5; кобальт 11,5-12,5; вольфрам 3,3-3,7; молібден 1,7-2,1; алюміній 3,35-3,65; титан 4,85-5,15; тантал 2,3-2,7; цирконій $\leq 0,020$; бор 0,010-0,020; гафній $\leq 0,05$; залізо $\leq 0,15$; мідь $\leq 0,10$; сірку $\leq 0,0012$; азот $\leq 0,020$; кисень $\leq 0,010$; нікель інше.

Однак, даний відомий сплав при високих показниках корозійної стійкості має схильність до знеміцнення при робочих температурах вище 800 °С. При цьому вироби з відомого сплаву мають до 7об.% евтектичних виділень. Крім того в сплаві в процесі напрацювання виділяється до 5об.% окрихчення σ -фази, що знижує службові характеристики виробу.

Метою винаходу і його технічним результатом є підвищення тривалої міцності жароміцного сплаву для литих лопаток газових турбін з рівноважною або монокристалічною структурою в поєднанні з високим опором окисленню і корозійних впливів, а також підвищеної структурної стабільністю на ресурс.

Технічний результат досягається тим, що жароміцний сплав на основі нікелю для лиття робочих лопаток газотурбінних установок, включає вуглець, хром, кобальт, вольфрам, молібден, алюміній, титан, тантал, цирконій, бор, гафній, залізо, мідь, сірку, азот, кисень, ніобій, церій, кремній, марганець і фосфор і нікель, при наступному співвідношенні компонентів, мас. %: Вуглець 0,05-0,10; хром 11,8-12,6; кобальт 8,4-9,2; вольфрам 4,2-4,8; молібден 1,0-1,5; алюміній 3,0-3,4; титан 3,7-4,15; тантал 4,0-4,5; цирконій 0,01-0,025; бор 0,005-0,02; гафній 0,06-0,15; залізо 0,08-0,3; мідь $\leq 0,05$; сірка $\leq 0,005$; азот ≤ 30 ppm; кисень, 20 ppm; ніобій 0,05-0,15; церій 0,002-0,012; кремній 0,002-0,012; марганець 0,002-0,012; фосфор $\leq 0,005$; нікель інше, при цьому сумарний вміст ніобію і гафнію становить $\leq 0,20$ мас. %, Церій, кремній і марганець містяться

в рівних кількостях, а сумарний вміст алюмінію і титану становить 7,0-7,5 мас. % При відношенні вмісту титану до вмісту алюмінію $\geq 1,2$.

Оптимальний вміст вольфраму 4,2-4,8 мас. % і танталу 4,0-4,5 мас. % Дає підвищену жароміцність литого сплаву, проте, подальше збільшення їх сумарного вмісту викликає значне зростання температури розчинення γ' -фази, що можна компенсувати збільшенням вмісту кобальту, але це здорожує сплав. Гафній в кількості 0,06-0,15 мас. % В поєднанні з ніобієм в концентрації 0,05-0,15 мас. % І цирконієм 0,01-0,025 мас. % При вмісті вуглецю 0,05-0,10 мас. % Забезпечують стабілізацію карбідів і достатню пластичність литого сплаву на тривалий ресурс, як в монокристалічній, так і в рівновісний станах.

Досягнутий рівень жароміцності був також забезпечений за рахунок досягнення обсягу зміцнювальної γ' -фази 52,8-54,4 ат. % Введенням 3,0-3,4 мас. % Алюмінію і 3,7-4,5 мас. % Титану при їх сумарному вмісті 7,0-7,5 мас. % При відношенні вмісту титану до вмісту алюмінію $\geq 1,2$.

Вибрані обмежені концентрації хрому 11,8-12,6 мас. %, Кобальту 8,4-9,2 мас. %, Молібдену 1,0-1,5 мас. %, Що формують окрихчення σ -фази, дозволили усунути її випадання при експлуатації, при тому, що:

- високе відношення вмісту титану до вмісту алюмінію $\geq 1,2$ в поєднанні з хромом і обмеженням вмісту молібдену, присутності рідкоземельних металів, марганцю (0,002-0,12 мас.%) і кремнію (0,002-0,12 мас.%) Сприяють підвищенню корозійної стійкості пропонованого сплаву;

- оптимальний вмісту алюмінію і танталу при пониженому вмісті молібдену 1,0-1,5 мас. % Спільно з рідкоземельними елементами дозволили забезпечити підвищений опір окисленню;

- помірний вміст кобальту 8,4-9,2 мас. % і зазначені вмісту вольфраму і танталу забезпечили невисоку температуру повного розчинення γ' -фази (1180-1190 ° С), що робить сплав досить технологічним при проведенні термічної обробки.

Вибрані оптимальні концентрації титану, алюмінію і ніобію (0,05-0,15 мас.%) Дозволили істотно обмежити обсяг евтектичних фаз до 1,5 об. %.

Вміст ніобію 0,05-0,15 мас. %, Гафнію 0,06-0,15 мас. % і цирконію 0,01-0,025 мас. % Дозволило домогтися структурної стабільності карбідів на межах зерен, підвищену тривалу пластичність нового сплаву на ресурс і високого опору зерномежевій корозії, чому також сприяють введені в рівній концентрації (0,002-0,012 мас.%) Церій, кремній і марганець і обмежений вміст сірки (не більше 0,005 мас.%), фосфору (не більше як 0,005 мас.%) і міді (не більше 0,05 мас.%).

При цьому вміст бору 0,005-0,02 мас. %, Заліза 0,08-0,3 мас. % і заявлені співвідношення компонентів в сплаві виключають в процесі напрацювання поява окрихчення фаз і обмежують виділення нерівноважної евтектичної фази до 1,5%, що забезпечує знижений на 25% в порівнянні з прототипом обсяг газоусадкової пористості і підвищує стійкість виробу до утворення тріщини.

Досягнення необхідного технічного результату можна проілюструвати даними з таблиць 1.1 і 1.2. [1].

Структурна стабільність на ресурс і обмеження при кристалізації нерівноважних евтектичних фаз, на місці яких після їх розпаду при термообробці будуть зароджуватися пори і тріщини, були оцінені за відомою методикою ФАКОМП.

З представлених даних випливає, що сплав по винаходу за рахунок обраних концентрацій вуглецю і бору забезпечує отримання робочих лопаток з рівновісною структурою, цілком з монокристалічною структурою або з монокристалічною структурою профільної частини.

Крім того, що сплав по винаходу з рівновісною структурою по корозійній стійкості дорівнює прототипу, але перевершує його по тривалій міцності на 15-20%.

Використання сплаву у виробках з монокристалічною структурою дає підвищення жароміцності на 15-20% в порівнянні з рівновісною структурою виробів і збільшує ресурс на 30-50%.

Таблиця 1.2.- Хімічний склад сплавів для лиття лопаток ГТД з монокристалічною структурою. [1]

Вміст компонентів, мас. %	Відомі сплави		Сплав за винаходом
	IN792-5A	RU2443792	
Вуглець	0,08	0,04-0,12	0,05-0,10
Хром	12,5	11,5-12,5	11,8-12,6
Кобальт	8,91	11,5-12,5	8,4-9,2
Вольфрам	4,01	3,3-3,7	4,2-4,8
Молібден	1,9	1,7-2,1	1,0-1,5
Алюміній	3,42	3,35-3,65	3,0-3,4
Титан	4,0	4,85-5,15	3,7-4,15
Тантал	4,0	2,3-2,7	4,0-4,5
Цирконій	0,02	≤20 ppm	0,01-0,025
Бор	0,018	0,01-0,02	0,005-0,02
Гафній	-	≤ 0,05	0,05-0,15
Залізо	0,22	≤ 0,15	0,08-0,3
Мідь	-	≤ 0,10	≤ 0,05
Сірка	≤ 0,001	≤ 0,0012	≤ 0,005
Азот	-	≤ 25ppm	≤ 30ppm
Кисень	-	≤ 10ppm	≤ 20ppm
Ніобій	0,03	-	0,05-0,15
Церій	-	-	0,002-0,012
Кремній	≤ 0,02	-	0,002-0,012
Марганець	-	-	0,002-0,12
Фосфор	≤ 0,005	-	≤ 0,005
Нікель	основа	основа	Основа

1.2 Вплив оброблення на структуру та властивості матеріалів

Відомий спосіб підвищення якості та експлуатаційної надійності деталей шляхом усунення мікропористості, підвищення втомної міцності і поліпшення комплексу механічних властивостей, для чого лопатки піддають гарячому ізостатичному пресуванню [3]. При литті лопаток турбіни високого тиску (ТВД) з жароміцних нікелевих сплавів в них утворюється внутрішня мікропористість, яка негативно впливає на механічні властивості і ресурсні характеристики лопаток. ГІП, лопаток ТВД проводять в газостатах при високих температурах і всебічному тиску газом аргоном. Однак при цьому виникає ряд проблем: зміна в поверхневому шарі сплаву лопаток, труднощі закриття поверхневих пор і т. ін.

Відомий спосіб проведення гарячого ізостатичного пресування (ГІП) деталей, при якому процес проводять в газостатах при температурах 1100-1400°C і всебічному тиску газом (Ar) до 2000 атм, а деталі розміщуються в спеціальних захисних екранах або оболонках [4].

Недолік цього способу полягає в тому, що захисні екрани і оболонки не рятують від окислення поверхню лопаток і при цьому неприпустимо проведення ГІП охолоджуваних лопаток ТВД з механічно обробленим профілем пера лопаток, тому що відбувається значне зменшення механічних властивостей. Після ГІП на поверхні лопаток спостерігаються компенсаційні вм'ятини і окислений шар.

Найбільш близьким за технічною сутністю є спосіб підвищення якості та експлуатаційної надійності деталей газових турбін з жароміцних нікелевих сплавів, що включає нанесення дифузійного захисного покриття на поверхню лопаток та подальше гаряче ізостатичне пресування в газощільної прес-формі при тиску 10000-50000 psi (US 4145481, В 05 D 3/06, 1979).

Недоліком даного способу є неможливість створення на зовнішній і внутрішній поверхнях механічно обробленого пера лопаток рівномірного захисного покриття заданої товщини.

Завданням технічного рішення є збільшення надійності і ресурсу лопаток ТВД за рахунок отримання на зовнішній і внутрішній поверхнях механічно обробленого пера лопаток рівномірного захисного покриття заданої товщини.

У способі, який висувається після механічної обробки профілю пера лопаток, перед ГП, на зовнішню і внутрішню поверхні лопаток наносять дифузійне захисне покриття (Al, Cr-Al, Co-Al) циркуляційним газовим методом [5].

Поставлена задача вирішується в способі підвищення якості та експлуатаційної надійності лопаток турбіни газотурбінних двигунів з жароміцних нікелевих сплавів, що включає нанесення дифузійного захисного покриття і подальше гаряче ізостатичне пресування, відповідно до винаходу попередньо здійснюють механічну обробку профілю пера лопаток, потім на зовнішню і внутрішню поверхні лопаток наносять дифузійне захисне покриття, при цьому товщина покриття на зовнішній поверхні становить 20-35,9 мкм, а товщина покриття на внутрішній поверхні - 20-25,9 мкм.

ГП призводить до усунення мікропористості і формуванню сприятливої структури сплаву лопаток, а дифузійне покриття виключає утворення окисленого шару на зовнішніх і внутрішніх порожнинах лопаток ТВД.

Зазначений інтервал товщини покриття виключає пробій захисного покриття і виразкової окислення. При товщині покриття менше 20 мкм можливий пробій захисного покриття і виразкового окислення.

Верхня межа обумовлена тим, що при операції ГП відбувається збільшення товщини покриття на 20-40%. При товщині покриття більше 35,9 мкм можливе зменшення межі витривалості лопаток.

При розгляданні двох партій охолоджених робочих лопаток ТВД зі сплаву ЖСУВІ, для яких проводили ГП протягом 3годин (після лиття та

механічної обробки профілю пера лопаток) на установці HIRp-25-70-200-200 при $T = 1220^{\circ}\text{C}$ і тиску 1940 атм., отримали певні результати про товщини захисного покриття.

Перша партія лопаток (після лиття та механічної обробки профілю пера) піддавалася ГП з використанням захисних екранів.

На другу партію лопаток (після лиття та механічної обробки профілю пера) перед проведенням ГП наносили на зовнішню і внутрішню поверхні дифузійне захисне покриття (ГА) товщиною 20-35,9 мкм і 20-25,9 мкм відповідно циркуляційним газовим методом.

У таблиці 1.3 наведено товщини дифузійного захисного покриття на поверхні лопаток ТВД, глибина окисленого шару на поверхні лопаток після проведення ГП і межа витривалості лопаток ($2 \cdot 10^7$ циклів випробувань після ГП).

Пропонований спосіб ГП охолоджуваних лопаток ТВД з остаточно механічно обробленим профілем пера лопаток виключає утворення окисленого шару на зовнішній і внутрішній поверхнях лопаток, що збільшує ресурс лопаток в 1,5- 2 рази. Після проведення ГП видалення захисного дифузійного покриття з лопаток не потрібно.

Спосіб підвищення якості та експлуатаційної надійності лопаток турбіни газотурбінних двигунів з жароміцних нікелевих сплавів, що включає нанесення дифузійного захисного покриття на поверхню лопаток і подальше гаряче ізостатичне пресування, що відрізняється тим, що попередньо здійснюють механічну обробку профілю пера лопаток, потім на зовнішню і внутрішню поверхні лопаток наносять дифузійне захисне покриття, при цьому товщина покриття на зовнішній поверхні становить 20-35,9 мкм, а товщина покриття на внутрішній поверхні становить 20-25,9 мкм.

Таблиця 1.3- Глибина окисленого шару і межа витривалості лопаток після проведення ГП. [2]

Спосіб	Товщина вихідного дифузійного захисного покриття на лопатках, мкм		Глибина окисного шару на лопатках після ГП, мкм		Межа витривалості лопаток σ_{-1} після ГП, МПа
			Зовнішня поверхня	Внутрішня поверхня	
	Зовнішня поверхня	Внутрішня поверхня			
пропонуємо	25	20	-	-	220
пропонуємо	35	25	-	-	240
Прототип	-	-	50	40	120

Метою даної роботи є дослідження впливу легувальних елементів та структури на властивості жароміцних нікелевих сплавів для деталей ГТД, вплив термічної обробки на стабільність структури та властивості.

Тому даній роботі висуваються наступні задачі:

- дослідження формування структури у залежності від термічної обробки та складу легувальних елементів;
- визначити роль та вплив фазових перетворень, які відбуваються при литі жароміцних сплавів;
- дослідити вплив таких параметрів термічної обробки, як температура, час нагріву і швидкість охолодження на структуру виробів, взятих в стані поставки та після експлуатації;
- з'ясувати вплив експлуатаційних та технологічних чинників, а також додаткової термічної обробки на характеристики деталей;
- визначити оптимальні параметри термічної обробки для забезпечення підвищеної роботи деталей.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЛОПАТОК ГТД

2.1 Матеріали для виготовлення лопаток ГТД

У даній роботі було розглянуто робочу лопатку газотурбінного двигуна, яка виготовляється з жароміцних нікелевих сплавів, таких як ЖС32-ВІ та ЖС6У-ВІ.

В силових установках енергетичного і авіаційного машинобудування широко застосовуються коштовні ливарні деталі з жароміцних нікелевих сплавів з направленою і монокристалічною макроструктурою. Як правило, дані відливки виготовляють у вакуумі на установках типу УВНК-8П.

Більша частина турбінних лопаток з направленою або монокристалічною макроструктурою для сучасних авіаційних і наземних силових установок виготовляють із жароміцного нікелевого сплаву ЖС32-ВІ. Даний сплав відрізняється дуже складною системою легування та відповідно, високою вартістю, проте при цьому не володіє корозійною стійкістю. Для вилучення даного недоліку на лопатки додатково наносять антикорозійні покриття.

Найдорожчим легувальним елементом у сплаві ЖС32-ВІ є реній, вміст якого складає 4 %. Одним із важливіших параметрів, які забезпечують експлуатаційний ресурс робочих лопаток, є фазова стабільність їх матеріалів-жароміцного нікелевого сплаву. Нижче у таблиці 2.1 та 2.2 наведено хімічний склад жароміцних нікелевих сплавів, які використовуються для виготовлення литих лопаток ГТД.

Таблиця 2.1- Хімічний склад сплаву ЖС32-ВІ

Сплав №	Вміст легувальних елементів, %(по масі)											
	C	Cr	Co	W	Mo	Al	Nb	Ta	Re	Zr	B	Ni
ЖС32-ВІ	0,15	4,9	9,3	8,2	1,1	5,8	1,6	4,0	4,0	0,05	0,015	Осн.

Таблиця 2.2.- Хімічний склад сплаву ЖС6У-ВІ

Сплав №	Вміст легувальних елементів, %									
	Ni	C	Cr	Co	Mo	W	Ti	Nb	Al	Ce
ЖС6- ВІ		0.13- 0.20	8.0- 9.5	9.0- 10.5	1.2- 2.4	9.5- 11.0	5.1- 6.0	2.0- 2.9	0.8- 1.2	0.02
Не більш										
	Zr	B	Si	Mn	S	P	V	Pb	Bi	Fe
	0.04	0.035	0.4	0.4	0.01	0.015	0.01	0.001	0.0005	1.0

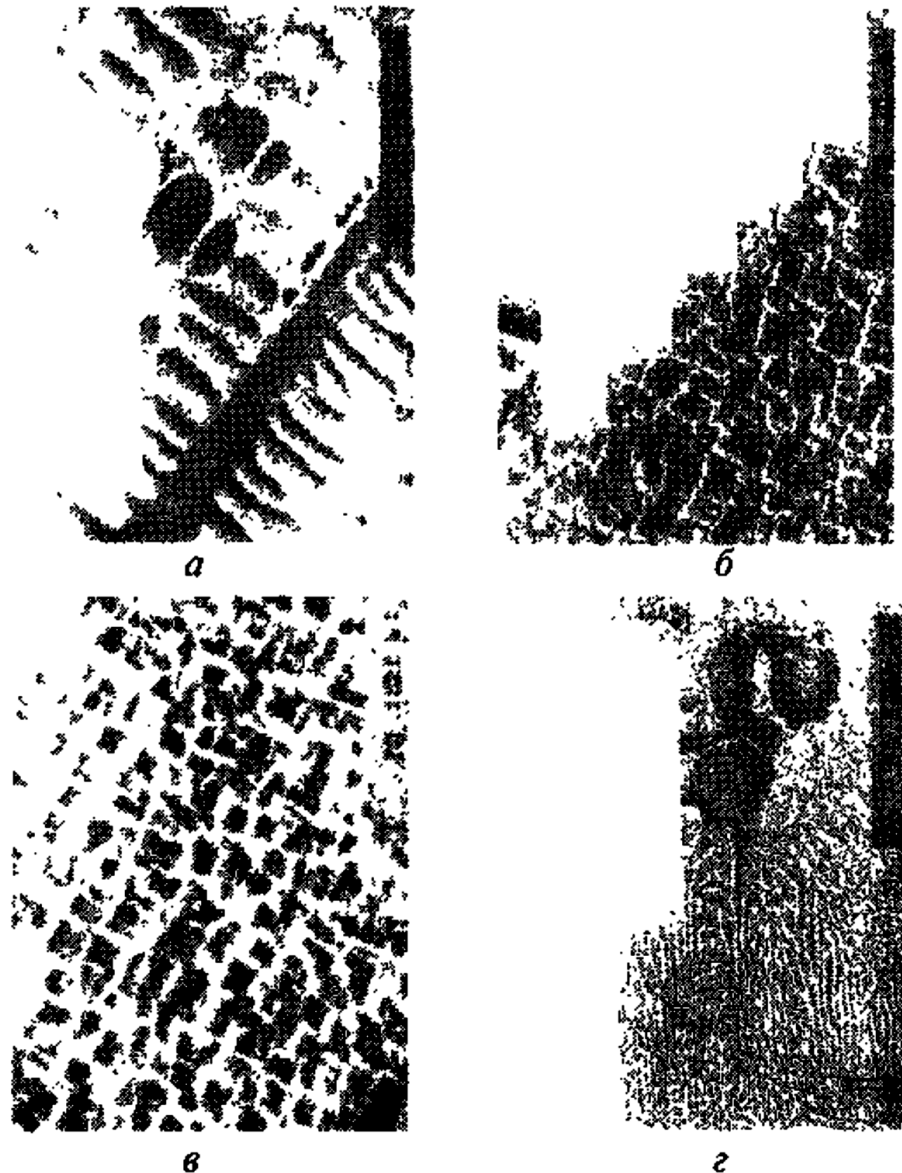
Ливарний жароміцний сплав ЖС6У-ВІ призначений для виготовлення робочих та соплових монолітних і охолоджувальних лопаток ГТД, який отримується методом точного лиття при рівновісній кристалізації.

По характеристикам жароміцності сплав ЖС6У-ВІ перевершує інші сплави, та рекомендується для лопаток, тривало працюючих при температурах 1050°C із захисними алюмінієвими покриттями.

Сплав ЖС6У-ВІ рекомендується до використання вже в термічно-обробленому стані, призначений для виготовлення робочих та соплових монолітних і охолоджувальних лопаток. Отримуються методом точного лиття при рівновісній кристалізації. Для підвищення межі витривалості можна провести поверхневе модифікування лопаток. Сплав ЖС6У-ВІ широко використовується у сфері, в сучасному часі лопатки робочих двигунів випрацьовують до 10000годин. Важливим показником є те, що при нанесенні захисних алюмінідних покриттів, показники короткочасної та довготривалої міцності не змінюються.

У сплавах ЖС32-ВІ та ЖС6У-ВІ, з яких і виготовляються ливарні лопатки ГТД присутні такі фази:- γ -твердий розчин+ зміцнювальна

інтерметалідна γ' -фаза (для сплаву ЖС32-ВІ-це Ni_3Al , а для сплаву ЖС6У-ВІ-це Ni_3AlTi) + карбідні фази на границях зерен та евтектична γ - γ' -фаза. Типова структура жароміцного сплаву ЖС32-ВІ у складі робочої лопатки турбіни середнього тиску двигуна Д-18Т, відлитою за технологією спрямованої кристалізації на установці УВНК-8П, наведена на рисунку 2.1.



а- структура дендриту, $\times 200$; б- будова γ' -фази (електрохімічне травлення), $\times 700$; в- будова γ -матриці (хімічне травлення), $\times 750$; г- евтектичні карбіди та евтектика γ - γ' -у міжосьових зонах дендритів, $\times 200$.

Рисунок 2.1- Структура сплаву ЖС32-ВІ, відлитої за технологією спрямованої кристалізації на установці УВНК-8П [6].

Процес формування структури ливарних сплавів починається при кристалізації відливків лопатки і продовжується при термічних нагріваннях, які пов'язані з термічною обробкою відливок, технологічними операціями пайки і нанесення жароміцних захисних покриттів.

Термічна обробка ливарних сплавів проводиться обов'язково. Так як з її допомогою забезпечується оптимальний комплекс експлуатаційних властивостей і усуваються залишкові ливарні напруження. Крім того, при нанесенні захисних покриттів, сплави піддаються нагріванню до високих температур, які впливають на їх структуру і властивості та в цілому уявляють собою певну частину термічної обробки.

Важливою сходинкою термічної обробки ливарних нікелевих сплавів є гомогенізація, необхідна для зменшення ступеню ліквідації, яка викликана дендритною кристалізацією. Гомогенний відпал стабілізує структуру сплавів. Відзначено, що гомогенізація ливарного сплаву підвищує пластичність та довготривалу міцність. При цьому гомогенізацію рекомендовано проводити при тих температурах, які забезпечують найбільш повне розчинення (евтектичних) виділень γ' -фази, оскільки ці виділення є не позитивними.

Нікелеві жароміцні сплави піддаються термічній обробці трьох видів: 1) обробка на твердий розчин, з метою розчинити виділення γ' -фази, щоб потім викликати її повторне виділення у вигляді більш тонких та рівномірно розподілених частин та тим самим збільшити міцність металу; 2) термічна обробка покриття з метою скріпити зв'язок покриття зі сплавом-підкладкою; 3) відпал-старіння з метою отримати додаткові виділення γ' -фази або карбідні та боридні фази по границях зерен.

В ливарному металі частини γ' -фази, які виділяються помітно відрізняються за розміром. Це обумовлено дендритною ліквідацією: при кристалізації між дендритний розплав збагачується γ -утворюючими елементами, що призводить до збільшення розміру та об'єму γ' -виділень в між дендритних областях. Термічна обробка сплавів при температурах

нагрівання, рівної температури повного розчинення γ' -фази або перевищує її, що сприяє вирівнюванню складу сплаву і розмірів γ' -виділень.

Для забезпечення оптимальних механічних властивостей жароміцні сплави піддаються термічній обробці: гомогенізації та старінню. При високотемпературній гомогенізації (1210..1320°C) відбувається наступне:

- розчинення зміцнювальних частин γ' -фази під час нагрівання до температури гомогенізації;
- повне або часткове розчинення грубих виділень евтектичної γ' -фази при температурі гомогенізації;
- зменшення ліквідаційної неоднорідності, тобто вирівнювання хімічних складів осей дендритів та міжосьових просторів;
- розчинення нерівновісної γ - γ' - евтектичної фази, яка завжди є присутньою в структурі після лиття.

Відомо, що оптимальна довготривала міцність в жароміцних сплавах досягається при певних розмірах частин кубічної форми зміцнювальної γ' -фази : $d=0.35...0,40\mu\text{м}$. Крім оптимального розміру частин важлива також їх однорідність за розміром, правильна кубічна морфологія та впорядковане розміщення в об'ємі твердого розчину. Метою старіння і є задовільнення цих вимог.

2.2 Методики проведення досліджень

В основі сучасних технологій виробництва лопаток ГТД є розробка жароміцних нікелевих сплавів останнього покоління. Основою вивчення природи фаз, фазові перетворення у широкому діапазоні температур, а також дослідження механізмів деформації та руйнування, як в умовах повзучості при статичному навантаженні, так і при динамічних навантаженнях, є металофізичні методи дослідження.

За допомогою оптичної металографії можна провести методи досліджень, як дослідження тонкої структури сплавів- просвічуваною і растровою електронною мікроскопією, енергодисперсійний та хвиледисперсійний рентгеноспектральний мікроаналіз, електронна спектроскопія, рентгеноструктурний фазовий аналіз. В умовах виробництва методи оптичної металографії знаходять широке застосування на контрольних операціях: контроль макро- і мікроструктур жароміцних сплавів на перегрівання, як при виробництві лопаток турбін, так і після їх експлуатації; контроль захисних покриттів, оцінка неметалевих включень та ливарних дефектів на співвідношення до вимог.

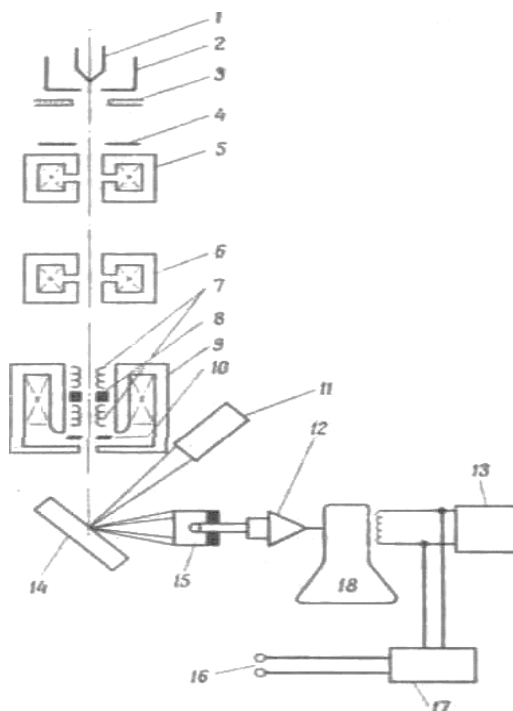
В області тонких структурних досліджень ливарних жароміцних сплавів використовують растровий електронний мікроскоп (РЕМ) і енергодисперсійний рентгеноспектральний мікроаналіз (РСМА) на приладах JSM-T300 та PHOENIX, які приведені на рисунках 2.2. також рентгеноструктурний фазовий аналіз на дифрактометрах ДРОН-6 для розбавування жароміцних монокристалічних лопаток (рис.2.3).

Методи РЕМ і РСМА об'єднані спільними ефектами взаємодії високоенергетичних електронів падаючого на поверхню досліджуваного зразка пучка (зонду) з атомами речовини (жароміцного сплаву). Потік електронів, розігнаних електронною гарматою до енергії 30кєВ, проходжуючи систему електромагнітних лінз та діафрагм, стискається до тонкого електронного зонду діаметром близько 4нм ($4 \cdot 10^{-3}$ мкм). При взаємодії електронного зонду з поверхнею зразка виникає ряд ефектів:

- поглинання електронного зонду;
- зворотне розсіювання електронного зонду;
- дифракція електронів зонду;
- вторинна електронна емісія низькоенергетичних електронів;
- іонізація атомів хімічних елементів високоенергетичними електронами зонду з наступною рекомбінацією електронів, яка супроводжується емісією

характерного рентгенівського випромінювання, або електронів із характеристичною енергією.

Розгортка електронного зонду у растр по поверхні досліджуваного зразка дозволяє отримати зображення досліджуваного зразка в одному (або одночасно у декількох) видах випромінювання, або ефектах взаємодії електронного зонду із зразком.



1-катод; 2-модулятор; 3-анод; 4-обмежувальна діафрагма; 5-перша конденсорна лінза; 6-вторинна конденсорна лінза; 7-катушка подвійного відхилення; 8-стигматор; 9-об'єктивна лінза; 10-діафрагма, обмежуюча розмір пучка; 11-детектор рентгенівського випромінювання; 12-підсилювач; 13-генератори розгортки; 14-зразок; 15-детектор вторинних електронів; 16-до катушки подвійного відхилення; 17-керівництво збільшенням; 18-ЕЛТ.

Рисунок 2.2-Схема електронної та рентгенівської оптики комбінованого пристрою РЕМ.



Рисунок 2.3.-Рентгенівський дифрактометр ДРОН-6

Метод РСМА дозволяє отримати зображення досліджуваної поверхні зразка у характеристичному випроміненні хімічних елементів, а також визначити хімічний склад дисперсійних фаз розміром до 2мкм.

Розрахунок хімічного складу дисперсійних фаз виконується спеціальною програмою, яка враховує інтенсивність характеристичних спектрів хімічних елементів. Даний метод широко застосовується при дослідженні робочих лопаток соплових апаратів ГТД після їх експлуатації, а також у процесі розробки технологій нанесення захисних покриттів.

Так при виготовленні лопаток ГТД розглядались такі дослідження, як контроль макроструктури лопаток та їх кристалографічної орієнтації. За допомогою ЛЮМ1-ОМ проводились контроль після кожної термічної обробки, після механічної обробки та після нанесення на лопатки захисних покриттів, також рентгеноспектральний аналіз після проведення ГП та після звичайної термічної обробки. Контроль хімічного складу лопаток проводиться на стилоскопі типу СЛ-11.

3 АНАЛІЗ ПРОВЕДЕНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Однією з найбільш актуальних задач сучасного двигунобудування є підвищення параметрів газотурбінних двигунів. Та в першу чергу підвищення температури і тиску газу в турбінах, що суттєво підвищує КПД силових установок і знижує витрату палива.

Для робочих та соплових лопаток газових турбін найбільше використання отримали Ni сплави з дифузійними або з електронно-променевими, плазмовими та іншими методами нанесення захисних покриттів, які надійно забезпечують роботу при високих температурах.

Активний розвиток ливарних жароміцних сплавів на Ni основі пов'язано з тим, що вони дозволяють досягти значного зміцнювального ефекту за рахунок γ' -фази та карбідів, при цьому структурна стабільність показує дуже високі показники (рис.3.1).

Другою важливою перевагою матеріалів цього класу є можливість відливати з них тонкостінні лопатки складної конфігурації та з розвиненою внутрішньою порожниною без припуску на механічну обробку або з мінімальними припусками, що суттєво понижує вартість їх виготовлення. Також використання ливарних жароміцних сплавів для лопаток газових турбін сприяли успіхи, досягнені в розробці керамічних форм та стрижнів, а також способів їх видалення, які дозволили отримати відливки з мінімальними каналами для охолодження.

Досягнутий рівень властивостей ливарних Ni сплавів досягнутий також за рахунок досліджень впливу легування на величину та характер зміцнення основними зміцнювальними фазами, досліджень термостійкості зміцнювальних фаз і матриці в системах на основі Ni, досліджень поверхонь розділу границь зерен, фаз, субграниць, дослідження дефектів кристалічної ґратки (дислокацій, вакансій), процесів дефузії та інших факторів, яка визначає структурну стабільність і жароміцність сплавів.

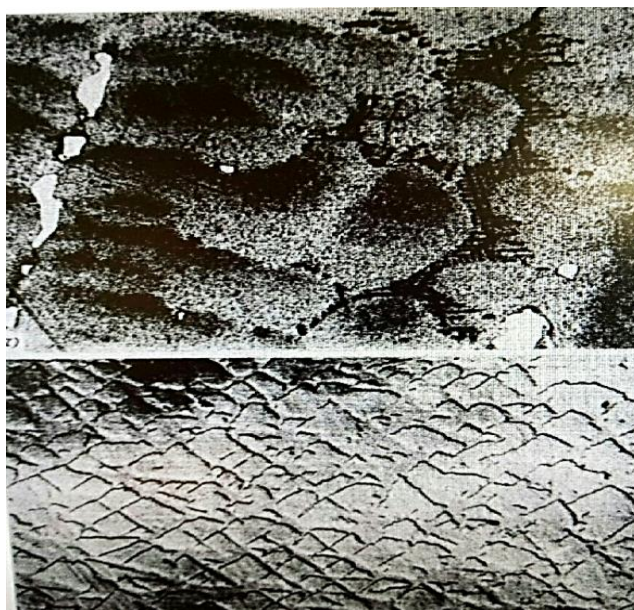


Рисунок 3.1- Мікроструктура жароміцних ливарних Ні сплавів при збільшенні $\times 200$, і $\times 10000$ [3].

Раніше більшу частину лопаток виготовляли куванням. Проте, цей процес є обмеженим, оскільки матеріал лопаток розроблений спеціально для того, щоб протистояти високотемпературній деформації. Тому почали використовувати прицезійне лиття, як єдиний спосіб отримання виробів необхідної форми з більш міцних сплавів. Крім того лиття забезпечує виготовлення виробів з високим класом точності, з високою якістю поверхні, отримання виробів складної форми з отворами та каналами а також порівняно за нижчою ціною. Впровадження вакуумної технології дозволяє дегазувати застосовувані сплави, стабілізувати якість і оберегти їх від забруднення в процесі лиття.

Більшість моделей в сучасний час виготовляються з воску або пластмаси, які присуються в металеві штампи. Конструкція штампу повинна враховувати велику кількість факторів: розширення та усадки металу, усадки моделі, дію потоку рідкого металу. Для отримання внутрішніх каналів та глухих отворів використовують стрижні, які зазвичай виготовляються з окису кремнію та іншої кераміки.

Звичайні модельні склади мають, як правило, великий коефіцієнт термічного розширення в порівнянні з вогнетривкою керамікою, яку використовують для виготовлення форм. Тому невеликі коливання температур можуть призвести до значного розширення моделі і утворення тріщини в слабких керамічних формах. Для оболонкових форм декілька слоїв покриття після відпалу забезпечує міцність, достатню для використання форми без опори. Форми, які використовують для лиття по витопним моделям, зазвичай мають один або два слоїв покриття.

При литті турбінних лопаток розміри відливок, як правило, відповідають розмірам креслення, тобто не потребують додаткової обробки, за винятком видалення невеликих дефектів поверхні. Відсутність дефектів є основним внеском в досягнення основних оптимальних характеристик міцності відливків, тому для отримання необхідних механічних властивостей слід застосовувати методи, які забезпечують отримання бездефектних відливків.

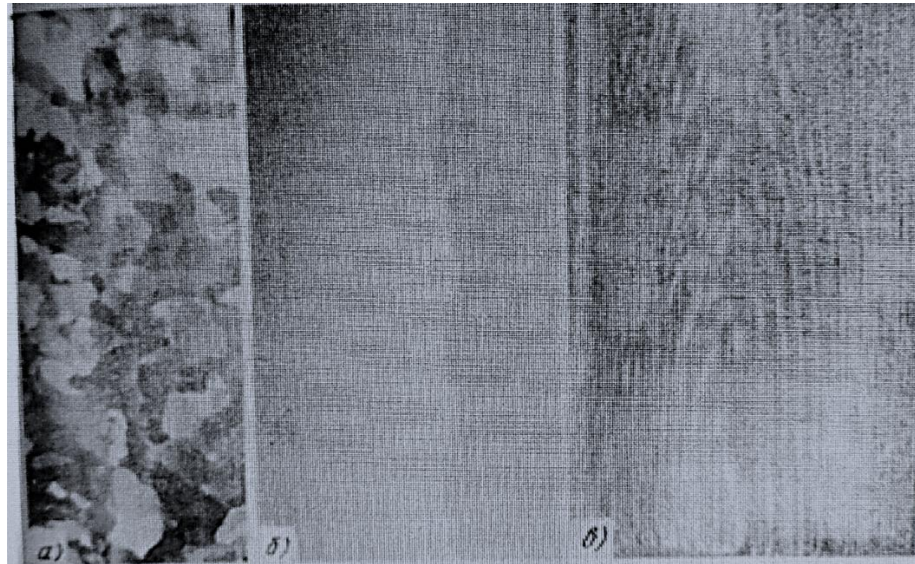
Для оцінки придатності матеріалу судять за результатами спеціальних випробувань при високих температурах, до яких відносяться: випробування на повзучість, короткочасну та тривалу міцність з визначенням зміни пластичних властивостей, релаксацію, втому, на окалинотійкість, а також циліндричні при змінних навантаженнях та перепадом температури.

Дані про опір повзучості та тривалої міцності являють найбільш важливі характеристики міцності матеріалів при високих температурах. Ці характеристики використовують при виборі матеріалу та розрахунку деталей, працюючих в умовах впливу тривало прикладених навантажень і температур.

Короткочасна міцність і гаряча твердість мають значно менший вплив. Їх використовують для отримання характеристик матеріалу, які працюють в короткочасних навантаженнях температур на навантаження. Визначення твердості при підвищених і високих температурах також має інтерес, так як дозволяє судити про опір матеріалу до деформації та про жароміцність і процеси, які протікають в сплавах. Визначення твердості слід проводити при строго визначених температурах, тривалості та добре прогрітим індентором.

Для робочих лопаток, які під час роботи піддаються дії розтягуючих навантажень і температури 650-980°C, крім високої міцності, матеріал повинен мати відповідну пластичність а також чинити опір малоциклічній деформації втоми, міцно з'єднуватись з диском. Також важливою вимогою є стійкість до корозії, яка визивається гарячими газами. Навіть при температурі вхідних газів 1370°C деяка частина робочих лопаток працює при такій області температур, у наслідок чого сплави, які не мають достатню стійкість до корозії, можуть піддаватися суттєвим пошкодженням. Для підвищення стійкості до окислення і газової корозії використовують захисні покриття. Також матеріал лопаток, повинен бути структурно стабільним, для забезпечення постійних механічних властивостей впродовж тривалого часу.

Також властивості жароміцних сплавів можна підвищити за рахунок певної термічної обробки сплавів. В даний час широко використовуються відливки із ливарних нікелевих сплавів з направленою стовпчастою або монокристалічною структурою (рис.3.2). Спрямована кристалізація є одним з найбільш важливих технологічних досягнень, яке забезпечує підвищення КПД двигунів. Застосування для виготовлення лопаток спрямовано кристалізованих сплавів дає можливість підвищити робочу температуру металу на 33-60°C, як наслідок витрата повітря на охолодження може знижуватись на 30% з економією палива на 1%. Також проводяться додаткові термічні обробки для збільшення надійності лопаток: нанесення захисних покриттів від корозії та окислення та ГІП для зменшення мікропористості.



а- з рівновісною структурою; б- спрямована стовпчаста структура; в- монокристалічна структура.

Рисунок 3.2.- Відливки жароміцних нікелевих сплавів [7].

3.1. Вплив структури та фазового складу на властивості жароміцних сплавів

Факторами, які визначають якість та службові властивості жароміцних сплавів, є фазовий склад, ступінь однорідності, морфологія та топографія зміцнювальних фаз. На властивості нікелевих сплавів великий вплив робить дисперсійне зміцнення матриці за рахунок виділення γ' -фази кубічної морфології. Вона має близьку з γ -фазою значення параметра кристалічної ґратки, що обумовлює їх когерентний зв'язок. Параметри утворення γ' -фази та їх об'ємний вміст обумовлюють характеристики міцності та опір повзучості об'єму зерен.

Жароміцність сплавів, зміцнених когерентними з матрицею виділеннями впорядкованої γ' -фази, залежать від стану цієї фази (дисперсності частинок, їх об'ємного вмісту, форми та розподілу), кінетики зміни структури і в значній мірі визначаються термодинамічною стабільністю системи ($\gamma+\gamma'$)

аж до температур, які дорівнюють $0,8 T_{пл}$. При більш високих температурах відбувається інтенсивна коагуляція і розчинення γ' -фази у γ -твердому розчині, що призведе до зменшення жароміцності сплавів. У зв'язку з цим, важливим параметром, яким характеризує інтерметалідну термостабільність, а отже і працездатність нікелевих сплавів, є температура розчинення γ' -фази, яка обмежує температурну область існування гетерофазної структури сплаву. Існує загальна закономірність для нікелевих сплавів: найбільш жароміцні сплави поряд з максимальною кількістю зміцнювальної γ' -фази мають максимальну температуру повного її розчинення.

Кількість та морфологія γ' -фази в модифікованому сплаві значно відрізняється від немодифікованого (рис.3.3). модифіковані формують більш дискретні дрібнодисперсні виділення γ' -фази більшою мірою квадратної форми або прямокутної. При введенні 0,01% частинок карбонітриду титану розмір виділень γ' -фази складає 0,8-1,2мкм, при 0,25% тугоплавких частинок - 0,4-0,6мкм. При подальшому збільшенні концентрації тугоплавких частинок γ' -фази досягає розмірів 0,2-0,3мкм з великою щільністю пакування у матриці. Виділення γ' -фази вирівнюються за розмірами, їх форма після довготривалих випробувань не змінюється, і розташовуються вони уздовж кристалографічних площин з дуже малою відстанню між ними. При цьому на термічну стабільність литого металу виробів з жароміцних сплавів великий вплив надає ліквідація легуючих елементів у частинках γ' -фази при модифікуванні жароміцного сплаву.



а- немодифікованого; б-модифікованого

Рисунок.3.3- Морфологія γ' -фази нікелевого сплаву [3].

Вплив параметру невідповідності кристалічних ґраток γ та γ' -фаз.

Високий ступінь дисперсності γ' -фази і висока стійкість її виділень проти коагуляції, які зумовлюють ефект дисперсійного зміцнення, викликані тим, що тип кристалічної ґратки γ' -фази і γ -матриці та параметри ґраток двох сусідніх фаз є близькими. Що є причиною виникнення відносно невеликих когерентних деформацій і відповідно невеликих величин поверхневої енергії на межі поділу γ та γ' -фаз. Процеси коагуляції знаходяться в прямій залежності від величини параметра невідповідності Δa : чим менше Δa , тим менша надлишкова поверхнева енергія, і тим повільніше йдуть процеси коагуляції γ' -фази, отже, тим стабільніша структура сплаву і, відповідно, протягом більшого часу він здатен витримувати навантаження. Також відомо, що більш дрібні виділення (відповідно, при такому ж самому об'ємному вмісті утвореної γ' -фази їх кількість буде більша та буде більшим зміцнювальний ефект) округленої форми, утворюються при мінімальному параметрі невідповідності Δa . Разом з цим експериментально відомо, що найбільш висока довговічність при підвищених температурах у даних сплавах досягається при нульовому значенні Δa . Так титан та ніобій підвищують параметр невідповідності Δa , так як вони входячи в γ' -фазу підвищують період її ґратки: хром, молібден, залізо зменшують Δa , бо вони легують матрицю, збільшують період ґратки твердого розчину, приближаючи його до значення а-параметру ґратки γ' -фази [8].

Проте навіть цей принцип потребує в подальшому його вдосконаленні. Тому що в жароміцних сплавах, в яких об'ємна доля вмісту γ' -фази досягають 60-65% щільність розподілення дисперсних виділень в матриці настільки висока, що подальше її збільшення не дає бажаного результату. Тому підвищення властивостей міцності при високих температурах у матеріалах цього класу може бути досягнуто за рахунок більш високої величини когерентних навантажень на міжфазній γ/γ' границі, яка в свою чергу тим вище, чим більше Δa в певних межах. Але легування при цьому повинно бути таким, щоб дифузійні процеси, які контролюють коагуляцію γ' -фази при високих температурах були б в максимальному ступені загальмовані.

Аустенітна матриця (γ).

Нікель сам по собі не має високого модуля пружності і малої швидкості дифузії, однак більшість конструкторів віддають перевагу аустенітній матриці для найбільш жорстких температурно-часових параметрів при роботі в повітряній атмосфері. Дані сплави можна використовувати до $0,8 T_{пл}$ та протягом 100000 часів при більш низьких температурах. Головними причинами стійкості є:

- висока стійкість структури нікелю при легуванні з огляду його практично заповненої електронної оболонки.

- утворення при наявності добавок хрому захисних плівок, багатих Cr_2O_3 з низьким вмістом вакансій, які обмежують швидкість дифузії металевих елементів зсередини, від кисню, азоту, сірки та інших шкідливих елементів з атмосфери всередину сплаву.

- підвищена схильність при високих температурах до утворення багатих Al_2O_3 плівок з високою стійкістю проти окислення.

Карбіди. В нікелевих сплавах карбіди виділяються переважно тільки по границям зерен, в той час як в жароміцних сплавах на кобальтовій і залізній основах виділяються в самих зернах. Карбіди здійснюють важливу і сприятливу дію на межу тривалої міцності при високих температурах. Також є зрозумілим, що морфологія чине вплив на пластичність. Також карбіди можуть впливати на хімічну стабільність матриці, за допомогою зв'язування елементів, які взаємодіють з вуглецем. Негативний вплив карбідів на дестабілізацію структури ЖС полягає у тому, що під час термічної обробки або в процесі довготривалої експлуатації сплаву, карбіди починають перетворюватись (один тип карбідів в інший) зі зміненням морфології та об'ємної долі карбідної фази. Все це негативно впливає на жароміцні властивості сплаву.

Бори́ди. Бор зазвичай присутній в жароміцних сплавах в кількості від 0,005 до 0,055%. Він уявляє собою важну добавку. Бор розташовується по границях зерен в містах з'єднання ґраток різної орієнтації. Вони уповільнюють

початок відриву границь зерен при руйнівних навантаженнях. Бориди- тверді тугоплавкі частинки, які спостерігаються тільки по границях зерен. Їх форма змінюється від глибоподібної до півмісяця. Часто спостерігається їх ріст від границь зерен всередину.

Розмір зерен оказує неоднозначний вплив на жароміцність. Тому як при низьких і середніх температурах для забезпечення високої міцності та в'язкості необхідна дрібнозерниста структура. А при високих температурах міжзернова деформація ковзанням та дифузійна повзучість обумовлюють переваги крупнозернистого матеріалу, в порівнянні із дрібним.

3.2.Вплив легувальних елементів на механічні властивості жароміцних сплавів

Металевий нікель при 800°C має 100-год тривалу міцність 4 кг/мм². Присадка 20% хрому до нікелю порівняно мало зміцнюють твердий розчин при високих температурах та підвищення межі довготривалої міцності складає 25-30%. Хром підвищує окалиностійкість та крім того підвищує енергію зв'язку атомів в твердому розчині системи Ni-Cr-Fe. Введення в ніхромові сплави 2,5-3,0% титану сприяє утворенню високодисперсних інтерметалідних фаз, які підвищують здатність сплаву до опору деформації та підвищенню довготривалої міцності. Ще більш помітному зростанню жароміцності сплавів сприяє збільшення вмісту титану або алюмінію (або їх суми) разом з бором та тугоплавкими елементами (W, Mo, Nb). У рисунку 3.4 можна подивись на вплив легувальних елементів на довготривалу міцність жароміцних нікелевих сплавів.

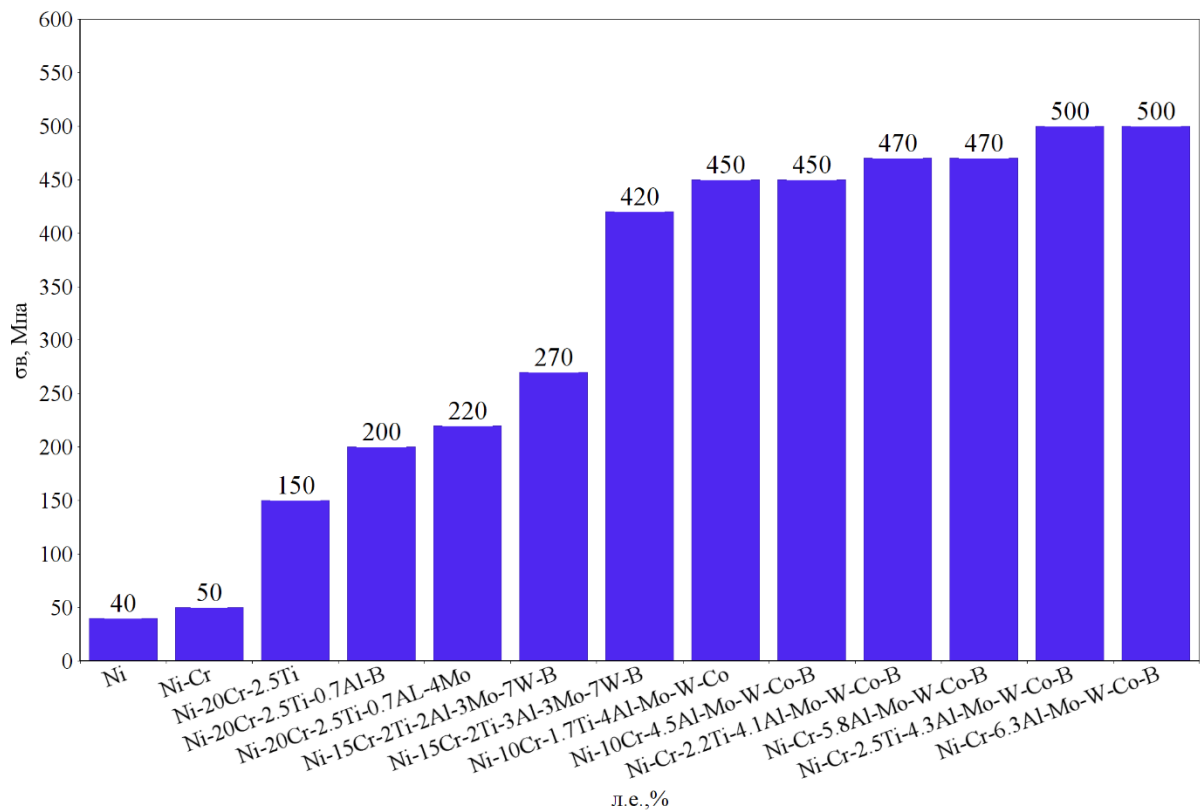
Вплив легувальних елементів на 100-год довготривалу міцність при $t=800$ 

Рисунок 3.4- Вплив легувальних елементів на 100-год довготривалу міцність нікелевих сплавів при 800°C [7].

Молібден, вольфрам та хром, які вводять до нікелю роздільно, підвищують твердість, жароміцність, електричний опір та параметр ґратки твердого розчину. Вплив хрому і алюмінію на довготривалу міцність при $700-750^{\circ}\text{C}$ та ступінь спотворення кристалічної ґратки, показало що з підвищенням вмісту хрому зростає довготривала міцність сплаву.

Ванадій та цирконій. Ванадій підвищує жароміцність, проте одночасно негативно сприяє на жаростійкість. Цирконій в ливарних сплавах присутній в малих кількостях. Він підвищує пластичність сплаву при введенні його $0,01\%$, при більшому або меншому вмісті пластичність значно падає.

Вольфрам та молібден. Вольфрам більш сильніше зміцнює сплав ніж молібден. Проте молібден є найпоширенішим легувальним елементом, його вводять в кількості $2...6\%$, він збільшує стійкість до сульфідної корозії.

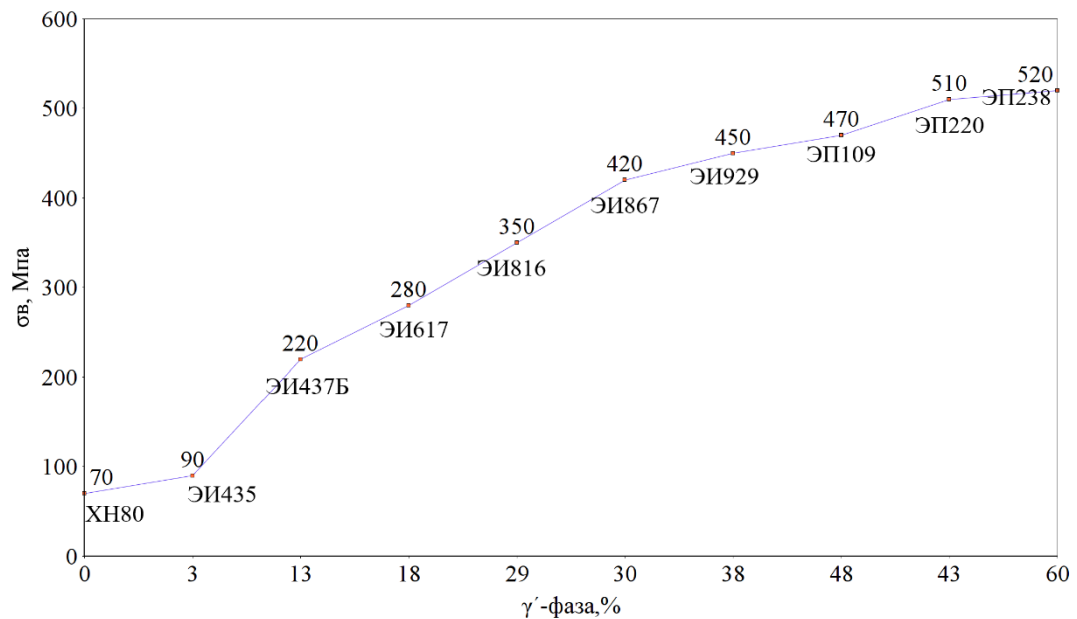
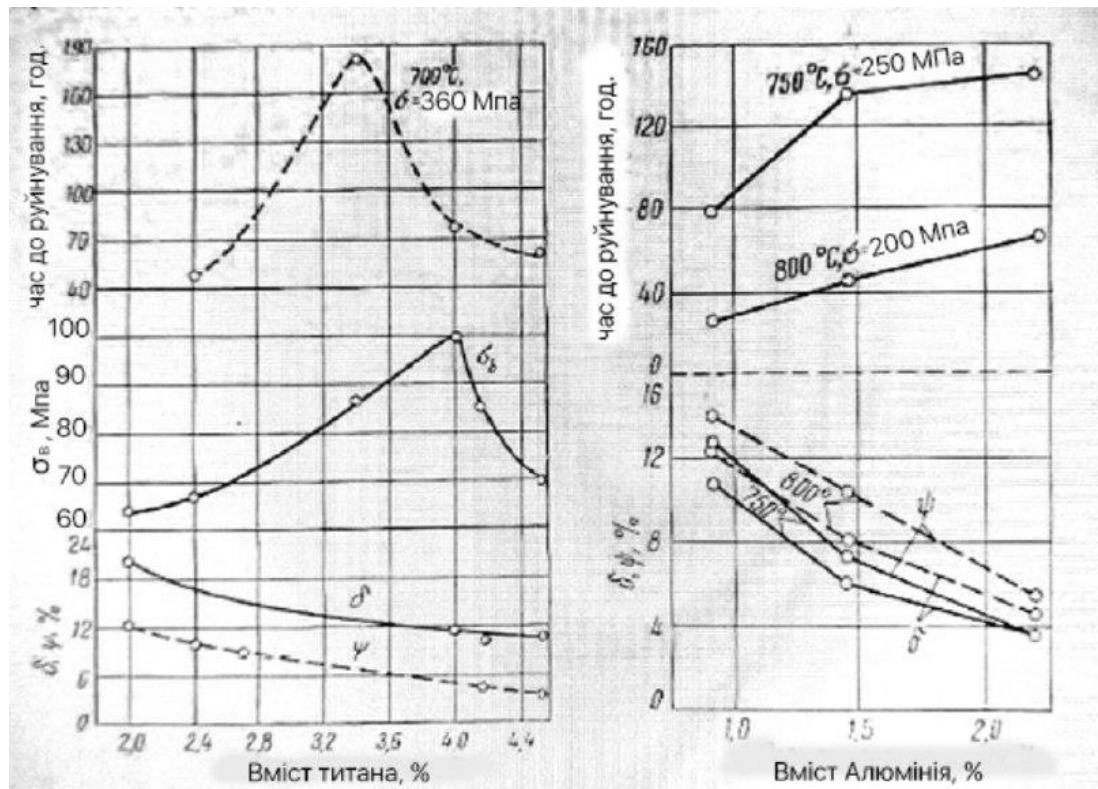
Вплив γ' фази на короткочасну міцність сплавів

Рисунок 3.5.- Вплив кількості зміцнювальної γ' -фази на 100-год довготривалу міцність сплавів на нікелевій основі [7].

Алюміній та титан. Аналіз сплавів найбільш жароміцних нікелевих сплавів показує, що збільшення довговічності при високих температурах досягається за рахунок підвищення вмісту цих елементів. Навпаки вміст (при загальному збільшенні кількості γ' -фази і утворюючих елементів в сплавах) особливо титану навіть дещо знижується. Це пояснюється тим, що при досягнутому рівні легування більш ефективними зміцнювачами при високих температурах виступають елементи як гафній, ніобій, тантал, так як вони більш інтенсивно зміцнюють γ' -фазу, підвищують її стабільність та забезпечують більш широкі можливості для досягнення параметрів співвідношення на межфазних γ/γ' -границях. Крім того збільшення цих елементів призводить до покращення структури та підвищення стабільності карбідів, які утворюються.



а

б

а - вплив титану на механічні властивості сплаву при 20°C та його довготривалу міцність, б - вплив алюмінію на механічні властивості сплаву та його довготривалу міцність.

Рисунок 3.6.- Вплив легувальних елементів на довготривалу міцність.

Гафній, ніобій та тантал. Широко використовуються при легуванні жароміцних сплавів. Вони позитивно впливають на роль зміцнення γ' -фази так і γ -твердого розчину. Вони є сильними карбідоутворювачами. Легування цими елементами дозволяє суттєво підвищити робочі характеристики сплавів.

Як правило міцність та пластичність взаємопов'язані протилежним образом, тобто збільшення однієї характеристики понижую показники іншої. Гафній є таким елементом, при введенні якого в жароміцні нікелеві сплави призводить до одночасного підвищення як міцності так і пластичності. Також гафній позитивно впливає на морфологію карбідів, які розміщуються по границях зерен, тобто гафній помітно покращує стан границь.

Ніобій уявляє собою γ' -утворюючий елемент, який також входить до складу як γ -твердого розчину так і до складу карбідів. Це підвищує жароміцність сплавів та призводить до зниження схильності сплавів до перебудови внаслідок послаблення дифузійних процесів, що покращує структурну стабільність та робочий ресурс. Також ніобій зменшує схильність до утворення зональної ліквіації. Вплив ніобію на механічні властивості приведено у рисунку 3.7

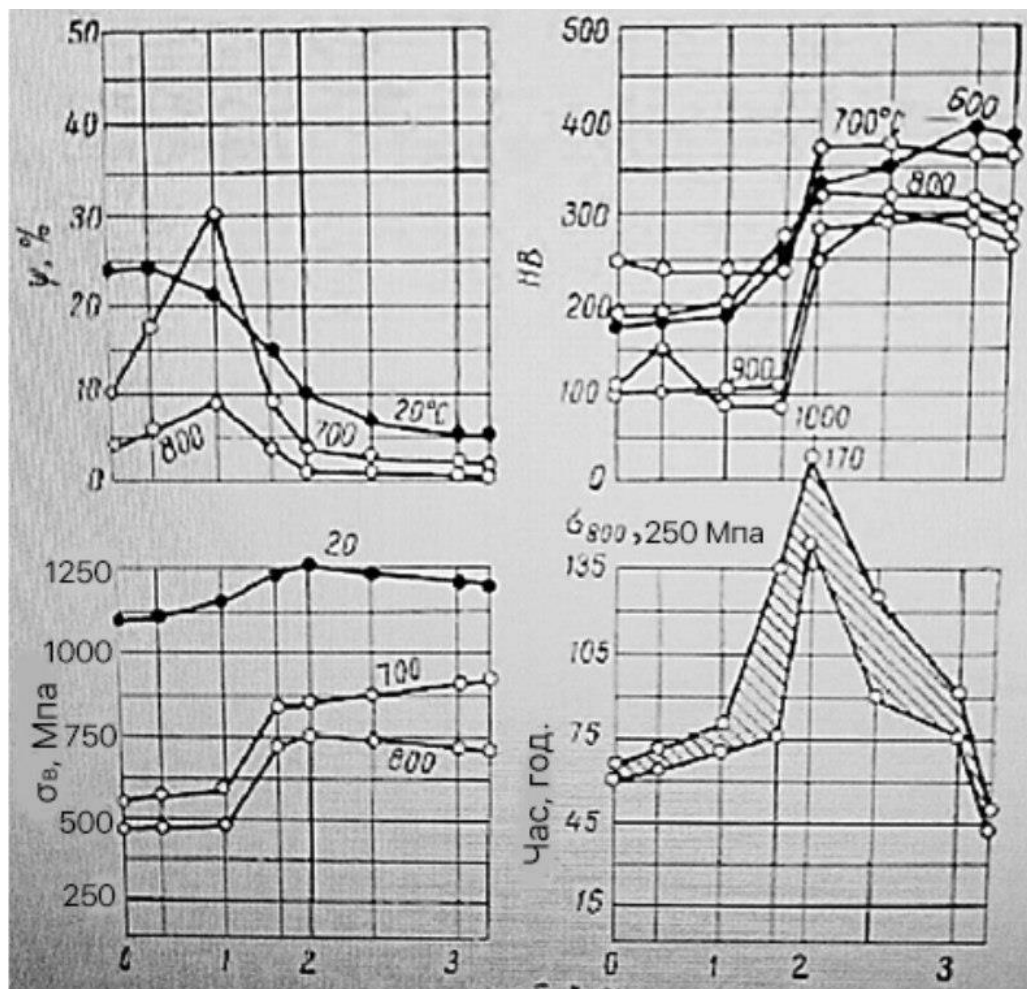


Рисунок 3.7.- Вплив ніобію на зміну механічних властивостей та довготривалу міцність сплаву після гарту з 1120°C на повітрі та подвійного старіння.

Тантал значно підвищує механічні властивості сплавів, він ефективно зміцнює γ' -фазу та утворює карбіди MC.

Хром та кобальт. Кобальт в незначній мірі підвищує жароміцність, при його вмісті помітно підвищується пластичність сплавів. Тому його оптимальний вміст 10%. Для підвищення жаростійкості до сплаву вводять легуючі компоненти, які мають більшу спорідненість до кисню, ніж залізо, і утворюють щільні оксидні плівки. До таких елементів відносяться хром, кремній і алюміній. Найбільш сильний вплив хрому на жаростійкість проявляється при його концентрації в сплаві 15 ... 20%. Відомо, що збільшення концентрації хрому призводить до збільшення цього елементу в окисній плівці, що знижує швидкість до окислення.

Елементи домішки. Вміст кремнію в сплавах 0,05-1,0%, цей елемент підвищує стійкість сплаву до окислення, але при цьому помітно знижує довготривалу міцність та пластичність. Кремній понижає температури ліквідусу та солідусу та температуру розчинення карбідів. Також негативно на властивості впливає марганець, тому його вміст обмежений 0,2-0,3%.

3.3 Термічна обробка ливарних жароміцних сплавів

Термічна обробка ливарних сплавів проводиться обов'язково. Так як з її допомогою забезпечується оптимальний комплекс експлуатаційних властивостей і усуваються залишкові ливарні напруження. Крім того, при нанесенні захисних покриттів, сплави піддаються нагріванню до високих температур, які впливають на їх структуру і властивості та в цілому уявляють собою певну частину термічної обробки.

Нікелеві жароміцні сплави піддаються термічній обробці трьох видів: 1) обробка на твердий розчин, з метою розчинити виділення γ' -фази, щоб потім викликати її повторне виділення у вигляді більш тонких та рівномірно розподілених частин та тим самим збільшити міцність металу; 2) термічна обробка покриття з метою скріпити зв'язок покриття зі сплавом-підкладкою;

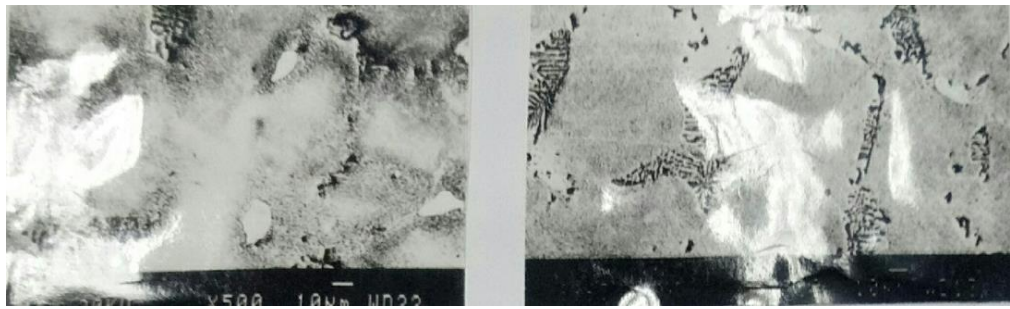
3) відпал-старіння з метою отримати додаткові виділення γ' -фази або карбідні та боридні фази по границях зерен.

В ливарному металі частини γ' -фази, які виділяються помітно відрізняються за розміром. Це обумовлено дендритною ліквідацією: при кристалізації між дендритний розплав збагачується γ -утворюючими елементами, що призводить до збільшення розміру та об'єму γ' -виділень в між дендритних областях. Термічна обробка сплавів при температурах нагрівання, рівної температурі повного розчинення γ' -фази або перевищує її, що сприяє вирівнюванню складу сплаву і розмірів γ' -виділень.

Для забезпечення оптимальних механічних властивостей жароміцні сплави піддаються термічній обробці : гомогенізація та старінню. При високотемпературній гомогенізації (1210..1320°C) відбувається наступне:

- розчинення зміцнювальних частин γ' -фази під час нагрівання до температури гомогенізації;
- повне або часткове розчинення грубих виділень евтектичної γ' -фази при температурі гомогенізації;
- зменшення ліквідаційної неоднорідності, тобто вирівнювання хімічних складів осей дендритів та міжосьових просторів;
- розчинення нерівновісної γ - γ' - евтектичної фази, яка завжди є присутньою в структурі після лиття.

Відомо, що оптимальна довготривала міцність в жароміцних сплавах досягається при певних розмірах частин кубічної форми зміцнювальної γ' -фази : $d=0.35...0,40\mu\text{м}$. Крім оптимального розміру частин важлива також їх однорідність за розміром, правильна кубічна морфологія та впорядковане розміщення в об'ємі твердого розчину. Дані про допустимі структури для сплавів ЖС32-ВІ та ЖС6У-ВІ наведено у рисунках 3.8 та 3.9. Метою старіння і є задовільнення цих вимог.



а

б

а - лита структура; б - оптимальна структура (термооброблена).

Рисунок 3.8- Оптимальна структура сплаву ЖС6У-VI.



а

б

в

а - лита структура; б - недогрівання при термічній обробці (підлягає повторній термічній обробці); в - оптимальна структура (термооброблена).

Рисунок 3.9- Оптимальна структура сплаву ЖС32-VI.

Перевагою проведення обробки з ступінчастим гартуванням є створення бімодальної фази. Температура другої стадії обирається в інтервалі, де відбуваються карбідні перетворення. Після такої обробки в структурі одночасно присутні частинки фази двох розмірних груп, що забезпечує більш повне виділення фази, більшу міцність та уповільнює коагуляцію, стабілізуючи структуру. Витримка на другій стадії формує сприятливу морфологію карбідних фаз на межах зерен, поліпшується пластичність. При повільному охолодженні (30°C/год.) між I та II стадіями нагріву на межах зерен виділяються карбідні частинки та відбувається розпад пересиченого

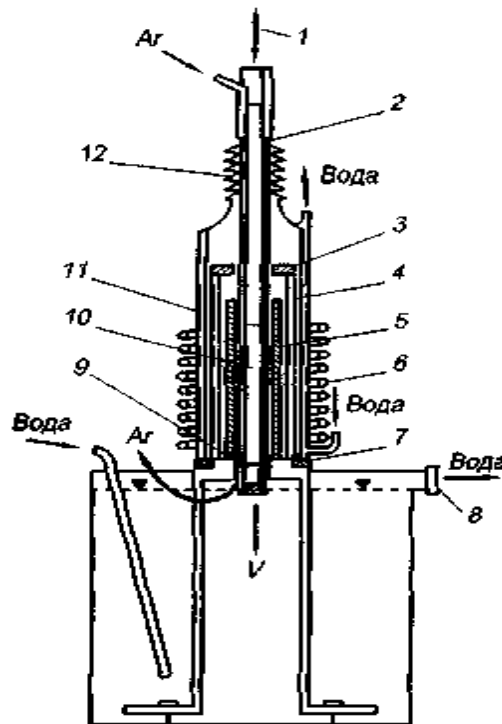
твердого розчину, така структура є сприятливою при тривалій експлуатації виробів.

При термічній обробці в вакуумних печах деталей з високолегованих жароміцних сплавів на основі нікелю нагрівання при гомогенізації проводять за ступінчастим режимом з проміжною витримкою при $1000+50^{\circ}\text{C}$ впродовж 40-90 хвилин. Час нагріву до цієї температури 1-2 год., нагрів до остаточної температури - від 30 до 90 хвилин, час витримки залежить від природи сплаву. Для зняття залишкових напружень, що виникають при механічній обробці, в таких сплавах проводять відпал при $950-1000^{\circ}\text{C}$ впродовж 2 год. в середовищі чистого аргону або в вакуумі $10^{-10}-10^{-2}$ Па [9].

Більша частина турбінних лопаток з направленою або монокристалічною макроструктурою виготовляють, як правило, у вакуумі на установках типу УВНК-8П.

Вперше стовпчасту структуру у відливках з нікелевих жароміцних сплавів отримали Ференайдер та Гуард методом спрямованої кристалізації. Проте навіть ідеальне орієнтування поздовжніх границь зерен не прибиравло поперечні компоненти у місцях стикування дендритів. Тому наступним шагом вдосконалення структури лопаток було отримання їх методом спрямованої кристалізації у вигляді монокристалів. Спрямована кристалізація сплавів може здійснюватися різними методами з наступними ознаками: безперервний або переривчастий; безтигельний або з використанням тиглю; з переміщенням зразка або з регулюванням потужності підігрівання; горизонтальний або вертикальний тип установки.

Лопатка ГТД, яка розглядається виготовлялась за допомогою методу Бриджмена-Стокбаргера (нормальної спрямованої кристалізації) рис.3.10

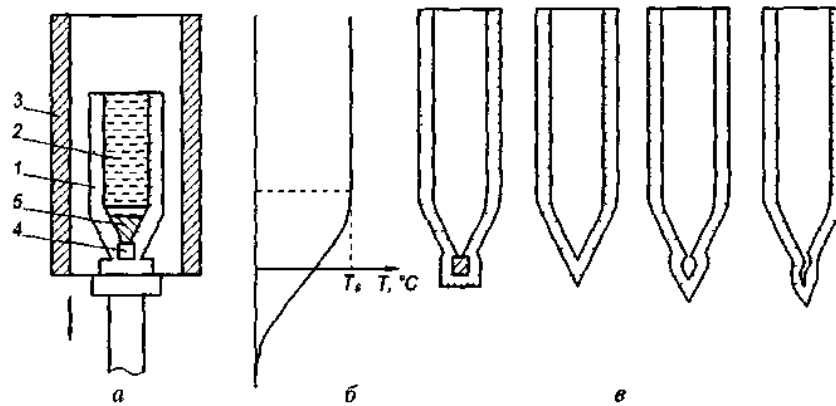


1-двигун; 2-глиноземна трубка; 3-графітовий тримач; 4-два молибденових екрани; 5-молибденовий концентратор; 6-індуктор; 7-гумове ущільнення; 8-відвод води; 9-спрямовано-кристалізований сплав; 10-розплав; 11-подвійна кварцева стіна; 12-гумовий сильфон.

Рисунок 3.10- Установа з водяним охолодженням для спрямованої кристалізації.

Повільне або ступінчасте регулювання швидкості кристалізації у широкому інтервалі здійснюється за допомогою приводу. Для того, щоб отримати якісну структуру моновідливка, необхідно забезпечити рівномірне витягування та виключити вібрацію. Нагрівальний пристрій, забезпечує повне розчинення зразку. Повільне зменшення температури зверху вниз запобігає конвекції рідкого металу. Для підвищення температурного градієнту використовують водяне охолодження. При вирівнюванні моновідливок довільною орієнтації дно тиглю має вигляд конусу, на вершині якого створюється переохолодження, де і зароджується монокристал. Для отримання моновідливок з кристалами заданої орієнтації в підставі форми поміщують затравку 4 (рис.3.11).

Для підвищення надійності отримання монокристалічної структури відливки в підставі тиглю існує перемичка (рис.3.11, в), яка запобігає або зменшує вірогідність проростання в основному об'ємі відливки декількох кристалів, якщо їх зародження пішло не від одного зародка.



а-схема теплового вузла устаткування; 1-тигель; 2-розплав; 3-нагрівач; 4 - затравка; 5-конус; б-розподілення температур по висоті тиглю; в- тигли, для отримання моновідливок з затравкою.

Рисунок 3.11- Отримання моновідливок методом Бриджена-Стокбаргера.

Цей метод можна реалізувати без переміщення тиглю або нагрівача, шляхом повільного пониження потужності. Ливарні нікелеві жароміцні сплави зі складним хімічним складом мають характерну дендритну структуру, в якій вісь першого порядку орієнтовані переважно вздовж заданого напрямку (наприклад, $[001]$), а вісь другого порядку, яка проростає у рідину в перпендикулярному напрямку, створюють у нормальному перетині відливки особливий сітковий візерунок з елементарною коміркою у вигляді тетрагона (рис.3.12.)



1.-у повздовжньому та поперечному, 2- перерізах

Рисунок 3.12- Вигляд комірчастої дендритної структури у сплаві ЖС32-ВІ спрямовано закристалізованого відливка, $\times 50$.

Устаткування для високошвидкісної спрямованої кристалізації УВНК-8П. в даній установці напівбезперервної дії використовується охолодження у рідкометалевому теплоносії розплавленим алюмінієм (рис.3.13.) Плавильна камера 1 призначена для розміщення індукційної плавильної печі 3, печі 4 підігрівання форм та рідкометалевого кристалізатору 2. Механізм 8 вертикального переміщення 5 забезпечує подачу блоку форм із зони нагрівання та виливки до зони кристалізації. Вакуумно газова система 10 забезпечує створення робочого середовища у плавильній камері: вакуум 0,133Па або аргон 26,7Па.

Два блоки форм по шість лопаток, у кожній підвішуються на каретку 9 і через шлюзову камеру переміщуються до електропечі. Мірна шихтова заготовка сплаву поміщується в індукційну піч 3, камера відкачується до вакууму, після чого вмикається нагрівач 4. По досягненню бажаної

температури вмикається індукційна піч, в якій розплавляються мірна та шихтова заготовки. Розплавлений метал заливається у нагріті форми при температурі 1550-1580°C, після чого починається процес спрямованої кристалізації шляхом опускання керамічного блоку форм із залитим металом в розплав алюмінію.

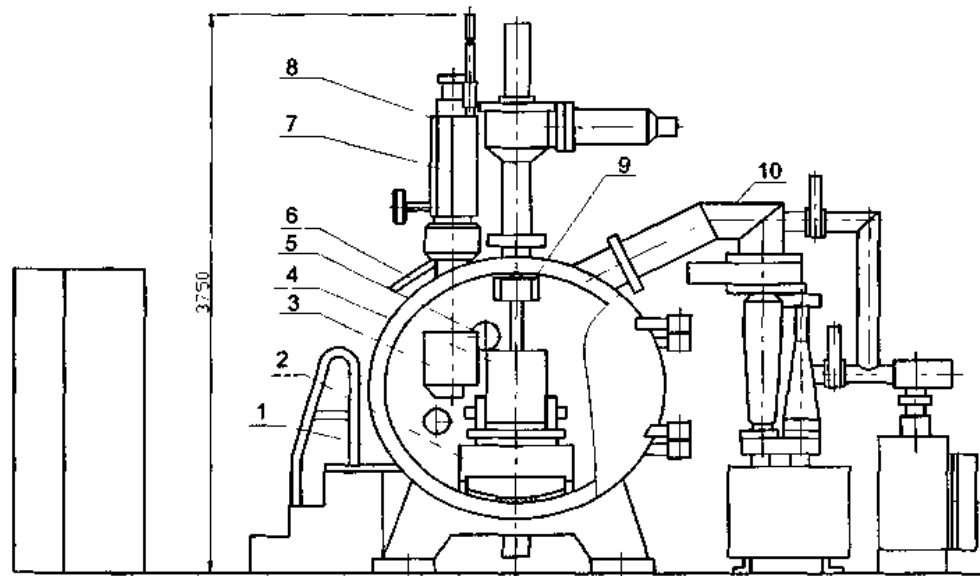


Рисунок 3.13.- Схема установки УВНК-8П[6]

Отже остаточна термічна обробка лопаток у вакуумній установці УВНК-8П має наступний вигляд:

-створення динамічного вакууму у електропечі з температури 400°C ((1-9)·10⁻² мм.рт.ст.) (1-9)·1,33 Па. Час створення вакууму не менше 2 годин.

Гартування:-час нагрівання садки до температури 1000 ±10°C 1год30хв+30хв; -перша ступінь витримки: 1000 ±10°C 30..45хв. ступінь вакууму((1-9)·10⁻² мм.рт.ст.) (1-9)·1,33 Па. Підйом до температури 1275⁺¹⁰₋₅°C за 1год.00хв+30хв у динамічному вакуумі;-друга ступінь витримки 1275⁺¹⁰₋₅°C 1год.15хв+15хв динамічний вакуум ((1-9)·10⁻²торр).

Охолодження:- увімкнути вентилятор одразу після опускання садки в камеру охолодження. Час охолодження не менш одного часу, швидкість

охолодження 40-80°C/хв. Після чого лопатки надходять на механічну обробку та на нанесення захисних покриттів.

Механічна обробка лопатки ТВД (після гартування):

- механічна обробка профілю пера, бандажної полки, полки хвостовика;
- «нарізання» ялинки хвостовика (шліфування зубців);
- відпал, для зняття внутрішніх напружень після шліфування при температурі 1000°C, час 1,5..2 години. контроль ЛЮМ1-ОВ;
- пропалення перфораційних отворів на пері лопатки;
- пайка зносостійкої пластини зі сплаву ХТН-62 на торець бандажної полки. Температура пайки у вакуумі 1265±5°C, протягом 20 хвилин. після пайки контроль мікроструктури лопатки на перегрівання;
- механічна обробка після пайки;
- контроль ЛЮМ1-ОВ;
- нанесення покриття ГЦП (хромоалітування), відпал при температурі 1050°C;
- нанесення покриття СДП-2, відпал при температурі 1050°C;
- нанесення покриття ВСДП-16, відпал при температурі 1050°C;
- нанесення покриття АС-2, відпал при температурі 1050°C;
- контроль ЛЮМ1-ОВ;
- контроль частот власних коливань.

Захисні покриття на лопатці ТВД (ЖС32-ВИ): ГЦП+СДП-2+ВСДП-16:

- газоциркуляційне хромоалітування (ГЦК), товщина покриття на внутрішній поверхні пера- 0,015...0,035мм, на зовнішній поверхні пера: 0,015...0,035мм;
- на зовнішній поверхні пера: СДП-2 товщиною 0,020...0,030мм, потім наносять покриття ВСДП-16 товщиною – 0,010..0,015мм.

Після кожного нанесення покриттів ГЦП, СДП-2, ВСДП-16 проводиться дифузійний відпал при температурі 1050°C у вакуумі. На зовнішню поверхню бандажної полки наноситься покриття алюмосиліцілювання АС-2, товщиною

0,030...0,060мм, та робиться дифузійний відпал при температурі 1000°C у вакуумній печі. У таблиці 3.1 наведено хімічний склад захисних покриттів.

Таблиця 3.1- Хімічний склад покриттів, їх тип та призначення

Тип покриття	Призначення	Марка катоду покриття (марка покриття)	Система покриття
Конденсовані покриття	Захист від газової корозії в області температур 1050-1100°C	СДП-2	Ni-Cr-Al-Y
Алюмінідні дифузійні покриття	Захист від газової корозії в області температур 950-1050°C	ВСДП-16(ВП)	Ni-Al-Cr-Si-Y
Легувальні алюмінідні дифузійні покриття	Захист від газової корозії в області температур 1000-1100°C	СДП2+ВСДП16(ВП)	Ni-Al-Cr-Si-Y
Конденсаційно-дифузійні покриття	Захист ЖС від газової корозії в області температур 1100-1200°C. З'єднуючі шари ТЗП	СДП-2+ВСДП(ВП)	(MeC)+(Ni-Cr-Al-Y)+(Ni-Al-Cr-Y)(Ni-Cr-Al-(Ta)-W-C-Y)+(Ni-Al-Cr-Y)
Іонне насичення поверхні конструкційних сталей	Захист від солевої корозії при температурах $\leq 700^{\circ}\text{C}$	ВСДП-16	Fe-Co-Al-Si-Y

Даний вид обробки є оптимальним та більш економічно вигідним, так як охолодження з аргоном замінює проведення операції старіння. Також після кожної операції проводять контролювання:

Контроль макроструктури лопаток:

- провести контроль макроструктури кожної лопатки;

- границі кристалів повинні буди переважно орієнтовані уздовж осі «z» лопатки. Не допускається проходження границь кристалів під кутом більш 60° , а у зоні 5мм від вхідної та вихідної кромки лопатки- не більш 30° (до осі «z» лопатки). Не допускається проходження границь кристалів в зоні «П» по радіусу переходу пера до хвостовика на вхідній та вихідній кромках(див. рис. 3.14 (a));

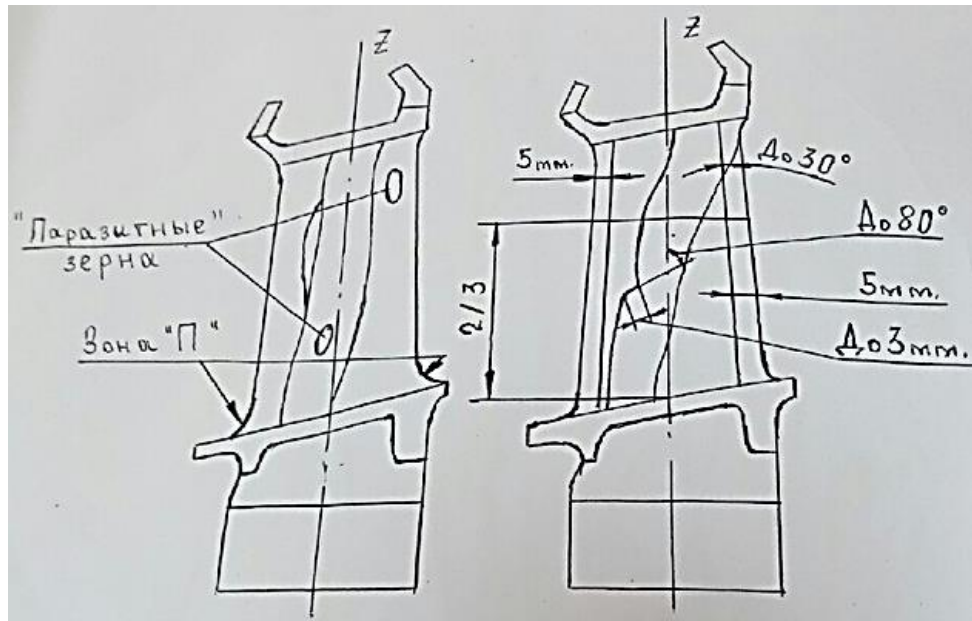
- допускається проходження границь кристалів по вхідній та вихідній кромках (без їх пересікання), виключаючи зону «а»-2/3 довжини пера від полки хвостовика лопатки. Допускається проходження границь кристалів довжиною не більш 3мм під кутом більш 60° до 80° до вісі лопатки, відстань від кромки 5мм не меньше. Допускається проходження границь кристалів по радіусу переходу пера до бандажної полки лопатки. Допустима кількість кристалів на пері лопатки-6, але не менше 2.

- допускається на пері лопатки монокристалічна структура. Монокристалічної рахувати структуру, яка має на пері один кристал не маюча допустиму кількість «паразитних» кристалів всередині одного кристалу. Кристал, який виріс на пері лопатки всередині монокристалу або всередині спрямованих кристалів і не маючий з ними спільних границь вважають «паразитним». Допустима кількість «паразитних» кристалів не більше двох (на лопатку). Кристали, які мають спільні границі, вважати окремими;

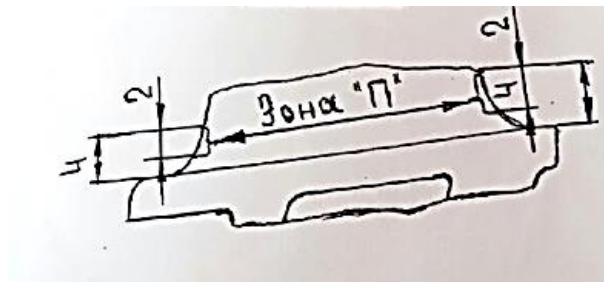
- контролю кристалографічної орієнтації повинні піддаватись лопатки з монокристалічною структурою та з спрямованою структурою. Якщо на стартовому конусі присутні більше одного кристалу і один гасить стабілі на довжині пера, то відмітити основний кристал червоним кольором на стартовому конусі;

-макроструктура на бандажній полці може бути монокристалічною або спрямованою, на полці хвостовика і на хвостовику – монокристалічно, спрямованою та рівноосьовою;

-при неможливості проведення контролю макроструктури, лопатки відправили на повторне травлення із наступним контролем. (травлення одних і тих самих лопаток проводити не більше двох разів).



а



в

Рис.3.14- Проведення контролю макроструктури лопатки а-ескіз1, б ескіз2.

Контроль хімічного складу лопаток:

-Контролю хімічного складу піддаються всі партії лопаток, відлитих на одній плавильній установці;

-Відрізати прибуток на одному з блоків і підготувати місто для зняття стружки шляхом зачищення поверхні на наджачному шарі;

-У підготовленому місці отримати необхідну кількість стружки шляхом сверлення або фрезерування;

-Направити хімічну стружку до лабораторії. Вміст вуглецю повинен відповідати ОСТ 1 90126-85 за інструкцією вміст $C=0,13-0,2\%$. У випадку незадовільних результатів аналізу направити стружку з двох інших блоків цієї плавки. При отриманні незадовільних результатів повторного аналізу хоча б на одному з блоків, всі блоки даної плавки проконтролювати на вміст вуглецю. Блоки, які мають відхилення вмісту вуглецю забракувати;

-Проконтролювати чашу кожного блоку на відповідність марки сплаву ЖС6У-ВІ та ЖС32-ВІ на стилоскопі СЛ-11.

3.4 Отримана структура та властивості відливок лопаток турбіни з нікелевих сплавів після ГІП.

Проведено випробування відливок турбінних охолоджувальних лопаток з нікелевих сплавів з монокристалічною та рівноважною структурою після гарячого ізостатичного пресування (ГІП). Встановлено, що ГІП забезпечує отримання більш якісних відливок за рахунок зниження усадкової мікропористості, а сумісно із наступною стандартною термічною обробкою і покращення однорідності матеріалу.

Для литої структури, як рівноосьової, так і монокристалічної лопаток газотурбінних двигунів з нікелевих жароміцних сплавів характерна наявність мікропористості. Одним із перспективних напрямків зменшення пористості відливок відповідального призначення, яка дозволяє підвищити втомну міцність, як наслідок і експлуатаційну надійність, є гаряче ізостатичне пресування (ГІП). Вивчається вплив ГІП на структуру та властивості відливок

охолоджувальних лопаток із жароміцних сплавів на нікелевій основі- ЖС6У-ВІ і ЖС32-ВІ.

Методика проведення досліджень: робочі лопатки і зразки зі сплаву ЖС6У-ВІ отримані методом рівновісної кристалізації з полікристалічною структурою, а зі сплаву ЖС32-ВІ- методом високошвидкісної спрямованої кристалізації (ВНК) і мають монокристалічну структуру.

Процес ГП здійснювали у атмосфері аргону при температурі $1210 \pm 10^\circ\text{C}$ (для сплаву ЖС6У-ВІ) і $1250 \pm 10^\circ\text{C}$ (для сплаву ЖС32-ВІ) з витримкою протягом 1,5 години та тиском 160...170 МПа. Випробування проводились при порівнянні з аналітичними лопатками без проведення операції ГП.

У таблиці 3.1 приведено технологічні варіанти обробки лопаток та зразків, відлитих зі сплавів ЖС6У-ВІ та ЖС32-ВІ. Крім того ГП лопаток проводили як після вилуговування керамічного стрижню із внутрішньої порожнини охолоджувального каналу (варіант «1^а»), так і сумісно з керамічним стрижнем, з наступним вилуговуванням після операції ГП (варіант «1^б»). У досліджуваних зразках і лопатках визначали хімічний склад, механічні і жароміцні властивості, вивчали структуру.

Таблиця 3.2- технологічні варіанти обробки лопаток і зразків зі сплаву ЖС6У-ВІ і ЖС32-ВІ

Варіант	Найменування	Температура при ГП, °C		Тиск при ГП, МПа	
		ЖС6У-ВІ	ЖС32-ВІ	ЖС6У-ВІ	ЖС32-ВІ
«0»	Початковий без ГП	-	-	-	-
«1»	Після ГП	1210 ± 10	1250 ± 50	160	170
«2»	ГП+т/о	-«-»	-«-»	-«-»	-«-»

Хімічний склад визначали методами спектрального та хімічного аналізів. Пористість по перетину відливок оцінювали люмінісцентним

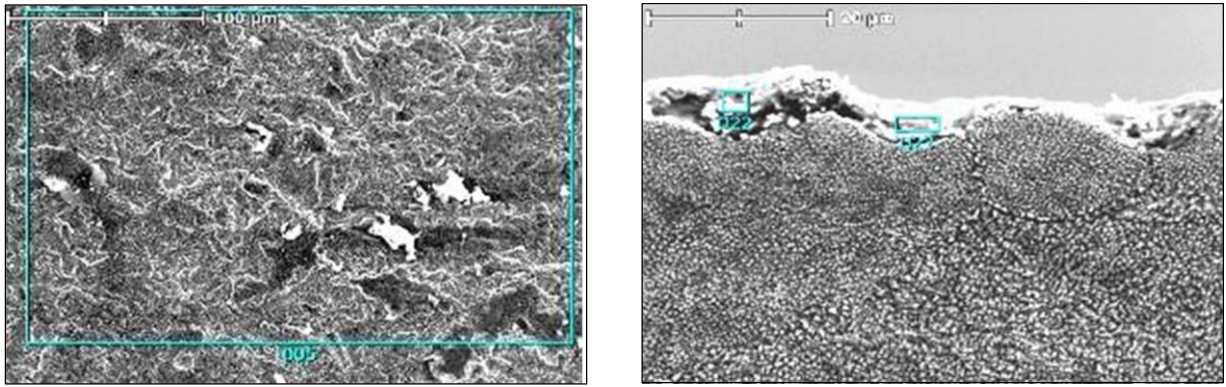
контролем ЛЮМ1-ОВ. Дослідження мікроструктурного стану проводили на мікрошліфів методами оптичної та растрової електронної мікроскопії.

Аналіз отриманих результатів: хімічний склад робочих лопаток і зразків зі сплавів ЖС6У-ВІ та ЖС32-ВІ задовільнений і відповідає вимогам технічної документації. Зовнішній огляд показав, що відливки після ГПВ відрізняються більш темнішим кольором поверхні в порівнянні із стандартною термічною обробкою у вакуумі.

При металографічному дослідженні по поверхні лопаток після ГПВ (варіант «1») виявлені неметалеві включення темно-сірого кольору, характерні для окисів, які проникають на глибину до 10мкм. На поверхні лопаток до проведення операції ГПВ+ термічна обробка (варіант «0»), а також ГПВ+ термічна обробка по стандартному режиму (варіант «2») окислення практично відсутнє. Відсутність окислення на поверхні деталей, оброблених по 2-му варіанту, обумовлено вакуумним очищенням поверхні у процесі високотемпературної обробки у вакуумі після проведення операції ГПВ.

Рентгеноспектральний аналіз (РСМА) робочих лопаток у вихідному стані (до ГПВ та без т/о), а також після операції ГПВ (без т/о), показав, що поверхні деталей після ГПВ спостерігається підвищений вміст кисню, алюмінію, танталу та вуглецю приблизно у 3 рази в порівнянні з поверхнею вихідних лопаток (до проведення ГПВ) (рисунок 3.1). підвищення елементів свідчить про окислення внаслідок використання у процесі ГПВ недостатньо чистого аргону.

Крім того слід відмітити, що одночасне прикладання високих температур(1210-1250°C) та тиску (160..170МПа) у процесі ГПВ призводить до інтенсивного дифузійного масоперенесення атомів алюмінію і титану від центру до поверхні з утворенням на поверхні сплавів шарів, які збагачені цими елементами.



а

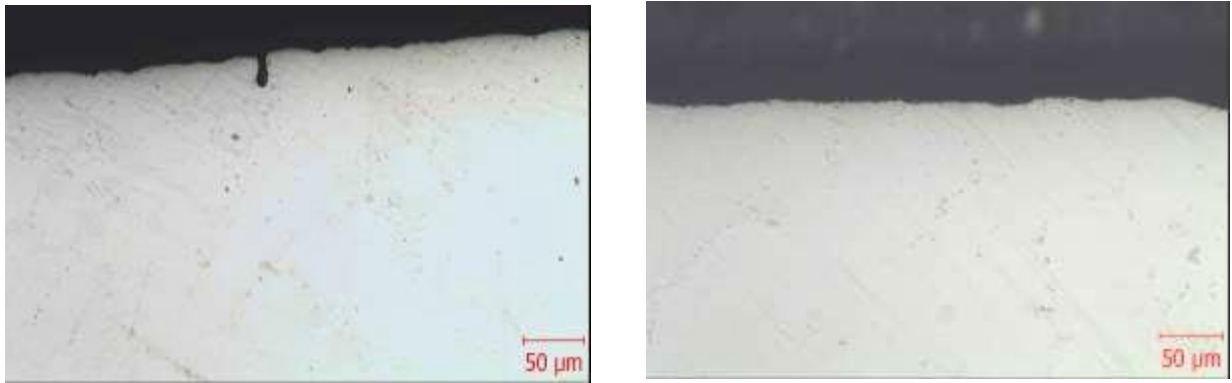
б

а – сплав ЖС32-ВІ - $\times 430$, б – ЖС6У-ВІ - $\times 2000$

Рисунок 3.15- Результати РМСА поверхні лопаток після проведення ГПІ

Досліджували стан поверхні внутрішніх (охолоджувальних) каналів робочих лопаток, відлитих зі сплавів ЖС6У-ВІ та ЖС32-ВІ, які пройшли газостативування після вилуговування керамічного стрижня із внутрішньої поверхні охолоджувального каналу, а також газостативування разом з керамічним стрижнем (до вилуговування). На внутрішній поверхні лопаток з відкритим охолоджувальним каналом (після вилуговування стрижня), виявлено окислення до темно-сірого кольору.

Після газостативування лопаток разом із керамічним стрижнем та наступним вилуговуванням у автоклаві, поверхня охолоджувального каналу світла, без виявлення окислення. Також на внутрішній поверхні охолоджувальних каналів робочих лопаток після вилуговування стрижня, маються мікропори (рис.3.16 а). Тоді як газостативування лопаток зі стрижнем відбувається «залікування» пор, які знаходяться на поверхні охолоджувального каналу (рис.3.16.б).



а

б

а-ГП з відкритим охолоджувальним каналом варіант «1^а»; б- ГП разом з керамічним стрижнем варіант «2^а»

Рисунок 3.16- Стан внутрішньої поверхні охолоджувальних каналів лопаток після ГП, $\times 200$:

Контроль методом ЛЮМ1-ОВ у осьовому перетині хвостовика та поперечному перетині пера, які потрапили на дослідження лопаток показав, що на лопатках до проведення ГП виявлено велику кількість яскраво просвічувальних точок (рис.3.17а). У зразках після проведення ГП їх не виявлено (рис.3.17 б,в).



а

б

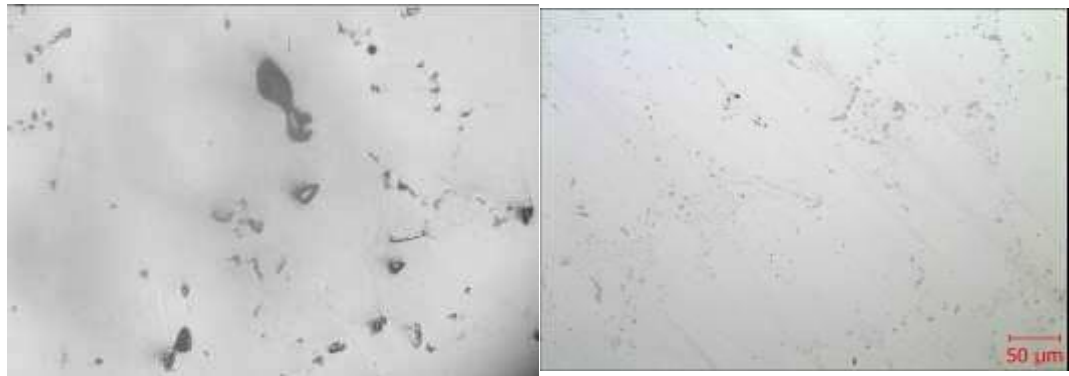
в

а- варіант «0»- до проведення ГП; б-варіант «1»-після проведення ГП;
в-варіант «2»-після проведення ГП+ т/о.

Рисунок 3.17- Зовнішній вид відливков лопаток у осьовому перетині хвостової частини під ультрафіолетовим світлом:

При огляді нетравлених шліфів, виготовлених у осьовому перетині хвостовика та поперечному перетині пера лопаток без ГП (варіант «0»),

виявлені одиничні мікропори розміром до 110мкм (рис.4 а). Карбіди MeC виділяються як у вигляді дискретних глобулярних частин, так і пластин типу «китайський ієрогліф», які розташовуються у міждендритних просторах та по границях зерен.



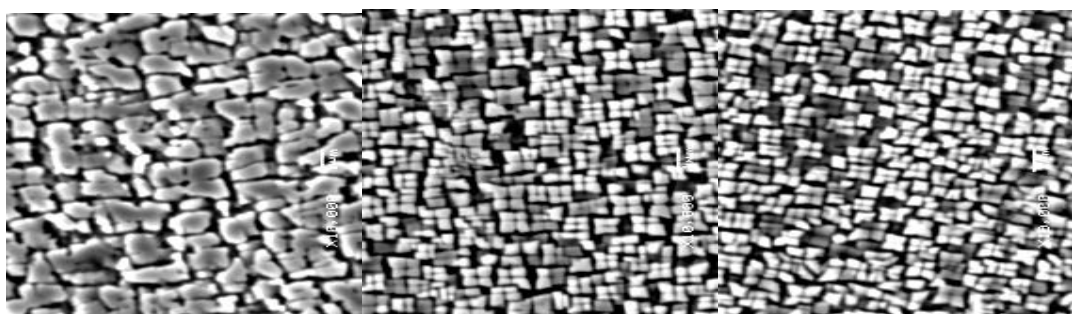
а

б

а- до проведення операції ГП; б-Після проведення ГП- варіант «1»

Рисунок 3.18- Мікропористість у матеріалі робочих лопаток, $\times 200$: [11]

Після проведення операції ГП відбувається заліковування пор у внутрішніх об'ємах металу (рис3.18 б). При дослідженні зміцнювальної інтерметалідної γ' -фази після проведення ГП спостерігається її подрібнення (рис 3.19).



а

б

в

а-до проведення ГП- варіант «0»; б-після проведення операції ГП варіант «1»; в- після ГП+т/о варіант «2»

Рисунок 3.5- Інтерметалідна γ' -фаза в осях дендритів відливок лопаток зі сплавом ЖС32-ВІ, $\times 1000$ [11].

Також наведені дані механічних і жароміцних властивостей сплавів до та після проведення операції ГПІ таблиця 3.3

Таблиця 3.3- Механічні та жароміцні властивості сплавів ЖС6У-ВІ та ЖС32-ВІ до та після ГПІ (варіанти «0», «1», «2»).

Стан матеріалу	Маркування сплаву	Механічні властивості при $t=20^{\circ}\text{C}$			Довготривала міцність		
		σ_B , МПа	δ , %	Ψ , %	$T_{\text{исп}}$, $^{\circ}\text{C}$	σ , МПа	τ_p , год
вихідні (без ГПІ) до т/о	ЖС6У-ВІ	975,0	4,4	4,5	975	200	90
	ЖС32-ВІ	1192,0	7,6	10,9	1000	280	52
		1125,0	8,4	11,3			53,5
вихідні (без ГПІ) після т/о	ЖС6У-ВІ	1043,0	4,8	6,3	975	200	79
		1046,0	4,0	67,			119
	ЖС32-ВІ	1156,0	6,0	8,2	1000	280	86,5
		1126,0	4,4	8,2			61,5
після ГПІ	ЖС6У-ВІ	1005,0	4,4	8,6	975	200	76
		1000,0	5,6	8,6			90,5
	ЖС32-ВІ	999,0	9,6	15,8	1000	280	55
		1043,0	8,8	15,0			57,5
Після ГПІ+ т/о	ЖС6У-ВІ	979,0	8,4	15,6	975	200	71,5
		974,0	9,2	12,2			63
	ЖС32-ВІ	1248,0	8,0	11,7	1000	280	102,5
		1103,0	14,8	14,6			91

Після проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

- якість матеріалу рівновісної та монокристалічних лопаток (а також зразків) відлитих сплавів, як до, так і після проведення ГП відповідає вимогам технічної документації;

- ГП сприяє підвищенню якості відливок робочих лопаток турбіни, за рахунок зменшення мікропористості, внаслідок їх залікування;

- встановлено, заліковування пор відбувається лише на лопатках з керамічним стрижнем, на відритих поверхнях цього не відбувається;

- термічна обробка за стандартною схемою після газостативування сприяє підвищенню структурної однорідності справу та релаксації напружень, наведених у процесі ГП, що показує позитивний вплив на фізико-механічні властивості;

- також отримавши результати таблиці 3.3, отримуємо, що після проведення ГП та стандартної термічної обробки при температурі 1000°C для сплаву ЖС32-ВІ та при прикладеному навантаженні у 280 МПа, маємо час до руйнування значно більший (майже в 2 рази) ніж у ЖС6У-ВІ при меншому навантаженні та температурі;

- для виготовлення лопаток використовуються обидва сплави. Вартість легувальних елементів сплаву ЖС32-ВІ є набагато дорожчими, тому його доречно використовувати при експлуатації при більш високих температурах;

- для захисту сплавів від корозії та окислення вони підлягають нанесенню захисних покриттів;

- для забезпечення експлуатаційних характеристик сплаву, обов'язковим є проведення контролю на всіх операціях (контроль хімічного складу, контроль структури та макроструктури, контроль кристалографічної орієнтації, контроль на відсутність дефектів та інші).

4 ОХОРОНА ПРАЦІ І БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

В даному розділі наведені основні заходи з охорони праці при дослідженні структури та хімічного складу жароміцних сплавів:

4.1 Аналіз потенційних небезпек

а) Незадовільна підготовка робочого місця в приміщеннях дослідницької лабораторії, внаслідок не виконання вимог ергономіки, що може привести до зниження працездатності, або механічних травм.

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

в) Небезпеки, які пов'язані з використанням персонального комп'ютера при виконанні дослідницької роботи:

- Негативний вплив електромагнітних випромінювання при використанні відео-дисплейних терміналів, застарілих моделей. Це погано впливає на імунну систему робітника.

- Підвищення напруженості і інтенсивність праці, що пов'язана з ПК. Що може призвести до погіршення якості зору.

- Можливість астенопії – відчуття дискомфорту та біль в очах. В наслідок частої зміни сприймання зображення та роботою с клавіатурою.

- Негативний вплив візуальних ефектів при низькій, або не достатній контрастності (дозволу) зображення. Наслідок підвищення напруження зорового нерву.

г) Небезпеки, які пов'язані з визначенням твердості, механічних та технологічних властивостей зразків, а саме:

- використання застарілого обладнання;
- порушення проведення випробувань;

д) Небезпеки, які пов'язані з дослідженням структури металу методом електронної металографії, з використанням електричних мікроскопів.

е) Небезпеки, які пов'язані з безпосереднім проведенням ТО або ХТО зразків або дослідницьких виробів а саме:

- негативний вплив теплового випромінювання від нагрітих поверхонь, обладнання або виробів;
- можливість отримання термічних опіків, внаслідок виплисків гартувального мастила, або при непередбачуваному торканні поверхні виробів;
- можливість отруєння, що може бути пов'язано з використанням насичуваних атмосфер при ХТО;
- можливість вибуху при порушеннях правил технік безпеки і при підготовці вуглець-вмісних насичуваних атмосфер;

ж) Незадовільні параметри повітряного середовища в КБ внаслідок неефективної роботи системи опалювання та повітрообміну, що може призвести до захворювань загального параметру.

з) Незадовільне рівень освітлення робочих зон в дослідницькій лабораторії, що виникає з причин: несправності освітлювальної техніки. Наслідками цих факторів може стати зниження зору, механічні травми.

и) Можливість загорянь внаслідок порушень правил з пожежної безпеки, що може призвести до пожежі.

і) Небезпеки яку пов'язані з умовами праці у надзвичайних ситуаціях, зокрема неправильна організація заходів що до проведення аварійно-рятувальних та інших невідкладних робіт.

4.2 Заходи по забезпеченню безпеки

а) вимоги ергономіки згідно ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ «Рабочее место при выполнении работ сидя. Общеэргономические требования» при організації робочого місця проектувальника забезпечують швидкість та ефективність роботи.

Важливими моментами, які необхідно врахувати для організації робочого місця, є такі:

- робоча поза;
- конфігурація та спосіб розміщення панелей індикаторів та органів управління;
- потреба в огляді робочого місця;
- необхідність використання робочої поверхні для писання або інших робіт, установлення телефонних апаратів, іншої техніки, допоміжних засобів;
- простір для ніг та стоп при роботі сидячи.

Конструктивне рішення щодо організації робочого місця обов'язково має забезпечити оптимальність усіх зон досяжності моторного та інформаційного полів. Під інформаційним полем розуміють простір робочого місця з розміщеними засобами відображення інформації та іншими джерелами інформації, якими користується людина в процесі праці. Оптимальною зоною інформаційного поля називається та його частина, у якій забезпечується найкраще сприйняття інформації, при цьому враховують кут огляду, оскільки більшість інформації оператори сприймають очима. Рекомендуються такі параметри: кут огляду має становити 30—40° по відношенню до горизонталі робочого місця та 0—30° вертикальній площині по відношенню до горизонталі.

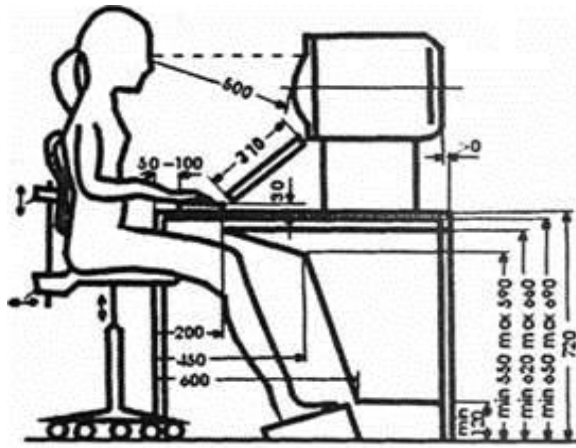


Рисунок 4.1- Робочий стіл і розміщення користувача ПК

б) Для запобігання ураження електричним струмом, передбачено: електрообладнання має відповідати ГОСТ 12.1.019-79 « Система стандартів безпеки праці. Електробезпеки. Загальні вимоги і номенклатура видів захисту» та ПУЕ-2013. Експлуатацію електрообладнання та електроустановок потрібно проводити згідно з «Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів» та « Правил технічної безпеки при експлуатації електроустановок споживачів»: – ізоляція струмоведучих частин (робота, додаткова, посилена, подвійна) повинна відповідати ГОСТ 12.2.007-75 «Системи стандартів безпеки праці. Вироби електротехнічні. Загальні вимоги безпеки»;

– захисне відключення відповідно ГОСТ 12.2.007-75 «Системи стандартів безпеки праці. Вироби електротехнічні. Загальні вимоги безпеки»;

– відповідність електрообладнання відповідно ГОСТ 12.2.019-79 « Система стандартів безпеки праці. Вироби електротехнічні. Загальні вимоги і номенклатура видів захисту».

в) Загальні вимоги до техніки безпеки при роботі на комп'ютері:

Персонал, що працює на комп'ютері зобов'язаний дотримуватися вимог інструкції, розробленої на підставі Санітарних норм і правил СанПин 2.2.2.542-96 «Гігієнічні вимоги до відео дисплейних терміналів, персональними електророзрахунковими машинами і організації робіт», а також нести особисту відповідальність за дотримання вимог безпеки своєї

праці і за створення небезпечного чи шкідливого виробничого фактору для інших працюючих і помилку комп'ютера.

Основні правила організації простору навколо робочого місця:

– при тривалому і інтенсивному використанні, на поверхні модулів ПК (системний блок, монітор, мишка і т.д.) виникають невеликі розряди струму. Ці частинки активізуються під час дотиків до них і призводять до виходу техніки з ладу. Потрібно регулярно використовувати нейтралізатори, зволожувачі повітря, антистатиками;

– навколо столу не повинно бути звисаючих проводів, користувач не повинен контактувати з ними;

– важлива цілісність корпусу розетки і штепсельної вилки;

– відсутність заземлення передекранного фільтра перевіряється за допомогою вимірювальних приладів.

При виконанні роботи:

Оскільки персональний комп'ютер має всі властивості електричного приладу, то на нього поширюються основні правила безпеки при взаємодії з провідниками струму:

– не можна розміщувати будь-які речі на проводах, а також самостійно змінювати їх розташування без особливої потреби;

– рекомендується уникати розташування рідин поруч з модулями комп'ютера;

– неприпустимо знімати корпус будь-якої із складових частин ПК під час його роботи;

– під час роботи на комп'ютері не можна одночасно торкатися до інших металевих конструкцій, які стоять на тій же поверхні. Це стосується опалювальних батарей або трубопроводів;

– при відчутті навіть незначного запаху гару, потрібно якомога швидше вимкнути ПК з мережі і звернутися до відповідального за обслуговування комп'ютерної техніки.

Що б мінімізувати вплив при тривалому знаходженні за монітором, варто назавжди запам'ятати наступні правила:

- відстань між очима користувача і екраном становить не менше 600 мм;
- клавіатура повинна встановлюватись під кутом $15^0(\pm 5)$;
- стілець розташовується таким чином, що б тримати рівну поставу;
- кість руки повинна мати опору, для чого відстань від клавіатури до краю стола становить 100-150 мм;
- надзвичайно важлива періодична зарядка. Щогодини потрібно вставати з крісла, розминати м'язи і суглоби на протязі 10-15 хв.

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

Види трудової діяльності поділяються на 3 групи:

Група А – робота з зчитування інформації з екрана комп'ютера з попереднім запитом;

Група Б – робота з введення інформації;

Група В – творча робота в режимі діалогу.

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

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

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

для групи Б – по сумарному числу зчитування або вводяться знаків за час роботи з комп'ютером, але не більше 60 000 знаків;

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

Категорично забороняється використання на робочому місці електронагрівальних приладів з відкритим елементом, відкритим вогнем. Користування електронагрівальними приладами з закритими нагрівальними

елементами дозволяється тільки у спеціально відведених для цього місцях. Недотримання вимог до мікроклімату приміщення може не тільки різко знижувати продуктивність праці, викликати втрати робочого часу через збільшеного числа помилок у роботі, але і проводити до функціональних розладів або хронічних захворювань органів дихання, нервової системи, імунної системи.

г) При випробуваннях на механічні властивості слід проводити екранування зони випробувань. При визначенні твердості велике значення має підготовка зворотній поверхні зразка. Використання індивідуальних способів захисту: окуляри, спецодяг.

д) При дослідженнях з використанням електронної мікроскопії слід вважати на негативний вплив потужного випромінювання на клітинному рівні, що може призвести до зниження імунітету та до імунних захворювань. Тому найбільш небезпечним є використання сучасного обладнання, конструкція якого вимикає більшість негативних чинників, які шкідливі для людини.

Негативний вплив електромагнітних хвиль та випромінювання полягає у зміні внутрішніх органів клітин людини. В якості заходів забезпечення захисту необхідно: захист часу, захист відстанню, використання екрануючих пристроїв, які поділяються на механічні та електронні та використання додаткових джерел електромагнітного поля, яке знижує фокусацію робочого електромагнітного поля, або випромінювання;

е) Заходи захисту при ТО та ХТО: - для попередження негативного впливу теплового випромінювання та термічних опіків передбачено використання індивідуальних засобів ; - з огляду на великий ступінь небезпеки при використанні насичувальних газів, що може бути пов'язано з відсутністю запаху та кольору цих газів на ділянці обов'язковим є встановлення автоматичних газоаналізаторів (ЩИТ-3М); - при перевищенні небезпечної концентрації газів прилад подає попереджувальні звуковий та світловий сигнали про небезпеку; - один раз на добу обов'язкова перевірка герметичності

з'єднань трубопроводів; - обов'язковим є наявність лабораторної індивідуальних засобів захисту в період виникнення аварійних ситуацій; - улаштування місцевої витяжної вентиляції . досконале знання процесу та інструкції з експлуатації обладнання.

4.3 Заходи забезпечення виробничої санітарії та гігієни праці

ж) Для нормалізації параметрів повітряного середовища в виробничих приміщеннях передбачається використовувати кондиціонер або спліт системи.

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

Таблиця 4.1 Оптимальні фізичні параметри повітряного середовища КБ

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

В теплий період року для зниження температури повітря в робочому просторі необхідно використовувати природну вентиляцію, або загально обмінну приточно-витяжну вентиляцію згідно СНІП 2.04.05-91 «Отопление вентиляция и кондиционирование», а в холодний період – систему опалення та приточно-витяжну вентиляцію з функцією підігріву зовнішнього повітря.

3) Для забезпечення нормованого освітлення передбачено встановлення системи штучного освітлення.

Штучне освітлення використовується для роботи в темні та перехідні години доби, а також при недостатньому або відсутньому природному освітленні.

Штучне освітлення може бути загальним і комбінованим. Загальне - світильники розміщуються у верхній зоні приміщення (не нижче 2,5 м над підлогою, або з врахуванням робочих місць). Комбіноване освітлення при складається із загального то місцевого. Його доцільно застосовувати при роботах високої точності, а також якщо потрібно створити певний напрямок світла.

За функціональним призначенням штучне освітлення поділяється на:

- робоче - призначене для забезпечення виробничого процесу і є обов'язковим для всіх виробничих приміщень;
- аварійне – використовується для продовження роботи у випадках відключення основного освітлення;
- евакуаційне – для забезпечення евакуації людей при аварійному відключенні робочого освітлення;
- чергове – передбачається в неробочий час
- охоронне – використовується в нічний період;

4.4 Заходи по забезпеченню пожежної безпеки

и) Для попередження пожеж передбачається використовувати первинні засоби пожежогасіння. До них відносяться: вогнегасники, пожежний інвентар (покривала з негорючого теплоізоляційного полотна, ящики з піском, бочкою з водою, пожежні відра, совкові лопати, ломы, сокири тощо), системи автоматичного пожежогасіння. Первинні засоби пожежогасіння, в залежності від категорії приміщень, можуть розташовуватись як окремо, так і в складі

пожежних щитів. Також необхідно періодично проводити протилежні інструктажі, навчання, та тренування персоналу.

Визначення категорії приміщення в конструкторському бюро

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

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

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

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

Визначення класу пожежі:

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

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

– клас С – пожежі газів;

– клас D – пожежі металів та їх сплавів;

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

Обираємо клас Е (додатковий) – пожежі, пов'язані з горінням електроустановок.

Вибір первинних засобів пожежогасіння:

Типи вогнегасників:

- пінні (водні пінні, хімічно-пінні) – для тушіння загорань тліючих матеріалів, тушіння ГСМ в ємностях;

- вуглекислотні – для тушіння електроустановок, коштовного обладнання, використовуються для тушіння загорань в адміністративних приміщеннях;

- хладогенові – для тушіння розлитих олій, матеріалів з високою інтенсивністю горіння;

- порошкові – для тушіння локальних загорань невеликої інтенсивності.

Для категорії Е обираємо: 2 порошкові вогнегасника місткістю 5 літрів, 2 хладогенових вогнегасника місткістю 2 (3) л, та 2 вуглекислотних вогнегасника місткістю 5(8).

4.5 Заходи з безпеки у надзвичайних ситуаціях

і) Ядерний вибух має декілька вражаючих факторів, які впливають на людей та механізми. Ці фактори складаються зі світового випромінювання, ударної хвилі та електромагнітного імпульсу, окрім цього радіоактивне враження.

Електромагнітний імпульс супроводжує ядерний вибух у вигляді короткого імпульсу, який вражає електричну та електронну апаратуру.

Особливість електромагнітного імпульсу полягає в його здатності поширюватися на десятки кілометрів в оточуючому середовищі та по різних комунікаціям.

В мережах електропостачання виникають перевантаження, які викликають пробій ізоляції обмоток електродвигуна, міжфазне коротке замикання, замикання на корпус, пробій ізоляції проводів, які підключають двигун до мережі.

Ступінь ушкодження залежить від амплітуди наведеного імпульсу напруги або струму та електричної міцності обладнання. Особливо незахищеним до впливу електромагнітного імпульсу є апаратура на напівпровідниках. Електромагнітний імпульс випалює елементи електросхем, викликає коротке замикання, іонізацію діелектриків.

Електромагнітний імпульс вражає також резистори, викликає іскріння у міжконтактних з'єднаннях. Це призводить до нагріву та пошкодження опору поверхні, що буває небезпечно.

Електромагнітний імпульс ядерного вибуху вражає електротехнічні пристрої керування електродвигуном, тому необхідно вірно оцінити ймовірність пошкодження наявних схем і систем внаслідок дії електромагнітного імпульсу (ЕМІ).

Головна задача захисних пристроїв від ЕМІ – виключити доступ наведених струмів до чутливих вузлів та елементів обладнання, яке захищається.

Одним з методів захисту від дії сильного ЕМІ є використання металевих екранів. Вони віддзеркалюють електромагнітні хвилі та гасять високовольтну високочастотну енергію. Через систему заземлення струм, наведений ЕМІ, збігає в землю.

Для розширення спектру частот ЕМІ, що поглинаються, використовують різні типи екранів, виготовлених з різних елементів. Найдешевший екрануючий матеріал – холоднокатана сталь. Стінки екранів можуть виконуватися у вигляді сіток та у вигляді листів.

Також використовуються розрядники, які встановлюються в лінії електропостачання на вході та виході електродвигуна, що захищається.

Основні функції захисного розрядника – розімкнути лінію або відвести енергію для попередження пошкодження в двигуні або обладнанні, що захищається.

Розрізняють два види розрядників:

- «жорсткі» обмежувачі – прилади з пробоем (газові розрядники, діоди);
- «м'які» обмежувачі – нелінійні опори, які залежать від напруги (конденсатори).

Для електродвигунів основну небезпеку представляє імпульс, який приходить до мережі живлення.

Для захисту використовують запобіжники та вхідні пристрої, які реагують на підвищення струму або напруги. Найбільш ефективними є вказані пристрої з використанням плавких запобіжників.

При появі між провідною лінією і землею великої різниці потенціалів розрядники у ряді випадків забезпечать “стікання” великого заряду в землю без пошкодження ізоляційних елементів ліній.

Для захисту двигунів в цьому випадку використовують: плавкі вставки з автоматичним відновленням, замикаючі котушки, розрядники, дренажні котушки, двопровідну лінію, екран кабелю та пристрій вимикання двигунів.

Також для захисту кабелів, які живлять електродвигуни, використовують екранування і прокладання кабелів в металевих трубах. При цьому використовуються кабелі з високим коефіцієнтом екранування і високою електричною та механічною міцністю, тому що прокладання в трубах викликане великими труднощами.

При виборі захисних пристроїв слід враховувати, що ЕМІ характеризується дуже великим об'ємом, тобто одночасним спрацюванням захисних засобів у всіх ланцюгах, які будуть знаходитись в зоні джерела ЕМІ. Тому схеми захисту, що використовуються, повинні автоматично відновлювати працездатність ланцюгів.

Стійкість електродвигунів до дії ЕМІ у великій мірі залежить від правильної експлуатації ліній та правильного контролю справності засобів захисту. До важливих вимог експлуатації відносять періодичну і своєчасну перевірку електричної міцності ізоляції ліній до вхідних ланцюгів електрорадіотехнічної апаратури, своєчасне виявлення та усунення

вимикаючих заземлень проводки, контроль працездатності розрядників, плавких вставок і т. д.

Вказані засоби захисту повинні застосовуватися на усіх видах електротехнічної апаратури з урахуванням характеру вражаючої дії електромагнітних випромінювань ядерного вибуху для забезпечення надійності роботи підприємств в умовах ракетно-ядерної війни.

Усі розглянуті заходи в розділі “Охорона праці” сприяють покращенню умов праці та безпеки, зменшують шкідливий вплив виробничих факторів на людину, а тому призводять до покращення якості виконаних робіт.

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

5.1 Тенденції розвитку світового ринку технологій

Ринок технологій є найважливішим фактором міжнародної економіки.

Потреба у турбінних лопатках виникла ще у минулому столітті, у зв'язку з розробкою газотурбінних двигунів для реактивних літаків. Робочі лопатки ГТД є невід'ємною частиною сучасного виробництва, незважаючи на всю важкість виготовлення даних деталей. Тому одним із актуальних напрямків розвитку авіаційного машинобудування є збільшення температури газів перед турбіною. Деталі авіаційних ГТД працюють при високих та низьких температурах і вологості, при значній запиленості і «засоленості» навколишнього середовища. Від надійності даних елементів двигуна у найбільшому ступені залежить надійність і ресурс газотурбінних двигунів в цілому, та, відповідно, безпека самих польотів.

Дану проблему надійності газових турбін можна вирішити шляхом розробки та впровадження якісно нових технологій, наприклад:

- високоградієнтне монокристалічне лиття заготовок;
- глибинного шліфування поверхонь замка та бандажних полок;
- нанесення захисних покриттів на внутрішні та зовнішні поверхні лопаток.

У наш час на Україні та за кордоном при виробництві робочих лопаток ГТД широке застосування отримав метод спрямованої кристалізації, який дозволяє значно підвищити якість жароміцних сплавів, які використовуються, усуваючи поперечні границі зерен. Подальшим розвитком цього методу стало одержання лопаток зі сплаву ЖС32-ВІ з монокристалічною структурою. Проте даний сплав є стійкий до температур експлуатації, але є не стійким до високотемпературної корозії. Що робить нанесення захисних покриттів на лопатки обов'язковою операцією.

Виробництво даних лопаток проводиться у США компанія Chromalloy Gas Turbine Corp; ОАО «Завод турбінних лопаток» Росія; ПАО «ОДК-Сатурн» Росія.

Найбільшими виробниками таких лопаток на Україні є ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», м. Миколаїв, їх також виготовляє ПАО «Криворізьський турбінний завод «Констар», м. Кривий Ріг. Виробництво турбінних лопаток для авіабудування в Україні виробляє АО «МОТОР СІЧ», м. Запоріжжя та ГП «Запорізьке машинобудівне конструкторське бюро «Прогрес» імені академіка А. Г. Івченко», м. Запоріжжя.

5.2 Техніко-економічні розрахунки

5.2.1 Характеристика продукції

Метою цього розділу є обґрунтування доцільності використання сплаву ЖС32-ВІ після гартування та охолодження аргоном, замість гартування та наступним подвійним старінням. У таблиці 5.1 вказано техніко-економічні показники виробів.

Таблиця 5.1- Техніко-економічні показники виробів.

Найменування виробу	Базовий виріб	Новий виріб
Лопатка ГТД	ЖС32-ВІ	ЖС32-ВІ
Технологія зміцнення	Гартування+ подвійне старіння	Гартування+ охолодження у аргоні
Програма випуску, шт	100	100

Вартість сировини та основних матеріалів розраховується на основі технічно обґрунтованих норм використання на виробництво одиниці виробу, цін відповідних видів матеріальних ресурсів. При цьому враховується

транспортно-заготівельні витрати. Сума витрат на сировину та матеріали зменшується на величину зворотних відходів, які створюються у процесі виробництва. Вартість сировини та основних матеріалів наведена у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2- вартість основних матеріалів для виготовлення лопатки ГТД зі сплаву ЖС32-ВІ

Найменування	Норма використання	Ціна	Вартість, грн
Сплав ЖС32-ВІ	1 кг	1500грн/кг	1500
Аргон	54л	20грн/л	1080
Разом	-	-	2580

Вартість купівельних комплектуючих виробів розраховується на основі норм використання й цін, з урахуванням транспортно-заготівельних витрат.

Основна заробітна плата основних робітників на одиницю виробу розраховується на основі трудомісткості виготовлення та часових тарифних ставок. У таблиці 5.3 наведено дані щодо обладнання та розрахунки амортизації.

Таблиця 5.3- Основне обладнання та амортизація.

Найменування	Балансова вартість	Норм. строк експл.	Річна норма аморти.	Щорічна норма аморти.	Місячна сума аморти.
FHV-60GHS	100000	15	6,6%	6600	550
Паравауумний насос	25000	20	5%	1250	104

Розрахунок основної заробітної плати за одиницю продукції наведених у таблиці 5.4.

Таблиця 5.4- Заробітна плата на одиницю продукції (розцінка) за новою технологією

Найменування операції	Норма часу, год	Розряд робіт	Часова тарифна ставка, грн	Заробітна плата на одиницю продукції, грн
Нагрівання до 1000°C	2	V	55	110
I ступінь витримки	2	V	55	110
II ступінь витримки	1,5	V	55	82,5
Охолодження з аргоном	0,13	V	55	20
Разом				322,5

Додаткова заробітна плата робітників виплачується за кількість та якість виконаної роботи. Вона вміщує надбавки і доплати, премії за виробничі результати, оплату чергових та додаткових відпусток та інше. Додаткова заробітна плата складає 40% від основної, та розраховується за формулою:

$$ЗД = 30 \cdot \frac{K_d}{100}, \text{ грн}$$

де K_d - відсоток додаткової заробітної плати.

$$ЗД = 322,5 \cdot \frac{40}{100} = 129 \text{ грн}$$

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

$$BC = (3O + 3Д + ПП) \cdot \frac{K_{BC}}{100}, \text{грн}$$

де ПП-премії з прибутку, грн

$$BC = (322,5 + 129 + 50) \cdot \frac{22}{100} = 110 \text{ грн}$$

Загальновиробничі витрати вміщують витрати на утримання та експлуатацію обладнання, цехові витрати і послуги виробничого характеру. Витрати на утримання та експлуатацію обладнання вміщують витрати на технічне обслуговування машин і механізмів, витрати на поточний ремонт обладнання, цехового транспорту та інструментів, знос малоцінних і швидкозношуваних приладів, заробітну плату допоміжного персоналу та інші. Цехові витрати вміщують витрати, пов'язані з поточним ремонтом та амортизацією будівель цеху, заробітну плату керівників та спеціалістів цеху, витрати на охорону праці та техніку безпеки в цеху та інші.

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

$$ЗВВ = 3O \cdot \frac{\alpha}{100}, \text{грн}$$

де α - % загально виробничих витрат.

$$ЗВВ = 322,5 \cdot \frac{400}{100} = 1290 \text{ грн}$$

Вищенаведені витрати складають виробничу собівартість. Адміністративні витрати вміщують витрати, які пов'язані з утриманням адміністративно- управлінського персоналу підприємства, а також утриманням та експлуатацією основних засобів загального виробничого призначення, охорону праці та техніку безпеки персоналу та інше. Адміністративні витрати складають в середньому 200% від основної заробітної плати основних робітників та розраховується як:

$$AB = 30 \cdot \frac{\beta}{100}, \text{грн}$$

де β -% адміністративних витрат.

$$AB = 322,5 \cdot \frac{200}{100} = 1003, \text{грн}$$

Витрати на збут складаються з витрат, пов'язаних з реалізацією продукції і вміщують витрати на тару та тарні матеріали, транспортування готової продукції, рекламу, витрати на маркетингові дослідження та інші.

Витрати на збут складають 2% від виробничої собівартості і розраховуються за формулою:

$$BЗ = C_v \cdot \frac{\gamma}{100}, \text{грн}$$

де C_v - собівартість виробнича, грн;

γ - % витрат на збут.

$$BЗ = 2854,5 \cdot \frac{2}{100} = 57 \text{грн}$$

Прибуток складає 30% від повної собівартості і розраховується за формулою:

$$П = C \cdot \frac{P}{100}, \text{грн}$$

де P - рентабельність виробу

$$П = 5491 \cdot \frac{30}{100} = 1647,3 \text{грн}$$

Податок на додану вартість згідно законодавства становить 20% від оптової ціни і розраховується:

$$ПДВ = Ц \cdot \frac{H_{ПДВ}}{100}, \text{грн}$$

де $H_{ПДВ}$ – норматив податку на додану вартість, %

$$ПДВ = 7138,3 \cdot \frac{20}{100} = 1427,6 \text{ грн}$$

Ціна продажу виробу розраховується за формулою:

$$Ц_{пр} = Ц + ПДВ, \text{грн}$$

$$Ц_{пр} = 7138,3 + 1427,6 = 8565,9 \text{грн}$$

Калькуляція собівартості і ціни продукції наведена у таблиці 5.5

Таблиця 5.5- Калькуляція собівартості проведення т/о та ціна продукції

Статті витрат	Сума виготовлення за базовою т/о	Сума виготовлення за новою т/о
Сировина і основні матеріали	1500	2580
Купівельні вироби	-	-
Основна заробітна плата осн. робітників	1622,5	322,5
Додаткова заробітна плата осн. робітників	649	129
Відрахування на соціальні заходи з заробітної плати осн. робітників	510,7	110
Щорічна норма амортиз.	7850	7850
Загальновиробничі витрати	6490	1290
Собівартість вир-ва	12517,2	2854
Адміністративні вит-ти	3245	1003
Витрати на збут	250,3	57
Собівартість повна	14267,5	5491
Прибуток	4280,2	1647,3
Ціна оптова	18547,7	7138,3
Податок на додану вартість	3709,5	1427,6
Ціна продажу	22258	8565,9

Економічна ефективність інноваційного проекту розраховується за показником економії експлуатаційних витрат

$$E = (C_6 \cdot K - C_n) \cdot N$$

де C_6 - собівартість базового виробу;

C_n - собівартість нового виробу;

K - коефіцієнт експлуатаційного ресурсу (1,5)

$$E = (14267,5 \cdot 1,5 - 5491) \cdot 100 = 1591025 \text{ грн}$$

У ході економічних розрахунків було визначено собівартість виготовлення лопатки ГТД з термічною обробкою гартування та охолодження з аргоном , яка складає 5491грн, прибуток у розмірі 1647,3грн,має оптову ціну 7138,3грн, та податок на додану вартість та ціну продажу має таку 1427,6грн та 8565,9грн.

Та була розрахована економічна ефективність на 100 виготовлених одиниць продукції, яка становить 1591025гривень. Впровадження цього методу дозволить зменшити витрати на енергетичні ресурси, витрати на заробітну плату та суттєво заощадити час виробництва та кошти.

ВИСНОВКИ

Основною тенденцією авіаційного машинобудування є безперервне підвищення температури газів перед турбіною, що передбачає підвищення вимог до конструкції, надійності та ресурсу лопаток, дисків, валів та інших деталей, які відчувають високі термомеханічні циклічно змінні навантаження. Тому темою дослідження дипломної роботи є дослідження впливу легування, та відповідно, самих легувальних елементів та структури на властивості жароміцних нікелевих сплавів для деталей ГТД. Як виріб було розглянуто лопатку ГТД, виготовлену зі сплаву ЖС6У-ВІ та ЖС32-ВІ.

Жароміцні сплави є складно-легованими сплавами, тому наявність у жароміцних сталях та сплавах високого вмісту легуючих елементів спричиняє виділення вторинних зміцнювальних фаз як при термічній обробці під час виготовлення деталей, так і в процесі їх експлуатації. Оскільки певна дисперсність, форма, об'ємна доля та розміщення частинок цих фаз може забезпечити максимальну довготривалу міцність матеріалів, а також спричинити їх підвищену крихкість. Було встановлено, що Cr підвищує окалинотійкість та крім того підвищує енергію зв'язку атомів в твердому розчині системи Ni-Cr-Fe. Введення в ніхромові сплави 2,5-3,0% Ti сприяє утворенню високодисперсних інтерметалідних фаз, які підвищують здатність сплаву до опору деформації та підвищенню довготривалої міцності. Ще більш помітному зростанню жароміцності сплавів сприяє збільшення вмісту Ti або Al (або їх суми) разом з бором та тугоплавкими елементами (W, Mo, Nb). Молібден, вольфрам та хром, які вводять до нікелю роздільно, підвищують твердість, жароміцність, електричний опір та параметр ґратки твердого розчину. Гафній є таким елементом, при введенні якого в жароміцні нікелеві сплави призводить до одночасного підвищення як міцності так і пластичності. Також гафній позитивно впливає на морфологію карбідів, які розміщуються по границях зерен, тобто гафній помітно покращує стан границь. Ніобій

підвищує жароміцність сплавів та призводить до зниження схильності сплавів до перебудови, що покращує структурну стабільність та робочий ресурс. Також ніобій зменшує схильність до утворення зональної ліквіації. Елементи домішки. Вміст кремнію в сплавах 0,05-1,0%, цей елемент підвищує стійкість сплаву до окислення, але при цьому помітно знижує довготривалу міцність та пластичність.

Також було розглянуто структуру сплавів, яка також впливає на властивості виробів. У сплавах ЖС32-ВІ та ЖС6У-ВІ, з яких і виготовляються ливарні лопатки ГДТ присутні такі фази:- γ -твердий розчин+ зміцнювальна інтерметалідна γ' -фаза (для сплаву ЖС32-ВІ-це Ni_3Al , а для сплаву ЖС6У-ВІ це Ni_3AlTi)+ карбідні фази на границях зерен та евтектична γ - γ' -фаза. Така структура у сплавах отримується методом спрямованої кристалізації, та для сплаву ЖС6У-ВІ має рівноосьову структуру, а для сплаву ЖС32-ВІ монокристалічну структуру, виготовляються на установці типу УВНК-8П у вакуумі.

Процес формування структури ливарних сплавів починається при кристалізації відливків лопатки і продовжується при термічних нагріваннях, які пов'язані з термічною обробкою відливок, технологічними операціями пайки і нанесення жароміцних захисних покриттів.

Процеси коагуляції знаходяться в прямій залежності від величини параметра невідповідності Δa : чим менше Δa , тим менша надлишкова поверхнева енергія, і тим повільніше йдуть процеси коагуляції γ' -фази, отже, тим стабільніша структура сплаву і, відповідно, протягом більшого часу він здатен витримувати навантаження. Також відомо, що більш дрібні виділення (відповідно, при такому ж самому об'ємному вмісті утвореної γ' -фази їх кількість буде більша та буде більшим зміцнювальний ефект) округленої форми, утворюються при мінімальному параметрі невідповідності Δa .

Також одним з основних факторів впливу на механічні властивості сплаву є термічна обробка:

Нікелеві жароміцні сплави піддаються термічній обробці трьох видів: 1) обробка на твердий розчин, з метою розчинити виділення γ' -фази, щоб потім викликати її повторне виділення у вигляді більш тонких та рівномірно розподілених частин та тим самим збільшити міцність металу; 2) термічна обробка покриття з метою скріпити зв'язок покриття зі сплавом-підкладкою; 3) відпал-старіння з метою отримати додаткові виділення γ' -фази або карбідні та боридні фази по границях зерен.

Так для сплаву ЖС6У-ВІ це є гомогенізація з наступним старінням, а для сплаву ЖС32-ВІ проводиться гартування та подальше охолодження у аргоні, яке замінює операцію старіння. також старіння цих плавів може відбуватись при нанесенні на них захисних покриттів та при експлуатації виробів.

До таких технологій у виробництві лопаток турбіни можуть бути віднесені виготовлення лопаток на основі аналітичних систем монокристалічного лиття, обробки робочих поверхонь хвостовика та бандажних полок методом глибинного шліфування, захист проточних та внутрішніх поверхонь охолоджувальних каналів лопаток від газовою корозії, окислення та впливу підвищених робочих температур за рахунок використання сучасних методів нанесення покриттів.

Вході роботи було розглянуто додаткову обробку сплавів метод гарячого ізостатичного пресування. Встановлено, що ГІП забезпечує отримання більш якісних відливок за рахунок зниження усадкової мікропористості, а сумісно із наступною стандартною термічною обробкою і покращення однорідності матеріалу.

Загалом можна зробити висновок, що обидва сплави для виготовлення лопаток ГТД задовільняють вимогам. Проте доцільним є використання сплаву ЖС6У-ВІ для більш низьких робочих температур. Цей сплав працює при температурі 1050°C протягом 10000годин. А сплав ЖС32-ВІ використовувати при робочих температурах 1150°C, тому що він є більш дорожчим за легуванням та самим процесом виготовлення. Обидва сплави підлягають контролю на хімічний склад, структуру та макроструктуру, для них проводиться

механічна обробка, та нанесення захисних покриттів для забезпечення стійкості для високотемпературної газової корозії. Також для обох сплавів можна проводити зміцнювальну обробку методом гарячого ізостатичного пресуванням.

Було проведено економічні розрахунки щодо вартості проведення термічної обробки сплаву ЖС32-ВІ за двома схемами: стандартною-гартування з двома стадіями витримки та проведення старіння та гартування з двома стадіями витримки і охолодженням у аргоні замість старіння. Завершивши розрахунки отримали суттєву економію при використанні другого методу обробки та економічний ефект який становить 1591025гривень.

Розглянули основні заходи охорони праці при дослідженні структури та хімічного складу, та проаналізували основні потенційні небезпеки , такі як: незадовільна підготовка робочого місця, негативний вплив випромінювання, використання застарілого обладнання та порушення правил проведення досліджень, можливість отруєння різноманітними газами при проведенні термічної обробки, незадовільний рівень освітлення та інші.

Розробили заходи по забезпеченню безпеки: забезпечення санітарних норм, безпека на робочому місці, заходи пожежної безпеки та правила поведінки у надзвичайних ситуаціях.

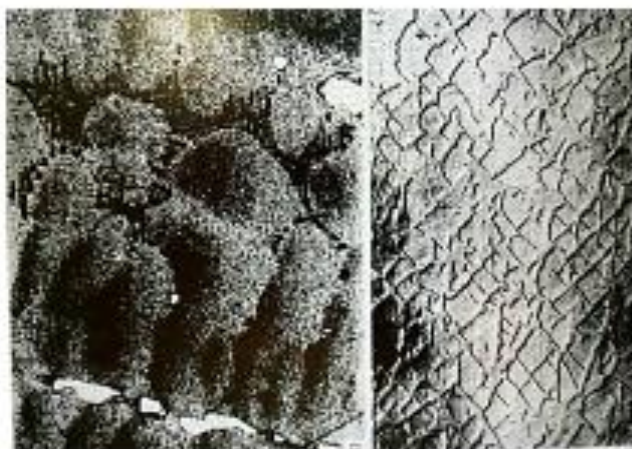
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Жаромічний сплав на основі нікелю для лиття робочих лопаток газотурбінних установок: пат. 2678352 Росія : С22С19/056, С22С19/05; заявл.15.05.2018; опубл.11.02.2019.
2. Спосіб підвищення якості та експлуатаційної надійності лопаток турбіни газотурбінних двигунів із жароміцних нікелевих сплавів. пат. 2565328 Росія: F01D5/28, C23F17, C23C10/06; заявл.22.03.2013-22Т09, опубл. 22.03.2018.
3. Сімс Ч., Хагель В. Жароміцні сплави: довідник. Москва: Металургія, 1976. 568 с.
4. Кривонос Г. А., Зверев А.Д., Максимов Л.Ю. Процеси і обладнання для газотурбінної обробки: навч. посібн. Москва: Металургія, 1994. 385с.
5. Лєсніков В.П., Кузнєцов В.П. Технологія відновного ремонту турбінних лопаток ГТД. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2004. №7. С. 236-239.
6. Технологічне забезпечення експлуатаційних характеристик деталей ГТД: посібник/ Богуслаєв В.А. та ін. Запоріжжя: ОАО «Мотор Січ», 2007. 496с.
7. Кишкін С.Т., Строганов, Г.Б., Логунов А.В. Ливарні жароміцні сплави на нікелевій основі: довідник. Москва: Машинобудування, 1997.-116с.
8. Монокристали нікелевих жароміцних сплавів/ Шалін Р.Е., Светлов І.Л., Качанов Е.Б., Гаврилін О.С. Москва: Машинобудування, 1997. 336с.
9. Крилов В.В, Єлісєєв Ю.С., Зудін К.І. Виробництво лопаток газотурбінних двигунів: навч. пос. Москва: Машинобудування, 2002. 376с.
10. Скибін В, Солонін В, Дульєв А. Перспективи розвитку газотурбінних двигунів. *Газотурбінні технології*. 2000. №4. С 20-29.

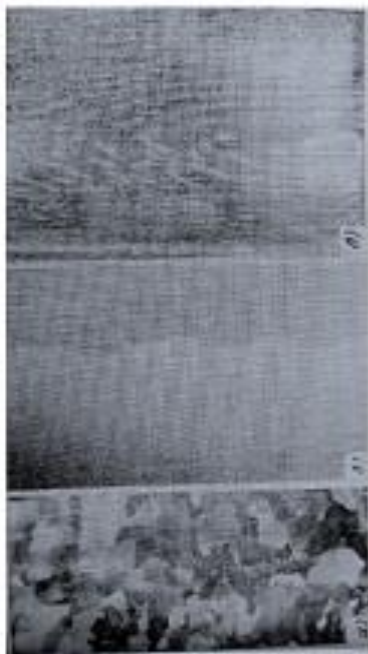
11. Падалко А.Г. Практика гарячого ізостатичного пресування неорганічних матеріалів: навч. пос. Москва: ІЦК Академіка, 2007. 230с.
12. Гецов Л.Б. Материалы и прочность газовых турбин: довідник. Москва, 1996. 231 с.

ДОДАТОК А

Мікроструктура жароміцних сплавів на Ні основі



Мікроструктура при
збільшенні $\times 200$ та $\times 1000$

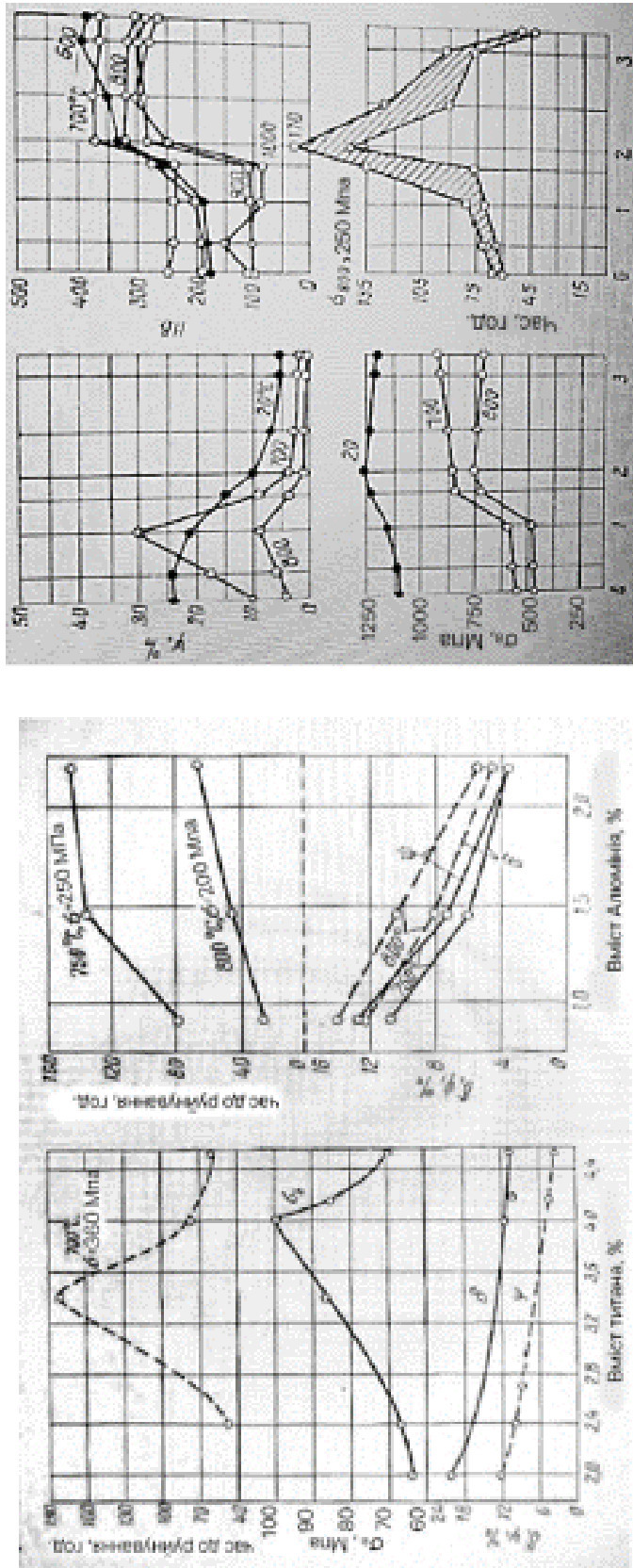


а - рівновісна, б - стовпчаста, в - монокристалічна

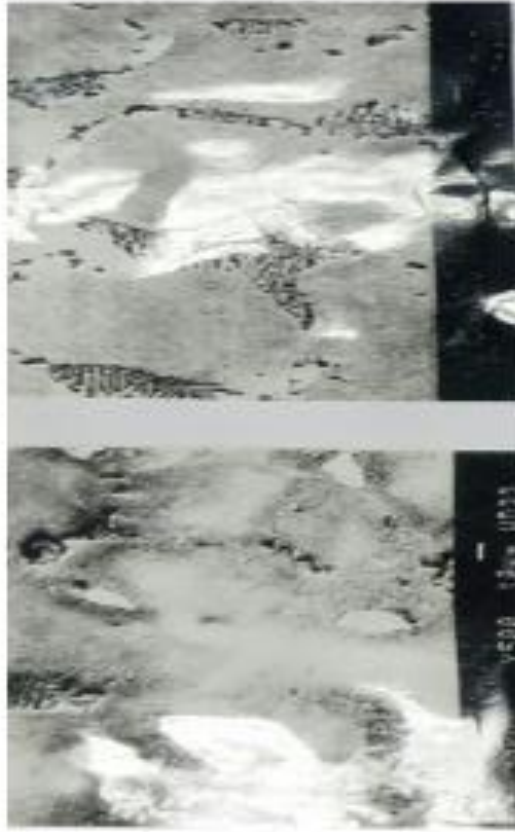


а - немодифікована, б - модифікована

Вплив вмісту Ті, Al та Nb на показник довготривалої міцності і механічні властивості



Отримана структура сплавів після проведення термічної обробки



Структура сплаву ЖС6У-ВІ після т/о



Структура сплаву ЖС32-ВІ після т/о

Методи отримання спрямованої і монокристалічної структур

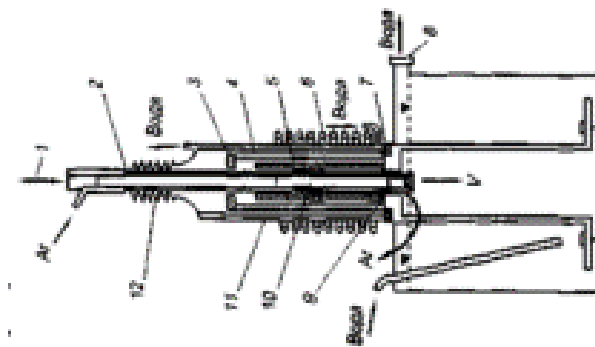


Схема установки 3
водяним охолодженням

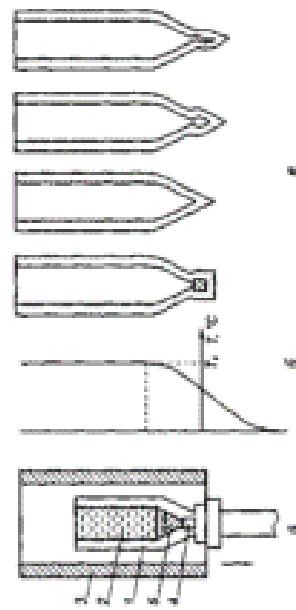


Схема отримання моновідливков 3
затравкою

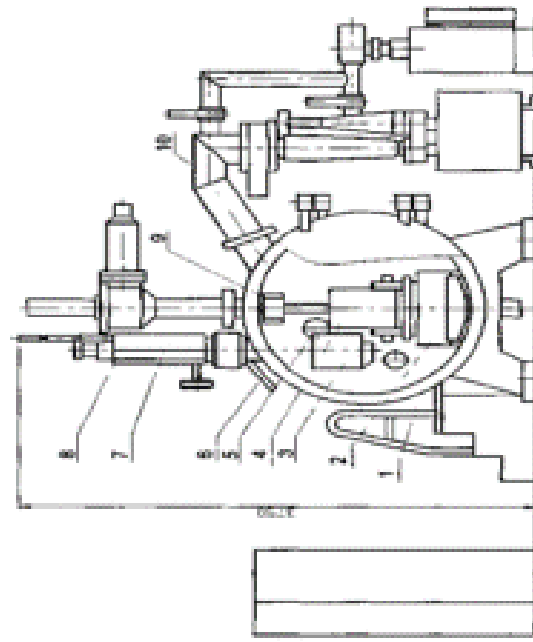
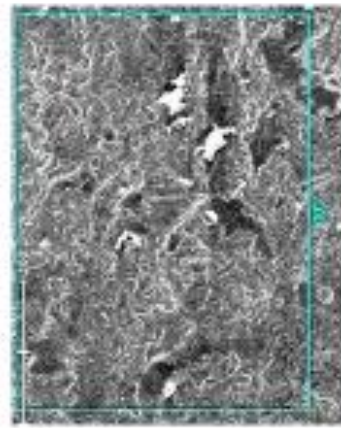


Схема установки УВНК-8П

Хімічний склад захисних покриттів, їх тип та призначення

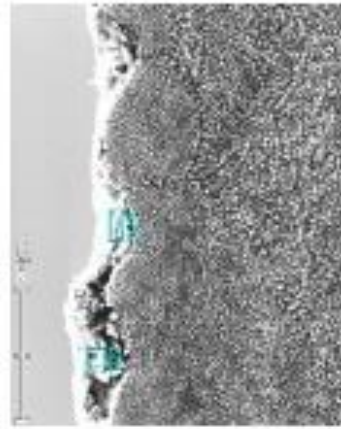
Тип покриття	Призначення	Марка газоду покриття (марка покриття)	Система покриття
Конденсатні покриття	Захист від газової корозії в області температур 1050-1100°C	СДП-3	Ni-Cr-Al-Y
Алюмінієві дифузійні покриття	Захист від газової корозії в області температур 950-1000°C	ВСДП-14(ВДП)	Ni-Al-Cr-Si-Y
Легувальні алюмінієві дифузійні покриття	Захист від газової корозії в області температур 1000-1100°C	СДПД-ВСДП14(ВДП)	Ni-Al-Cr-Si-Y
Конденсатно-дифузійні покриття	Захист ЖС від газової корозії в області температур 1100-1200°C. З'єднуєної шару ТЗП	СДПД-3-ВСДП(ВДП)	(MoCr)(Ni-Cr-Al-Y)(Ni-Cr-Al-Ta)-W-C-Y+(Ni-Al-Cr-Y)
Іонне покриття плавких конструкційних сплавів	Захист від соленої корозії при температурах 5700°C	ВСДП-16	Fe-Co-Al-Si-Y

Проведення операції ГП для зменшення пористості



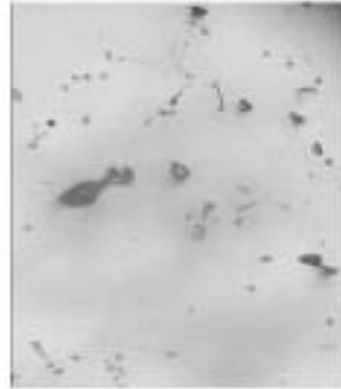
а

а-сплав ЖС32-ВІ- $\times 430$, б-сплав ЖС6У-ВІ- $\times 2000$



б

Рисунок 1- Результати РМСА поверхні лопаток після ГП



а

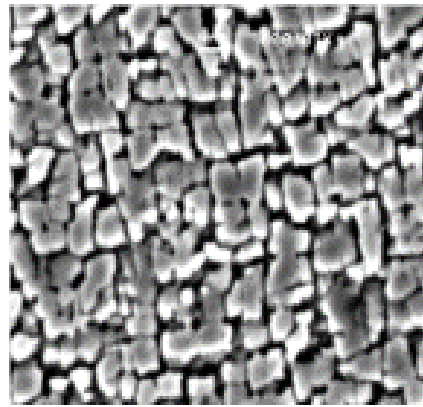


б

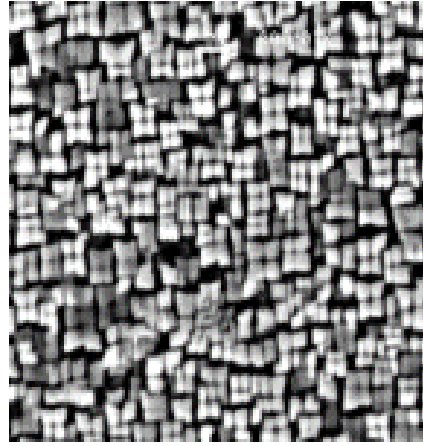
а-вигляд до проведення ГПП, б- вигляд після проведення ГПП, $\times 200$

Рисунок 2- Мікропористість у матеріалі робочих лопаток

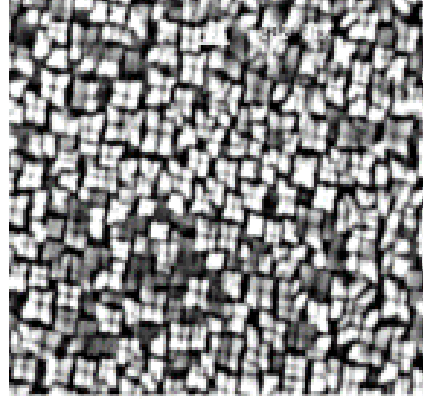
Вплив проведення операції ГП на лікування пор та досліджування γ' -фази після ГП



а



б



в

а- до проведення операції ГП, б- після проведення операції ГП, в- після ГП та т/о $\times 1000$.

Таблиця - Механічні та жароміцні властивості сплавів ЖС6У-ВІ та ЖС32-ВІ до та після ГП (варіанти «0», «1», «2»).

Стан матеріалу	Маркування сплаву	Механічні властивості при t=20°C			Довготривала міцність			
		σ _в , МПа	δ, %	ψ, %	T _{роз} , °C	σ _{МП} , а	σ _в , год	τ _в , год
виробні (без ГП) до т/о	ЖС6У-ВІ	975,0	4,4	4,5	975	200	200	90
	ЖС32-ВІ	1192,0	7,6	10,9	1000	280	280	52
		1125,0	8,4	11,3				53,5
виробні (без ГП) після т/о	ЖС6У-ВІ	1043,0	4,8	6,3	975	200		79
		1046,0	4,0	67,				119
після ГП	ЖС32-ВІ	1156,0	6,0	8,2	1000	280	280	86,5
		1126,0	4,4	8,2				61,5
	ЖС6У-ВІ	1005,0	4,4	8,6	975	200	200	76
Після ГП+т/о		1000,0	5,6	8,6				90,5
	ЖС32-ВІ	999,0	9,6	15,8	1000	280	280	55
		1043,0	8,8	15,0				57,5
Після ГП+т/о	ЖС6У-ВІ	979,0	8,4	15,6	975	200	200	71,5
		974,0	9,2	12,2				63
	ЖС32-ВІ	1248,0	8,0	11,7	1000	280	280	102,
		1103,0	14,8	14,6				5
								91