

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Сумський державний університет
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій
Кафедра прикладного матеріалознавства і ТКМ

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Оксана ГАПОНОВА

« ___ » _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня магістр

зі спеціальності _____ 132 Матеріалознавство _____

освітньо-професійної програми _____ «Прикладне матеріалознавство»

на тему: «Дослідження особливостей формування структури жароміцних нікелевих сплавів для лопаток газотурбінного двигуна».

Здобувача групи _____ МТ.м-31 _____ Крижанського Марата Хамідовича

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ Марат КРИЖАНСЬКИЙ

Керівник завідувач кафедри ПМ і ТКМ, _____
д.т.н., проф. Оксана ГАПОНОВА _____

Нормоконтроль доцент кафедри ПМ і ТКМ
к.т.н., доц. Андрій ДЕГУЛА _____

Сумський державний університет
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій
Кафедра «Прикладне матеріалознавство та технології конструкційних матеріалів»
Спеціальність 132 «Матеріалознавство»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ О.П. Гапонова

«__» _____ 2024 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Крижанський Марат Хамідович

1. Тема проекту (роботи) «Дослідження особливостей формування структури жароміцних нікелевих сплавів для лопаток газотурбінного двигуна», затверджена наказом по університету від “22” жовтня 2024 р. № 1085-VI.
2. Термін здавання студентом закінченого проекту (роботи) 15.12.2024 р. _____
3. Вихідні дані до проекту (роботи) склад жароміцного нікелевого сплаву, його фізичні та механічні властивості _____
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити) В пояснювальній записці належить опрацювати наступні питання:
 - літературний огляд, аналіз проблеми на сьогоднішній день;
 - розробити методику проведення експерименту, вибір матеріалів та обладнання;
 - провести експериментальні дослідження: виготовлення зразків, визначення мікротвердості, мікроструктурний аналіз;
 - в економічній частині розкрити питання теоретичних відомостей та методики розрахунку витрат, провести розрахунки;

- в п'ятому розділі розкрити питання охорони праці, охорони довкілля та техніки безпеки;

- зробити загальні висновки по роботі.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Результати роботи та літературний огляд слід доповнювати рисунками і таблицями. Обов'язковими є таблиці з фізико-механічними властивостями матеріалів, макро- і мікроструктури, зображення основного і допоміжного обладнання, яке використовували під час проведення експериментів

6. Консультанти по проекту (роботі), із значенням розділів проекту, що стосуються їх

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	Говорун Т.П.	10.11.2024 р.	
Економічна частина	Берладір Х.В.	16.11.2024 р.	

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз літературних джерел та вибір основних напрямів дослідження	10.11.2024 р.	виконано
2	Загальна методика та основні методи дослідження	20.11.2024 р.	виконано
3	Експериментальні дослідження та загальні результати	10.12.2024 р.	виконано
4	Економічна частина	15.12.2024 р.	виконано
5	Охорона праці, довкілля, та техніка безпеки	15.12.2024 р.	виконано

7. Дата видачі завдання 01.11.2024 р.

Студент М.Х. Крижанський

Керівник проекту О.П. Гапонова

АНОТАЦІЯ

Крижанський Марат Хамідович. Дослідження особливостей формування структури жароміцних нікелевих сплавів для лопаток газотурбінного двигуна.

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня магістр за спеціальністю 132 – Матеріалознавство. – Сумський державний університет, Суми, 2024 р.

Кваліфікаційна робота присвячена питанням особливостей формування структури жароміцних нікелевих сплавів для лопаток газотурбінного двигуна. Проаналізовано вплив структури та фазового складу на властивості жароміцних сплавів.

Проведено аналіз мікроструктури сплаву ЖС6У для лопаток газотурбінного двигуна. Розроблена методика проведення операцій термічної обробки та нанесення зміцнюючого покриття для жароміцного нікелевого сплаву. Досліджені фізико-механічні властивості жароміцного нікелевого сплаву.

Ключові слова: НІКЕЛІВІ СПЛАВИ, ЖАРОМІЦНІСТЬ, ЛОПАТКА, СТРУКТУРА, ФАЗОВИЙ СКЛАД, ЛЕГУВАЛЬНІ ЕЛЕМЕНТИ, ТЕРМІЧНА ОБРОБКА.

ABSTRACT

Kryzhanskyi Marat Khamidovych. Investigation of the structure formation of heat resistant nickel alloys for gas turbine engine blades.

Qualifying paper for obtaining the qualification of master's degree in the specialty 132 – Materials Science. – Sumy State University, Sumy, 2024.

The qualification work is devoted to the issues of the features of the formation of the structure of heat-resistant nickel alloys for gas turbine engine blades. The influence of the structure and phase composition on the properties of heat-resistant alloys is analyzed.

An analysis of the microstructure of ZhS6U alloy for gas turbine engine blades was carried out. A method of heat treatment operations and application of a strengthening coating for a heat-resistant nickel alloy has been developed. The physical and mechanical properties of heat-resistant nickel alloy were studied.

Key words: NICKEL ALLOYS, FERTILITY, BLADES, STRUCTURE, PHASE COMPOSITION, ALLOYING ELEMENTS, HEAT TREATMENT.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ЖНС – жароміцні нікелеві сплави;

ГТД – газотурбінний двигун;

КІБ – катодно-іонне бомбардування;

HV – твердість за Віккерсом;

τ , год – час;

H_μ, ГПа – мікротвердість;

ТЕО – техніко-економічне обґрунтування.

σ_b , МПа – поріг міцності;

σ_t , МПа – поріг текучості;

ψ , % – відносне подовження;

δ , % – відносне звуження.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра включає в себе 78 сторінок, у тому числі: 16 таблиць, 22 рисунків, бібліографії із 23 літературних джерел.

Мета роботи – аналіз структури жароміцного нікелевого сплаву для лопаток газотурбінного двигуна, дослідження його фізико-механічних властивостей на різних етапах термічної та поверхневої обробки.

Завдання дослідження. Провести аналіз жароміцних нікелевих сплавів для лопаток газотурбінного двигуна; дослідити вплив режимів термічної обробки та поверхневої обробки на структуроутворення жароміцних нікелевих сплавів для лопаток газотурбінного двигуна; на основі отриманих результатів зробити висновки та розробити рекомендації для впровадження у виробництво.

Об'єкт дослідження – процеси структуроутворення жароміцного нікелевого сплаву ЖС6У для лопаток газотурбінного двигуна.

Предмет дослідження – структура та фізико-механічні властивості жароміцного нікелевого сплаву ЖС6У для лопаток газотурбінного двигуна.

Методи досліджень – металографічний аналіз, стандартні методи визначення фізико-механічних властивостей, фрактографічний аналіз.

Наукова новизна: встановлено вплив режимів термічної обробки та поверхневої обробки на формування структури жароміцних нікелевих сплавів для лопаток газотурбінного двигуна та на його фізико-механічні властивості.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	6
Реферат.....	7
ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1.....	12
ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД.....	12
1.1 Умови роботи лопаток газотурбінних двигунів.....	12
1.2 Характеристика жароміцних нікелевих сплавів.....	16
1.2.1 Склад і властивості чистого нікелю.....	16
1.2.2 Класифікація нікелевих сплавів.....	18
1.3 Аналіз жароміцних сплавів на нікелевій основі для виготовлення лопаток ГТД.....	21
1.4 Вплив легуючих елементів на структуру і властивості жароміцного нікелевого сплаву ЖС6У.....	25
1.5 Вплив термічної обробки на структуру нікелевих жароміцних сплавів.....	29
1.6 Методи поверхневого зміцнення для жароміцних сплавів.....	31
Висновки до розділу 1.....	34
РОЗДІЛ 2.....	35
МЕТОДИ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ, МАТЕРІАЛИ ТА ОБЛАДНАННЯ.....	35
2.1 Хімічний склад та властивості сплаву ЖС6У.....	35
2.2 Методи дослідження мікроструктури сплаву.....	36
2.2.1 Металографічний аналіз.....	36
2.2.2 Визначення неметалевих включень.....	39
2.2.3 Методи дослідження твердості.....	40
2.2.4 Випробування на мікротвердість.....	41
2.2.5 Електронна мікроскопія.....	42
2.3 Установка для нанесення захисних покриттів.....	44

2.4 Випробування втомної міцності.....	45
Висновки до розділу 2.....	47
РОЗДІЛ 3.....	48
АНАЛІЗ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	48
3.1 Аналіз впливу структури та фазового складу на властивості жароміцних сплавів.....	48
3.2 Проведення термічної обробки та іонно-плазмового азотування промислового жароміцного сплаву.....	49
3.3 Дослідження мікроструктури.....	51
3.4 Дослідження впливу іонного азотування на мікроструктуру сплаву.....	55
3.5 Результати випробувань втомної міцності сплаву ЖС6У.....	58
Висновки до розділу 3.....	60
ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	63
4.1 Загальні теоретичні відомості.....	63
4.2 Методика розрахунку витрат.....	64
Висновки до розділу 4.....	68
ОХОРОНА ПРАЦІ, ДОВКІЛЛЯ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ.....	69
5.1 Правила зберігання отруйних речовин.....	69
5.2 Заходи проти отруєння.....	69
5.3 Протипожежні заходи.....	70
5.4 Заходи з охорони довкілля.....	71
Висновки до розділу 5.....	72
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	73
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	75

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 [1]. Тому темою даної дипломної роботи є дослідження особливостей формування структури жароміцних нікелевих сплавів для виготовлення деталей ГТД

Жароміцні сплави на нікелевій основі знайшли широке застосування під час виготовлення газотурбінних двигунів, головним чином, у вигляді робочих і соплових лопаток і меншою мірою як турбінні диски та кільця. В результаті складного легування у сплавів цієї групи досягнуто найвищих жароміцних властивостей в порівнянні з жароміцними властивостями сплавів на залізній та кобальтовій основах.

Структура жароміцних сплавів разом з хімічним складом, є одним з головних факторів, які визначають їх властивості, такі як жароміцність, пластичність, опір втомі та інші. Тому отримання оптимальної для даного сплаву структури є важливою умовою одержання потрібних властивостей і забезпечення підвищеної працездатності матеріалу [2].

Актуальність теми. Дослідження особливостей формування структури жароміцних нікелевих сплавів є актуальним сучасним завданням при проектуванні і виробництві деталей газотурбінних двигунів.

Мета роботи – аналіз структури жароміцного нікелевого сплаву для лопаток газотурбінного двигуна, дослідження його фізико-механічних властивостей на різних етапах термічної та поверхневої обробки.

Завдання дослідження. Провести аналіз жароміцних нікелевих сплавів для лопаток газотурбінного двигуна; дослідити вплив режимів термічної обробки та поверхневої обробки на структуроутворення жароміцних нікелевих сплавів для лопаток газотурбінного двигуна; на основі отриманих

результатів зробити висновки та розробити рекомендації для впровадження у виробництво.

Об’єкт дослідження – процеси структуроутворення жароміцного нікелевого сплаву ЖС6У для лопаток газотурбінного двигуна.

Предмет дослідження – структура та фізико-механічні властивості жароміцного нікелевого сплаву ЖС6У для лопаток газотурбінного двигуна.

Методи досліджень – металографічний аналіз, стандартні методи визначення фізико-механічних властивостей, фрактографічний аналіз.

Обладнання: металографічний мікроскоп, прилади для вимірювання твердості і мікротвердості, електромеханічна універсальна випробувальна машина на розтягування.

Наукова новизна: встановлено вплив процесу термічної обробки та поверхневої обробки на формування структури жароміцних нікелевих сплавів для лопаток газотурбінного двигуна та на його фізико-механічні властивості.

Практичне значення отриманих результатів. Результати дослідження можуть бути покладені в основу технологічного процесу зміцнення жароміцних нікелевих сплавів для лопаток газотурбінного двигуна.

Особистий внесок. Автору належить аналіз літературних даних, визначення мети та постановки завдання дослідження, виготовлення зразків, проведення випробувань та оформлення роботи.

РОЗДІЛ 1

ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Умови роботи лопаток газотурбінних двигунів

Надійність та довговічність газотурбінних двигунів (ГТД) в цілому визначаються спроможністю працювати в найбільш відповідальних і навантажених елементах, якими є робочі лопатки ГТД. Напруження при виконанні роботи, теплові навантаження, і пошкодження деталей ГТД залежать від режимів роботи двигуна (авіаційний двигун на літаку, корабельний двигун, або стаціонарний двигун) [3].

Так, стаціонарні ГТД працюють протягом сотень тисяч годин на розрахованих режимах при високій економічності і в меншій мірі при змінних режимах. В той же час транспортні (авіаційні, корабельні та локомотивні) ГТД працюють значний час в умовах змінних режимів навантажень (рис. 1.1). Всі пошкодження можна розбити на три великі категорії в відповідності з закономірностями їх виникнення: першочергові, випадкові, які підкоряються закону розподілу [3].

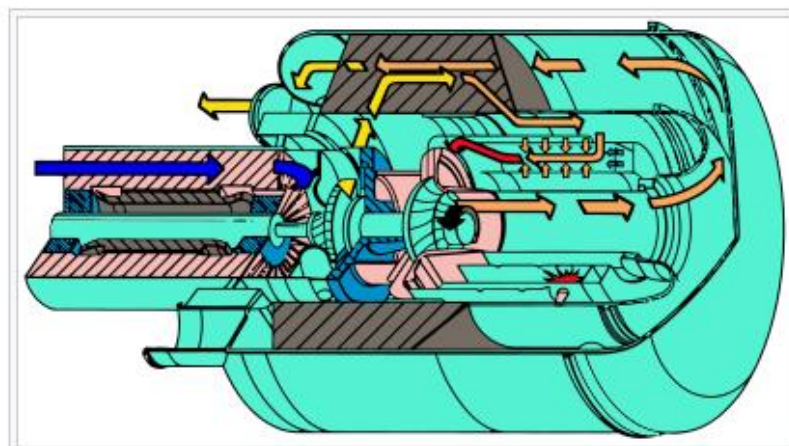


Рисунок 1.1 – Основні вузли та секції ГТД

В найбільш важких умовах знаходяться *лопатки турбін*, що працюють при температурах 850-1050°C. Вони піддаються значним розтягуючим напругам внаслідок центробіжних навантажень, ці напруги викликають повзучість деталей. Швидкісний газовий потік високої агресивності і режим роботи визначають виникнення перемінних механічних та термічних навантажень, які викликають високотемпературне та термічне стомлення, активний розвиток процесів газової корозії та ерозії. Соплові лопатки працюють при температурах до 1150°C й невеликих напругах, а диски – при температурах 600-800°C і більш високих робочих навантаженнях (до 500-600 МПа), тому жароміцні сплави, які використовують для цих груп деталей, значно відрізняються за складом та властивостями [1-2].

Робочі лопатки турбіни сучасних ГТД, працюючи в умовах складної спільної дії статичних, термоциклічних та динамічних навантажень, зазнають неізотермічного навантаження при досягненні екстремальних температур у циклі навантаження. Це сприяє появі в матеріалі великих зон, охоплених циклічними пластичними деформаціями, в яких вихідні деформаційні та міцнісні властивості матеріалу зазнають значних змін. Цим багато в чому пояснюються ушкодження, що переходять у тріщини та руйнування коліс та лопаток турбіни [4].

Робочі лопатки, що охолоджуються, дозволяють збільшувати робочу температуру газу перед турбіною або застосовувати для виготовлення лопаток менш дефіцитні матеріали. Охолодження в основному здійснюється повітрям, що відбирається з компресора [3].

В даний час застосовують в основному два типи робочих лопаток, що охолоджуються: каркасні і складові. Каркасна лопатка (рис. 1.2, г, д) складається з несучого стрижня-каркаса і тонкостінної оболонки, що покриває його. Між каркасом та оболонкою є канали для проходу повітря, що охолоджує [3].

Складові лопатки (рис. 1.2, в, е) виконуються із двох окремих частин. Кожну частину виготовляють окремо, а потім на поверхнях, що стикуються,

вифрезерують канали. Після з'єднання обох частин усередині лопатки утворюються порожнини для проходу охолоджуючого повітря.

Крім того, можливе охолодження робочих лопаток за допомогою захисної плівки (загороджувальне охолодження). Такий спосіб ґрунтується на принципі створення захисного шару охолоджувача між гарячим газом та поверхнею лопатки. У цьому випадку в стінках лопаток є ряд щілин, якими охолоджувач вдувається в прикордонний шар газу у лопатки [3].

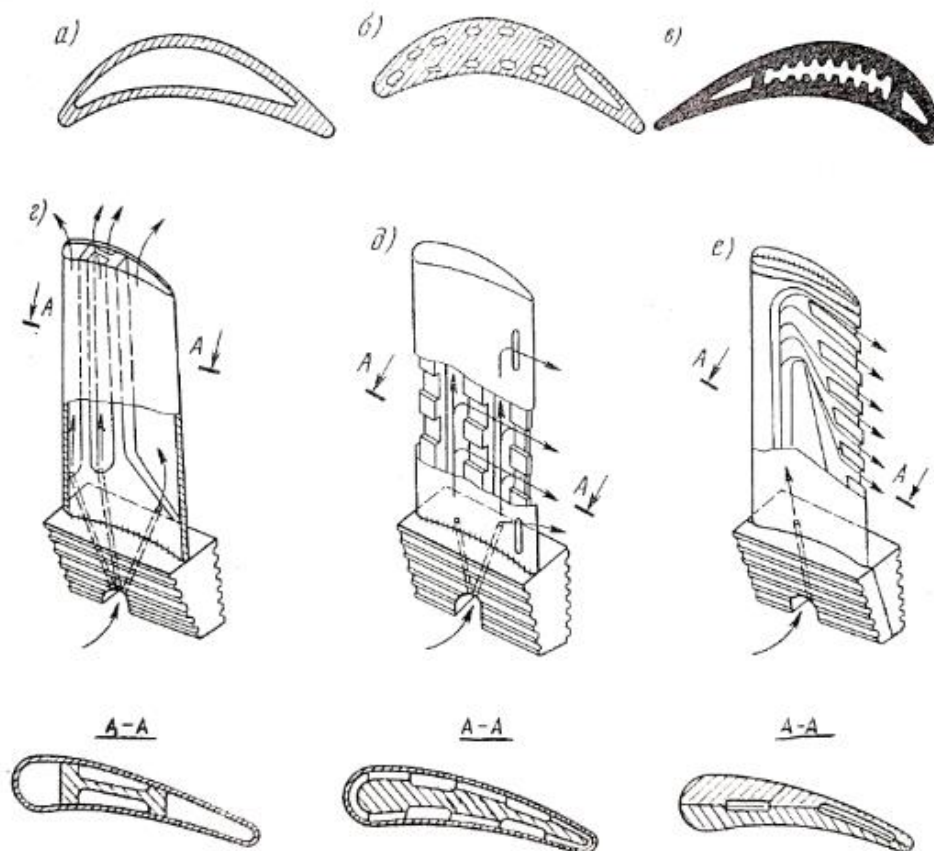


Рисунок 1.2 – Робочі лопатки, що охолоджуються (поперечні перерізи)

Другим варіантом загороджувального охолодження є пористе, або, як його називають, охолодження «випотівання». Лопатку виготовляють спіканням із порошку жароміцного матеріалу таким чином, що її стінки виявляються досить пористими. Охолоджувач (вода або інша рідина з високою температурою кипіння), що просочується (під тиском) через пори на поверхню, випаровується, відбираючи тепло від стінок. При цьому над

поверхнею лопатки утворюється шар пари, що захищає стінку від гарячих газів [3].

Охолодження лопаток шляхом відведення тепла в обід диска є найпростішим способом, проте ефективність його залежить від типу замка кріплення лопатки та теплопровідності матеріалу лопатки [1-3].

Типи кріплення робочих лопаток

Штифтовий і циліндричний замки (рис. 1.3, а, б) лопаток ГТД в даний час не знаходять застосування, так як вони збільшують вагу конструкції і значно послаблюють обід диска, хоча сприяють хорошему відводу тепла від лопатки в диск [4].

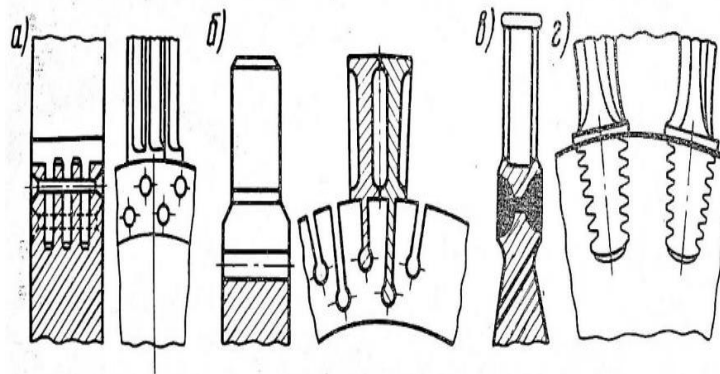


Рисунок 1.3 – Типи кріплення робочих лопаток

Кріплення лопаток за допомогою зварювання (рис. 1.5, в) також не поширене, оскільки не допускає заміни лопаток в умовах експлуатації і вимагає складного обладнання для організації процесу зварювання (паяння).

На сучасних турбінах ГТД для кріплення лопаток до дисків застосовуються «ялинкові» замки (рис. 1.5, г).

Під впливом підвищених термічних напружень і підвищених температур, порівняно з номінальними значеннями, в певних умовах виникають такі термічні ушкодження: перегрів матеріалу елементів конструкції; обгоряння пера лопатки; витяжка робочих лопаток турбіни; тріщини повзучості; підвищений ступінь окислення; розтріскування та прогар країв лопаток [3].

Ушкодження від дії вібраційних навантажень зустрічаються на всіх

типах ГТД, що експлуатуються в різних країнах світу. Ці пошкодження пов'язані з підвищеним рівнем змінної напруги, що виникають в деталях при їх коливаннях, з якістю виготовлення та режимом навантаження. Режим навантаження впливає як на межу втоми, так і на термоциклічну довговічність [3].

Під дією підвищених динамічних навантажень за наявності концентраторів напружень, погіршення фізико-механічних властивостей матеріалу та температурного стану виникають втомні ушкодження робочих лопаток турбіни та лопаток.

В результаті такого впливу виникають тріщини втоми в пазах замкової частини лопаток. Під час експлуатації за певних умов можливе розтріскування захисного покриття та створення умов для прискорення корозії [5].

1.2 Характеристика жароміцних нікелевих сплавів

1.2.1 Склад і властивості чистого нікелю

Чистий нікель – метал світло-сріблястого кольору. Його поверхня має дуже високу відбивну здатність. Нікель володіє також достатньо високою міцністю і пластичністю, добре обробляється в гарячому і холодному станах. Після оброблення його тиском можна отримати лист завтовшки до 0,02 мм або дріт діаметром до 0,01 мм [5].

Нікель до температури 357,6 °С виявляє магнітні властивості, його температура плавлення становить 1455 °С, кипіння – 2730°С, густина – 8900 кг/м³ [5]. У хімічному відношенні нікель належить до малоактивних металів, володіє високою корозійною стійкістю в атмосфері повітря, морській воді, не руйнується у воді та багатьох агресивних середовищах (наприклад, лугах). За підвищеної температури (500 °С і більше) окислюється досить швидко.

Світові ресурси нікелю за даними Геологічної служби США оцінюють близько 600 млн. т, щорічне видобування з надр – 60 млн. т [5]. У рудах нікель знаходиться у складі хімічних сполук разом з кобальтом, арсеном, залізом, сіркою та ін. У сульфідних мідно-нікелевих рудах міститься від 0,3 % до 5,5 %

нікелю. В окислених нікелевих рудах, що надходять на переробку, вміст нікелю складає від 0,9 % до 1,5 % [5].

Виготовлення нікелю з природних руд є трудомістким процесом. Металургійна промисловість виготовляє декілька марок електролітичного нікелю, що відрізняються вмістом домішок (табл. 1.1). Найбільш шкідливими домішками нікелю є сірка, кисень, вуглець.

Хімічний склад електролітичного нікелю надано в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Хімічний склад нікелю [5]

Марка	Ni, % не менше	Co, % не менше	Масова частка домішки, % не більше			
			C	Mg	Al	Si
1	2	3	4	5	6	7
H-0	99,985	0,005	0,005	0,001	0,001	0,001
H-1y	99,92	0,10	0,01	0,001	-	0,002

Продовження таблиці 1.1

Марка	Масова частка домішки, % не більше					
	P	S	Mn	Fe	Cu	Zn
8	9	10	11	12	13	14
H-0	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,0005
H-1	0,001	0,001	-	0,01	0,015	0,0008

Продовження таблиці 1.1

Марка	Масова частка домішки, % не більше					
	As	Cd	Sn	Sb	Pb	Bi
15	16	17	18	19	20	21
H-0	0,0005	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003
H-1	0,001	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005

Ці домішки розчинюються в рідкому нікелі, а при кристалізації виділяються як евтектики Ni–NiS, Ni–NiO, Ni–C (графіт). Евтектика Ni–NiS плавиться за температури 645 °C та спричинює гарячеламкість металу під час обробки тиском [3,5]. Евтектики Ni–NiO, Ni–C істотно погіршують пластичність нікелю.

У чистому стані нікель використовують для захисного і декоративного покриття заліза та інших металів, для виготовлення лужних акумуляторів та як каталізатор різних хімічних процесів. Нікель використовують для виготовлення різних сплавів і сталей зі спеціальними властивостями. Відомо понад 3000 сплавів, що містять нікель [3].

Так, у нафтопереробних, нафтохімічних, фармацевтичних та інших промислових процесах використовують нікелеві каталізатори, у яких міститься від 3 % до 80 % нікелю [5]. Вважають, що кожного року в світі утворюється близько 150 тис. т відпрацьованих каталізаторів.

Структура використання нікелю у промислово-розвинених країнах така [2], %: нержавіючі та жароміцні сталі – 30-50, конструкційні сталі – 10-15, сплави на нікелевій основі – 16-20, захисне і декоративне покриття – 10-18, чавунне і сталеве литво – 10-12, інші споживачі – 8-10.

1.2.2 Класифікація нікелевих сплавів

В дійсний час сплави на нікелевій основі використовують в якості жароміцних матеріалів, які призначені для роботи при температурах від 700 до

1100°C. Їх використовують в газових турбінах двигунів літаків, кораблів, енергетичних установок, при виготовленні деталей ракетно-космічної техніки, в нафтохімічному обладнанні [6].

Так, в авіаційному газотурбінному двигуні більше 70% маси складають жароміцні сплави на нікелевій та залізо-нікелевій основах – це диски, соплові та робочі лопатки турбін, камери згоряння та т.п..

Сучасні жароміцні сплави на нікелевій основі є дуже складними за хімічним складом: в них входять до 7-9 основних легуючих елементів та велика кількість домішок, вміст яких слід контролювати в сплаві [6].

Нікель утворює тверді розчини з багатьма елементами, що обумовлює значні можливості досягнення високої жароміцності сплавів на його основі. При 1000°C кобальт, залізо, марганець та мідь утворюють необмежені тверді розчини, а такі тугоплавкі метали, як вольфрам, молібден, тантал, ніобій, ванадій – обмежені тверді розчини з різними областями гомогенності.

Розчинність при 1000°C таких елементів, як титан та алюміній складає, відповідно, 10% та 7%. Важливо відзначити, що розчинність легуючих елементів в багатокомпонентних сплавах на основі нікелю може істотно різнитися у бік зменшення від значень, отриманих при вивченні бінарних сплавів нікельлегуючий елемент. Багато з легуючих елементів, що розчинені в нікелі або ніхромі, є ефективними зміцнювачами й підвищують опір повзучості сплавів на основі нікелю [5].

Промислові нікелеві сплави класифікують за хімічним складом і за областю застосування.

За застосуванням сплави поділяють на жароміцні, жаростійкі, корозійностійкі і спеціальні (з особливими фізичними властивостями).

За хімічним складом нікелеві сплави можна поділити на п'ять груп [7]:

1 група: сплави на основі систем нікель–мідь, нікель–мідь–силіцій, нікель–мідь–олово, нікель–мідь–свинець та інші;

2 група: ніхроми;

3 група: сплави на основі системи нікель–молібден;

4 група: подвійні сплави нікелю з силіцієм, берилієм, алюмінієм і титаном;

5 група: складнолеговані жароміцні сплави.

Сплави першої групи відрізняються високою стійкістю в багатьох реагентах (морська вода, сульфатна і органічні кислоти, розчини лугів, атмосфера пари при 350–450°C), хорошими антифрикційними властивостями і стабільністю механічних властивостей при підвищених температурах [7].

Антифрикційні властивості покращують шляхом легування свинцем, а твердість – додаванням силіцію. Монель (НМЖМц 28–2,5–1,5) і нікелеві бронзи – найбільш поширені сплави цієї групи. Виливки з монелей застосовують в нафтохімічному машинобудуванні для виготовлення клапанів, робочих коліс і корпусів насосів, втулок, кранів і інших деталей, що працюють в агресивних середовищах, в харчовому машинобудуванні і суднобудуванні [7].

Для *сплавів другої групи* характерними є хороша стійкість проти окиснення і високі механічні властивості при підвищеній температурі. Їх широко використовують майже до температури 1000–1100 °C [3,7].

Сплави нікелю з хромом отримали назву ніхромів (Х10Н90, Х20Н80, Х30Н70, Х40Н60, Х50Н50 та ін.). Подвійні ніхроми і хромелі застосовують в техніці як деформовані напівфабрикати і дуже рідко використовують для фасонного лиття. Виливки виготовляють із залізистих ніхромів (ніконелей).

Завдяки високій жаростійкості у середовищі окислювальних і відновних газів, виливки з цих сплавів можуть витримувати багаторазове нагрівання і охолодження без тріщин і викривлення. Їх широко застосовують для пічної арматури, захисних трубок пірометрів, деталей цементацийних установок, як нагрівальні елементи електричних печей опору та ін. [8].

Нікельмолібденові і більш складнолеговані *сплави третьої групи* добре протистоять дії неорганічних кислот і рідкого хлору. Деякі зі сплавів (з 30 % Мо і 5 % Fe) дуже стійкі у соляній кислоті будь-якої концентрації при високих температурах [9]. Виливки зі сплавів цієї групи добре заварюються і

зварюються електродами того самого складу, мають підвищену жароміцність і стійкість проти ерозії. Їх широко застосовують в хімічному машинобудуванні.

Сплави четвертої групи: подвійні сплави нікелю з берилієм, алюмінієм, титаном і силіцієм мають хорошу корозійну стійкість у ряді агресивних середовищ, добре чинять опір зносу (Ni-Si і Ni-Be). Виливки зі сплавів Ni-Si можна піддавати зварюванню. Сплави цієї групи застосовуються для виготовлення важко навантажених деталей, що працюють на стирання при високих температурах [7].

Сплави п'ятої групи: жароміцні сплави – найбільш важлива група сплавів на основі нікелю. До них відносяться складнолеговані ливарні сплави серії ЖС, ВЖЛ (ЖС3, ЖС6, ЖС6К, ЖС6У, ВЖЛ12, ЖС26, ЖС32, ЖС40 та ін.) і деформівні. Вони широко використовуються в сучасних газотурбінних двигунах.

З жароміцних нікелевих сплавів виготовляють робочі лопатки і диски турбіни, що направляють лопатки, камери згорання газотурбінних двигунів, тобто деталі, що сприймають комплексну дію теплових ударів, великих відцентрових сил, окислювачів, високих температур і навантажень [8].

Використання сучасних складнолегованих жароміцних нікелевих сплавів дозволило підвищити температуру газів на вході в турбіну з 800 °С до 1100 °С, що привело до значного підвищення потужності, зменшення витрати палива, збільшення ресурсу і надійності роботи двигунів [7-8].

1.3 Аналіз жароміцних сплавів на нікелевій основі для виготовлення лопаток ГТД

Особливу роль при конструюванні нового газотурбінного двигуна грає вибір матеріалу деталей газового тракту і, зокрема, лопаток турбіни [1-3].

Найбільш поширеними сплавами для виробництва лопаток ГТД є нікелеві жароміцні сплави різних систем легування. Насамперед необхідно

виділити сплави групи ЖС (ЖС32, ЖС32ВІ, ЖС6У та ін.), що мають необхідні жароміцні характеристиками.

Проблема довговічності деталей газотурбінних двигунів, що працюють в умовах впливу високотемпературного газового потоку, є однією з найважливіших в машинобудуванні. Особливої гостроти ця проблема набуває при створенні сучасних авіаційних двигунів, для яких основними ознаками є збільшення температури газів перед турбіною.

Якщо в перших газотурбінних двигунах (ГТД) робочі температури матеріалу становили 600-900 °С, то в подальшому значно підвищилися, досягнувши на даний час 1400 °С і більше, при одночасному зменшенні маси конструкції і збільшенні ступеня стиснення повітря в компресорі [1-3].

Збільшення параметрів двигуна неминуче веде до зростання навантажень на деталі і вузли, ускладнення конструкцій і пошуку нових технологій забезпечення тривалої працездатності ГТД [2].

З літературних джерел відомо, що обмеження ресурсів високотемпературних двигунів пов'язане зі зростанням напруженості в деталях турбіни, сопла та камери згоряння. Тому розробка покращених жароміцних, жаростійких сплавів, надійних методів захисту від газової корозії, зменшення маси конструкції є однією з провідних завдань машинобудування.

Конструктивні рішення, які закладаються в авіадвигуни нових поколінь, як правило, знаходяться за межами можливостей відомих матеріалів. Тому особливої гостроти набуває необхідність розробки нових матеріалів і технологічних процесів, які повинні забезпечити деталям мати підвищені характеристики жароміцності, жаростійкості, опірності термічній втомі [1-3].

На початкових етапах авіадвигунобудування провідну роль мала розробка конструктивних вдосконалень. Згодом, як видно з аналізу, для 4-го покоління авіадвигунів ролі конструкції і технологій зрівнялися, а для 5-го і 6-го поколінь внесок нових матеріалів і технологій в забезпечення параметрів авіадвигунів вже складає більше 70% [1-3].

При більш високих температурах використовуються сплави на основі інтерметалідів Ni_3Al і $NiAl$ [6,7]. Частка нікелевих сплавів в авіадвигунобудуванні складає не менше 70% маси конструкцій ГТД. Властивості цих сплавів забезпечуються наявністю легувальних елементів, технологією лиття деталей, штампуванням і оптимізацією режимів термічної обробки [3].

Для лиття соплових і робочих лопаток застосовуються нікелеві сплави ЖС-6К, ЖС-6Ф, ЖС6У. Величезний прогрес в параметрах лопаток турбіни досягнутий з впровадженням в практику сплавів з направленою кристалізацією і монокристалічних сплавів. Основна ідея сплаву з направленою кристалізацією полягає у ліквідації меж між зернами, перпендикулярних напрямку відцентрових сил. Тобто виключення можливостей для повзучості і руйнування по межах зерен. Монокристалічна деталь взагалі не має меж зерен, тому вона має оптимальні характеристики міцності [4-6].

Найбільш напруженими конструктивними елементами газової турбіни є диски, робочі лопатки та соплові апарати. Вони виготовляються із жароміцних хромонікелевих сплавів які наведено у таблиці 1.2.

Умови роботи конструкційних матеріалів для виготовлення робочих лопаток характеризуються чіткими експлуатаційними факторами, до яких в першу чергу слід віднести високі рівні напруження та температур, їх циклічність та тривалість, наявність хімічних активних робочих середовищ та ін. [6].

За кордоном застосовуються гранульовані сплави IN100, RENE95, MERL 76 (двигуни V2500, PW2000), які можна віднести до сплавів першого покоління.

Сплав R88DT (використовуваний в ГТД двигуна GE90) можна віднести до сплавів 2 покоління. R88DT володіє вищим (ніж у сплавів першого покоління), опором повзучості (приблизно на 30-50 °C), більш високими короточасними міцністю і тріщиностійкістю [6].

Таблиця 1.2

Матеріал деталей турбін [6]

	Деталь	Матеріал
Турбіна високого тиску		
1.	Робочі лопатки	ЖС-26-НК, ЖС6У
2.	Диск	ЭП-742-ИД
3.	Обертовий дифлектор	ЭИ-698
4.	Соплові лопатки	ЖС6К-ВИ
Турбіна низького тиску		
1.	Робочі лопатки	ЖС-26-НК, ЖС6У
2.	Диск	ЭП-741П
3.	Вал	ЭП-741П
4.	Соплові лопатки	ЖС6К-ВИ

Для лиття соплових і робочих лопаток застосовуються нікелеві сплави ЖС-6К, ЖС-6Ф, ЖС6У, ЭИ617, ЭИ617-ВИ. Величезний прогрес в параметрах лопаток турбіни досягнутий з впровадженням в практику сплавів з направленою кристалізацією і монокристалічних сплавів. Основна ідея сплаву з направленою кристалізацією полягає у ліквідації меж між зернами, перпендикулярних напрямку відцентрових сил. Тобто виключення можливостей для повзучості і руйнування по межах зерен. Монокристалічна деталь взагалі не має меж зерен, тому вона має оптимальні характеристики міцності [4-6].

Серед нікелевих сплавів з надтвердими фазами, які використовуються для виготовлення деталей, зокрема лопаток газотурбінних двигунів, можна виділити такі основні марки:

1. ЖС6У (жаростійкий сплав 6, удосконалений). Сплав з високим вмістом γ' -фази, що забезпечує міцність і термостійкість. Використовується для виготовлення лопаток турбін. Основні елементи: Ni, Cr, Co, Al, Ti.

2. ЖС26. Сплав з хорошими характеристиками міцності при високих температурах. Використовується в авіаційних двигунах. Основні елементи: Ni, Cr, Al, Ti, Mo.

3. ЖС32. Сплав із високою жароміцністю та тривалою витривалістю за високих температур. Основні елементи: Ni, Cr, Co, Mo, Ti, W.

4. ЖС30. Високотемпературний сплав для роботи в агресивних середовищах. Основні елементи: Ni, Cr, Mo, Al, W.

5. ЖС3Л. Ливарний сплав із відмінними характеристиками для роботи в умовах високих температур і термодинамічних навантажень. Основні елементи: Ni, Cr, Ti, Al.

6. ВЖЛ12У (високолегований жароміцний ливарний сплав). Забезпечує високу жароміцність і стабільність властивостей у складних умовах. Основні елементи: Ni, Cr, Mo, Al, Ti.

7. ВЖЛ1. Перший вітчизняний ливарний жароміцний нікелевий сплав, який досі використовується в газотурбінних двигунах. Особливості: ЖС (жаростійкі сплави) широко застосовуються у виробництві деталей, які піддаються високим механічним і температурним навантаженням [4-6].

Вміст γ' -фази ($Ni_3(Al, Ti)$) в ЖС забезпечує стабільність структури при високих температурах. Ливарні марки (ЖС3Л, ЖС32) використовуються для складних форм деталей, таких як монокристалічні лопатки.

Саме необхідність довготривалої експлуатації деталей авіадвигунів при температурах до 1100 °С і короткочасно до 1150 °С обумовило застосування жароміцних і жаростійких нікелевих сплавів [6].

1.4 Вплив легуючих елементів на структуру і властивості жароміцного нікелевого сплаву ЖС6У

Використання перспективних легувальних елементів, таких як, ніобій, титан, вольфрам, молібден і інших дефіцитних металів, підвищує характеристики температурної працездатності і жароміцність нікелевих сплавів, але при цьому значно збільшують їх вартість. Тому промислове

використання таких сплавів повинно визначатися, в першу чергу, економічною доцільністю [5].

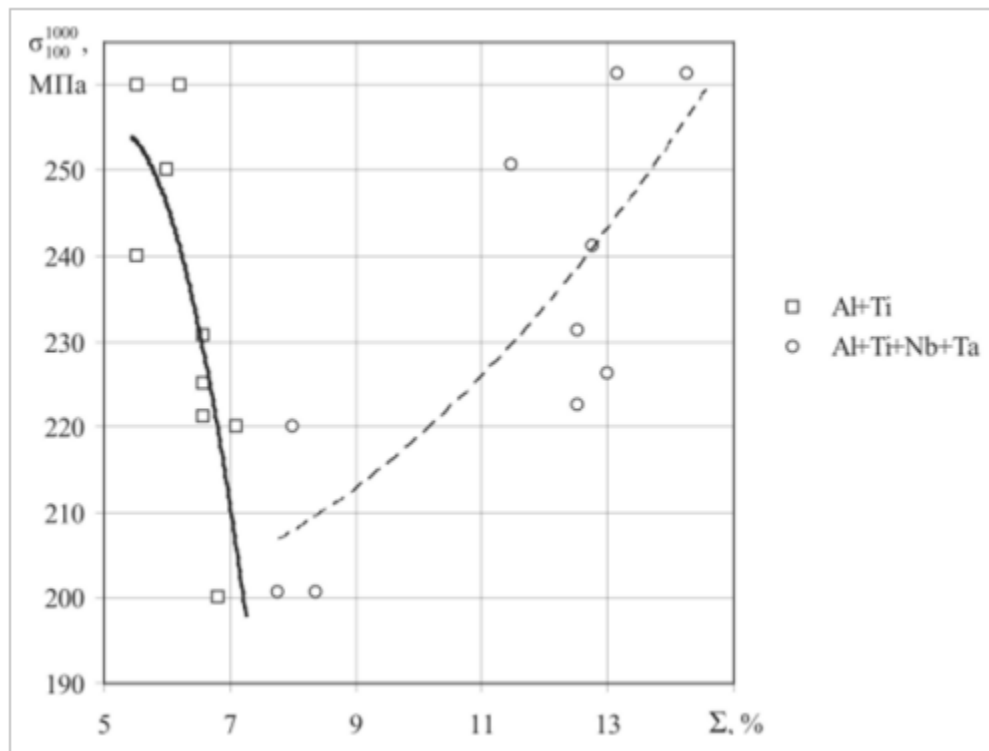


Рисунок 1.4 – Вплив легувальних елементів на довготривалу міцність сплаву ЖС6У [5]

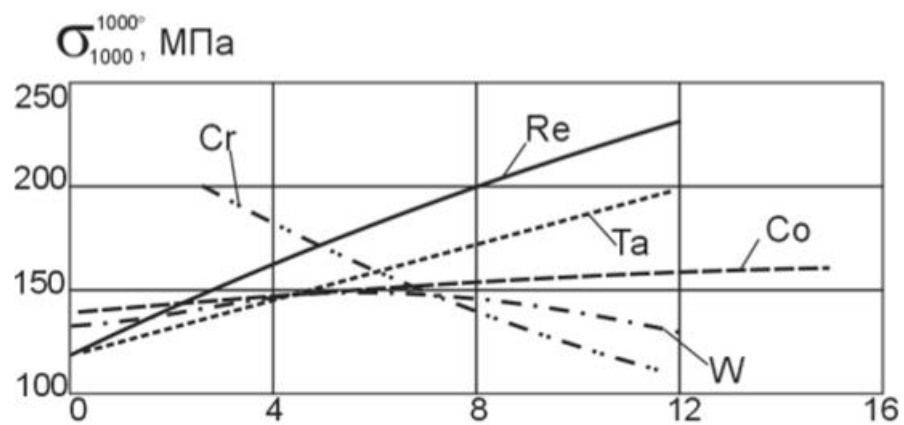


Рисунок 1.5 – Вплив легувальних елементів на довготривалу міцність сплаву ЖС6У [5]

Чистий нікель має низьку тривалу міцність близько 40 МПа при 800 °С за 100 годин та малу стійкість газовій корозії при високих температурах.

Необхідні службові властивості досягаються шляхом комплексного легування, в результаті якого утворюються багатофазні сплави, які відповідають вимогам сучасного машинобудування. Хімічні елементи, які необхідні для легування жароміцних сплавів поділяються на три групи [7].

До першої групи належать елементи, які зміцнюють твердий розчин на основі нікелю. Це хром, кобальт, молібден, вольфрам, ванадій, гафній. Окрім зміцнення твердого розчину хром активно захищає сплав від окислення; молібден, вольфрам, ванадій утворюють разом з хромом різні карбідні фази типу Me_2C_6 , Me_6C [4-7].

До другої групи елементів відносяться алюміній, титан, ніобій і тантал. Ці елементи, окрім зміцнення твердого розчину, утворюють з нікелем інтерметалідну сполуку складного типу: $(Ni,Co)_3(Al, Ti, Nb, Ta)$. Окрім інтерметалідної фази, карбідоутворюючі елементи цієї групи утворюють карбіди типу MeC . Алюміній як і хром, утворює захисну оксидну плівку, яка підвищує жаростійкість сплаву [7].

До третьої групи можна віднести вуглець, бор, цирконій і елементи із групи лантаноїдів – лантан, церій, неодим і інші, які вводять в кількості десятих і сотих часток відсотка. Основною метою введення цих елементів є утворення фаз проникнення, зміцнення границь зерен за рахунок сегрегації по границям зерен, утворення спеціальних фаз, рафінування металу від шкідливих речовин, вплив на кінетику фазових перетворень, зміну морфологій фаз, які виділяються [6-7].

Елементи першої групи впливають на зміцнення жароміцних сплавів через зміну електронної структури твердого розчину. Це призводить, в свою чергу, до пониження енергії дефектів упаковки та дифузійної рухомості атомів, виникнення локальних викривлень електронної структури поблизу розчинених атомів [6].

Жароміцність сплавів перебуває в прямій залежності від кількості зміцнювальної фази. Чим більша об'ємна частка цієї фази, тим вища робоча температура сплаву. В зв'язку з тим, що найбільший вплив на розчинність титану, алюмінію, танталу, ніобію виявляє хром, для збільшення їхньої кількості вміст хрому в сплавах зменшується. Це призводить до підвищення робочої температури сплавів. Композиції жароміцних сплавів уже не базуються на системі Ni-Cr, а є комплексно легованими системами, в яких вміст хрому знаходиться на рівні двох легуючих елементів (Al, Mo, W, Ti, Nb, Co). Об'ємна частка зміцнювальної γ -фази в таких сплавах доходить до 60 % [8].

Таблиця 1.3

Вплив легуючих елементів на структуру і властивості жароміцних нікелевих сплавів [7]

Хімічний елемент	Основні види впливу на сплав
Кобальт	Твердорозчинне зміцнення, розширення температурного інтервалу для здійснення термічної й деформаційної обробки, підвищення стійкості до сольової корозії
Хром	Твердорозчинне зміцнення, додаткове зміцнення карбідами, підвищення стійкості до високотемпературної газової й сульфідної корозії, збільшення опору росту втомної тріщини
Вольфрам	Твердорозчинне зміцнення й підвищення стабільності γ -фази, збільшення опору високотемпературної повзучості, додаткове карбідне зміцнення
Молібден	Твердорозчинне зміцнення й зміцнення γ -фази
Ніобій	У невеликих кількостях підвищує опір повзучості
Титан + алюміній	Основні γ' -утворюючі елементи, Ti — основний елемент, що утворює додаткову зміцнювальну фазу на основі карбідів типу MC
Вуглець	Карбідне зміцнення, контроль росту зерна при підвищених температурах

Накопичений до теперішнього часу досвід розробки жароміцних нікелевих сплавів дозволяє систематизувати наявні дані про роль кожного елемента в композиції сплаву. Узагальнені дані представлені в табл. 1.3.

1.5 Вплив термічної обробки на структуру нікелевих жароміцних сплавів

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

По характеристикам жароміцності сплав ЖС6У перевершує інші сплави, та рекомендується для лопаток, тривало працюючих при температурах 1050°C із захисними покриттями. Сплав ЖС6У рекомендується до використання вже в термічнообробленому 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. Жароміцність сплаву безпосередньо залежить від кількості γ' -фази (рис. 1.6) [9].

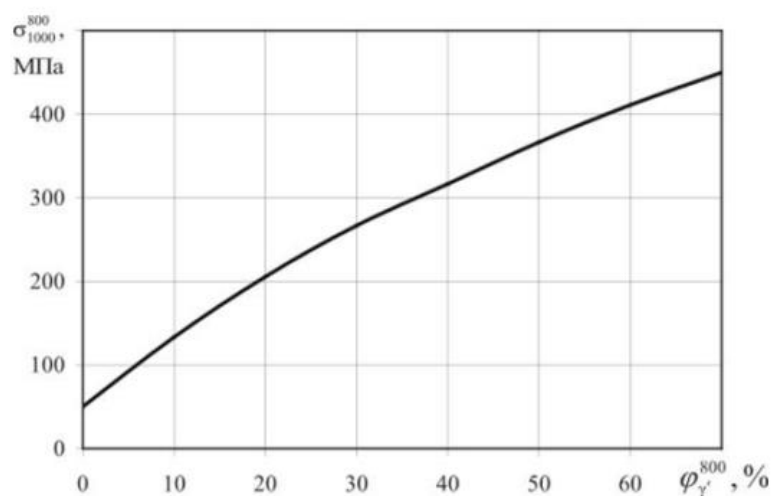


Рисунок 1.6 – Залежність 1000-годинної жароміцності нікелевих жароміцних сплавів від об'ємної частки γ' -фази при температурі 800°C [9]

У сплаві ЖС6У присутні такі фази:- γ -твердий розчин + зміцнювальна інтерметалідна γ' -фаза (Ni_3AlTi) + карбідні фази на границях зерен та евтектична γ - γ' -фаза [9].

Процес формування структури ливарних сплавів починається при кристалізації відливоків лопатки і продовжується при термічних нагріваннях, які пов'язані з термічною обробкою відливоків, технологічними операціями пайки і нанесення жароміцних захисних покриттів [7-8].

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 [8].

Гомогенізаційний 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.

Аустенітна матриця (γ). Нікель сам по собі не має високого модуля пружності, однак більшість конструкторів віддають перевагу аустенітній матриці для найбільш жорстких температурних параметрів при роботі в повітряній атмосфері [9].

Дані сплави можна використовувати до $0,8 T_{\text{пл}}$ та протягом 100000 часів при більш низьких температурах. Головними причинами стійкості є висока стійкість структури нікелю при легуванні з огляду на його практично заповнену електронну оболонку; 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 [9].

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 виявляє вплив на пластичність. Карбіди можуть впливати на хімічну стабільність матриці, за допомогою зв'язування елементів, які взаємодіють з вуглецем [10].

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.

1.6 Методи поверхневого зміцнення для жароміцних сплавів

Жароміцні нікелеві сплави розроблені для авіаційної, енергетичної та промислової галузей і продовжують удосконалюватися.

Для зміцнення поверхні лопаток із жароміцних сплавів рекомендується використовувати методи, які забезпечують високу зносостійкість, термічну стабільність і стійкість до корозії та окислення. Вибір методу залежить від умов експлуатації деталі [11].

Методи поверхневого зміцнення лопаток із жароміцних сплавів, які набули поширення:

1. Плазмове або лазерне зміцнення.
2. Іонна імплантація.
3. Нітрування та карбонітування.
4. Термодифузійне алітування.

5. Механічні методи обробки.
6. Покриття з використанням CVD або PVD.
7. Електролітно-плазмові методи.
8. Термічне окислення.

Такі методи особливо ефективні для збільшення ресурсу роботи лопаток газотурбінних двигунів, які піддаються значним термомеханічним навантаженням і діям агресивного середовища [11].

Для отримання ефективних захисних покриттів використовують багаторазове легування алюмінідами, створюють вдосконалені композиції і впроваджують нові технологічні процеси. Алюмініди $CoAl$, Ni_3Al , $NiAl$ формують основну інтерметалідну фазу більшості захисних покриттів деталей ГТД, що працюють при високих температурах [3].

Дифузійні захисні покриття, що одержують технологіями порошкового або газового алітування, хромоалітування, шлікерного алітування, алюмосиліціювання продовжують широко використовуватись для підвищення механічних характеристик деталей.

Проте, такі покриття обмежуються по товщині до 0,04 ... 0,06 мм через їх значну крихкість, тому важливо підвищувати стійкість до розтріскування покриттів [10-11].

Найбільш широкого розповсюдження отримали конденсаційні покриття, одержувані магнетронним, іонно-плазмовим, електронно-променевим методами.

Склад і властивості зносостійких та жаростійких покриттів значною мірою залежать від технології їх нанесення. Методи створення таких покриттів за допомогою осадження діляться на фізичні (PVD) і хімічні (CVD).

При фізичному осадженні (PVD) матеріал покриття переходить з твердого стану в газову фазу в результаті випаровування під впливом теплової енергії або в результаті розпилення за рахунок кінетичної енергії зіткнення часток з матеріалом. Енергія, розподіл і щільність потоку часток визначаються методом нанесення, параметрами процесу і формою часток. Нанесення

покриттів методом PVD проводиться при температурі до 450 °C, що практично не обмежує вибір матеріалів, на які наноситься покриття. PVD - процеси проводять у вакуумі або в атмосфері робочого газу при досить низькому тиску [10-11].

Метод хімічного осадження (CVD) практично не має обмежень за хімічним складом покриттів. Всі присутні частки можуть бути осаджені на поверхню матеріалу. Які покриття при цьому утворюються, залежить від комбінації матеріалів і параметрів процесу. Якщо процес протікає при заповненні простору реакційноздібним газом (киснем, азотом або вуглеводнями), в результаті хімічної реакції між атомами завантажених металів і молекулами газу відбувається нанесення оксидних, нітридних та карбідних покриттів.

Метод катодно-іонного бомбардування (КІБ) заснований на генерації речовини катодною плямою вакуумної дуги потужнострумовевого низьковольтного розряду, що розвивається виключно в парах матеріалу електрода. Подача в вакуумний простір реагуючих газів (азоту, метану тощо) в умовах іонного бомбардування призводить до конденсації покриття на поверхні деталі завдяки протіканню плазмохімічних реакцій [7-9].

Всі процеси випаровування, утворення сполук, іонного бомбардування і конденсації покриттів відбуваються у вакуумній камері, металевий корпус якої служить анодом. Катод виготовляють з тугоплавкого матеріалу, що підлягає випаровуванню.

Особливість методу КІБ полягає у прискоренні іонів речовини шляхом створення негативного заряду (щодо корпусу камери) на деталі. Характерна особливість методу КІБ – це висока хімічна активність матеріалу що випаровується, обумовлена утворенням конденсату при електродуговому випаровуванні матеріалу катода, за рахунок якого конденсат перетворюється у високо іонізований потік низькотемпературної плазми [8].

Крім того, в порівнянні з газовим азотуванням в печі, іонно – плазмове азотування забезпечує: скорочення тривалості обробки в 2–5 разів, як за

рахунок скорочення часу нагріву і охолодження садки, так і за рахунок зменшення часу ізотермічної витримки; зниження крихкості зміцненого шару; скорочення витрат робочих газів в 20–100 разів; скорочення витрат електроенергії в 1,5–3 рази; виключення операції депасивації; зниження деформації настільки, що виключається фінішне шліфування; простоту й надійність екранного захисту від азотування поверхонь, що не зміцнюються; покращення санітарно-гігієнічних умов виробництва [9].

Висновки до розділу 1

Лопатки газотурбінних двигунів (ГТД) є одним з найбільш напружених елементів та представляють максимальну потенційну небезпеку з точки зору вторинних руйнувань елементів конструкції.

Основними умовами роботи лопаток газотурбінних двигунів є: високі рівені температурних, вібраційних, динамічних, тривалих статичних, ізотермічних та неізотермічних навантажень [1].

Жароміцні сплави на нікелевій основі знайшли широке застосування під час виготовлення газотурбінних двигунів, головним чином, у вигляді робочих і соплових лопаток. В результаті складного легування у сплавів цієї групи досягнуто найвищі жароміцні властивості. Сплави на нікелевій основі використовують в якості жароміцних матеріалів, які призначені для роботи при температурах від 700 до 1100°C.

Провели аналіз впливу легуючих елементів на структуру і властивості жароміцного нікелевого сплаву ЖС6У та розкрили питання впливу термічної обробки на структуру нікелевих жароміцних сплавів.

Для зміцнення поверхні лопаток із жароміцних сплавів рекомендується використовувати методи, які забезпечують високу зносостійкість, термічну стабільність і стійкість до корозії та окислення.

Найбільш широкого розповсюдження отримали конденсаційні покриття, одержувані іонно-плазмовим та електронно-променевим методами.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ, МАТЕРІАЛИ ТА ОБЛАДНАННЯ

2.1 Хімічний склад та властивості сплаву ЖС6У

Під час виконання роботи нами було розглянуто робочу лопатку газотурбінного двигуна, яка виготовляється з жароміцного нікелевого сплаву ЖС6У (ХН57ВКЮТМБЛ).

Значна частина турбінних лопаток з направленою або монокристалічною макроструктурою для сучасних авіаційних і наземних силових установок виготовляють із жароміцного нікелевого сплаву ЖС6У.

Даний сплав відрізняється дуже складною системою легування та відповідно, високою вартістю. Характеристика, хімічний склад, механічні властивості жароміцного нікелевого сплаву, який використовуються для виготовлення литих лопаток ГДТ наведено у таблицях 2.1 - 2.3.

Таблиця 2.1

Характеристика сплаву ЖС6У (ХН57ВКЮТМБЛ) [11]

Марка	ЖС6У (інше позначення ЖС6У-ВІ)
Класифікація:	Сплав жароміцний ливарний
Додатково	Сплав жароміцний на нікелевій основі.
Застосування	Виготовлення литих пруткових заготовок для подальшого переплаву при лиття лопаток та інших фасонних виливків

Таблиця 2.2

Хімічний склад сплаву ЖС6У (ХН57ВКЮТМБЛ) [11]

Хімічний елем.	Fe	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Ce	Mo	W
Вміст, %	до 1	0,13 - 0,2	до 0,4	до 0,4	54,3 -62,7	до 0,01	до 0,015	8 - 9,5	до 0,02	1,2- 1,4	9,5- 11

Продовження таблиці 2.2

Хімічний елемент	Co	Nb	Ti	Al	Zr	B	Pb	Bi	Y
Вміст, %	9 - 10,5	0,8 - 1,2	2 - 2,9	5,1 - 6	до 0,04	до 0,035	до 0,001	до 0,0005	до 0,01

Таблиця 2.3

Механічні властивості сплаву ЖС6У (ХН57ВКЮТМБЛ) [11]

Сортамент	σ_b , МПа	δ , %	Ψ , %	НВ, при T= 20 °С
Пруток, T=800 °С	830	3	≥ 8	299-341

2.2 Методи дослідження мікроструктури сплаву

2.2.1 Металографічний аналіз

Першим етапом металографічного аналізу є приготування мікрошліфів. Місце вирізання зразка вибирають залежно від задач дослідження (у ряді випадків порядок і місце вирізання строго регламентуються Держстандартами). При вирізанні і наступному шліфуванні зразка неприпустиме значне нагрівання (вище 150°C), тому що воно може викликати суттєві структурні зміни металу.

Мікрошліф - це зразок, поверхня якого підготовлена для мікроаналізу. Правильне виготовлення шліфів має важливе значення, оскільки від цього залежить правильність тлумачення мікроструктур.

Найбільш зручними є прості форми зразків, такі як циліндр, куб. Зразки виготовляють зі скошеними кутами на поверхні мікрошліфа, щоб під час полірування не рвати сукно, розміри зразків: діаметр 10-20 мм або сторона квадрата 10-20 мм при висоті 10-15 мм. Зразки вирізають як на токарному, фрезерувальному або стругальному верстатах. З металів і сплавів, що мають

високу твердість із складною оброблюваністю, зразки вирізають на тих же верстатах з застосуванням нормального різального інструменту, виготовленого із твердих або надтвердих сплавів або за допомогою тонкого наждачного круга, а також електроіскрового різання.

При механічній обробці повинні бути вжиті заходи, що запобігають перегріванню зразка, якщо це пов'язано зі зміною структури. Виготовлення мікрошліфа зводиться до послідовного виконання наступних операцій: - вирівнювання поверхні зрізу або зламу грубим шліфуванням; - тонке шліфування; - полірування.

Шліфування виконується на абразивних кругах. При шліфуванні на абразивних кругах слід застосовувати інтенсивне охолодження. Шліфування закінчують після повного вирівнювання всієї поверхні зрізу (шліфа). Шліфування виконується на 4-5 номерах шліфувального паперу, який обирається в залежності від властивостей оброблюваного матеріалу.

Поліруванням видаляють дрібні дефекти поверхні, риски, що залишилися після шліфування. Полірування виконується на спеціальному полірувальному верстаті, диск якого обтягнутий фетром, сукном або оксамитом. Диск верстата змочують полірувальною рідиною, що складається з води, в якій знаходяться частинки полірувального порошку: окису алюмінію або оксиду хрому [12].

Щоб виявити структуру, слід створити рельєф або пофарбувати в різні кольори структурні складові, що досягається зазвичай хімічним травленням. При травленні кислота в першу чергу впливає на межі фаз і зерен, як місця, що мають найбільш дефектну будову і які на протравленому шліфі стануть заглибленнями. Світло, яке падає буде розсіюватися, і в поле зору мікроскопу вони будуть здаватися темними, а тіло зерна - світлим.

Виявлення мікроструктури. Для виявлення мікроструктури на приготованих мікрошліфах зазвичай необхідно використовувати один з методів травлення. Найбільш часто застосовують метод травлення в розчинах кислот, лугів і солей, які викликають вибіркоче розчинення металевих або

інших фаз, а також їх граничних ділянок внаслідок відмінності фізико-хімічних властивостей.

Дослідження мікроструктури проводили на металографічному мікроскопі МИМ-7 (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – Металографічний мікроскоп МИМ-7.

В металографічному мікроскопі МИМ-7 мікрошліф освітлюється спеціальною освітлювальною системою, що складається з джерела світла, серії лінз, світлофільтрів і діафрагм.

Світло потрапляє на поверхню досліджуваного зразка, після відбивання спрямовується в об'єктив мікроскопа і через систему лінз та окуляр – до ока спостерігача. Об'єктив дає дійсне збільшене зображення структури зразка [12].

Це зображення за допомогою лінзи переноситься в площину, близьку до фокуса окуляра.

Окуляр збільшує зображення, отримане об'єктивом, в результаті чого остаточне зображення виходить уявним, зворотним, збільшеним і знаходиться на відстані 250 мм від ока спостерігача.

2.2.2 Визначення неметалевих включень

Неметалеві включення визначають відповідно до методики зазначеній у Держстандарті [13]:

- методом Ш (варіанти Ш1-Ш14) - порівнянням з еталонними шкалами, застосовується для випробування деформованого металу;
- методом К (варіанти К1-К2) - підрахунком кількості включень, застосовується для випробування деформованого і литого металу;
- методом П (варіанти П1-П4) - підрахунком кількості і об'ємного відсотка включень, застосовується для випробування деформованого і литого металу;
- методом Л (варіанти Л1-Л2) - лінійним підрахунком включень; застосовується для випробування лиття.

Оцінку неметалевих включень за методом Ш деформованого металу діаметром або товщиною не менше 6 мм проводять під мікроскопом порівнянням з еталонними шкалами табл. (2.4) при перегляді всієї площі нетравлених шліфів з повздовжнім напрямком волокон.

Таблиця 2.4

П'ятибальна шкала класифікує такі види неметалевих включень:

оксиди рядкові	- ОС
оксиди точкові	- ОТ
силікати крихкі	- СХ
силікати пластичні	- СП
силікати не деформовані	- СН
сульфіди	- С
нітриди і карбонітриди рядкові	- НС

нітриди і карбонітриди точкові	- НТ
нітриди алюмінію	- НА

2.2.3 Методи дослідження твердості

Під твердістю розуміють властивість поверхневого шару матеріалу чинити опір пружній і пластичній деформації або руйнуванню при місцевих контактних діях з боку іншого, твердішого і не набуваючого залишкової деформації тіла (індентора) певної форми і розміру. Прилад для вимірювання твердості по Роквеллу (рис. 2.2) .



Рисунок 2.2 – Прилад для вимірювання твердості по Роквеллу.

Твердість визначають по глибині відбитка. За одиницю твердості по Роквеллу прийнята умовна величина, відповідна осьовому переміщенню наконечника на 0,002 мм. При випробуванні твердість можна вимірювати за трьома шкалами: А, В і С.

Залежно від твердості випробовуваного матеріалу застосовують два типи наконечників: сталеву кульку діаметром $1,588 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$ для вимірювання твердості при сумарному навантаженні 100 кгс (1000 Н) – шкала В, або алмазний конус із кутом біля вершини $120^\circ \pm 30$ і радіусом закруглення біля вершини конуса $0,200 \pm 0,005 \text{ мм}$ для вимірювання твердості металів при

сумарному навантаженні 150 кгс (1500 Н) – шкала С і 60 кгс (600 Н) – шкала А. Число твердості по Роквеллу позначається HR (А,В,С).

2.2.4 Випробування на мікротвердість

Визначення мікротвердості здійснювали від краю поверхні покриття до основи з захватом перехідної зони [12].

При дослідженні мікротвердості матеріалу проникненням застосовували навантаження 0,196; 0,490; 0,981 Н (гирі вагою 20; 50; 100 г).

Визначення мікротвердості захисних покриттів здійснювали на приладі ПМТ-3 (рис. 2.3). Розмір відбитка, що може бути якісно виміряний на цих приладах складає 3 - 4 мкм.



Рисунок 2.3 – Мікротвердомір ПМТ-3 (фото)

На основі отриманих даних визначають середнє значення мікротвердості, яке обчислюють за формулою:

$$HV = 1,854 \cdot P/d^2 \quad (2.1)$$

де P – величина навантаження, кг · с;

d – довжина діагоналі, мм².

2.2.5 Електронна мікроскопія

Особливості будови мікроструктури визначаються за допомогою методів рентгеноспектрального аналізу та растрової електронної мікроскопії.

Метою рентгеноспектрального аналізу є встановлення відповідності між атомною структурою дослідного зразка та просторовим розподілом рентгенівського випромінювання, розсіяного зразком [14].

Растровий електронний мікроскоп дозволяє проводити неруйнівне дослідження масивних зразків та мікропроб в твердій фазі, як спеціально підготовлених, так і в природному вигляді. Сканування поверхні зразка здійснюється з допомогою електронного пучка діаметром кілька нанометрів і з енергією електронів 0,2-40 кВ. Діапазон зміни кратності збільшення становить 10 – 300000, а роздільна здатність – 5,0 нм. Для запобігання накопичення паразитичного заряду внаслідок опромінення електронами під час отримання зображення за допомогою растрового електронного мікроскопа, зразок вкривали тонким графітовим шаром, прозорим для електронного пучка.

Растрові електронні мікроскопи (РЕМ) із системою мікроаналізу широко використовуються у матеріалознавстві для дослідження поверхні твердих металічних та неметалічних зразків. Зображення в растровому електронному мікроскопі отримують, скануючи пучком первинних електронів зонду поверхню зразку. Для такого сканування в конструкції РЕМ є система відхилення променя, яка складається із електромагнітних котушок, які розштовхують пучок первинних електронів (зонд) із боку в бік.

Таким чином, електронний зонд сканує поверхню об'єкту рядок за рядком, формуючи растрове зображення об'єкту. При попаданні первинного електронного променя в яку-небудь ділянку зразку відбувається вибивання із його матеріалу вторинних електронів і вихід відображених електронів первинного пучка [14].

Обидва види сигналу реєструються відповідними детекторами, які виводять результат на екран монітору. Яскравість зображення ділянки на

екрані залежить від кількості виходів електронів. Високий вихід електронів із зразку дає світлу ділянку зображення на екрані, малий вихід відповідає темній ділянці. Величина сигналу визначається струмом зонду, топографією поверхні, елементним складом, кристалографічною структурою та іншими властивостями.

Для проведення електронного мікроаналізу використовується растровий електронний мікроскоп-мікроаналізатор РЭММА 102-02 (рис. 2.3).



Рисунок 3.3 – Растровий електронний мікроскоп-мікроаналізатор РЭММА102-02.

Зразки для РЕМ можуть бути підготовлені за допомогою звичайних методів шліфування та полірування, аналогічних методам підготовки шліфів для металографічних досліджень. Перед випробуванням зразки повинні бути ретельно очищені для запобігання утворенню газоподібних продуктів, які ускладнюють отримання необхідного вакууму при відкачуванні мікроскопа і забруднюють його колону. Рекомендується проводити очищення зразків у різних розчинниках з використанням ультразвуку [14].

2.3 Установка для нанесення захисних покриттів

В даній роботі був використаний спосіб азотування зразків в вакуумно-дуговому газовому розряді. Цей спосіб реалізується в установці з вакуумною камерою, забезпеченою дуговими випарниками. На рис. 2.4 приведена схема установки «Булат-6», призначеної для азотування в дуговому газовому розряді. Азотування проводилося після попереднього відкачування до тиску 0,003 Па і тиску азоту (при напуску азоту) 0,3 Па. Регулюючи позитивний потенціал в межах від 100 до 150 В; протягом однієї години підтримувалась температура азотування 650-700 °С [15].

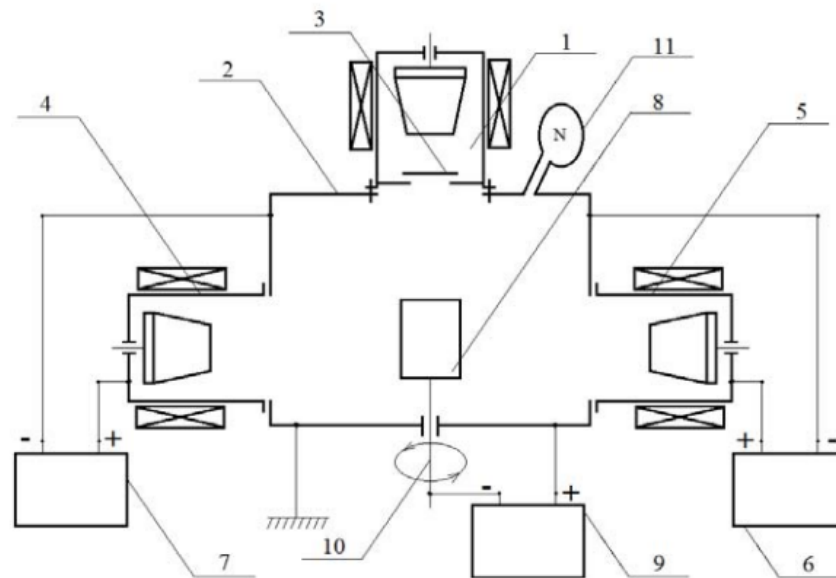


Рисунок 2.4 – Принципова схема вакуумно-дугової установки типу «Булат-6» для іонного азотування: 1, 4, 5 – вакуумно-дугові випарники; 2 – вакуумна камера; 3 – щілинний екран; 6, 7 – джерела живлення газового розряду; 8 – азотовані вироби; 9 – високовольтне джерело; 10 – поворотний пристрій; 11 – натікач [15]

Технологія іонно-плазмового азотування має такі переваги: нагрівання відбувається за рахунок енергії розряду, що тліє; при циклічному нагріванні та охолодженні деталі в поверхневому шарі виникають термічні напруги, які у два-три рази прискорюють дифузійні процеси, і, відповідно, скорочується час

технологічної обробки; форма та розміри деталі, а також чистота її поверхні залишаються без змін, що виключає необхідність фінішної обробки поверхні [12].

2.4 Випробування втомної міцності

Вплив іонно-плазмового азотування на опір втоми сплаву ЖС6У досліджували на зразках із круглим поперечним перерізом типу 1 згідно [15] (рис. 2.5).

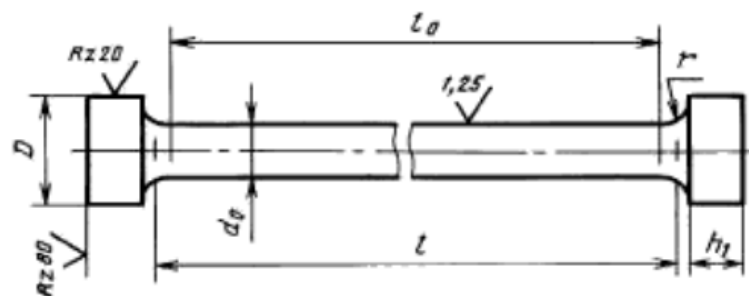


Рисунок 2.5 – Зразок для випробувань на втомну міцність

Вибір цього типу зразків обумовлений тим, що при випробуванні локалізується місце руйнування при консольному закріпленні на вібростенді, що зручно, так як виключається можливість прояву різних крайових ефектів.



Рисунок 2.6 – Електромеханічна універсальна випробувальна машина на розтягування ТМЕ-6040/110

Повністю автоматична електромеханічна універсальна випробувальна машина для випробування на розтяг є багатофункціональною універсальною машиною, яка задовольняє вимогам для розтягування, стиснення випробування на вигин під навантаженням або контролем зміщення для широкого спектру матеріалів, основні характеристики наведені в таблиці 2.4.

Електромеханічні універсальні випробувальні машини можуть бути використані для випробування на розтягування на будь-якому матеріалі, таких як: метал, пластик, текстиль, дерево, використовуючи відповідне приладдя. Ці машини також можуть бути використані для загального стиснення, вигину, випробування на сталь, ґрунту, бетону, цементу, асфальту та інших подібних матеріалів, за допомогою відповідного приладдя [13].

Таблиця 2.4

Основні характеристики універсальної випробувальної
машини ТМЕ-6040/110 [13]

Межа навантаження	33 кН
Максимальний вертикальний робочий простір (без приладдя)	900 мм
Відстань між колонами	600 мм
Хрестова	200 мм
Діапазон швидкості	0-750 мм / хв
Навантаження Швидкість	0,001-2 кН/с (залежно від жорсткості зразка)
Клас 1	Клас 1, починаючи з 1% ємності
Дозвіл датчика	0,001 мм
Точність датчика	0,01 мм
Габарити	1300x660x2300 мм
Маса	1100 кг

Висновки до розділу 2

У розділі представлені дані про фізико-механічні властивості жароміцного нікелевого сплаву ЖС6У (ХН57ВКЮТМБЛ) і визначено методи проведення випробування.

Для дослідження металографічних характеристик жароміцного нікелевого сплаву, було вибрано засоби, що дозволяють провести оптимальні дослідження структури матеріалів лопатки турбіни ГТД.

Розглянуті методи дослідження мікроструктури сплаву: металографічний аналіз; визначення неметалевих включень; дослідження твердості; випробування на мікротвердість; електронна мікроскопія.

Методом нанесення захисних покриттів було обрано технологію іонно-плазмового азотування, яка має такі переваги: нагрівання відбувається за рахунок енергії розряду, що тліє; при циклічному нагріванні та охолодженні деталі в поверхневому шарі виникають термічні напруги, які у два-три рази прискорюють дифузійні процеси, і, відповідно, скорочується час технологічної обробки; форма та розміри деталі, а також чистота її поверхні залишаються без змін, що виключає необхідність фінішної обробки поверхні.

Вплив іонно-плазмового азотування на опір втоми сплаву ЖС6У досліджували на повністю автоматичній електромеханічній універсальній випробувальній машині.

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Аналіз впливу структури та фазового складу на властивості жароміцних сплавів

Активний розвиток ливарних жароміцних сплавів на основі нікелю 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. Для сплаву ЖС6У це $Ni_3(Al,Ti)$ [16].

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 .

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

Спрямована кристалізація є одним з найбільш важливих технологічних досягнень, яке забезпечує надійну роботу ГТД. Також проводиться додаткова термічна обробка для збільшення надійності лопаток та нанесення захисних покриттів від корозії та окислення [16].

Факторами, які визначають якість та службові властивості жароміцних сплавів, є фазовий склад, ступінь однорідності, морфологія та топографія зміцнювальних фаз.

На властивості нікелевого сплаву ЖС6У великий вплив виявляє 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, залежить 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 [14-15].

У зв'язку з цим, важливим параметром, який 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 [16].

3.2 Проведення термічної обробки та іонно-плазмового азотування промислового жароміцного сплаву

Для проведення досліджень запропоновано економнолегований жароміцний сплав, призначений для виготовлення литих лопаток турбін методом високошвидкісної спрямованої кристалізації, який відрізняється збалансованою системою легування та не містить в своєму хімічному складі коштовного імпортного ренію.

Аналітичні та експериментальні дослідження проводили на зразках промислового жароміцного сплаву ЖС6У, які були отримані методом високоточного вакуумного лиття жароміцного сплаву з спрямованою

кристалізацією (отримання монокристалу) по моделі, що виплавляється, з подальшим високоточним формуванням методом пластичної деформації.

Проведена вакуумна термічна обробка досліджуваних зразків виготовлених з жароміцного сплаву ЖС6У (таблиця 3.1) у печі типу А/ВОК1300-1288 з послідуєчим зміцненням поверхні іонно-плазмовим азотування при температурі 550 °С.

Таблиця 3.1

Режими термічної обробки та іонно-плазмового азотування зразків зі сплаву ЖС6У

Марка матеріалу	Вид термічної обробки	Температура, °С	Час витримки, годин	Охолоджуюче середовище
ЖС6У	Гартування	1220-1280 °С	1 год.	повітря
	Старіння	950 °С	7 год.	повітря
	Іонно-плазмове азотування	550 °С	3 год.	-

Таблиця 3.2

Результати вимірювання твердості на зразках зі сплаву ЖС6У після термічної обробки та іонно-плазмового азотування

Марка матеріалу	Вид обробки	Твердість, HRC
ЖС6У	Гартування	32-34
	Старіння	33-35
	Іонно-плазмове азотування	68-70

Режими термічної обробки та іонно-плазмового азотування зразків зі сплаву ЖС6У наведені в таблиці 3.1 та рисунку 3.1. Результати вимірювання твердості на зразках зі сплаву ЖС6У після термічної обробки і іонно-плазмового азотування наведені в таблиці 3.2.



Рисунок 3.1 – Графік режиму термічної обробки зразків зі сплаву ЖС6У

Гартування проводилось при температурах 1220-1280 °С у вакуумі протягом 1 години, охолодження на спокійному повітрі.

Зміцнююча γ' -фаза виділяється в основному в процесі охолодження.

Процес старіння проводили при температурі 950 °С протягом 7 годин, охолодження – повітря. Під час цієї термічної операції відбувається додаткове незначне виділення частинок γ' -фази та зміцнення сплаву.

Поверхнєве зміцнення проводили шляхом іонно-плазмового азотування зразків зі сплаву ЖС6У при температурі 550 °С впродовж 3 годин.

Термічна обробка ливарних сплавів проводиться обов'язково.

Так як з її допомогою забезпечується оптимальний комплекс експлуатаційних властивостей і усуваються залишкові ливарні напруження.

Нікелеві жароміцні сплави піддаються термічній обробці двох видів:

- 1) обробка на твердий розчин, з метою розчинити виділення \square' -фази, щоб потім викликати її повторне виділення у вигляді більш тонких та рівномірно розподілених частин та тим самим збільшити міцність металу;
- 2) старіння з метою отримати додаткові виділення \square' -фази або карбідні та боридні фази по границях зерен [18].

3.3 Дослідження мікроструктури

Макроструктура відливки нікелевого сплаву наведена на рисунку 3.2.

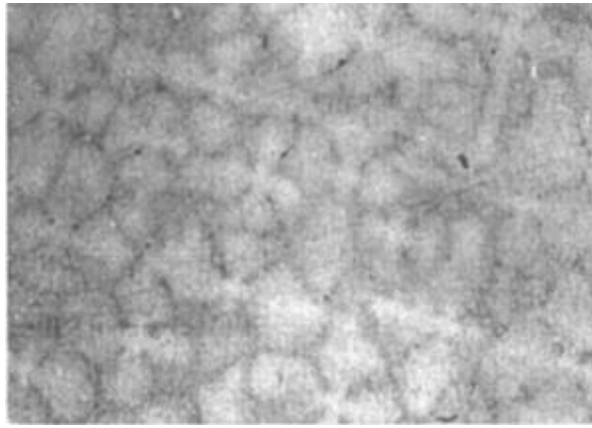


Рисунок 3.2 – Макроструктура відливки нікелевого сплаву, збільшення 50 разів

В ливарному металі частини \square' -фази, які виділяються помітно відрізняються за розміром. Це обумовлено дендритною ліквідацією: при кристалізації дендритний розплав збагачується \square - утворюючими елементами, що призводить до збільшення розміру та об'єму \square' -виділень в між дендритних областях [19].

З досліджуваних зразків були виготовлені мікрошліфи. При металографічному дослідженні на нетравлених мікрошліфах в матеріалі виявлені мікропори і усадкові рихлоти, а також поодинокі оксидні включення (рис. 3.3).

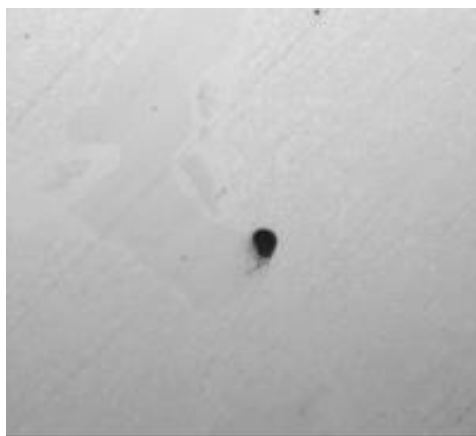


Рисунок 3.3 – Мікропора виявлена на мікрошліфі з жароміцного нікелевого сплаву, збільшення 500 разів

Крім того, в сплаві є дрібні включення сферичної форми розміром 1 бал за шкалою Ш, характерні для точкових оксидів (рис. 3.4).



Рисунок 3.4 – Виявлені неметалеві включення, характерні для точкових оксидів, на мікрошліфі з жароміцного нікелевого сплаву, збільшення 500 разів

Мікроструктурним аналізом після травлення зразків виявлено, що основними структурними складовими матеріалу термічно оброблених зразків з дослідного жароміцного нікелевого сплаву є: γ -твердий розчин з наявністю інтерметалідної γ' -фази і евтектичної (γ - γ')-фази (рис. 3.5).

Структури, характерні для перегрітого стану нікелевого жароміцного сплаву, не виявлені.

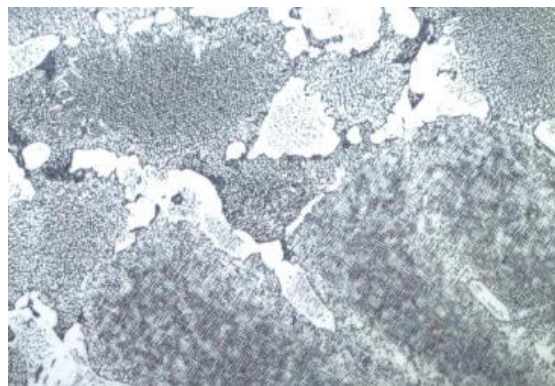


Рисунок 3.5 – Мікроструктура нікелевого сплаву ЖС6У після гартування: γ -твердий розчин з наявністю інтерметалідної γ' -фази і евтектичної (γ - γ')-фази, збільшення 500 крат.



Рисунок 3.6 – Мікроструктура сплаву ЖС6У після старіння при збільшенні 300 (а) і 800 (б): 1 - γ -фаза, зміцнена високодисперсними частками γ' -фази; 2 - γ' -фаза евтектичного походження; 3 - високодисперсні частки γ' -фази; 4 - виділення глобулів γ' -фази евтектичного походження.

Гартування проводиться з метою розчинити виділення \square' -фази, щоб потім викликати її повторне виділення у вигляді більш тонких та рівномірно розподілених частин та тим самим збільшити міцність металу, структура після гартування зображена на рисунку 3.5.

Старіння проводять з метою отримати додаткові виділення \square' -фази або карбідні та боридні фази по границях зерен. В ливарному металі частини \square' -фази, які виділяються помітно відрізняються за розміром, структура після старіння зображена на рисунку 3.6.

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 рf, забезпечення цих вимог.

При проведенні термічної обробки відбулися наступні структурні перетворення:

- розчинення зміцнювальних частин \square' -фази;
- повне або часткове розчинення грубих виділень евтектичної \square' -фази при температурі гомогенізації;
- вирівнювання хімічних складів осей дендритів та міжосьових просторів;
- розчинення нерівноважної \square - \square' - евтектичної фази, яка завжди є присутньою в структурі після лиття.

3.4 Дослідження впливу іонного азотування на мікроструктуру сплаву

В роботі розглянуто вплив іонно-плазмового азотування на мікротвердість сплаву ЖС6У.

Іонно-плазмове азотування забезпечує дифузійне насичення поверхневого шару сплаву азотом в азотно-водневій плазмі при температурах 400–700°C.

Під час досліджень іонно-плазмового азотування зразків зі сплаву ЖС6У проводили при температурі 550 °C впродовж 3 годин, товщина шару 7,5-8 мкм, твердість азотованого шару 68-70 HRC (HV 1100-1000). Розподіл мікротвердості після іонного азотування по глибині зразка наведено в таблиці 3.4.

Принцип дії іонно-плазмового азотування полягає в тому, що в розрядженому ($P = 150\text{--}1000$ Па) азотовмісному газовому середовищі між катодом – деталями і анодом – стінками вакуумної камери – викликається аномальний тліючий розряд, який утворює активне середовище (іони, атоми), що забезпечує формуванню азотованого шару [19].

Технологічними факторами, які впливають на ефективність іонного азотування, є температура процесу, тривалість насичення, тиск, склад і витрати робочої газової суміші.

Після іонно-плазмового азотування мікроструктурним аналізом виявлено тонкий шар, що відрізняється від основи відтінком (рис.3.7).

Мікротвердість вимірювали на приладі ПМТ-3 на підготовлених мікрошліфах.

Таблиця 3.4

Розподіл мікротвердості після іонного азотування

Номер заміру	Відстань від поверхні, мкм	Мікротвердість H_{μ} , кгс/мм ²	Тип поверхні
1	3	1100	шар TiN
2	5	1100	
3	8	1000	
4	100	350	Основний метал
5	140	350	
6	240	350	

Не зважаючи на те, що мікроструктура поверхневої зони сплаву після іонного азотування наближена до загартованої, тобто має в своєму складі значно менше зміцнюючих фаз, її мікротвердість майже в 2 рази вища. Це можна пояснити саме утворенням твердого розчину азоту та кисню в нікелі та впливом дії плазми.

Необхідно відзначити, що структура поверхневого шару після іонно-плазмового азотування, значно більш гомогенна, ніж вихідна [19]. Вона наближена до структури загартованого та не зістареного сплаву. Товщина дифузійного шару після плазмового азотування складає 8-9 мкм.

Вимірювання мікротвердості проводили на приборі ПМТ-3 при навантаженні 0,1 кг. Розрахунок мікротвердості проходили за допомогою формул.

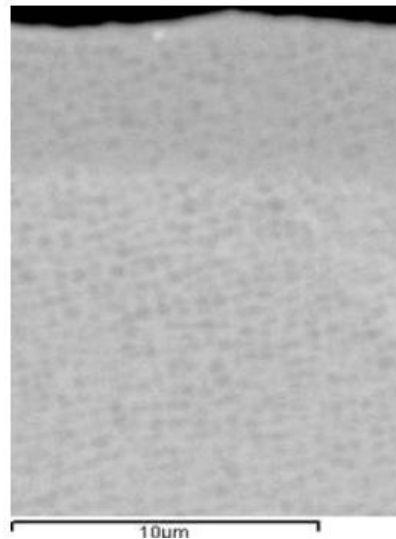


Рисунок 3.7 – Електронні мікрофотографії поверхневого шару сплаву ЖС6У після іонно-плазмового азотування

Розподіл мікротвердості по товщині поверхневого шару сплаву ЖС6У зображено на рис. 3.8.

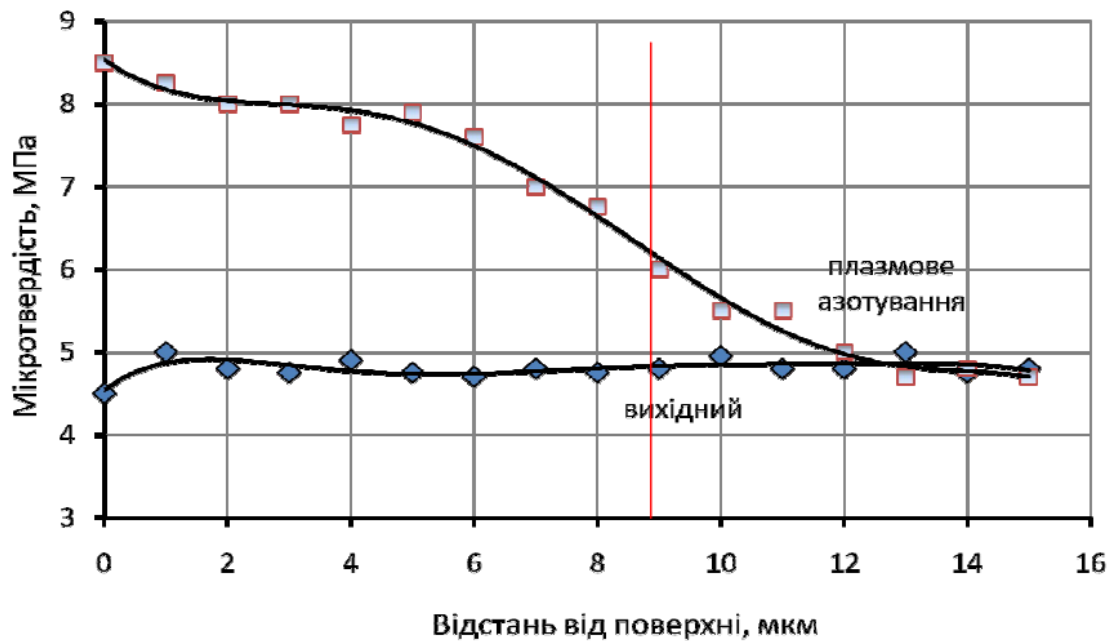


Рисунок 3.8 – Розподіл мікротвердості по товщині поверхневого шару сплаву ЖС6У: червоним – зразок після іонно-плазмового азотування, синім – вихідний зразок.

Ефекти плазмової обробки досягаються як тепловою, так і механічною дією плазми (бомбардуванням виробу частинками плазми, що рухаються з дуже високою швидкістю - так званий швидкісний натиск плазмового потоку) [19].

При цьому активується як поверхня, що насичується, так і самі атоми активного азоту отримують більшу енергію та здатність дифундувати в основу. Ці ефекти також вносять свою долю в підвищення мікротвердості поверхневого шару.

3.5 Результати випробувань втомної міцності сплаву ЖС6У

Випробування на втому проводили на установці на основі електродинамічного вібратора за методикою описаної в [15].

Вплив іонно-плазмового азотування поверхні зразків оцінювали при порівняльних випробуваннях на втому та зразків у вихідному стані.

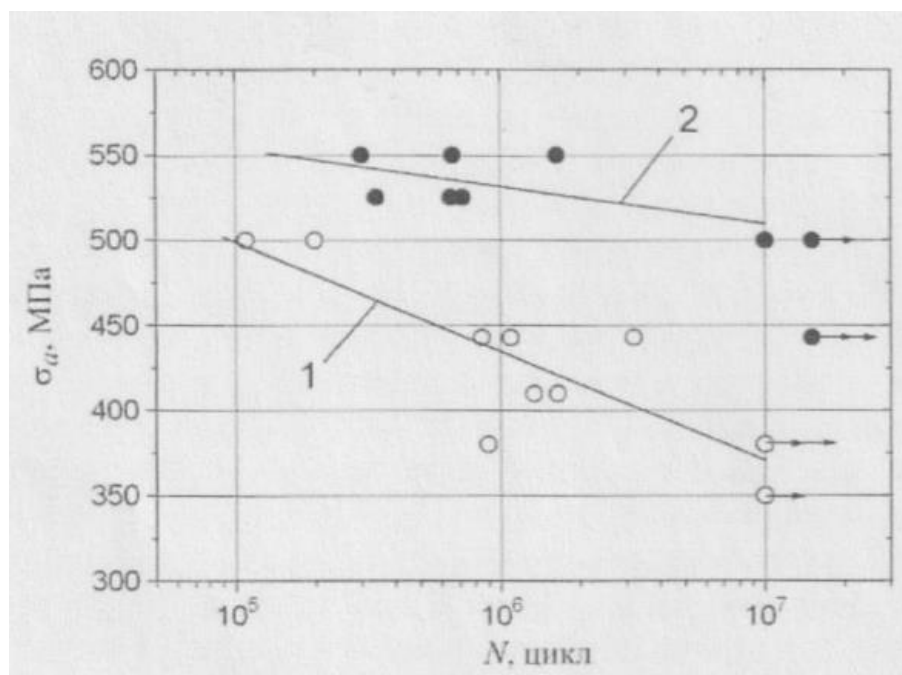


Рисунок 3.9 – Результати випробувань на втому зразків у вихідному стані (1) та після іонно-плазмового азотування (2).

Результати випробувань зразків із різним станом поверхні наведено на рис. 3.9. Характеристики їхньої статистичної обробки, отримані при побудові кривих втоми у вигляді лінії регресії:

$$\sigma_a = A + B \lg N \quad (3.1)$$

де σ_a - амплітуда напруги;

N - число циклів до руйнування при σ_a : A і B коефіцієнти лінії регресії, визначені при мінімізації квадратів відхилень величин $\lg N$ [15], представлені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5

Результати випробувань втомної міцності зразків

зразок	$n_{\text{сум}}/n_{\text{руйн.}}$	$r_{i/i}$	$A + B \lg N$		σ^{-1} , МПа на базі 107 циклів
			A	B	
Після термічної обробки	15/9	-0,9867	978,45	-85,62	456
Після іонно-плазмового азотування	15/6	0,7354	797,54	-28,54	600

де $n_{\text{сум}}$ – кількість випробувань зразків;

$n_{\text{руйн.}}$ – кількість зруйнованих зразків;

$r_{i/i}$ – коефіцієнт кореляцій;

σ_{-1} – межа витривалості.

Аналіз результатів показує, що всі зразки після термічної обробки і іонно-плазмового азотування вистояли або зруйнувалися при більш високих рівнях напружень.

Межа витривалості на основі 107 циклів, зразків після термічної обробки, дорівнює $\sigma_{-1} = 456$ МПа, зразків після іонно-плазмового азотування $\sigma_{-1} = 600$ МПа, тобто на 32% вище.

Таке збільшення характеристик опору втоми зразків забезпечує тонкий (глибина 8-9 мкм) поверхневий шар, який утворився в результаті іонно-плазмового азотування.

Сформований зміцнений шар сприяє уповільненню процесу розсіяного накопичення пошкоджень при циклічному навантаженні зразка і гальмування поширення тріщин втоми.

Фрактографічному дослідженню підлягали зразки сплаву ЖС6У у стані після термічної обробки та після іонно-плазмового азотування, які пройшли випробування на втомну міцність та були зруйновані при різних кількостях циклів навантажень.

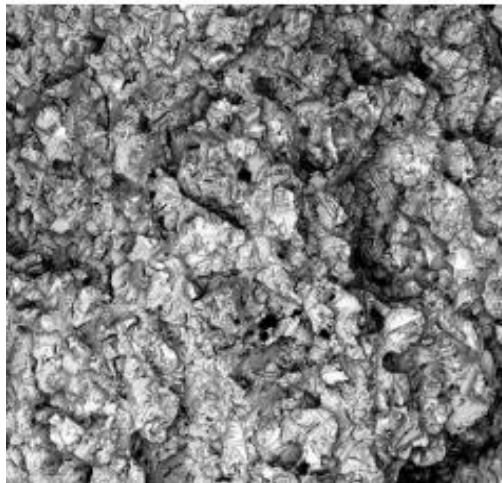


Рисунок 3.10 – Фрактографічне дослідження зламів зразків, х400.

Злами зразків після руйнування ідентичні для обох варіантів і мають характерну класичну будову зламу. Виражених вогнищ руйнування, як і зон долому, немає, будова зламів однакова у всьому перерізі руйнації. Характер руйнувань в'язкий (рис. 3.10). Суттєвої різниці у будові зламів на зразках не виявлено.

Висновки до розділу 3

Аналітичні та експериментальні дослідження проводили на зразках промислового жароміцного сплаву ЖС6У, які були отримані методом високоточного вакуумного лиття жароміцного сплаву з спрямованою кристалізацією (отримання монокристалу) по моделі, що виплавляється, з подальшим високоточним формуванням методом пластичної деформації.

На властивості нікелевого сплаву ЖС6У великий вплив чинить 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 сплаву.

На першому етапі була проведена вакуумна термічна обробка досліджуваних зразків виготовлених з жароміцного сплаву ЖС6У.

Гартування проводилось при температурах 1220-1280 °С у вакуумі протягом 1 години, охолодження на спокійному повітрі. Зміцнююча γ' -фаза виділяється в основному в процесі охолодження.

Процес старіння проводили при температурі 950 °С протягом 7 годин, охолодження – повітря. Під час цієї термічної операції відбувається додаткове незначне виділення частинок γ' -фази та зміцнення сплаву.

Дослідження твердості після термічної обробки показали, що показники твердості після старіння змінились не суттєво. Твердість після гартування становила 32-34 HRC, після старіння 33-35 HRC. Це можна пояснити тим, що після старіння відбувається додаткове незначне виділення частинок γ' -фази та, як наслідок, незначне зміцнення сплаву.

Мікроструктура після гартування являє собою багатокомпонентний твердий розчин на основі нікелю, зміцнений дисперсними частинками інтерметалідної фази на основі $Ni_3(Al, Ti)$. В результаті старіння всередині кристалічної структури проходить розпад пересиченого твердого розчину, що підвищує міцність металу.

При металографічному дослідженні на нетравлених мікрошліфах в матеріалі виявлені мікропори і усадкові рихлоти, а також поодинокі оксидні включення. Крім того, в сплаві є дрібні включення сферичної форми розміром 1 бал за шкалою Ш, характерні для точкових оксидів.

Другим етапом проведених досліджень була оцінка впливу зміцнюючої обробки на розподіл мікротвердості по товщині зміцненої зони. Після проведення операції іонно-плазмового азотування зразків зі сплаву ЖС6У при температурі 550 °С впродовж 3 годин, на приборі ПТТ-3 визначили товщина шару, яка становила 7,5-8 мкм, та твердість азотованого шару 68-70 HRC (HV 1100-1000).

Встановлено, що мікроструктура поверхневого шару після іонно-плазмового азотування, значно більш гомогенна, ніж вихідна. Вона наближена до структури загартованого та не зістареного сплаву, тобто має в своєму складі значно менше зміцнюючих фаз, її мікротвердість майже в 2 рази вища. Це можна пояснити саме утворенням твердого розчину азоту та кисню в нікелі та впливом дії плазми.

За результатами досліджень зразків на втомну міцність встановили, що втомна міцність зразків після термічної обробки на 32% нижче, ніж втомна міцність зразків після іонно-плазмового азотування. Таке збільшення характеристик опору втоми зразків забезпечує тонкий (глибина 8-9 мкм) поверхневий шар, який утворився в результаті іонно-плазмового азотування і гальмування поширення тріщин втоми.

Фрактографічне дослідження показало, що злами зразків після термічної обробки та після іонно-плазмового азотування мали в'язкий характер руйнувань. Злами зразків після руйнування ідентичні і мають характерну класичну будову.

РОЗДІЛ 4

ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Загальні теоретичні відомості

Конкуренстоспроможність та економічна ефективність авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД) визначається рівнем їх надійності. Лопатки є одним з найбільш напружених елементів та представляють максимальну потенційну небезпеку з точки зору вторинних руйнувань елементів конструкції [19].

Основними причинами виходу з ладу лопаток газотурбінних двигунів є: високі рівень температурних, вібраційних, динамічних, тривалих статичних, ізотермічних та неізотермічних навантажень.

Жароміцні сплави на нікелевій основі знайшли широке застосування під час виготовлення газотурбінних двигунів, головним чином, у вигляді робочих і соплових лопаток. В результаті складного легування у сплавів цієї групи досягнуто найвищі жароміцні властивості. Сплави на нікелевій основі використовують в якості жароміцних матеріалів, які призначені для роботи при температурах від 700 до 1100°C [5].

Актуальність теми. Дослідження особливостей формування структури жароміцних нікелевих сплавів є актуальним сучасним завданням при проектуванні і виробництві деталей газотурбінних двигунів.

Мета роботи – аналіз структури жароміцного нікелевого сплаву для лопаток газотурбінного двигуна, дослідження його фізико-механічних властивостей на різних етапах термічної та поверхневої обробки.

Завдання дослідження. Провести аналіз жароміцних нікелевих сплавів для лопаток газотурбінного двигуна; дослідити вплив режимів термічної обробки та поверхневої обробки на структуроутворення жароміцних нікелевих сплавів для лопаток газотурбінного двигуна; на основі отриманих результатів зробити висновки та розробити рекомендації для впровадження у виробництво.

Тип НДР відповідно до класифікації відповідає пошуковим дослідженням. Пошукові – це дослідження, спрямовані на аналіз і розвиток фундаментальних досліджень для встановлення можливості і необхідності їх практичного застосування в певних областях техніки і технології. Результатом пошукових досліджень повинні бути рекомендації по створенню нових продуктів і нових технологічних процесів [19].

Взаємозв'язок даної НДР з попередніми роботами подібного спрямування – немає.

4.2 Методика розрахунку витрат

1. Склад витрат на проведення НДР.

Витрати на проведення дослідних і експериментальних робіт є підготовчими і складаються з наступних складових: витрати на постановку задачі дослідження (літературний огляд, вивчення патентів тощо) [19];

- витрати на лабораторні дослідження;
- витрати на дослідне виробництво (проекування і спорудження дослідної установки), отримання і випробування дослідної партії продукту, вивчення відходів виробництва і техніко-економічна оцінка процесу;
- витрати на промислове проектування.

2. Матеріальні витрати.

Вартість витрачених в процесі дослідження основних і допоміжних матеріалів та реактивів розраховується, виходячи з їх фактичної витрати та цін за формулою [19]:

$$V_m = V \cdot C, \text{ грн} \quad (4.1)$$

де, V – витрата даного виду матеріальних ресурсів, одиниць вимірювання;

C – ціна за одиницю вимірювання даного виду матеріальних ресурсів, грн.

Розрахунок представлений в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Вартість матеріалів

Найменування матеріалу	Одиниця вимірювання	Ціна, грн. За одиницю виміру	Фактична кількість	Сума, грн.
Пруток жароміцного сплаву на основі нікелю	м	1300,00	0,1	130,00
Аміак газоподібному стані	л	16	27,75	444,00
Разом				574,00

Вартість палива та електроенергії, витрачених в процесі дослідження, розраховується аналогічно витратам на матеріали. Витрати на електроенергію визначаються, виходячи з потужності обладнання, часу його роботи і ціни 1 кВт·год, за формулою [19]:

$$V_e = M \cdot n \cdot T \cdot Ц, \text{ грн,} \quad (4.2)$$

де, M – потужність обладнання або електроприладу (за паспортом), кВт;

n – кількість застосованого обладнання, шт.;

T – час роботи обладнання, год.;

$Ц$ – ціна 1 кВт·год електроенергії, грн.

Розрахунок представлений в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Вартість електроенергії

Найменування матеріалу	Потужність, кВт	Час роботи обладнання, год.	Ціна 1 кВт·год електроенергії, грн.	Сума, грн.
вакуумний піч	0,5	8	4,32	34,56
Установка Булат-6	1	7	4,32	30,24
Разом				64,80

3. Оплата праці.

Витрати на заробітну плату складаються з заробітної плати виконавця, керівника, залучених осіб (лаборанта та терміста).

Витрати на заробітну плату виконавця (Зв) роботи визначаються множенням розміру місячної стипендії на число місяців, що були витрачені на виконання науково-дослідної практики та кваліфікаційної магістерської роботи.

Для керівника і консультантів, а також науково-технічного персоналу (інженери, лаборанти) – виходячи з посадових окладів з усіма надбавками і нормативів часу.

Заробітна плата керівника роботи ($Z_{кер}$) визначена, виходячи зі ставок погодинної оплати праці науково-педагогічного персоналу за проведення навчальних занять і норми витрат його робочого часу на одну випускную роботу студента рівня підготовки «магістр» для денної форми навчання (12 год/чол.). Заробітна плата залучених осіб (терміста і лаборанта) визначається, виходячи з розміру мінімальної заробітної плати у погодинному вираженні і витрат їх робочого часу при проведенні досліджень.

Таблиця 4.3

Витрати на заробітну плату

Посада	Ставка погодинної оплати праці, грн.	Відпрацьований час, год.	Сума, грн.
Доцент	182,12	12	2 913,92
Разом			2 913,92

4. Інші витрати

Інші витрати визначаються в розмірі 25% від суми прямих витрат. До них відносяться загальноуніверситетські витрати на амортизацію і ремонт обладнання та адміністративно-управлінського персоналу, закупівлю канцелярського приладдя тощо.

Витрати на спеціальне обладнання, придбане для даної НДР, послуги сторонніх організацій (проведення аналізів і випробувань, комп'ютерне моделювання тощо), витрати на відрядження враховуються на фактичному рівні [19].

Таблиця 4.4

Кошторис витрат на науково-дослідницьку розробку

Найменування статті витрат	Сума, грн.	Частка даної статті у загальній сумі витрат, %
Вартість матеріалів	574,00	16,20
Вартість електроенергії	64,80	1,98
Витрати на заробітну плату	2 913,92	81,82
Разом	3 552,72	

Висновок до розділу 4

Жароміцні сплави на нікелевій основі знайшли широке застосування під час виготовлення газотурбінних двигунів, головним чином, у вигляді робочих і соплових лопаток. В результаті складного легування у сплавів цієї групи досягнуто найвищі жароміцні властивості.

Так, в авіаційному газотурбінному двигуні більше 70% маси складають жароміцні сплави на нікелевій та залізо-нікелевій основах – це диски, соплові та робочі лопатки турбін, камери згоряння та т.п.

Для зміцнення поверхні лопаток із жароміцних сплавів рекомендується використовувати методи, які забезпечують високу зносостійкість, термічну стабільність і стійкість до корозії та окислення.

Найбільш широкого розповсюдження отримали конденсаційні покриття, одержувані іонно-плазмовим та електронно-променевим методами.

Підсумковий кошторис витрат на НДР являє собою суму результатів розрахунків суми витрат по всіх статтях витрат за період її виконання та становить близько 3 552,72 гривень.

РОЗДІЛ 5

ОХОРОНА ПРАЦІ, ДОВКІЛЛЯ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ

5.1 Правила зберігання отруйних речовин

Слід пам'ятати, що зберігання отруйних і легкозаймистих речовин на головному складі та в цехових приміщеннях проводиться за правила, встановленим відповідними інструкціями, так само як і їх відпуск і транспортування. Дотримання інструкцій є строго обов'язковим. Селітру дозволяється зберігати тільки в металевій тарі [20].

Для зберігання кислот краща металева тара з кислототривкої футеровкою. Кислоти також не допускаються роботи, пов'язані з утворенням іскор. Ціаністі солі, упаковані в жерстяні або залізні банки або барабани, зберігаються на особливому складі, ізолюваному від загального складу, з вентиляцією, що включається поза складу [220].

Отже, на тарі повинен бути напис « ОТРУТА ». До роботи з ціаністими солями допускаються спеціально виділені особи. У приміщеннях складів куріння суворо заборонено. Обов'язковим є бездоганна чистота і порядок, відсутність захаращеності, наявність вентиляції, проходів шириною не менше 1 м в складі та 5 м зовні [20].

Горючі речовини зберігаються в забарвлених бочках з написами про вміст. Тара повинна бути ретельно промитої. Між рядами бочок слід залишати достатні проходи. Для зберігання масел відводяться окремі комори, зберігання в яких бензину, газу та інших горючих матеріалів забороняється.

5.2 Заходи проти отруєння

Кодексом законів про працю передбачається видача робітникам, робота яких пов'язана з небезпекою професійного отруєння, жирів, або нейтралізують коштів в якості протиотрути. В окремих, де проводиться робота з отруйними речовинами, забороняється приймати їжу і палити. Необхідно наявність

аптечки першої допомоги. Робота в умовах забрудненого середовища проводиться у відповідних міських, респіраторних, окулярах [21].

Отже, у відділеннях, відведених для робіт із шкідливими виділеннями (відділення цементної, ціанування, оксидування та ін.), Перед початком роботи обов'язково включення припливно-витяжної вентиляції. Перед прийняттям їжі слід ретельно вимити руки і вичистити зуби. Не можна допускати миття рук у воді гартівних баків [21].

5.3 Протипожежні заходи

Отже, згідно ДСТУ 2272:2006 «Пожежна безпека. Терміни та визначення основних понять», протипожежні заходи в термічних цехах зводяться в основному до профілактичних заходів:

- регулярної очищення трубопроводів від сажі, підтримування в справності газопроводів і газорегуляторів, підтримці в справності масло охолоджуючої системи, особливо відведення циркулюючого гартувального масла, щоб уникнути його переливу через борти боки і розтікання по підлозі цеху [22];

- у цехах повинен знаходитися пожежний інструмент, пінні вогнегасники, кошма або листовий азбест для накриття гартувального бака з палаючим маслом, сухий пісок в разі пожежі в термічному цеху, особливо з утворенням вогнища загоряння, пов'язаного з надходженням (подачею) палива – нафти або газу, слід негайно перекрити кран біля печі і загальний кран на магістралі, не можна допускати установки баків з мазутом в приміщенні, де розташовані печі [22].

Таким чином, при загорянні мазуту ефективним для гасіння засобом виявляється пінний вогнегасник, пісок, розпорошена вода, застосування якої базується переважно на освітлі водної пари, при 30% якого в повітрі горіння не підтримується. Проходи і проїзди в цеху повинні бути вільними, доступними для дій при гасінні вогнищ загоряння [20].

Лабораторія знаходиться в будівлі, що відноситься до першого ступеня пожежної безпеки. Лабораторія будована з вогнетривкого будівельного матеріалу згідно вимогам.

За ступенем пожежної безпеки приміщення лабораторії відносяться до категорії В, оскільки в лабораторії знаходяться і використовуються горючі та важкогорючі рідини, тверді горючі та важкогорючі речовини та матеріали, але при цьому приміщення не належать до категорій А і Б. Клас по вибухонебезпеці відсутній [23].

Отже, виникнення пожежі в лабораторії може бути викликано коротким замиканням електропроводки або перевантаженням електропроводів. Пожежі, які можуть виникати в лабораторіях з пічним обладнанням, представляють велику небезпеку, так як температура технологічних процесів становить 1000°C і більше [21].

Таким чином, при таких температурах відбувається миттєве займання багатьох органічних матеріалів. В таких лабораторіях для гасіння пожеж використовуються вуглекислотні вогнегасники типу ОУ-2.

В кожній лабораторії для локалізації наслідків короткого замикання встановлені спеціальні вимикачі і плавкі запобіжники [23].

На випадок пожежі в лабораторії розроблений план евакуації. Приміщення обладнане пожежною сигналізацією автоматичної дії (теплові або димові повідомлювачі), а також встановлений ящик з піском [23].

Отже, основними заходами по пожежній безпеці є регулярна перевірка працездатності засобів гасіння пожежі і систем пожежної сигналізації; перевірка виправності електричної проводки; обережне відношення з легкоплавкими речовинами. Виконувати роботи необхідно лише на робочому місці [21].

5.4 Заходи з охорони довкілля

Отже, найбільшу шкоду атмосферному повітрю можуть нанести пари металу в процесі плавки та металічний пил, який утворюється при шліфуванні

зразків, пари ацетону і плавикової кислоти при знежирюванні та травленні зразків, згідно ДСТУ 3831-1998 «Охорона навколишнього природного середовища». В нашому випадку приготування металографічних шліфів та наступне їх знежирення та травлення відбувалося декілька разів, процес був короткочасним та відбувався в іншій лабораторії [20].

Таким чином для запобігання надходження шкідливих речовин в атмосферу система вентиляції всієї будівлі, до складу якої входить ця та інші лабораторії, комплектується пиловловлювачем та абсорбером [21].

Всі стічні води спускаються в міську каналізаційну систему. Зливання в каналізаційну мережу відпрацьованих розчинів хімічних речовин допускається лише після їх нейтралізації та очищення [21].

На ділянках шліфування, полірування та при застосуванні мокрих засобів обробки пилових матеріалів, стічні води повинні надходити до системи загальної каналізації через відстійники.

Висновки до розділу 5

Проведений аналіз потенційної небезпеки і шкідливих факторів на виробництві. Представлені вимоги до технологічних процесів, виробничих приміщень та технологічних матеріалів застосовуваних для дослідження впливу процесу термічної обробки та поверхневої обробки на формування структури жароміцних нікелевих сплавів для лопаток газотурбінного двигуна.

Прописані вимоги до розміщення виробничого обладнання, зберігання і транспортування вихідних матеріалів, оброблюваних виробів і відходів виробництва. Наведені вимоги, що висуваються до кваліфікаційної освіченості персоналу і до застосування засобів захисту для працівників.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. В роботі проведено аналіз умов роботи деталі: робочі лопатки турбіни сучасних ГТД працюють в умовах складної спільної дії статичних, термоциклічних та динамічних навантажень. Основними причинами виходу з ладу лопаток газотурбінних двигунів є: високі рівень температурних, вібраційних, динамічних і статичних навантажень. Склад жароміцних сплавів на нікелевій основі забезпечує стійкість до корозії, термостійкість і високі механічні властивості. Для нікелевих сплавів одним із методів підвищення механічних властивостей є поверхневе зміцнення: іонно-плазмове азотування поверхні.

2. Обрані матеріали та запропоновані методи дослідження. Подані дані про хімічний склад і фізико-механічні властивості жароміцного нікелевого сплаву ЖС6У, проаналізований вплив легуючих елементів та термічної обробки на формування структури сплаву. Для дослідження металографічних характеристик сплаву обрано засоби, що дозволяють провести металографічні дослідження структури матеріалів лопатки турбіни ГТД.

Запропоновані режими зміцнювальної обробки сплаву ЖС6У: гартування і старіння. Гартування пропонується проводити при температурах 1220-1280 °С у вакуумі протягом 1 години, охолодження на спокійному повітрі. Визначено, що зміцнювальна γ' -фаза виділяється в основному в процесі охолодження. Процес старіння рекомендовано проводити при температурі 950 °С протягом 7 годин, охолодження – повітря. Під час цієї термічної операції відбувається додаткове незначне виділення частинок γ' -фази та зміцнення сплаву.

Дослідження твердості після термічної обробки показали, що показники твердості після старіння змінилися не суттєво. Твердість після гартування становила 32-34 HRC, після гартування з подальшим старінням 33-35 HRC. Це можна пояснити тим, що після старіння відбувається додаткове незначне виділення частинок γ' -фази та, як наслідок - незначне зміцнення сплаву.

Мікроструктура після гартування представлена багатокомпонентним твердим розчином на основі нікелю, зміцнений дисперсними частинками інтерметалідної фази на основі Ni_3Al . В результаті старіння відбувається розпад пересиченого твердого розчину, що підвищує міцність сплаву за рахунок дисперсійного твердіння.

За результатами металографічних досліджень на нетравлених мікрошліфах в сплаві виявлені мікропори й усадкові рихлоти, а також поодинокі оксидні включення. Крім того, в сплаві є дрібні включення сферичної форми розміром 1 бал за шкалою Ш, характерні для точкових оксидів.

3. У якості зміцнювальної поверхневої обробки, що забезпечує підвищення твердості і жаростійкості нікелевому сплаву запропоновано іонно-плазмове азотування. Поверхневу обробку виконували при $550\text{ }^\circ\text{C}$ впродовж 3 годин. Досліджена мікроструктура поверхневого шару і розподіл мікротвердості. Встановлено, що товщина зміцненого шару складає $7,5\text{-}8\text{ }\mu\text{m}$, а його твердість $68\text{-}70\text{ HRC}$ ($\text{HV } 1100\text{-}1000$). Мікроструктура поверхневого шару після іонно-плазмового азотування, значно більш гомогенна, ніж вихідна. Вона наближена до структури загартованого та не зістареного сплаву, тобто має в своєму складі значно менше зміцнюючих фаз, її мікротвердість майже в 2 рази вища. Це можна пояснити утворенням твердого розчину азоту та кисню в нікелі та впливом дії плазми.

4. За результатами досліджень зразків на втомну міцність встановлено, що втомна міцність зразків після термічної обробки на 32% нижче, ніж втомна міцність зразків після іонно-плазмового азотування. Таке збільшення характеристик опору втоми забезпечує поверхневий шар, який утворився в результаті іонно-плазмового азотування.

5. Фрактографічне дослідження показало, що злами зразків після термічної обробки та після іонно-плазмового азотування мали в'язкий характер руйнувань. Злами зразків після руйнування ідентичні і мають характерну класичну будову.

6. Розглянута економічна ефективність проведення НДР. Підсумковий кошторис витрат на НДР – це сума результатів розрахунків суми витрат за всіма статтями витрат за період її виконання та становить близько 3 552,72 грн.

7. Проведений аналіз потенційної небезпеки і шкідливих факторів на виробництві. Представлені вимоги до технологічних процесів, виробничих приміщень та технологічних матеріалів застосовуваних для дослідження впливу процесу термічної обробки та поверхневої обробки на формування структури жароміцних нікелевих сплавів для лопаток газотурбінного двигуна.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кулик, М.С. Конструкція, міцність та надійність газотурбінних установок і компресорів / Тамаргазін О.А. Київ: НАУ, 2009. 477 с.
2. Терещенко, Ю.М. Газотурбінні двигуни літальних апаратів, Київ: Вища школа, 2000. 319 с.
3. Іноземцев, А.А. Газотурбінні двигуни / Сандрацький В.Л. П.: ВАТ «Авіадвигун», 2006.1024 с.
4. Нашимов, Ю.С. Аналіз ушкоджень лопаток газотурбінних двигунів. Інститут проблем міцності Г.С. Писаренко НАН України, м. Київ. 2005. 114 с.
5. Трощенко, В.П. Несуча здатність робочих лопаток ГТО при вібраційних напругах / Матвеев В.В., Грязнов Б.А./ – Київ. Наук. Думка, 1981 – 314с.
6. Масагін В. І., Конструкція та міцність авіаційних двигунів :курс лекцій / В. І. Масагін, В. В. Самулеєв, Н. М. Отрешко.– Х.: ХУПС, 2014.– 464 с.
7. Берлизова, Т.Ю. Термопружний стан монокристалічної лопатки ВМД, що охолоджується, з урахуванням орієнтації кристалографічних осей // Сучасні проблеми машинобудування: Тези доп. конф. мол. вчених та спеціалістів. Харків: ІПМаш НАН України. 2014. С. 3.
8. Берлизова, Т.Ю. Проблеми використання нових матеріалів для лопаткового апарату турбомашин // Вісник НТУ «ХП». Сер. Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування: зб. наук. пр. Харків: НТУ «ХП», 2016. № 9(1181). С. 44 – 49.
9. Ведь, В. Е. Жаростійке покриття для лопаток турбін ГТУ / Гусєв Ю.А., Гусєва Н.І., Кахраї Камбіз // Авіаційно-космічна техніка та технологія. 2012. №9(96). С. 127 – 131.
10. Іноземцев, А.А. Газотурбінні двигуни. П.: ВАТ «Авіадвигун», 2006.1024 с.
11. Шулов, В.А. Модифікація поверхні деталей із жароміцних сталей сильноточними імпульсними електронними пучками. /В.А. Шулов, А.Г.

Пайкін, А.Б. Белов // Фізика та хімія обробки матеріалів. – 2005. – № 2. – С. 61-70.

12. Лупінос, С. М. Сучасні тенденції розвитку гранульної металургії / 109 С. М. Лупінос, Д. В. Прутцьков, Д. О. Листопад, В. О. Панова, Р. І. Безпалов, Р. М. Воляр Металургія. 2017. Вип. 2. - С. 33-37.

13. Богуслаєв, А.В. Технологічне забезпечення експлуатаційних характеристик деталей ВМД. Лопатки компресора та вентилятора: моногр. Частина 1/О. Ст. Богуслаєв та ін. – Запоріжжя, вид. ВАТ "Мотор Січ", 2003. – 396 с.

14. Богуслаєв, А.В. Технологічне забезпечення експлуатаційних характеристик деталей ВМД. Лопатки турбіни: моногр. Частина 2/А.В. Богуслаєв, Ф.М. Муравченко, П.Д. Жеманюк, В.К. Яценко, А.Я. Качан, Е.І. Цивірка, С.Б. Беліков, М.Р. Ор-лов, В.Є. Замкової, В.Ф. Мозговий, О.В. Рубель. - Запоріжжя, вид. ВАТ "Мотор Січ", 2003. – 420 с.

15. Богуслаєв, А.В. Прогресивні технології моделювання, інтелектуальної автоматизації етапів авіаційних двигунів: А.А. Олейник, Д.В. С.А.Субботіна - Запоріжжя: ВАТ "Мотор-Січ", 2009. – 468 с.

16. Мовчан, Б.А. Жаростійкі покриття обложені у вакуумі / Б.А. Мовчан, І.С. Малащенко. - Київ : Наукова думка, 1983. – 231 с.

17. Борисов, Ю.С. Плазмові порошкові покриття / Ю.С. Борисов, А.Л. Борисова. – Київ: Техніка, 1986. – 223 с.

18. Скибін, В.Ю. Перспективи розвитку газотурбінних двигунів. Газотурбінні технології. 2000. №4. С 20-29.

19. Лащенко, Г. І. Плазмове зміцнення та напилення; Київ-Екотехнологія; 2003р. 8-10 с.

20. Гальчинський, А.С. та інші Основи економічних знань: Навчальний посібник. // – К.: Вища школа, 1999. – 544 с.

21. ДСН 3.3.6.042-2013. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.

22. ДСТУ 2272:2006 «Пожежна безпека. Терміни та визначення основних понять».

23. ДСТУ 3831-98 «Охорона навколишнього природного середовища».