

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Інженерно-фізичний факультет
(повне найменування факультету)

Кафедра «Фізичне матеріалознавство»
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

магістра
(ступінь вищої освіти)

на тему Підвищення властивостей зварних ливарних жароміцних нікелевих
сплавів

Виконав(ла): студент(ка) курсу, групи ІФ-612м

Спеціальності 132 «Матеріалознавство»

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Прикладне матеріалознавство

Д'ЯЧЕНКО Олександр Степанович

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник ГЛОТКА Олександр Анатолійович

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет Інженерно-фізичний
Кафедра Фізичне матеріалознавство
Ступінь вищої освіти магістр
Спеціальність 132 «Матеріалознавство»
(код і найменування)
Освітня програма (спеціалізація) Прикладне матеріалознавство
(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри «Фізичне матеріалознавство»

Вадим ОЛЬШАНЕЦЬКИЙ

«_____» _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

Д'ЯЧЕНКО Олександр Степанович

(ПРИЗВИЩЕ, ІМ'Я, ПО БАТЬКОВІ)

1. Тема проєкту (роботи) Підвищення властивостей зварних ливарних жароміцних нікелевих сплавів

керівник проєкту (роботи) к.т.н., доцент ГЛОТКА Олександр Анатолійович,

(науковий ступінь, вчене звання, ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «_____» _____ 20__ року №_____

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) хімічний склад та властивості серійних ливарних жароміцних нікелевих сплавів

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

1. Літературний огляд;
2. Матеріали та методики досліджень;
3. Експериментальний розділ;
4. Охорона праці;
5. Економічний розділ.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів, плакатів) Типові діаграми розтягу, Діаграма стану Ni–Cr, Діаграма стану системи Al–Ni, Діаграма стану системи Ti–Ni, Вплив легувальних елементів на час до руйнування сплаву 80%Ni + 20%Cr при випробуваннях на довготривалу міцність при 800°C і $\sigma = 200$ МПа, Хімічний склад дослідних плавок досліджених сплавів, Хімічний склад присадкових матеріалів, Зовнішній вигляд поверхні зразків-темплетів після зварювання, Зовнішній вигляд поверхні зразків-темплетів після зварювання промислового ливарного зварюваного жароміцного корозійностійкого сплаву ЖСЗЛС, Тріщини та мікроструктура сплаву ВЖЛ12Э після зварювання, Мікроструктури промислового сплаву ЖСЗЛС.

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-3	ГЛОТКА О.А., к.т.н., доцент		
4	КРУГЛІКОВА В.М.		
5	НЕСТЕРОВ О.В., к.т.н., доцент		
н/к	ФАСОЛЬ Є.О., ст. викладач		

7. Дата видачі завдання «_____» _____ 20__ року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Ознайомлення із темою дипломного проєкту. Вивчення відповідної літератури	06.10.2023	
2	Розробка вступу та розділу «Літературний огляд»	16.10.2023	
3	Розробка розділу «Матеріали та методики досліджень»	27.10.2023	
4	Розробка розділу «Експериментальний розділ»	16.11.2023	
5	Розробка розділу «Охорона праці»	04.12.2023	
6	Розробка розділу «Економічний розділ»	20.12.2023	
7	Написання висновків та переліку посилань	22.01.2024	

Студент(ка)

_____ Олександр Д'ЯЧЕНКО
(підпис) (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи) _____ Олександр ГЛОТКА

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської роботи: 100 с., 15 табл., 21 рис., 12 дод., 48 джерел.

НІКЕЛЕВІ СПЛАВИ; ЖСЗЛС-М; ЗВАРЮВАННЯ; ТРІЩИНИ; γ' -ФАЗА; ЛЮМ; ВЖЛ12Э; МІЦНІСТЬ; ПРИСАДКА ЭП367; АРГОНОДУГОВЕ ЗВАРЮВАННЯ

Об'єкт розробки – зварні ливарні жароміцні нікелеві сплави

Мета роботи – дослідження та підвищення властивостей зварних ливарних жароміцних нікелевих сплавів. Для досягнення цієї мети необхідно ретельно дослідити вплив різноманітних факторів та умов зварювання на структуру та властивості сплавів, а також розробити оптимальні технологічні режими зварювання для підвищення їхньої ефективності та витривалості.

Результати роботи – Порівняльні дослідження зварюваності сплавів показало, що найгіршою зварюваністю володіє промисловий ливарний жароміцний не корозійностійкий сплав ВЖЛ12Э. Зварюваність дослідного сплаву ЖСЗЛС-М, перебуває на рівні промислового ливарного зварюваного корозійностійкого сплаву ЖСЗЛС.

При цьому характеристики міцності дослідного ливарного зварюваного корозійностійкого сплаву ЖСЗЛС-М істотно вищі, ніж у сплаву ЖСЗЛС і перебувають на рівні сплаву ВЖЛ12Э.

ЗМІСТ

	C.
Вступ.....	7
1 Огляд літературних джерел.....	8
1.1 Особливості експлуатації ливарних жароміцних нікелевих сплавів.....	8
1.1.1 Міцність і пластичність сплавів.....	11
1.1.2 Характеристики жароміцності сплавів.....	17
1.1.3.Втома і термовтома сплавів.....	24
1.1.4 Жаростійкість сплавів.....	28
1.2 Огляд стратегій легування жаростійких нікелевих сплавів.....	29
1.3 З'єднання деталей.....	33
1.3.1. Переваги зварювання.....	33
1.3.2 Проблематика зварювання.....	34
1.3.3 Автоматизація зварювання.....	35
1.3.4 Характеристика зварних з'єднань.....	36
1.3.5 Короткочасний термічний цикл.....	37
1.3.6 Вплив незначних домішок та добавок.....	39
1.3.7 Сплави, зміцнені випаданням γ' -фази.....	40
2 Матеріали та методики досліджень.....	45
3 Порівняльні дослідження зварюваності ливарних жароміцних нікелевих жароміцних сплавів.....	48
4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.....	59
4.1 Аналіз потенційних небезпек.....	59
4.2 Заходи забезпечення безпеки.....	61
4.3 Заходи з виробничої санітарії.....	64
4.4 Заходи з пожежної безпеки.....	65
4.5 Заходи безпеки в умовах НС.....	66
5 Економіко-організаційна частина.....	72

5.1 Актуальність теми з позиції маркетингу.....	72
5.2 Послідовний аналіз.....	73
Висновки.....	82
Перелік джерел посилань.....	83
Додаток А	88

ВСТУП

В сучасному технічному прогресі зварні ливарні жароміцні нікелеві сплави визнаються одними з ключових матеріалів для вирішення важливих завдань в галузі інженерії та металургії. Ці сплави відзначаються унікальними фізико-хімічними властивостями, такими як висока термостійкість, корозійна стійкість і міцність, що робить їх особливо цінними для виробництва складних елементів обладнання, наприклад, турбін та аеродинамічних лопаток.

Однак, не дивлячись на великий потенціал цих сплавів, існують певні аспекти, що обмежують їхнє ефективне використання. Один із ключових чинників – це властивості зварюваності, які безпосередньо впливають на надійність та довговічність елементів конструкцій, підданих впливу високих температур та механічних навантажень.

Мета даної магістерської дипломної роботи полягає у дослідженні та підвищенні властивостей зварних ливарних жароміцних нікелевих сплавів. Для досягнення цієї мети необхідно ретельно дослідити вплив різноманітних факторів та умов зварювання на структуру та властивості сплавів, а також розробити оптимальні технологічні режими зварювання для підвищення їхньої ефективності та витривалості.

Враховуючи значущість цієї теми в сучасній металургійній практиці та інженерному будівництві, вивчення властивостей зварних ливарних жароміцних нікелевих сплавів та розробка нових методів підвищення їхньої якості та надійності стає актуальною та перспективною задачею для подальшого розвитку технічної галузі.

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1 Особливості експлуатації ливарних жароміцних нікелевих сплавів

Заміна авіаційних двигунів, які функціонували на основі внутрішнього згоряння, на газотурбінні двигуни спонукала до використання новітніх матеріалів, адже вони повинні були витримувати значно складніші робочі умови. На відміну від двигунів внутрішнього згоряння, де матеріали експлуатувались при температурах до 800°C і під високим тиском, у газотурбінних двигунах ці матеріали мають витримувати не тільки високі температури до 1050-1100°C або вище, але й комбіновані навантаження, як статичні так і динамічні, включаючи розтягування та змінні термічні впливи.

Лопатки газових турбін вимагають особливо високих стандартів матеріалів, з яких вони виготовлені, оскільки умови їх роботи суттєво відрізняються. Залежно від типу лопаток – соплові чи робочі – вимоги до їх властивостей можуть варіюватися. Наприклад, соплові лопатки піддаються вищим температурам в порівнянні з робочими і зазнають впливу газового потоку та теплових навантажень, особливо під час зміни режимів роботи двигуна. Вони менше піддаються змінним навантаженням та мають нижчі рівні виникаючих напружень, однак вони особливо схильні до газової корозії через недостатню жаростійкість сплавів.

Сплави, які використовуються для виготовлення робочих лопаток газових турбін, мають відповідати надзвичайно складному набору критеріїв через різноманітність навантажень і пошкоджень, яким вони підлягають, включаючи статичні, вібраційні, термоциклічні, корозійні та ерозійні, які всі впливають на їхній термін служби [1]. Лопатки часто ламаються через низьку довготривалу міцність матеріалу, яка погіршується через регулярно повторювані навантаження, що є необхідною умовою роботи двигуна. Постійні високі температури газу та відхилення від нормативних умов термічної і механічної обробки можуть призвести до статичних пошкоджень лопаток. Під час механічної обробки можливе перегрівання, що веде до пластичної деформації і

зовнішніх шарів компресії металу, залишаючи після себе видимі розтягнуті залишкові напруження, які сприяють утворенню тріщин. Неконтрольоване шліфування може збільшити ці напруження до 350 МПа, що є значним, враховуючи, що межа міцності для деяких нікелевих жаростійких сплавів становить 700-1000 МПа, тому тріщини можуть формуватися при навантаженнях від 350 до 650 МПа - значно нижче границі міцності сплаву. Зразки, які були піддані шліфуванню після лиття, мають на 15-27% нижчу межу руйнування в порівнянні з тими, які зберегли поверхню після лиття. Крім того, метал з наклепом має більшу дифузійну проникність, що призводить до більш швидкої рекристалізації на поверхні та згущення дисперсних частинок у зміцнюючій фазі γ' , послаблюючи тим самим зовнішній шар і роблячи умови для утворення і розширення тріщин більш сприятливими.

Критерії для ливарних жаростійких сплавів, які застосовуються для створення лопаток з охолодженням, стають все більш жорсткими. В області тонких стінок лопаток із системою охолодження спостерігається значна різниця у температурах, що призводить до виникнення термічних напружень через розширення матеріалу, які можуть досягати 200-300 МПа на внутрішніх поверхнях під час певних умов експлуатації. Ці теплові напруження в комбінації з напруженнями від центробіжних сил можуть викликати тріщини на внутрішній поверхні порожнистих лопаток, створених із збалансованою структурою.

Одним з типових способів пошкодження робочих лопаток газових турбін є втомне руйнування. Поява таких дефектів пов'язана з труднощами прогнозування інтенсивності циклічних навантажень та відгук на них під час дизайну, а також з високою чутливістю характеристик збудження та довговічності лопаток до непередбачуваних змін умов експлуатації та виробництва [2]. Під час довготривалих випробувань іноді виникають випадки пошкодження замків лопаток через недостатню довговічність і стійкість до втоми матеріалу.

Тим не менш, сьогодні обидва зазначені типи пошкоджень лопаток турбін вважаються достатньо добре вивченими. Встановлені причини їх виникнення і

розроблені методики для їх усунення як на етапі розрахунків, так і під час експериментальних тестів двигунів.

З розвитком нових серій газотурбінних моторів, які працюють при температурі газу більш ніж 1600 К до турбіни, важливим завданням стала потреба у матеріалах для виготовлення лопаток, особливо для тих, що використовуються на початкових ступенях турбін, які мають високі термічні та втомні характеристики. Сучасні турбінні двигуни піддаються швидким змінам температур газу під час запуску, а також варіаціям швидкості під час польоту і при зниженні оборотів, що значно впливає на різницю температурних режимів між товстими і тонкими частинами лопатки. Це викликає істотні термічні напруження, які додатково ускладнюються напруженнями від газового потоку та центробіжних сил. Досягнення високих температур газу було можливим не лише завдяки розробці жароміцних сплавів, але і через поліпшення систем охолодження. При цьому виникла необхідність забезпечити більш однорідне охолодження по всій поверхні лопатки, оскільки недостатнє охолодження окремих ділянок може викликати не тільки локальне перегрівання металу (що знижує жароміцність), але й значні термічні напруження на границях цих гарячих зон. Термомеханічна втома, зазвичай, зосереджується на границях зерен і часто має багато джерел.

Типовим дефектом для лопаток з бандажами є зношування контактних поверхонь на бандажах, що призводить до утворення зазорів. Зношування залежить від багатьох факторів, пов'язаних із конструктивними особливостями лопаток і двигуна в цілому, а також від характеристик матеріалу лопатки, таких як зносостійкість, жаростійкість та крихкість під впливом тривалого навантаження.

В останніх моделях газотурбінних двигунів, лопатки на початкових етапах турбіни мають охолодження. Їх внутрішня структура складається з численних штифтів та перетинок, які не тільки направляють потоки охолоджуючого повітря, але й забезпечують міцність самої лопатки. Проте, точки з'єднань цих штифтів і перетинок з внутрішньою поверхнею лопатки схильні до накопичення великих напружень, що може призводити до пошкоджень. Щоб запобігти таким

дефектам, здійснюють заходи зі згладжування внутрішніх поверхонь лопатки та елементів всередині неї, а також збільшують радіуси у місцях з різкими переходами геометрії. Водночас, це вимагає створення нових матеріалів для лопаток газотурбінних двигунів, які б мали високу пластичність та малу чутливість до точок концентрації напружень, з високими показниками жароміцності та витривалості, особливо для зразків з надрізами.

З підвищенням робочих температур лопаток турбін, стає все більш важливим забезпечити їх стійкість до газової корозії. Таким чином, високий рівень жаростійкості стає ключовою вимогою до сплавів, які використовуються для виробництва лопаток газотурбінних двигунів. З огляду на ці особливості, стає очевидною необхідність дослідження властивостей ливарних нікелевих жаростійких сплавів, що використовуються для виготовлення лопаток.

1.1.1 Міцність і пластичність сплавів

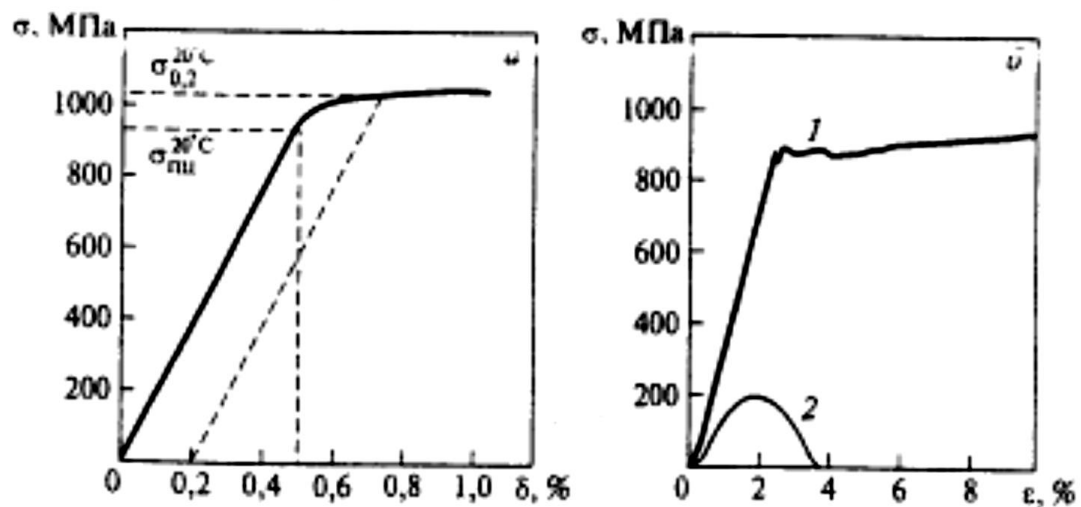
Міцність

Параметри міцності, визначені за допомогою короткотривалих тестів, застосовуються для моніторингу двигунів, аналізу якості матеріалів і в наукових експериментах, включаючи експертні та перевірочні випробування. Це має важливе значення при визначенні та валідації умов термообробки та інших процесів виготовлення турбінних лопаток.

В практичному застосуванні використовують показники границі міцності, отримані під час короткотривалих тестів, що вказують на напруження при температурі (T , °C), при якому стандартний зразок руйнується при одноосьовому навантаженні, а також значення границі текучості σ_T або умовної границі текучості $\sigma_{0,2}^T$, які відображають напруження, при якому залишкова деформація зразка досягає 0,2%. Процедури вимірювання σ_b і $\sigma_{0,2}$, а також вимоги до зразків і випробувального обладнання, детально описані в джерелі [3].

Треба зауважити, що результати випробувань на короткотривалу міцність залежать від швидкості деформування, часу, протягом якого матеріал підтримується при високій температурі, і часу витримки при цій температурі, оскільки в цей період можуть відбуватися зміни в структурі матеріалу. Стандарти встановлюють певний час нагріву до температури випробування і час витримки при цій температурі, а також швидкість деформування.

Рисунок 1.1 демонструє типові діаграми розтягнення для литих нікелевих жаростійких сплавів. На рисунку 1.1,а показано залежність між напруженням і видовженням зразків із сплаву, що має як рівноважну, так і орієнтовану структуру. Ця діаграма напруження відома і характерна не тільки для жаростійких сплавів, але й для багатьох сплавів на основі алюмінію, титану та сталей.



а – жароміцний нікелевий сплав, б – спрямовано кристалізовані евтектичні сплави з орієнтованими волокнами зміцнювальної фази: 1 – при 20 °С, 2 – при 1100 °С

Рисунок 1.1 – Типові діаграми розтягу

Особливістю діаграми, наведеної на рис. 1.1, б, є наявність "зуба" і (за невисоких температур) області плинності (крива 1). Подібні діаграми характерні для наведено кристалізованих сплавів евтектичного типу, структура яких

складається з матриці на нікелевій або кобальтовій основі та орієнтованих волокон зміцнювальної фази (Co-MeC , γ/γ' - MeC та ін.). При напруженні на рівні вершини зуба плинності починається подрібнення волокон у довільній частині зразка (у зоні з меншою міцністю). Це викликає деяке зниження напруження, необхідного для здійснення подальшої деформації зразка. На цій стадії подрібнення волокон не призводить до руйнування загалом, тому що внаслідок локального нахилу поблизу розривів кожного волокна матриця сприймає те навантаження, яке несло раніше волокно. Подрібнення при відносно малозмінному навантаженні охоплює поступово всі волокна в робочій частині зразка подібно до поширення лінії Чернова-Людєрса і відбувається доти, доки не буде досягнуто критичної довжини волокна зміцнювача, що визначається напрямком зсуву локально нахиленої матриці [4]. Подальша деформація зразка аж до руйнування забезпечується за деякого зростання напруження, що зумовлено деформаційним зміцненням матриці в об'ємі.

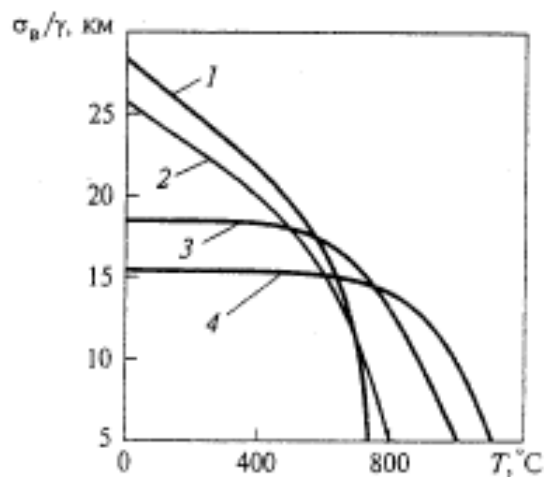
При високих температурах відбувається зміна в поведінці кривих деформування (див. рис. 1.1, б – крива 2). Це відбувається через те, що матриця не зазнає зміцнення від деформації у зоні високих температур. Коли волокна ламаються у довільному місці, матриця повинна взяти на себе напруження. Оскільки матриця не може зміцнюватися деформацією і не витримує додаткове навантаження, волокна в цій точці продовжують деформуватись, згодом формуючи "шийку", що призводить до руйнування зразка. Також, під час розтягнення зразка при низьких температурах волокна ламаються рівномірно по всій робочій області, тоді як під час випробувань при високих температурах ламаються лише поблизу місця руйнування.

При розробці авіаційних конструкцій важливо оцінити доцільність використання матеріалу з точки зору його ефективності при однаковій масі, що вимірюється питомою міцністю – міцністю, нормалізованою до густини (σ_v/γ). На рис. 1.2 представлені температурні діапазони питомої міцності для титанових сплавів (крива 1), жароміцних сталей (крива 2), деформованих (крива 3) і литих жароміцних сплавів (крива 4). З графіка видно, що хоча при низьких температурах титанові сплави мають найвищу питому міцність, при

температурах вище 800-850°C перевага переходить до литих жароміцних нікелевих сплавів, що і пояснює їх широке застосування для лопаток газових турбін.

Модуль пружності

Ініціальна пряма частина кривої натягу вказує на можливість визначення модуля Юнга E , який описує здатність матеріалу до зміцнення у інших регіонах. Модуль пружності E є ключовим показником властивостей матеріалу, він вказує на стійкість матеріалу до деформацій у пружному режимі, яка є критичною для компонентів, таких як лопатки газотурбінних двигунів. Цей показник включається в обчислення для оцінки термічних напружень, частот власних коливань лопаток і інших характеристик. Зі зростанням температури значення модуля Юнга, подібно до границі текучості σ_T та границі міцності σ_B , знижується. При визначенні модуля Юнга за короточасних статичних випробувань необхідно брати до уваги, що його значення може змінюватися в залежності від тривалості навантаження через деформацію, яка відбувається через повзучість. Тому для точного вимірювання модуля пружності при високих температурах часто використовуються динамічні методи визначення.



1 – титанові сплави, 2 – сталі, 3, 4 – нікелеві жароміцні деформівні (3) та ливарні (4) сплави

Рисунок 1.2 – Температурна залежність питомої міцності сталей, титанових і нікелевих жароміцних сплавів

Пластичність

Сплави, що використовують для виготовлення турбінних лопаток, мають бути достатньо пластичними, щоб гарантувати їх ефективну роботу в умовах, коли напруження розподіляються по перерізу нерівномірно. Це важливо з огляду на те, що в лопатках часто виникають зони з високою концентрацією напружень. Вплив потоків газу призводить до того, що лопатки піддаються згинальним і крутильним навантаженням. Ці фактори спричиняють непостійний розподіл напружень. Здатність до пластичної деформації дозволяє матеріалу перебалансувати напруження, значно знижуючи їх у ділянках, де рівень напруження є найнижчим. Міцність зразка з надрізом σ_B^H при крихкому руйнуванні пов'язана теоретичним коефіцієнтом концентрації напружень α_σ залежністю

$$\sigma_B^H = \alpha_\sigma \sigma_B \quad (1.1)$$

Якщо матеріал здатний до пластичного перерозподілу напружень, то:

$$\sigma_B^H = K_\sigma \sigma_B \quad (1.2)$$

Ефективний коефіцієнт концентрації K_σ пов'язаний з теоретичним коефіцієнтом α_σ таким чином:

$$K_\sigma = 1 + q (\alpha_\sigma - 1) \quad (1.3)$$

де q – коефіцієнт чутливості матеріалу до концентрації напружень, що змінюється від 0 (пластичні матеріали) до 1 (крихкі матеріали).

Матеріали з високою пластичністю, які менш чутливі до місць з високою концентрацією напружень, здатні витримувати більші навантаження, ніж ті, що крихкі та обмежені у пластичності. Під час згинання або кручення максимальні напруження спостерігаються на поверхні, в той час як у внутрішніх областях напруження значно менші. Матеріал із достатньою пластичністю може

перерозподіляти ці напруження, знижуючи їх на поверхні та підвищуючи тим самим загальну працездатність.

Протягом тривалого часу роботи, пластичність лопаток також пов'язана з явищем повзучості їхніх сплавів. Сплави з меншою повзучістю перед руйнуванням при певних умовах температури та напруження схильні бути більш чутливими до концентрації напружень, на відміну від матеріалів, у яких процес накопичення повзучості відбувається більш рівномірно і які виявляють вищі рівні залишкової деформації після другої стадії повзучості у високотемпературних умовах.

У дослідженні [2] наголошується, що висока працездатність сплавів у конструкціях із концентраторами напружень, які використовуються протягом тривалого часу при високих температурах, може бути забезпечена, якщо показник відносного видовження після довготривалих випробувань міцності $\delta_{\text{дл}}$ перевищує 3% (відносне подовження після випробування на тривалу міцність).

Пластичні матеріали, що мають низьку чутливість до концентрації напружень, мають набагато вищу несівну здатність, ніж малопластичні крихкі матеріали.

Зазвичай пластичність оцінюють, вимірюючи залишкову деформацію зразків після руйнування під час короточасних або тривалих випробувань. Критеріями залишкової деформації слугують відносне видовження зразків (δ , %) або звуження (ψ , %):

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{l_k - l_0}{l_0} 100 = \frac{\Delta l}{l_0} 100; \\ \psi &= \frac{F_0 - F_k}{F_0} 100 = \frac{\Delta F}{F_0} 100,\end{aligned}\tag{1.4}$$

де l_k і F_k - довжина розрахункової частини і мінімальний переріз зразка після розриву;

l_0 і F_0 - довжина розрахункової частини і переріз зразка перед випробуваннями.

Обидва ці критерії змінюються в однаковому напрямку при збільшенні або зменшенні пластичності. У деяких випадках (якщо деформація протікає рівномірно аж до руйнування і пластична плинність матеріалу відбувається за постійного об'єму, тобто якщо $l_0 F_0 = l_k F_k$) між ними існує зв'язок

$$\delta = \frac{\psi}{1-\psi}. \quad (1.5)$$

Це свідчить про те, що в області рівномірної пластичної деформації видовження завжди більше, ніж звуження. Однак у більшості випадків зразки з жароміцних сплавів руйнуються з утворенням шийки (зосередженої деформації), тож співвідношення (1.5) не буде діяти. При цьому звуження стає більшим, ніж видовження.

1.1.2 Характеристики жароміцності сплавів

Повзучість

Стійкість матеріалу до явища повзучості є критичним фактором, що впливає на допустимі рівні деформації, які, у свою чергу, визначають надійне функціонування лопаток у високотемпературних зонах двигуна. Повзучість описує процес, за яким матеріал поступово деформується незворотно з плином часу під впливом сталого навантаження. Цей процес є типовим для сплавів при будь-якій температурі та навантаженні, що призводить до статичної деформації, але особливу увагу привертає повзучість при високих температурах, яка є важливою при проектуванні та експлуатації газотурбінних двигунів. Для вивчення цього явища виконуються тести, які вимірюють деформацію матеріалу у часі під постійним навантаженням та при сталій температурі, результати яких зазвичай зображуються у вигляді кривої повзучості, приклад якої представлено на рис. 1.3.

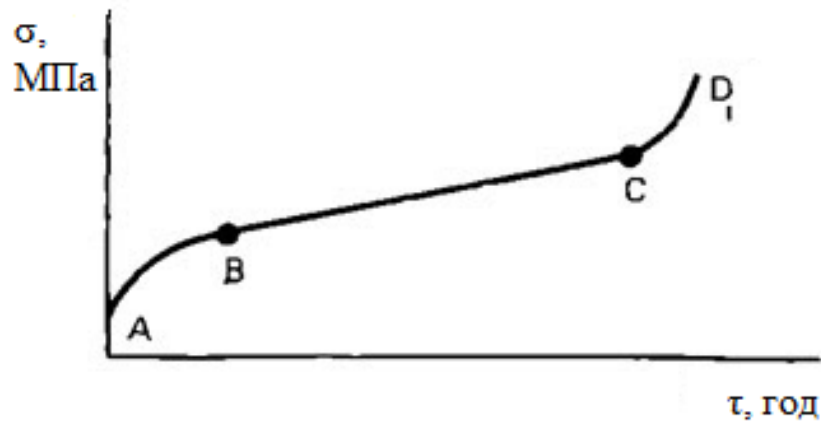


Рисунок 1.3 – Крива повзучості ($T=\text{const}$, $\sigma=\text{const}$)

Коли зразок піддається навантаженню, він одразу виявляє еластичну або еластично-пластичну деформацію ϵ_p , відому як початкова деформація. Згодом, зразок починає накопичувати деформацію і на початковому етапі, який є нестабільним, швидкість деформації поступово знижується. Цей початковий етап повзучості завершується після часу τ_1 , і на цій стадії загальна деформація досягає ϵ_1 (відрізок АВ на діаграмі). У деяких ситуаціях, особливо при короткотривалих високотемпературних умовах, цей етап може не спостерігатись, і деформація може накопичуватись із стабільною швидкістю від самого початку. На другому етапі повзучості (відрізок ВС), деформація зразка протікає досить рівномірно і швидкість повзучості є відносно сталою та найнижчою, тому цей етап називають стабільним. Насправді, стадія із постійною швидкістю повзучості при певних температурі та напруженні може не існувати, але другий етап виділяється як період із найповільнішим і найбільш стабільним накопиченням деформації, описуваний часовим інтервалом τ_2 . Тривалість цієї стадії залежить від сили навантаження та температури: чим вони більші, тим коротший відрізок ВС.

На завершальній стадії повзучості (відрізок СД) відбувається поява та розвиток тріщин, що веде до їх збільшення і, врешті-решт, до розлому матеріалу. Цей етап вирізняється стрімким зростанням швидкості деформації до моменту ламання зразка. Тривалість цієї фази залежить від пластичності матеріалу: більш

пластичні сплави дозволяють розподілити напруження біля вершини тріщин більш ефективно, сповільнюючи таким чином їх прогресування і продовжуючи фазу прискореної повзучості. Водночас, наукові спостереження [5] підтверджують, що графіки з тривалими ділянками постійної швидкості повзучості не відображають всієї різноманітності поведінки матеріалів під час повзучості.

Основним показником опору матеріалу до повзучості є умовна межа повзучості, яка визначається як напруження, яке спричиняє задану деформацію зразка або задану швидкість деформації на стабільній стадії протягом зазначеного часу при певній температурі, наприклад, $\sigma_{0.2/100}^{900^\circ}$ або $\sigma_{1 \cdot 10^{-5}}^{900^\circ}$.

Коли границя повзучості записується як $\sigma_{0.2/100}^{900^\circ}$, це означає, що вона визначена через величину деформації: таке напруження, яке за 100 годин при температурі 900°C викликає деформацію в 0,2% від початкової довжини зразка. Коли границя повзучості визначається через швидкість деформації, нижній індекс вказує на необхідну швидкість повзучості у відсотках за годину, тобто означає напруження, яке спричиняє швидкість сталої повзучості $1 \cdot 10^{-5} \text{ \%}/\text{год}$ при температурі 900°C.

Швидкість повзучості на сталій стадії залежить від рівня діючого напруження і пов'язана залежністю

$$V_2 = B\sigma^h \quad (1.6)$$

або

$$V_2 = B'e^{a\sigma}, \quad (1.7)$$

де V_2 - швидкість деформації на сталій стадії повзучості;

B, B', h і a - коефіцієнти, постійні для даної температури матеріалу;

σ - напруження;

e - основа натуральних логарифмів.

Рівняння (1.7) забезпечує більш точне співпадіння з даними експериментів в рамках великого діапазону швидкостей деформації повзучості. Застосування формул такого роду, як (1.6) і (1.7), дозволяє прогнозувати довгострокову поведінку матеріалів на основі короткотермінових випробувань при високих швидкостях деформації. Однак, з ростом температури спостерігається зниження межі повзучості матеріалу.

Тим не менш, варто підкреслити, що дані про повзучість, отримані при одночасному навантаженні в умовах сталої температури, потребують обережного застосування у розрахунках. Це пов'язано з тим, що лопатки газотурбінних двигунів (ГТД) експлуатуються в умовах складних напружень (поєднання розтягування і кручення), циклічних навантажень, змінності навантажень і так далі. Всі ці фактори впливають на поведінку сплавів при повзучості і потребують розробки більш комплексних методів випробувань для повзучості.

Тривала міцність

Основною вимогою до матеріалів, що використовуються для виготовлення лопаток газотурбінних двигунів (ГТД), є висока жаростійкість. Ця якість визначається границею довготривалої міцності, яка представляє собою рівень напруження, що при певній температурі викликає руйнування зразка протягом заданого періоду, наприклад, σ'_t . Так, $\sigma_{100}^{900^\circ}$ може означати напруження, необхідне для руйнування зразка при 900° C за 100 годин. Випробування на розтяг є стандартним методом для визначення границі довготривалої міцності, яке широко використовується як в наукових дослідженнях, так і у виробничих процесах, де воно застосовується для контрольних випробувань жаростійких сплавів. Залежно від умов експлуатації конструкцій, границю довготривалої міцності сплавів встановлюють на основі випробувань з тривалістю від 50 до 10000 годин та більше.

В останні роки інтенсивно вивчається залежність між тривалістю життя матеріалу (τ_p - час до зламу), напруженням (σ) і температурою (T). Це дослідження має велике значення через зростаючу важливість аналізу довготривалої роботи сплавів під дією напружень і високих температур. Розуміння цього взаємозв'язку дозволяє ефективно вирішувати багато

практичних завдань, наприклад, точно прогнозувати довготривалу працездатність сплавів на основі короткострокових тестів, або визначати границю довготривалої міцності при заданій температурі, коли відомо її значення при іншій температурі. Порівняно часто використовують емпіричні рівняння, що визначають τ і σ (за $T = \text{const}$), виду

$$\tau_p = B \exp(-a\sigma) \quad (1.8)$$

де A , t , B і a – коефіцієнти, що характеризують матеріал за заданої температури.

Екстраполяція на більші значення довговічності може призводити до згинань, оскільки зі збільшенням тривалості випробувань коефіцієнти у формулах (1.8) змінюються.

У джерелі [5] представлений аналіз різноманітних параметричних функцій, які корелюють час до руйнування (τ_p), напруження (σ) і температуру (T). Автори порівнювали експериментальні дані про довговічність сплаву ЕП109-ВД та сталі EI-961, які були отримані для ресурсу від 5000 до 10000 годин, із розрахунковими показниками, визначеними на основі екстраполяції експериментальних даних з меншою тривалістю, до 1000-2000 годин. Використовуючи формули (1.8) і (1.9), дослідники виявили, що формальне застосування цих залежностей може призвести до значних спотворень в результаті.

У параметричній залежності Ларсона - Міллера

$$P = f(\sigma) = T (C + \lg \tau_p) \quad (1.9)$$

Константа C , котра використовується у цих розрахунках, зазвичай приймається за 2,0 і вважається характеристичною для даного матеріалу. Проте, на практиці, значення C може змінюватись не лише за умов виходу за межі температурного діапазону, характерного для певного структурного стану сплаву, але й значно варіювати залежно від рівня прикладених напружень.

Розрахунки тривалості служби сплаву ЕП109-ВД і сталі ЕІ-961, представлені в [5] (таблиця 1.1) і виконані з використанням формул (1.8) - (1.9) та описаного методу, демонструють, що зазначений підхід дозволяє належним чином проводити екстраполяцію для довготривалого прогнозування поведінки матеріалу.

Таблиця 1.1 – Експериментальні та розрахункові значення довговічності сплаву ЕП109-ВД і сталі ЕІ961

Матеріал	$T_{\text{випр.}}$	σ , МПа	τ_r , експ., год.	τ_r , год, розрахована за формулою		
				ступеневе	Ларсона-Міллера	узагальнене
ЭП109-ВД	950	60	2400	6000	4000	2450
		50	3700	12500	8000	3890
		40	6660	30000	15000	6725
ЭІ961	500	440	3600	7200	6100	4000

Зі зростанням температури спостерігається зниження межі довготривалої міцності, причому швидкість цього зниження збільшується при довготривалому застосуванні постійного навантаження.

Властивості матеріалу, такі як стан наклепу, розмір зерна, а також розміри і форма зміцнюючих фаз, істотно впливають на показники довготривалої міцності. Дослідження показали, що попереднє застосування стискальних навантажень знижує тривалість експлуатації сплавів під час повзучості при розтягуванні.

Часто у практичній діяльності виконують випробування довговічності на зразках незвичайної форми або малого перетину, особливо при аналізі причин відмови лопаток турбін. Ці випробування, здійснені на зразках, створених безпосередньо з лопаток, мають на меті перевірку якості матеріалу. При цьому випробуваннях важливо взяти до уваги масштабний фактор, оскільки у зразках з малим перерізом значно сильніше проявляється вплив окремих великих дефектів, таких як пори чи включення, що негативно впливає на жаростійкість

матеріалу. Також довговічність матеріалу впливає на характер зародження і розвитку тріщин, які переважно формуються в поверхневому шарі. У зразках малого перетину, де поверхневі шари більш активно беруть участь у перенесенні навантаження, це може призвести до зниження показників довговічності. Процеси окислення поверхні, що прискорюються через зазначені причини, також можуть мати більш руйнівний вплив на жаростійкість зразків меншого діаметру. Спеціалізовані дослідження показали, що довговічність зразків з діаметром 3 мм на 25-30% нижча, порівняно зі стандартними зразками з діаметром робочої частини 5 мм.

Під час дослідження витривалості сплавів, важливою є аналіз їхньої ефективності при умовах, коли існують елементи, що призводять до зосередження напружень. Для цього виконуються випробування на довговічність зразків зі спеціальними вирізами. Зразки з V-подібним кільцевим вирізом, розташованим перпендикулярно до осі зразка, часто використовуються для оцінки чутливості до таких вирізів. При випробуванні ливарних сплавів для лопаток газотурбінних двигунів зазвичай використовують вирізи з радіусом у вершині 0,5 мм, а діаметр у найтоншому місці зразка з вирізом вибирають ідентичним до діаметру гладких зразків для спрощення порівняння результатів. Оцінка чутливості до вирізів здійснюється шляхом порівняння інтервалів тривалої міцності зразків з вирізами та без них при рівній довговічності, або порівнянням довговічності при однаковому рівні напруження.

Лопатки газотурбінних двигунів функціонують в умовах, що змінюються, з певною періодичністю та швидкістю змін температур і напружень. На кожному етапі роботи в металі відбувається накопичення пластичної деформації, тому розробка методик оцінювання витривалості матеріалів при змінних температурах та напруженнях є ключовою.

1.1.3.Втома і термовтома сплавів

Втома

Тривалість служби лопаток турбін, що піддаються як повторюваним статичним, так і циклічним навантаженням, залежить від їх здатності витримувати подібні умови. Нерівномірний газовий потік, який викликається варіаціями у температурі та тиску по периметру, є причиною циклічних навантажень. Матеріал зазнає руйнування під дією частих циклічних навантажень при нижчих рівнях напруження, ніж ті, які виникають під час одиничного статичного навантаження. Тому надзвичайно важливо аналізувати характеристики стійкості сплавів до таких умов.

Втома матеріалу характеризується як процес, де з часом накопичуються дефекти через регулярно змінні напруження, що ведуть до зниження терміну служби, утворення тріщин та кінцевого руйнування. Витривалість визначається як здатність матеріалу протистояти такому процесу втоми.

Термін "границя витривалості" σ_{-1}^T відноситься до максимального напруження σ_a , яке матеріал може переносити без знищення протягом певної кількості циклів N . Це напруження змінюється залежно від асиметрії циклу навантаження, частоти, температури та характеру напруження, тому параметри випробувань для визначення витривалості завжди уточнюються. Диференціюють високоциклову втому ($10^7 - 10^{11}$ циклів), малоциклову втому ($10^3 - 10^4$ циклів) та втому у проміжному діапазоні ($10^5 - 10^6$ циклів) [6].

Під час досліджень з ливарними жаростійкими сплавами, що використовуються для лопаток газотурбінних двигунів, зазвичай досліджують границю витривалості на основі $2 \cdot 10^7$ циклів.

Зміни напружень у межах одного періоду досягають максимального $\sigma_{\max}$ і мінімального $\sigma_{\min}$ значень. У разі симетричного циклу значення $\sigma_{\max}$ і $\sigma_{\min}$ за абсолютною величиною рівні. У разі асиметричного циклу може бути виділена змінна складова з амплітудою

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (1.10)$$

і постійна складова

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (1.11)$$

Залежно від співвідношення

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (1.12)$$

цикл змінних напружень може бути симетричним ($\sigma_m = 0$, $R = -1$), пульсуючим ($\sigma_m = \sigma_a$, $R = 0$) або асиметричним за будь-яких інших значень коефіцієнта асиметрії R [3].

У дослідженнях, що стосуються розробки нових матеріалів або оцінки довговічності деталей, часто використовують показники втоми, отримані при симетричному циклічному навантаженні. Для цього проводять тести на згинання з обертанням або на розтяг-стиск круглих зразків. Втоми руйнування матеріалів може бути обумовлене статичними чинниками, такими як дефекти структури на атомному рівні та наявність мікро- та макродефектів.

У певних дослідженнях [7] зазначено, що в литих нікелевих жаростійких сплавах з монокристалічною структурою, аномальне падіння довговічності деяких зразків під час випробувань може бути викликане внутрішніми дефектами, такими як концентрації неметалевих включень, "паразитні зерна", нерозчинені евтектичні виділення γ' -фази та поверхнева рекристалізація. Вказується, що ці дефекти з'являються внаслідок порушень у процесах лиття, механічної та термічної обробки і можуть бути ліквідовані.

У зламах зразків, крім поверхневих, часто виявляють внутрішні втомні ділянки руйнування, пов'язані з ливарними мікропорами. Втомні осередки також можуть бути розташовані на субмежах зерен. Характерною особливістю

втомного руйнування є відсутність макроскопічної деформації в області руйнування [7].

У жаростійких сплавах змінні навантаження можуть прискорювати процеси деформаційного старіння, оскільки втомне накопичення необоротних змін відбувається через дислокаційний механізм. Локальне виділення зміцнювальних фаз гальмує рух дислокацій, запобігаючи досягненню критичної концентрації. Таким чином, у нікелевих сплавах зі збільшенням температури спостерігається зростання опору до втоми до певної точки (температури старіння), після якої опір знижується. У сучасних високоміцних сплавах з високими температурами старіння, збільшення границі витривалості спостерігається аж до 900°C.

У [8] вказується, що криві втоми складаються з трьох відрізків (I, II), кожен з яких може бути з достатнім ступенем достовірності представлений у координатах $\lg \sigma - \lg N$ прямими лініями.

Рівняння кривої втоми зазвичай представляють у вигляді

$$\sigma_a^m N = C, \quad (1.13)$$

де σ_a – амплітуда змінних напружень;

m і C – постійні.

Для кожного сегмента [8] на графіку втомної довговічності існують унікальні значення m і C . Виходячи з формули (1.13), можна зробити висновок, що зі зростанням рівня змінних напружень зменшується кількість циклів, які матеріал здатен витримати до початку руйнування.

Якість поверхні зразків під час втомних випробувань відіграє критичну роль. Саме тому обробці поверхонь слід приділити особливу увагу, оскільки фактори такі як конфігурація нерівностей, глибина дефектів, наявність наклепу та залишкові напруження мають вирішальний вплив на втому матеріалу.

Термовтома

Під час роботи двигуна на нестандартних режимах (запуск, прийомистість, скидання газу) відбувається різка зміна температури матеріалу лопатки, що

призводить до виникнення термічних напружень. Величина термічних напружень визначається залежністю

$$\sigma_t = \frac{E\alpha\Delta t}{1-\mu} \quad (1.15)$$

де E – модуль пружності;

α – температурний коефіцієнт лінійного розширення;

Δt – перепад температур;

μ – коефіцієнт Пуассона.

Чим вище σ_t , тим швидше відбувається руйнування через термічну втому. Термічна втома характеризує здатність сплавів витримувати певну кількість температурних циклів. За формулою (1.15) можна ідентифікувати фактори, що впливають на рівень термічних напружень, а також на термостійкість матеріалу: це температурний коефіцієнт розширення, модуль пружності та коефіцієнт Пуассона. Величина σ_t також залежить від межі текучості матеріалу, його пластичності, що дозволяє розподіляти навантаження за допомогою пластичної деформації, а також від здатності матеріалу релаксувати напруження. Розподіл температурного поля, який залежить від коефіцієнтів теплопровідності та температуропровідності, а також від товщини стінок елемента, також впливає на термостійкість. На термостійкість впливають і такі явища, як малоциклова втома та чутливість матеріалу до концентрації напружень.

Для випробувань на термостійкість зазвичай використовують метод Коффіна, який передбачає імітацію термічних напружень шляхом фіксації зразка й обмеження його теплового розширення під час циклічного нагрівання електричним струмом.

При випробуванні матеріалів на здатність витримувати високі температури, важливо взяти до уваги особливості експлуатації елементів, що будуть з них створені. Властивості термостійкості у значній мірі зумовлені умовами, в яких проводять випробування. Наприклад, для лопаток турбін, важлива стійкість до температурних коливань, які виникають у процесі роботи,

а також їхня здатність проводити та розподіляти тепло. Термічні напруження в таких деталях зазвичай викликані різницею в розширенні між зовнішніми та внутрішніми шарами металу, коли зовнішні частини нагріваються сильніше. Саме тому спеціальні ливарні сплави, розроблені для використання в лопатках газових турбін, тестують за особливою процедурою, яка включає використання зразків у формі призм, створених для імітації реальних лопаток. Ці зразки піддаються циклічному нагріванню та охолодженню за допомогою чергування потоків гарячого та холодного газу (або повітря), до якого можуть додаватися продукти горіння.

1.1.4 Жаростійкість сплавів

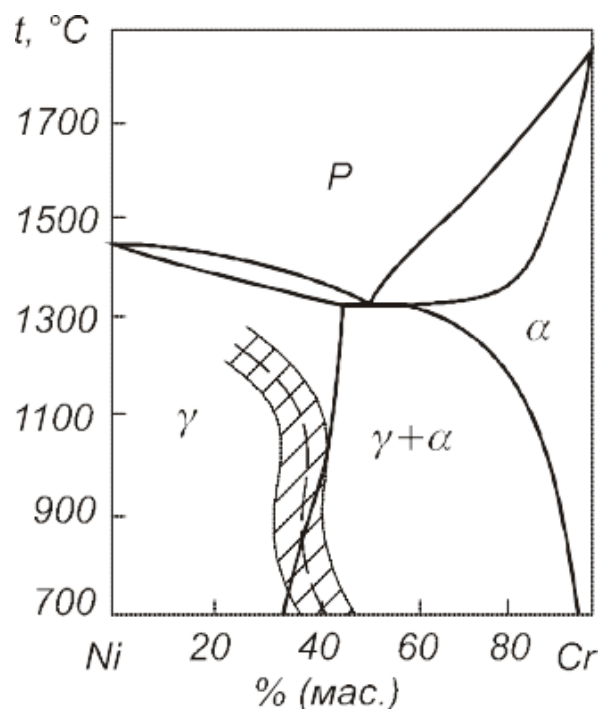
Жаростійкість – здатність матеріалу протистояти впливу на його поверхню зовнішнього окисного середовища за високих температур.

Випробування на жаростійкість є одним із важливих видів досліджень під час розроблення ливарних нікелевих сплавів для лопаток ГТД. Безперервне підвищення температури газу перед турбіною висуває дедалі вищі вимоги до проблеми забезпечення необхідного рівня жаростійкості цього класу матеріалу. Поверхневе окислення лопаток призводить, з одного боку, до зменшення перерізів і, отже, до зниження несівної здатності лопаток, з іншого боку, внаслідок вибіркості процесу окиснення (переважно на границях зерен) - до значного погіршення якості поверхні, що спричиняє зниження таких важливих властивостей, як опір втомі, термостійкість і т.д.

Жаростійкість, або опір газовій корозії, визначається швидкістю окислення, тобто приростом на одиницю поверхні за певний проміжок часу за температури випробування. У деяких випадках (якщо оксиди леткі) жаростійкість визначається втратою маси, в інших випадках – масою матеріалу зразків зі знятою окалиною.

1.2 Огляд стратегій легування жаростійких нікелевих сплавів

Жаростійкі сплави на основі нікелю часто включають систему Ni-Cr (рис. 1.4). Хром може розчинятися в нікелі при кімнатній температурі до рівня близько 30%. Додавання хрому значно покращує опір матеріалу до окислення при високотемпературних умовах. Захист від корозії забезпечується при вмісті хрому від 20 до 25%. Найвищу жаростійкість можна досягти, коли кількість хрому перевищує 40%. Сплави, такі як X10H90, X20H80, X30H70, мають однофазну структуру (γ -фазу твердого розчину на основі нікелю), тоді як X40H60, X50H50 складаються з двох фаз ($\gamma+\alpha$). Висока жаростійкість цих сплавів забезпечується завдяки утворенню під тонким зовнішнім шаром оксиду нікелю NiO внутрішнього шару Cr_2O_3 , який росте повільно, а також формуванню шпінелі NiCr_2O_4 .



Заштриховано область сплавів з максимальним опором повзучості при різних температурах

Рисунок 1.4 – Діаграма стану Ni–Cr

Сплави на основі системі Ni–Cr, не відзначаються достатньою жаростійкістю, тому було вирішено додати алюміній (Al), що спричинило формування γ' -фази (твердого розчину, базованого на інтерметаліді Ni_3Al з об'ємно-центрованою кубічною (ОЦК) кристалічною структурою). Розміри кристалічних ґраток нікелевого твердого розчину та γ' -фази мають схожі параметри ($\alpha_\gamma \approx \alpha_{\gamma'}$), що забезпечує когерентний зв'язок між ними. Відповідно до фазової діаграми Al–Ni (рис. 1.5), розчинність алюмінію в нікелі зменшується від 11% (мас.) при 1385°C до 6% при 750°C.

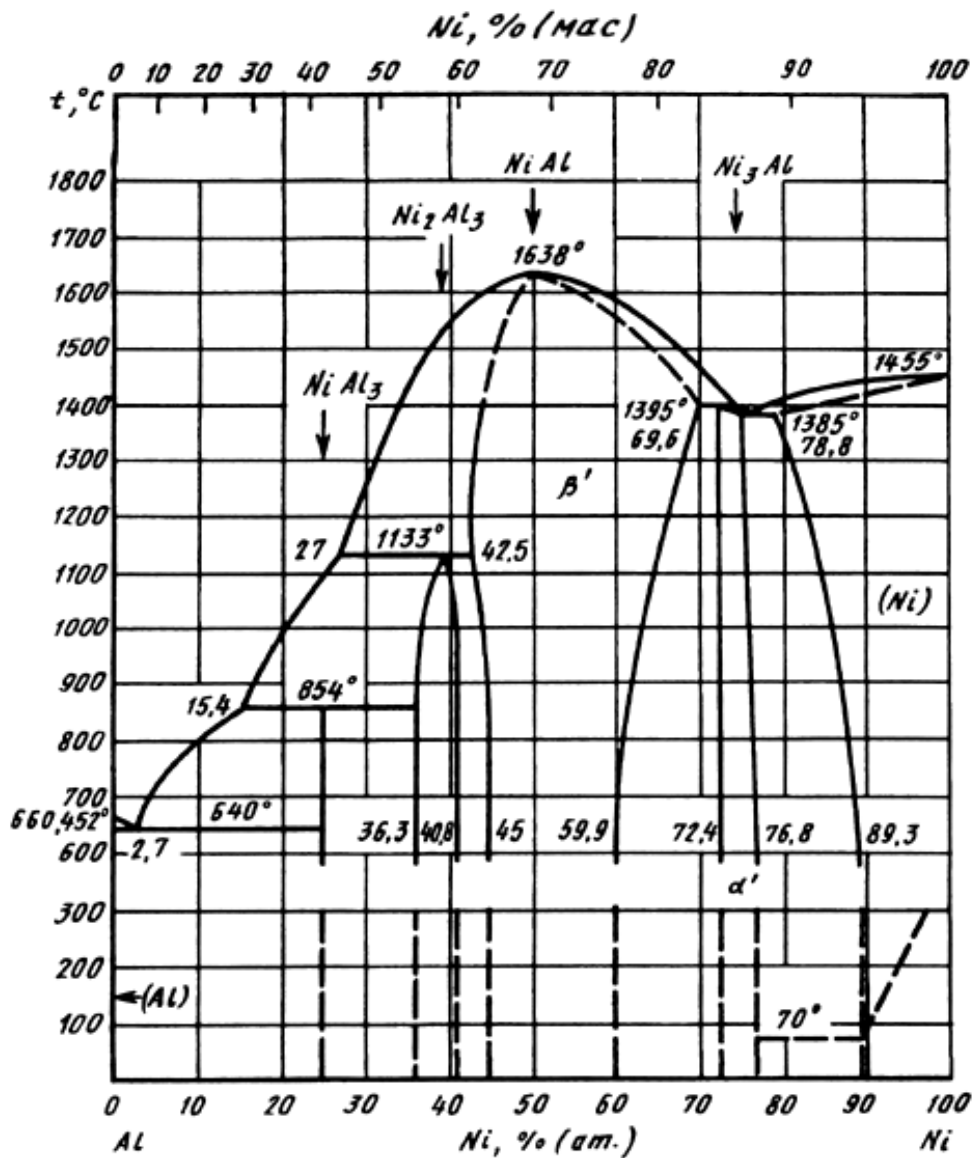


Рисунок 1.5 – Діаграма стану системи Al–Ni

Легування алюмінієм підвищило жароміцність (див. рис. 1.7) і покращило опір високотемпературному окисленню, що пов'язане з утворенням оксидної плівки Al_2O_3 .

Далі, до системи Ni–Cr–Al було додано кобальт, який сповільнює коагуляцію та знижує дифузійну рухливість атомів. Подальше покращення властивостей сплавів було досягнуто шляхом введення титану (рис. 1.6), що ускладнило хімічний склад γ' -фази, перетворивши її на $\text{Ni}_3(\text{Al},\text{Ti})$ та $(\text{Ni},\text{Co})_3(\text{Al},\text{Ti})$ і тим самим забезпечило вищу термодинамічну стабільність цієї зміцнюючої фази.

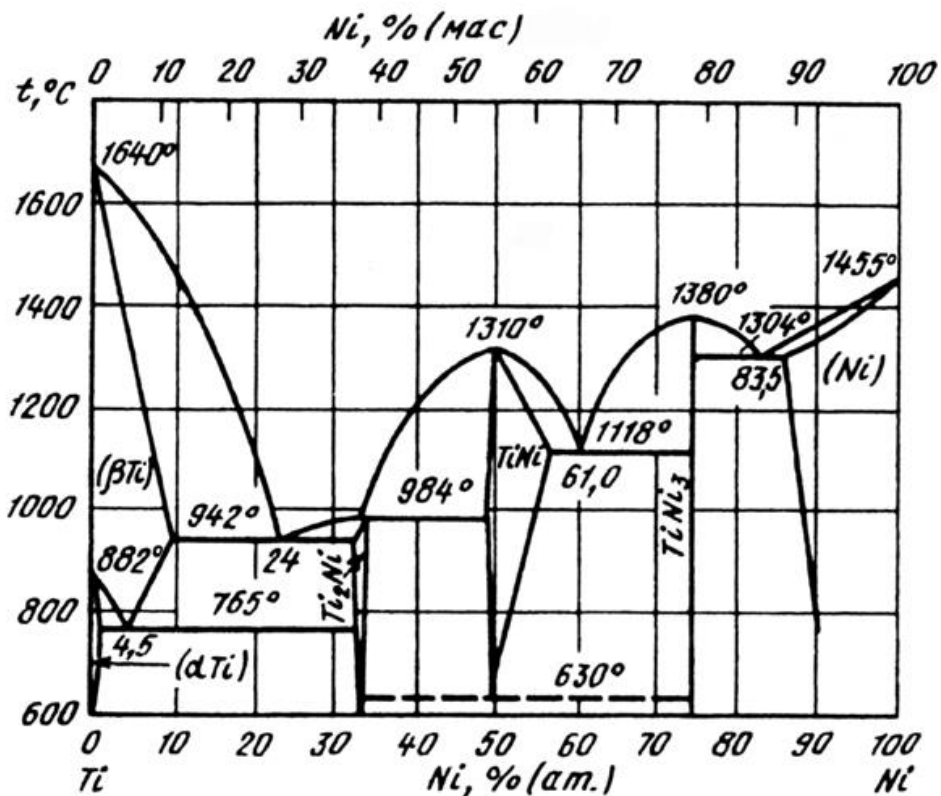


Рисунок 1.6 – Діаграма стану системи Ti–Ni

Додаткове легування за допомогою вольфраму (W) та молібдену (Mo) (див. рис. 1.7) зміцнює твердий γ -розчин, затримуючи дифузію; ніобій (Nb) та тантал (Ta) можуть заміщувати Al в структурі Ni_3Al . У результаті комплексного легування жароміцність значно зросла у порівнянні з не легованими сплавами ніхрому (табл. 1.2). Утворилися складнолеговані сполуки: γ -твердий розчин Ni з

домішками (Cr,Co,Mo,W), γ' -фаза Ni з (Al,Ti,Ta,Nb), а також присутні карбіди типу MC, M_6C , $M_{23}C_6$ та інші.

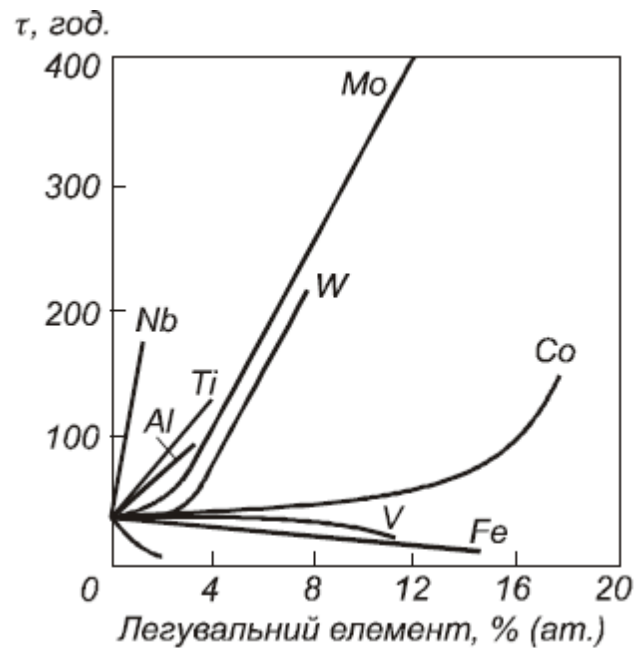


Рисунок 1.7 – Вплив легувальних елементів на час до руйнування сплаву 80%Ni + 20%Cr при випробуваннях на довготривалу міцність при 800°C і $\sigma = 200$ МПа

Таблиця 1.2 – Структура та властивості ніхрому (а) та комплексно легованого сплаву на основі нікелю (б)

Показник	Матеріал	
	Ніхром	Комплексно легований сплав на основі нікелю
Мікроструктура (схема)		
Структурний склад	γ -твердий розчин	γ -твердий розчин, γ' -фаза, карбіди
Границя міцності (σ_B), МПа	400	1000
Границя тривалої міцності (σ_{100}^{900}), МПа	30	250
Відносне видовження (δ), %	30	2-3

1.3 З'єднання деталей

Розвиток сучасних сплавів іде поряд із прогресом у створенні газотурбінних двигунів для авіабудування. Робота над сплавами просуvalася стрімко і в багатьох аспектах випередила розробку методів з'єднання компонентів. Традиційно, при виготовленні сплаву, основна увага приділялася його властивостям при високих температурах, довговічності та опору до окислення. З'єднання деталей залишалося окремим завданням для фахівців із зварювання та паяння, до яких зверталися за розробкою процедур і методів з'єднання для кожного нового сплаву вже після завершення його розробки. Для деяких сплавів такий підхід призводив до надмірно високої вартості, оскільки не враховувалися та не коригувалися деякі металургійні змінні, що відповідали за зварне розтріскування.

1.3.1. Переваги зварювання

Незважаючи на певні складнощі, зварювання залишається одним із ключових методів виробництва компонентів як для авіаційних двигунів, так і для двигунів наземного обладнання. Зварювання дозволяє виготовляти частини з точністю розмірів, що забезпечує економне використання матеріалу, мінімізуючи непотрібну масу та підтримуючи помірну вартість. Використання зварних деталей не призводить до значного скорочення терміну служби обладнання, особливо якщо ці деталі встановлені не в найбільш критичних місцях. Точність, яку можна досягти на зварних деталях, є достатньо високою, за умови використання належних методів для скріплення та зварювання.

1.3.2 Проблематика зварювання

Однією з основних труднощів, які виникають під час зварювання, є макро- і мікророзтріскування. Макротріщини – це відносно великі плоскі порушення цілісності, які можна побачити неозброєним оком. Мікротріщини можна ідентифікувати лише за допомогою металографічних (мікроскопічних) досліджень. Основне завдання при зварюванні суперсплавів – запобігти виникненню таких дефектів. Багато суперсплавів, наприклад ливарні 713C та B-1900, схильні до мікророзтріскування настільки, що зварити шов без мікротріщин практично неможливо.

Інша суттєва проблема при зварюванні суперсплавів – зберегти їх механічні властивості. Зазвичай вдається використовувати техніки зварювання, які дозволяють уникнути істотного зниження границі міцності або текучості, але пластичність зварних зразків знижується майже завжди. Це відбувається через ліквідацію в затверділому металі шва, який стає менш пластичним, ніж аналогічний матеріал зі структурою, сформованою при обробці деформацією. Ліквідація в затверділому металі шва також може призвести до зниження окисної стійкості. Якщо під час затвердіння металу шва відбувається ліквідація елементів з високою щільністю електронних порожнин, може статися виділення σ -фази або інших крихких фаз під час зварювання або в процесі експлуатації сплаву. Кожен сплав необхідно досліджувати окремо, щоб оцінити, наскільки його механічні властивості можуть погіршитися під час зварювання. Для зниження ліквідації може бути корисна термообробка після зварювання, але термічне відпалювання великих виробів часто буває складним.

У деяких місцях зони термічного впливу може відбуватися прискорене зерноутворення, розчинення та повторне виділення карбідів та інших фаз. Такі зміни можуть спричинити зниження корозійної та оксидативної стійкості, тому кожну зміну необхідно досліджувати окремо.

Уникнення посилення швів (використання посилюючих валиків на лицьовій та зворотній стороні шва) є важливим у випадках, коли основною

причиною відмови є втома матеріалу. Відомо [8, 9], що застосування посилюючих валиків з зворотного боку шва може призвести до 2,25–2,5-разового зниження втомної міцності. Щоб уникнути проблем з втомою, найкраще розташовувати зварні деталі у малонавантажених ділянках.

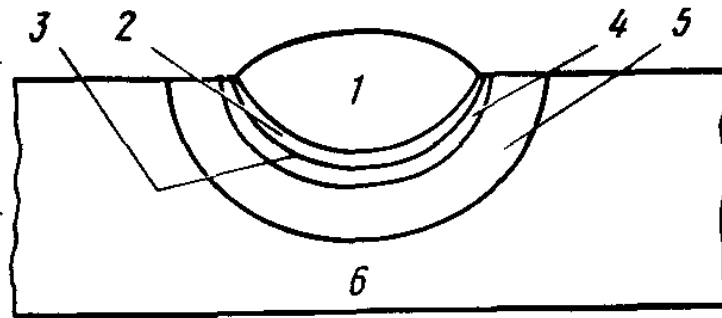
1.3.3 Автоматизація зварювання

Зварювання покритими електродами – це процес, який зазвичай виконується вручну, і спроби його автоматизувати не набули широкого поширення. Інвестиції в реалізацію цього процесу не великі, однак вимагають значної кваліфікації оператора. Зварювання у захисних газах вольфрамовим або плавким електродом можна виконувати як вручну, так і в автоматичному режимі. У напіваавтоматичному режимі зварювальний пальник монтують на пристрій, який переміщає його уздовж зварного шва, а також підключають пристрої, що регулюють швидкість руху пальника і величину дугового проміжку. Застосування програмованого переміщення електрода та зміни напруги перетворює процес зварювання на повністю автоматизований.

Раніше автоматизація зварювального процесу базувалася на встановленні певної програми до початку процесу, що називали цифровим підходом до управління. Нещодавно було запроваджено новий підхід та розроблено метод, який називають методом адаптаційного регулювання. При цьому під час зварювання моніторять результативні параметри, наприклад, ширину ванни, і відповідно до них коригують вхідні параметри, такі як силу струму, щоб домогтися бажаного рівня результативних параметрів. Різні методи адаптаційного регулювання можуть бути дуже корисними при зварюванні суперсплавів для певного застосування.

1.3.4 Характеристика зварних з'єднань

У найпростішому вигляді зварні з'єднання формуються з двох основних регіонів: металу наплавки та зони теплового впливу. Згодом цю концепцію розвинули, виділивши декілька різних зон [10], що представлені на рисунку 1.8.



1 – зона змішування; 2 – зона роздільного плавлення; 3 – поверхня зварювання; 4 – зона часткового оплавлення; 5 – справжня зона термічного впливу; 6 – зона незайманого основного металу

Рисунок 1.3 – Рекомендована термінологія та визначення для характерних зон зварного шва [11]

Зона змішування. Це щільна область наплавленого металу, де внаслідок перемішування хімічний склад змінюється через розбавлення розплавленим матеріалом від прилеглого базового металу.

Зона роздільного плавлення. Це зовнішній обмежений шар наплавленого металу, що складається з основного металу, який розплавився та затвердів протягом процесу зварювання без механічного перемішування з присадковим металом.

Площина зварювання. Це поверхня, що обмежує область повного розплавлення, що утворюється під час зварювання. Її положення чітко видно при аналізі структури, яка формується у процесі кристалізації.

Зона часткового розплавлення. Це ділянка базового металу, розташована безпосередньо за площиною зварювання. В межах цієї зони кількість розплавленого металу варіюється від 0 до 100 відсотків.

Справжня зона теплового впливу. Це секція основного металу, в якій всі мікроструктурні зміни, викликані зварюванням, відбуваються у твердому стані.

1.3.5 Короткочасний термічний цикл

Металургійні дослідження суперсплавів зазвичай проводяться в умовах повільного термічного циклу, який є майже рівноважним. Однак, під час зварювання відбувається швидкий термічний цикл, що призводить до інших металургійних змін протягом цього періоду. Щоб розуміти суть явищ, таких як розтріскування, необхідно знати ці зміни.

Зниження температури солідуса

Для початку розглянемо ефект швидкого твердіння на процес кристалізації розплаву. Явище ліквідації під час твердіння сплавів відоме: тверда фаза матиме хімічний склад, який відрізняється від складу рідкої фази, з якої вона утворилася. Якщо в рівноважному стані коефіцієнт розподілу менший за одиницю, то концентрація розчиненого елемента в твердій фазі, що з'явилася при твердінні, буде нижчою, ніж у розплаві, і це призводить до збагачення розплаву розчиненим елементом. Таке збагачення може бути причиною зниження температури твердіння розплаву. У системах з евтектикою збагачення розплаву може тривати, доки його склад не стане повністю евтектичним, що робить подальше зниження температури твердіння неможливим. Таким чином, розплав, який твердіє при відносно високій температурі в умовах рівноваги, може залишатися рідким до значно нижчих температур при швидкому твердінні через ліквідацію розчиненого елемента.

Фазовий склад плавлення

При швидкому нагріванні може виникати інше явище – місцеве плавлення. На рисунку 1.4 показано фазову діаграму простого двокомпонентного сплаву АВ. Діаграма відображає номінальний склад сплаву С та рівноважні структури при різних температурах. При температурі 1 в сплаві спостерігаються фази α і β , при температурах 2 і 3 — лише фаза α , а при температурі 4 — фаза α та рідина.

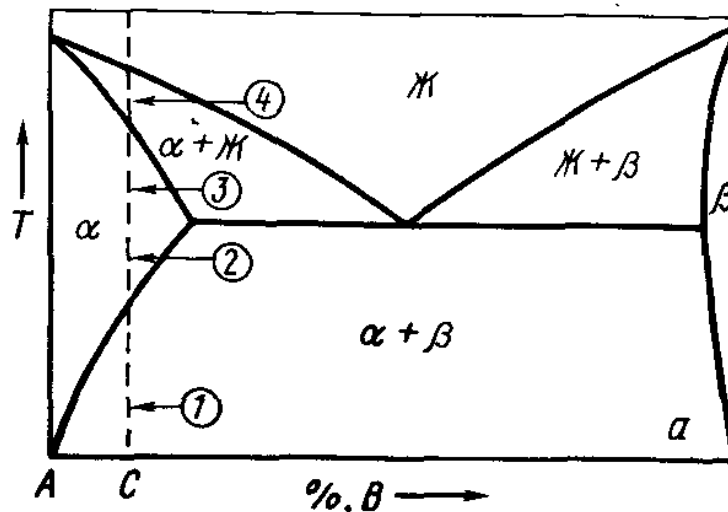


Рисунок 1.4 – Діаграма стану сплаву простої подвійної системи

Припустимо, що цей сплав швидко нагрівся до початкової температури 1. Рисунок 1.5 показує, що при цій температурі утворюється двофазна структура $\alpha + \beta$ і відповідний розподіл розчиненого елементу В. При температурі 2 рівноважний стан передбачає наявність тільки фази α . Однак, оскільки сплав нагрівається швидко, об'ємний баланс не досягається. На межі фаз α і β існує місцевий баланс, і відбувається розчинення часток фази β . Для цього випадку також показаний розподіл розчиненого елементу. Якщо температура 3 досягнута раніше, ніж станеться повне розчинення часток фази β , відбудеться утворення рідкої фази. Фазова діаграма свідчить, що в структурі $\alpha + \beta$ рідка фаза повинна бути присутня при температурі 3. Таким чином, якщо завдяки швидкому нагріванню зберігається двофазна структура і існує місцевий баланс, на поверхні межі між двома твердими фазами має існувати рідка фаза. Це явище, яке виявляється у місцевому плавленні через нерівноважний розподіл фаз в процесі швидкого нагріву, називають "фазоскладовим зплавленням".

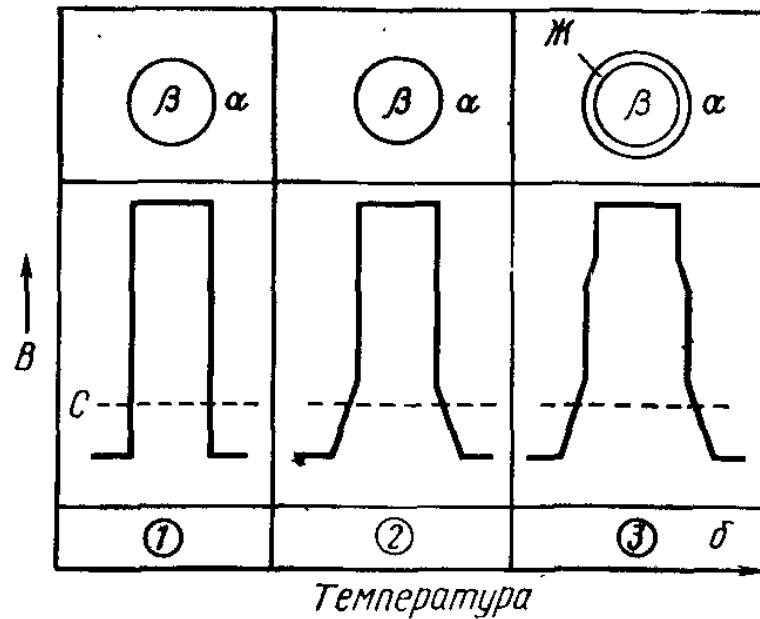


Рисунок 1.5 – Структура та розподіл компонента В у сплаві хімічного складу С за температур, зазначених на рис.1.4, а в разі швидкого нагрівання від температури 1

1.3.6 Вплив незначних домішок та добавок

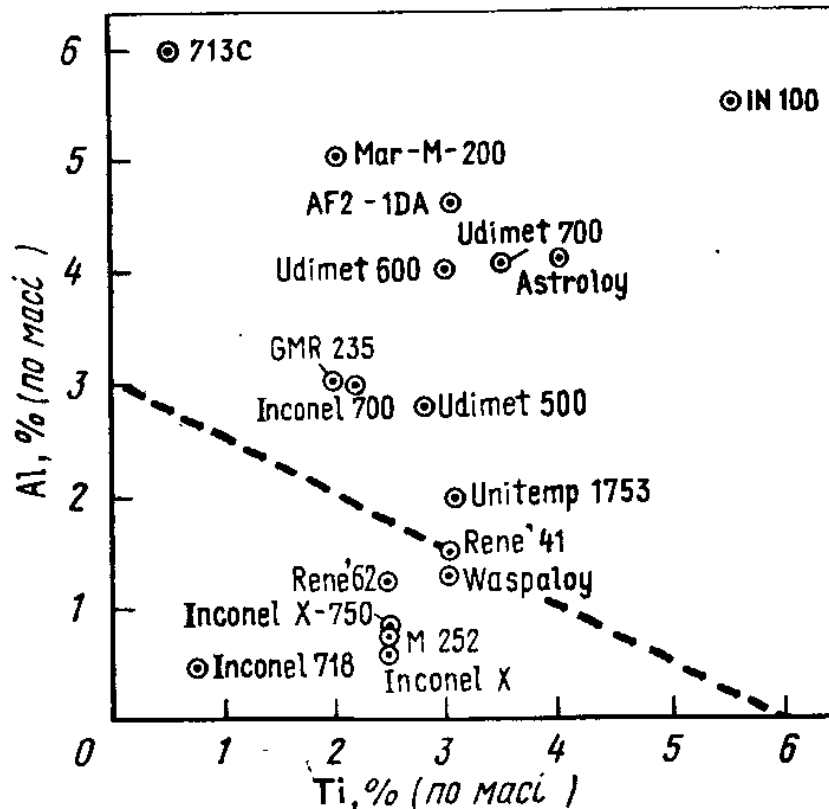
Сплави на нікелевій основі та зміцнені твердим розчином, зазвичай мають бути легкозварюваними. Вони не схильні до фазових змін або реакцій старіння, які часто викликають складнощі під час зварювання. Проте, через широкий діапазон кристалізації, характерний для цих сплавів, проблеми з гарячими тріщинами та дефектами розриву часто роблять їх зварювання складним.

Невеликі кількості елементів, таких як сірка у сплавах на основі нікелю, відомі як шкідливі домішки; якщо їх рівень навіть трохи перевищує допустимий, вони можуть різко підвищити ризик утворення тріщин під час зварювання. В таких випадках значно збільшується температурний діапазон без пластичності. Однак, часто у сплавах, що мають схильність до тріщин, рівень цих "незначних домішок" не перевищує норм, встановлених специфікацією. Щоб краще

зрозуміти цю проблему, по сплаву Hastelloy X було проведено статистичне дослідження [12] з використанням багатофакторного аналізу. Метою було кількісно визначити вплив восьми незначних домішок на схильність до тріщин у зоні термічного впливу зварного шва. Ця схильність зростала з підвищенням рівня бору, сірки, фосфору та вуглецю. Шкідливий вплив кремнію та магнію був незначний, а марганець і цирконій навпаки сприяли поліпшенню. Однак, чотири елементи, які мали найсильніший негативний вплив, окремо не були настільки ефективними. Таким чином, було зроблено висновок, що окрема незначна домішка, рівень якої не перевищує встановлені межі, сама по собі не викликає значного збільшення ризику тріщин у зоні термічного впливу. Проте, коли номінальний рівень кількох незначних домішок стає високим, їхня сукупна дія стає адитивною, і в зоні термічного впливу може спостерігатися значне збільшення схильності до тріщин. Таким чином, видається, що для надійного прогнозування схильності суперсплавів до зварних тріщин, необхідно ретельно оцінити їх хімічний склад.

1.3.7 Сплави, зміцнені випаданням γ' -фази

Сучасний стан технології зварювання нікелевих суперсплавів ілюструється на рис. 1.6. Сплави з невеликим вмістом алюмінію та титану, що знаходяться під штриховою лінією, легко піддаються зварюванню. Однак, коли загальний вміст алюмінію та титану збільшується, процес зварювання стає складнішим. Межу зварюваності позначають сплави подібні до René 41 та Waspaloy; їх можна зварювати з відносно невеликими труднощами, але іноді вони схильні до тріщин під час постзварювальної термічної обробки. Ливарні сплави з високим вмістом алюмінію та титану (як-от 713C і IN-100) мають низьку пластичність при будь-яких температурах і зазвичай тріскаються під час зварювання. Важко зварювані характеризуються схильністю до утворення тріщин під час зварювання та деформаційного старіння



важкозварювані – вгору від штрихової лінії; легкозварювані – вниз від штрихової лінії

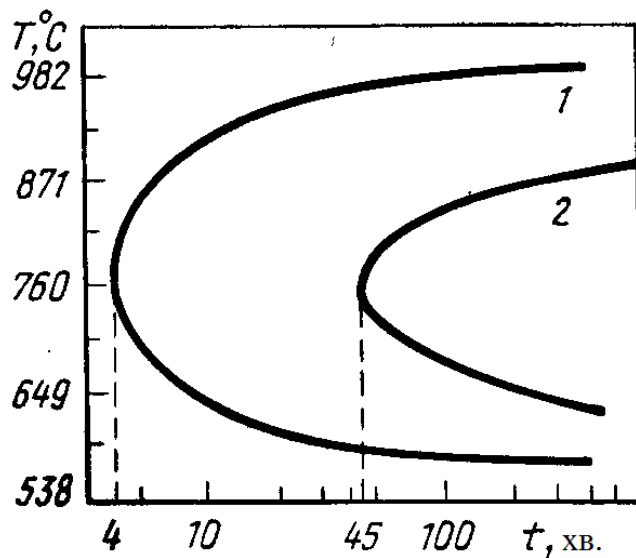
Рисунок 1.6 – Поділ суперсплавів, що зміцнюються виділеннями γ -фази [28].

Зазвичай, якщо сплави, наприклад, René 41 термічно оброблені для отримання твердого розчину, ретельно очищені та захищені від забруднення киснем за допомогою спеціальних заходів, вони зварюються без утворення тріщин. Але якщо після зварювання з'єднання піддавати зміцненню шляхом старіння, сплави схильні до інтенсивного тріщиноутворення. Щоб уникнути цього, перед процесом старіння зі зварних з'єднань знімають залишкові напруження шляхом повторного нагріву до температури гомогенізації. Після такої обробки з'єднання можна термічно зміцнювати без будь-яких проблем. Однак у деяких випадках сплави тріскаються під час нагріву до температури відпуску. Такий тип тріщин характерний для великогабаритних деталей, які повільно охолоджуються. Сплави або окремі партії сплавів, які під час повторного нагріву до температури відпуску більше схильні до

тріщиноутворення, ніж інші сплави чи партії, були названі "схильними до тріщин умов деформаційного старіння".

Випробування зварних швів

Щоб відтворити реальні умови, використовуючи невеликі кількості матеріалів, проводили лабораторні випробування за допомогою методу напруженого шва. Сьогодні існує понад 25 різних типів таких випробувань, але і "General Electric" [13], і "Rocketdyne" [14] вибрали метод "круглої латки". У лабораторії "General Electric" застосовували підхід [15], згідно з яким встановлюють залежність між температурою, часом та утворенням тріщин у напружених швах. Після проведення ізотермічного відпалу при температурах від 595 до 980 °C, були побудовані S-подібні криві, які показують умови виникнення тріщин. Типові S-подібні криві, які ілюструють відмінності між плавками, схильними до тріщиноутворення та стійкими до нього в умовах деформаційного старіння, представлені на рис. 1.7.



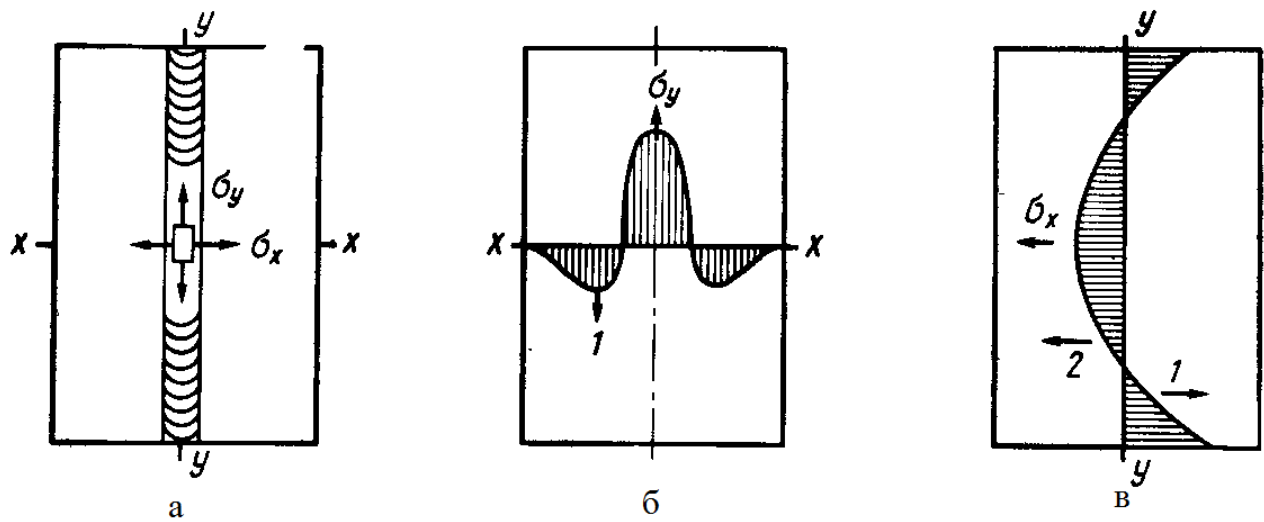
1 – схильні, 2 – стійкі до розтріскування при деформаційному старінні

Рисунок 1.7 – Криві ізотермічного відпалу, що демонструє виникнення тріщин у сплаві Rene 41

"Ніс" S-подібної кривої для плавки, схильної до такого тріщиноутворення, знаходиться на 4-й хвилині, в той час як для стійкої плавки цей період становить 45 хвилин. Оскільки тріщиноутворення відбувалося в інтервалі від 585 до 980 °C, зсув "носа" S-подібних кривих у бік більш тривалого часу повинен бути важливим фактором у зниженні схильності до тріщиноутворення в умовах деформаційного старіння. Сорткування цих плавок за схильністю до тріщиноутворення проводили на основі реальних виробничих процесів; плавки, схильні до тріщиноутворення, демонстрували інтенсивне та численне тріщиноутворення, тоді як ті, що були охарактеризовані як стійкі, не показували тріщиноутворення в умовах деформаційного старіння.

Напруженість

Для того, щоб створити умови деформаційного старіння, яке може спровокувати тріщиноутворення, необхідна висока напруженість шва. Вона виникає під час виробництва реальних виробів зі сплаву René 41 і є одним з ключових факторів, що визначають використання цього матеріалу. Іншими словами, сплав René 41 не воліють застосовувати для створення великогабаритних зварних з'єднань через їх високу напруженість. Під час тестування напружених зварних з'єднань було виявлено, що при руйнуванні зварного шва тріщиноутворення, яке є характерним для деформаційного старіння, не виникає. Вважають, що крім зовнішніх напружень, які регулюються геометрією зварюваної конструкції, істотну роль у тріщинуванні, яке виникає внаслідок деформаційного старіння, відіграють внутрішні залишкові напруження. На рис. 1.8 у якісному вигляді представлено розподіл напружень навколо довгого ненапруженого стикового шва у тонколистовому виробі. Можна помітити, що вісь розтягуючих напружень розташовується паралельно і перпендикулярно до напрямку зварювання у наплавленому металі і в суміжній зоні термічного впливу, а також що ці розтягуючі напруження збалансовані стискаючими. Коли мова йде про напружений шов, скомпенсовані стискаючі напруження можуть розташовуватися далі від зварного шва, тобто у навантажувальних елементах конструкції. Рівень залишкових розтягуючих напружень уздовж осі може досягати межі текучості металу.



а - стиковий шов; б - розподіл компоненти σ_y вздовж осі x ; в - розподіл компоненти σ_x вздовж осі y : 1 – стиснення; 2 – розтягнення

Рисунок 1.8 – Типовий розподіл залишкових напружень у зоні стикового зварного шва [16]

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Метою даної роботи було дослідження зварюваності розробленого дослідного сплаву ЖСЗЛС-М у порівнянні з промисловими сплавами ЖСЗЛС та ВЖЛ12Е. Хімічний аналіз плавів здійснювався стандартними методами, згідно з вимогами ТУ 14-1689-73 та ОСТ 1.90126-85. Спектральний хімічний аналіз проводився на оптичному емісійному приладі ARL-4460 (квантометр одночасного багатоканального аналізу) у діапазоні хвиль 170–800 нм. Хімічний склад дослідних плавів досліджуваних сплавів наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад дослідних плавів досліджених сплавів

Марка сплаву	Вміст елементів, мас. %										
	C	Cr	Al	Ti	Mo	W	Co	Ta	Hf	B	Ni
ЖСЗЛС-М	0,09	14,3	3,0	3,0	1,8	6,8	4,5	2,9	0,35	0,012	зал.
ВЖЛ12Э	0,15	9,5	5,5	4,4	3,1	1,6	4,8	Nb=0,7	V=0,7	0,015	зал.
ЖСЗЛС	0,08	16,2	2,7	2,7	3,5	3,5	4,5	–	–	0,011	зал.

Хімічний склад плавів зразків із промислових сплавів ВЖЛ12Е та ЖСЗЛС за вмістом легувальних елементів відповідав нормам ОСТ 1.90126 – 85 та нормативно-технічній документації. Склад плавів зразків із розробленого дослідного сплаву ЖСЗЛС-М за вмістом легувальних елементів відповідав складу, заявленому у патенті України № 67814 від 12.03.2012. Хімічний склад серійної присадкового дроту марки ЕП367 відповідав нормам ГОСТ 2246-70 (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Хімічний склад присадкових матеріалів

Марка сплаву	Вміст елементів, мас. %										
	C	Cr	Al	Ti	Mo	W	Co	Ta	Hf	B	Ni
ЖСЗЛС-М	0,09	14,3	3,0	3,0	1,8	6,8	4,5	2,9	0,35	0,012	осн.
ЭП367	$\geq 0,08$	14,0-16,0	–	$\geq 0,2$	14,0-16,0	–	–	–	–	$\text{Fe} \geq 4,0$	осн.

Для металографічних досліджень спочатку проводився ЛЮМ-контроль усіх досліджуваних темплетів після зварювання, як у литому стані (до термообробки), так і після зварювання та термічної обробки (ТО), з метою контролю зразків сплавів на наявність різних дефектів у зварних швах (ЗШ) та навколошовних зонах (НШЗ) (тріщини, пористість, оксидні плівки, непровари та ін.). Після виконання зачистки зварних швів на зразках-темплетах були проведені порівняльні металографічні дослідження мікроструктури зварних швів (ЗШ), навколошовних зон (НШЗ) та основного металу (ОМ) досліджуваних сплавів ВЖЛ12Е, ЖСЗЛС-М та ЖСЗЛС.

Дослідження мікроструктури зразків проведено на нетравлених і травлених мікрошліфах на світловому оптичному мікроскопі "Olympus IX-70" з цифровою відеокамерою "ExwaveHAD color video camera Digital Sony" при різних збільшеннях.

Мікроструктуру досліджено за допомогою травлення на поверхні шліфів реактивом Марбле (CuSO_4 - 4 г, HCl - 20 мл, вода - 20 мл) за режимом: травлення 10-15 секунд, промивання водою, сушіння гарячим повітрям.

Для виявлення евтектики $\gamma + \gamma'$ і γ' - фази використовували реактив CuSO_4 - 20 г, H_2SO_4 - 5 мл, решта - H_2O , густина струму - 500 А/м². Для виявлення карбідів, використовувався реактив NaF - 30 г, HCl - 100 мл, лимонна кислота – 100 г, H_2O – 1000 мл, густина струму – 200 А/м². Для ідентифікації σ - і μ -фаз, а також карбідів типу Me_{23}C_6 і M_6C , що мають схожу пластинчасту і голчасту морфологію, проводили кольорове травлення за допомогою реактиву: червона кров'яна сіль -10 г, NaOH - 10 г, H_2O - 100 мл, густина струму 500 А/м².

Мікроаналіз виконували на шліфах, виготовлених у поперечних перерізах зразків (темплетів) досліджуваних сплавів ВЖЛ12Э, ЖСЗЛС-М і ЖСЗЛС. Досліджувані перерізи шліфів збігаються із зонами зварного шва і фонового світіння в зонах термічного впливу.

Товщина всіх зразків (темплетів) у зоні оброблення під зварювання становила $\sim 2,0 \dots 2,5$ мм. Під час мікроаналізу встановлено, що в основному матеріалі зразків (темплетів) усіх досліджених сплавів ливарні дефекти не виявлено. Зварні шви мають чітку сформовану границю з проникненням в основний матеріал.

З ПОРІВНЯЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗВАРЮВАНOSTІ ЛИВАРНИХ ЖАРОМІЦНИХ НІКЕЛЕВИХ ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ

Впровадження в промислове виробництво нових ливарних вогнетривких нікелевих сплавів для газотурбінної техніки вимагає від матеріалів набору високих експлуатаційних характеристик: термостійкості, корозійної стійкості, а також хороших технологічних властивостей (ливарних, зварюваності тощо). Однак, значним мінусом цих сплавів є обмежена технологічна зварюваність через схильність зварних з'єднань до утворення гарячих тріщин різних типів під час аргонно-дугового зварювання. Цей процес часто виявляється незамінним при усуненні ливарних дефектів на критично важливих деталях газотурбінних двигунів (ГТД). Технологічні складнощі створення якісних зварних швів без гарячих тріщин в багатьох випадках є єдиним можливим способом формування з'єднань із високолегованих ливарних вогнетривких нікелевих сплавів [17–20].

Покращення зварюваності вогнетривких нікелевих сплавів з якісно сформованими зварними швами та розроблення відповідної технології відзначається з одного боку нормативними вимогами забезпечення відсутності в швах тріщин будь-якої топографії та морфології, а з іншого боку – відсутністю прийнятних технологічних рішень, які дозволяють усунути ливарні дефекти відповідно до зазначеної нормативної документації. У зв'язку з цим у ряді критично важливих виробів галузевими нормативами дозволяється наявність мікротріщин певної довжини або кількості пористості на одиницю площі зварного шва [21–27].

Тому, тільки комплексний підхід, який включає в себе вирішення завдань з матеріалознавства та технології, дозволяє вирішувати проблеми усунення ливарних дефектів за допомогою аргонно-дугового зварювання у відповідальних деталях ГТД, а також забезпечувати технологічні можливості їхнього ремонтного зварювання з метою збільшення надійності роботи та впровадження у промислове виробництво нових ливарних жаростійких нікелевих сплавів, які використовуються в газотурбінному обладнанні, вимагає від матеріалів цілого

ряду високих робочих властивостей: термостійкості, стійкості до корозії, а також відмінних технологічних характеристик, таких як ливарні властивості, зварюваність тощо. Основною проблемою жаростійких нікелевих сплавів є їх обмежена зварюваність, зумовлена схильністю зварних швів до утворення гарячих тріщин різного типу під час аргонно-дугового зварювання, незважаючи на те, що цей процес часто є незамінним при виправленні ливарних дефектів на важливих деталях газотурбінних двигунів. Труднощі з отриманням якісних зварних швів без гарячих тріщин часто є єдиною можливістю для створення з'єднань із високолегованих ливарних жаростійких нікелевих сплавів.

Покращення зварюваності цих сплавів з якісно утвореними зварними швами та розробка відповідної технології обумовлюється з одного боку вимогами стандартів щодо відсутності тріщин будь-якої форми та структури у швах, а з іншого – необхідністю технологічних рішень, які б дозволили усунути ливарні дефекти у відповідності до цих стандартів. Тому в деяких відповідальних виробках за галузевими стандартами допускається наявність мікротріщин певної довжини або певної кількості пор на одиницю площі зварного шва.

Отже, лише комплексний підхід, що об'єднує вирішення завдань у галузі матеріалознавства та технологій, дозволяє вирішувати проблеми з усунення ливарних дефектів за допомогою аргонно-дугового зварювання у критично важливих деталях газотурбінних двигунів, а також забезпечувати технічні можливості їх ремонтного зварювання, з метою підвищення надійності їх роботи та продовження терміну служби [28–36].

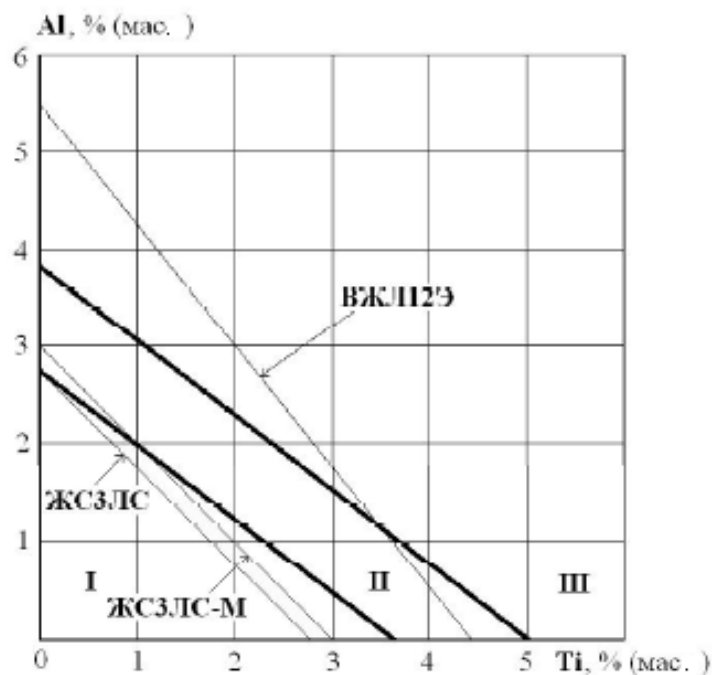
Відомо [17, 21–24, 29, 30], що можливість утворення термічних тріщин у жароміцних нікелевих сплавах оцінюється залежно від вмісту алюмінію (Al), титану (Ti) і кількості виділеної γ' - фази, що виділилася ($V\gamma'$), яка найбільше впливає на рівень утворюваних залишкових температурних напружень, що утворюються.

Для порівняльної оцінки зварюваності жароміцних нікелевих сплавів на рис. 3.1 наведено діаграму, яка передбачає поділ сплавів на три групи: добре, задовільно і погано зварювані. Оскільки головну роль у зміцненні жароміцних нікелевих сплавів (ЖНС) відіграє γ' -фаза, вміст якої в сучасних сплавах

перевищує 50 % за масою, то це визначає складнощі при їх зварюванні плавленням, тобто методом аргано-дугового зварювання.

До першої групи можна віднести промисловий ливарний зварюваний корозійностійкий нікелевий сплав ЖСЗЛС із вмістом алюмінію 2,5-3,0 % при граничній умові 2,7 %, титану 2,5-3,0 % за граничної умови 3,6 %, що відповідає кількості γ' -фази 38-40 %. Сплав не схильний до утворення термічних тріщин (рис. 3.1, зона I).

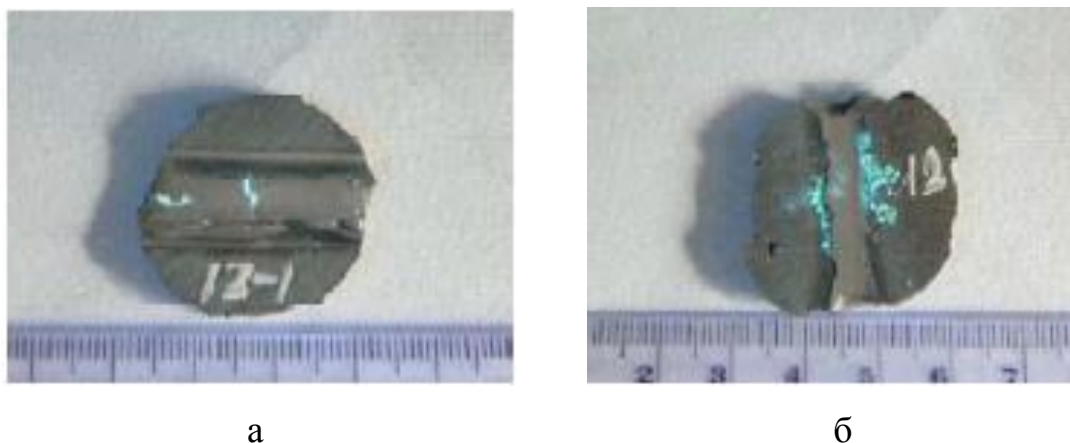
До другої групи входить розроблений на основі промислового сплаву ЖСЗЛС ливарний зварюваний корозійностійкий сплав ЖСЗЛС-М з підвищеною жароміцністю, в якому вміст алюмінію 2,5-3,5 % за граничної умови 2,7 %, титану 2,5-3,5 % за граничної умови 3,6 %, що відповідає 42-46 % γ' - фази, але не більше 50 %. Сплав не має схильність до утворення термічних тріщин (рис. 3.1, зона II).



зона I-III відповідно, сплав не схильний, з помірною схильністю, з високою схильністю до утворення тріщин

Рисунок 3.1 – Діаграма для оцінки схильності жароміцних нікелевих сплавів до утворення термічних тріщин

До третьої групи належить ливарний жароміцний не корозійностійкий нікелевий сплав ВЖЛ12Э з високою схильністю до утворення термічних тріщин із вмістом алюмінію (5,0-5,7 %) за граничної умови 2,7 %, титану – (4,2-4,7 %), при граничній умові 3,6 %, що відповідає кількості γ' -фази 58-62 %, що значно перевищує 50 % (рис. 1, зона III, рис. 3.2).



а - тріщини в зварному шві (присадка ЭП367); б - групове світіння в зоні зварювання (присадка ЖСЗЛС-М)

Рисунок 3.2 – Зовнішній вигляд поверхні зразків-темплетів після зварювання промислового ливарного жароміцного не корозійностійкого сплаву ВЖЛ12Э

Дослідження зварюваності проведено методом аргонодугового зварювання (АДЗ) на зразках-темплетах сплавів ВЖЛ12 Э, ЖСЗЛС-М і ЖСЗЛС у литому стані двома видами присадних матеріалів: дослідним сплавом ЖСЗЛС-М (електроди $\varnothing$ 1,8 мм) і серійним присадним дротом марки ЭП367.

На рис. 3.2 – 3.4 представлено зовнішній вигляд зони зварного шва. Під час зварювання зразків-темплетів сформувався щільний зварний шов, дефекти типу непровар не виявлені. Під час зовнішнього огляду зварних темплетів сплаву ВЖЛ12 Э (рис. 3.2) в ультрафіолетовому світлі в зоні зварного шва виявлено поперечні та поздовжні тріщини, а також групові точкові світіння пенетранта, на

зразках дослідного сплаву ЖСЗЛС-М і промислового ЖСЗЛС – світіння поодинокі (рис. 3.3, 3.4).



а



б

а - поодинокі точкові світіння в зварному шві (присадка ЕП367);

б - поодинокі точкові світіння в зварному шві (присадка ЖСЗЛС-М)

Рисунок 3.3 – Зовнішній вигляд поверхні зразків-темплетів після зварювання дослідного ливарного зварюваного жароміцного корозійностійкого сплаву ЖСЗЛС-М з підвищеними механічними властивостями (на рівні промислового сплаву ВЖЛ12Э)



а



б

а - поодинокі точкові світіння в зварному шві (присадка ЕП367);

б - поодинокі точкові світіння по межі зварного шва (присадка ЖСЗЛС-М)

Рисунок 3.4 – Зовнішній вигляд поверхні зразків-темплетів після зварювання промислового ливарного зварюваного жароміцного корозійностійкого сплаву ЖСЗЛС

На рис. 3.2 показано індикаторний розподіл дефектів у зварному шві під лампою УФС під час контролю зони зварювання зразків-темплетів промислового сплаву ВЖЛ12Э. На зразку-темплеті сплаву ВЖЛ12Э (рис. 3.2, а) зварний шов сформований серійним присадним матеріалом ЭП367. Ширина зварного шва - становить $\sim 4...6$ мм. По зварному шву виявлено дві зварювальні тріщини. Тріщини звивисті та окислені, протяжністю $\sim 4...6$ мм.

На малюнку (рис. 3.2, б) представлено зовнішній вигляд зварного шва на зразку-темплеті сплаву ВЖЛ12Э, який сформований дослідним присадним матеріалом ЖСЗЛС-М. Ширина зварного шва – становить $\sim 4...6$ мм. Видно, що на поверхні зразка-темплета в зоні зварного шва спостерігається групове точкове світіння через скупчення пор. На зразку (темплета) сплаву ВЖЛ12Э поверхні в зоні зварного шва виявлено скупчення пор діаметром $\sim 0,1...0,5$ мм.

Під час мікроаналізу зони зварювання зразків-темплетів дослідженого промислового сплаву ВЖЛ12Э, виявлено зварні тріщини (рис. 3.5). Встановлено, що тріщини розвиваються як по зварному шву, так і по межі зварного шва. Тріщини мають звивисту морфологію.



Рисунок 3.5 – Тріщини, що виходять на зовнішню поверхню по межі зварного шва і зони термічного впливу в зварних зразках-темплетах сплаву ВЖЛ12Э: $\times 50$

У перерізі шліфа виявлено множинні тріщини, що мають вихід як на поверхню зразка (темплета) (рис. 3.5), так і внутрішні тріщини в металі, без виходу на поверхню (рис. 3.6). Усі тріщини звивисті й окислені, в основному розвиваються по межами зерен.



Рисунок 3.6 – Внутрішні тріщини по межах зерен у зварних зразках-темплетах сплаву ВЖЛ12Э

Слід зазначити, що тріщини утворюються в зразках-темплетах сплаву ВЖЛ12Э під час зварювання обома видами присадних матеріалів (ЭП367, ЖСЗЛС-М) як по зварному шву, так і по межі зварного шва. Протяжність тріщин становить $\sim 0,1 \dots 0,5$ мм і більше.

У зоні межі зварного шва і в зоні термічного впливу в основному матеріалі виявлено внутрішні тріщини, що не виходять на зовнішню поверхню зразка (рис. 3.6). Тріщини звивисті й окислені. Протяжність тріщин становить $\sim 0,1 \dots 0,5$ мм.

Мікроструктура зразків-темpletів на межі зварного шва, сформована в сплаві ВЖЛ12Э дослідною присадкою ЖСЗЛС-М (рис. 3.7), неоднорідна на межах зерен спостерігаються грубі евтектичні виділення. У зоні зварювання в тілі зерен спостерігається рівномірне виділення дрібних частинок зміцнювальної γ' -фази.



Рисунок 3.7 – Мікроструктура промислового сплаву ВЖЛ12Э без ТО, сформована в зоні зварювання дослідною присадкою ЖСЗЛС-М: $\times 100$

Мікроструктура зразків-темплетів, сформована в сплаві ВЖЛ12Э сформована в сплаві ВЖЛ12Э серійною присадкою ЭП367 (рис. 3.8) на межі зварного шва також неоднорідна, але менш груба. У зоні зварного шва і навколошовній зоні карбіди помітно дрібніші, ніж в основному металі. Частинок зміцнювальної γ' -фази, що виділилися, не спостерігається.



Рисунок 3.8 – Мікроструктура промислового сплаву ВЖЛ12Э без ТО, сформована в зоні зварювання серійною присадкою ЭП367

При мікроаналізі зони зварювання зразків (темплетів) дослідженого промислового ливарного зварюваного корозійностійкого сплаву ЖС3ЛС, зварні тріщини не виявлено, при зварюванні двома видами присадних матеріалів (дослідним сплавом ЖС3ЛС-М; сірим сплавом марки ЭП367) (рис. 3.9, 3.10).



а



б

а - мікроструктура в зоні зварного шва; б - мікроструктура на межі зварного шва

Рисунок 3.9 – Мікроструктура промислового сплаву ЖС3ЛС без ТО, сформована в зоні зварювання дослідною присадкою ЖС3ЛС-М: $\times 200$:

Мікроструктура зразків-темплетів на межі зварного шва, сформована в сплаві ЖСЗЛС дослідною присадкою ЖСЗЛС-М (рис. 3.9) також, як і у сплаву ВЖЛ12Э неоднорідна, на кордонах зерен спостерігаються грубі евтектичні $\gamma + \gamma'$ виділення. У тілі зерен також спостерігаються великі виділення частинок зміцнювальної γ' -фази.



а



б

а - мікроструктура в зоні зварного шва;

б - мікроструктура на межі зварного шва

Рисунок 3.10 – Мікроструктура промислового сплаву ЖСЗЛС у зоні зварювання, сформована серійною присадкою ЭП367 (без ТО): $\times 200$

Мікроструктура зразків-темплетів, сформована в сплаві ЖСЗЛС серійною присадкою ЭП367 (рис. 3.10) на межі зварного шва досить груба і неоднорідна. По межах зерен спостерігаються більші виділення евтектики $\gamma + \gamma'$ і карбідів. У зоні зварного шва і навколошовній зоні карбіди мають приблизно однаковий розмір і морфологію, порівняно з карбідами в основному металі. У зоні зварювання, в тілі зерен не спостерігається виділень частинок зміцнювальної γ' -фази.

Під час мікроаналізу зони зварювання зразків-темплетів дослідженого дослідного сплаву ЖСЗЛС-М, зварні тріщини не виявлені при зварюванні двома видами присадних матеріалів (дослідним - ЖСЗЛС-М; серійним - ЭП367) (рис. 3.11, 3.12).



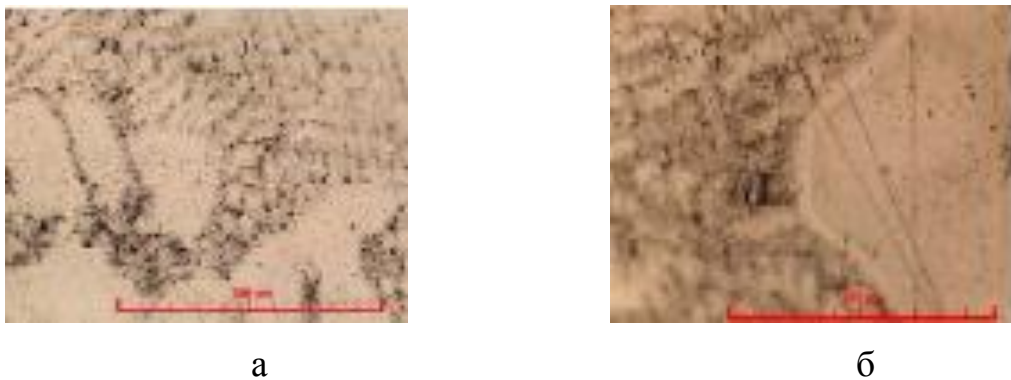
а

б

а - структура в зоні зварного шва;

б - структура на межі зварного шва

Рисунок 3.11 – Мікроструктура дослідного сплаву ЖСЗЛС-М без ТО, сформована в зоні зварювання дослідною присадкою ЖСЗЛС-М: $\times 200$



а

б

а - структура в зоні зварного шва;

б - структура на межі зварного шва

Рисунок 3.12 – Мікроструктура дослідного сплаву ЖСЗЛС-М без ТО, сформована в зоні зварювання серійною присадкою ЭП367: $\times 200$:

Мікроструктура зразків-темплетів у зоні зварного шва, сформована в дослідному сплаві ЖСЗЛС-М дослідною присадкою ЖСЗЛС-М (рис. 3.11, а) дрібно дендритна й однорідна з рівномірним виділенням γ' - фази і карбідної фази. На межі зварного шва мікроструктура має помітний перехід - спостерігається досить однорідна, але більша дендритна структура, у міждендритних просторах розташовуються карбідні частинки сферичної

морфології, грубі евтектичні виділення не спостерігаються. У зоні зварного шва і навколошовній зоні карбіди помітно дрібніші, ніж в основному металі, при цьому карбіди виділяються рівномірно. У зоні зварного шва утворюються дрібнодисперсні частинки γ' - фази, що рівномірно виділилися (рис. 3.11, б).

Мікроструктура зразків-темплетів дослідного сплаву ЖСЗЛС-М у зоні зварного шва і на межі зварного шва, сформована, сформована серійною присадкою ЭП367, має також яскраво виражену межу переходу (рис. 3.12). Мікроструктура в зоні зварного шва (рис. 3.12, а) дрібно дендритна і досить однорідна, спостерігається незначне виділення частинок γ' - фази і карбідів.

На межі зварного шва мікроструктура однорідна, але більш крупно дендритна структура, грубі виділення евтектичного походження не спостерігаються. У зоні зварного шва і навколошовній зоні карбіди дещо дрібніші, ніж в основному металі, при цьому карбіди виділяються досить рівномірно. У зоні зварного шва дрібнодисперсних частинок γ' - фази, що виділилися, не спостерігаються (рис. 3.12, б).

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Охорона праці в процесах зварювання та обробки ливарних жароміцних нікелевих сплавів відіграє вирішальну роль у забезпеченні безпеки та здоров'я робітників. Ризики, пов'язані з високотемпературним впливом та роботою з високолегованими матеріалами, вимагають детального аналізу та розроблення ефективних заходів щодо їхнього зниження. Робота з нікелевими сплавами потребує особливих заходів безпеки, зокрема, захисту від шкідливих хімічних випаровувань та ультрафіолетового випромінювання. В цьому розділі будуть розглянуті методи оцінки ризиків, пов'язаних із зварювальними роботами, та розроблені рекомендації щодо забезпечення безпеки працівників. Особлива увага буде приділена створенню безпечного робочого середовища, що включає технічні засоби захисту, персональні засоби захисту, а також навчання та інструктажі з охорони праці.

4.1 Аналіз потенційних небезпек

Небезпеки які пов'язані з порушеннями роботодавцями вимог

НПАОП 0.00 – 7.11 – 12 «Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників», а саме [37]:

а) небезпеки які пов'язані, з порушенням вимог ергономіки стосовно, організації робочих місць дослідників в приміщенні дослідницької лабораторії, зокрема невідповідності розмірів робочих зон, а також максимально можливої кількості осіб, що можуть там перебувати, нераціонального розташування дослідницького приладдя та офісного обладнання;

б) можливість ураження електричним струмом, при виконанні службових обов'язків внаслідок порушення правил з електробезпеки, несправності енергоспоживаючого обладнання, відсутності групових або індивідуальних

засобів захисту, що може призвести до електричних травм або летального наслідку;

в) небезпеки які пов'язані із обробкою результатів досліджень із використанням ПК, зокрема ушкодження кістково-м'язового апарату внаслідок довготривалої роботи в однотипній позі, що може призвести до зниження працездатності та розвитку професійних захворювань;

г) можливість отримання механічних травм при підготовці зразків або дослідницьких виробів до термічної обробки що може бути пов'язано з порушеннями правил охорони праці під час роботи з абразивним інструментом зокрема: використання абразивного інструменту який не пройшов випробування, порушення правил експлуатації, що може призвести до тяжких травм;

д) небезпеки які пов'язані з дослідженням структури металу методом електронної металографії з використанням електронних мікроскопів зокрема: негативний вплив потужного електронного випромінювання на клітинному рівні, що може призвести до зниження імунітету та розвитку імунних захворювань;

е) незадовільні параметри мікроклімату які повинні відповідати фізіологічним потребам організму працюючих, із врахуванням енергетичних витрат на виконувану роботу внаслідок неефективної роботи систем опалення та повітрообміну, що може призвести до загальних захворювань;

є) невідповідність вимогам освітлення робочих зон дослідницької лабораторії внаслідок виходу з ладу освітлювальних приладів або хибного розрахунку їх кількості та потужності, що може призвести до погіршення зору;

ж) можливість загоряння внаслідок порушень правил пожежної безпеки, а саме хибне визначення видів та кількості первинних засобів пожежогасіння відносно категорій приміщень с пожежної безпеки, що може привести до пожежі;

з) невиконання інженерно-технічні заходи цивільної оборони, що забезпечують тривалу роботу цеху у військовий час [38].

4.2 Заходи забезпечення безпеки

а) конструкція робочого місця дослідника має відповідати сучасним вимогам ергономіки і забезпечувати оптимальне розміщення на робочій поверхні пристроїв і документів, які необхідні для виконання досліджень. Висота робочої поверхні робочого столу ВДТ має регулюватися в межах 680...800мм, а ширина і глибина –забезпечувати можливість виконання операцій у зоні досяжності моторного поля (рекомендовані розміри: 600...1400 мм, глибина – 800...1000мм).Робочий стіл повинен мати простір для ніг заввишки не менше ніж 600 мм, завширшки не менше ніж 500 мм, завглибшки (на рівні колін) не менше ніж 450 мм, на рівні простягнутої ноги - ніж 650 мм.

б) до основних заходів захисту людини від ураження електричним струмом, відносять:

- забезпечення неможливості випадкового дотику до струмоведучих частин, що перебувають під напругою;
- електричний розподіл мережі;
- усунення небезпеки ураження з появою напруги на корпусах, кожухах та інших частинах електроустаткування, що досягається захисним заземленням, зануленням і захисним відключенням;
- використання малих напруг;
- захист від випадкового дотику до струмоведучих частин кожухами, огороженням або подвійною ізоляцією;
- захист від небезпек можливих при переході напруги з вищої сторони на нижчу;
- контроль і профілактика пошкоджень ізоляції;
- компенсація ємнісної складової струму замикання на землю;
- застосування спеціальних електрозахисних засобів, блокувань, сигналізації та запобіжних пристроїв;
- організація безпечної експлуатації електроустановок.

Використання захисного заземлення:

- робоче заземлення – це заземлення струмоведучих частин електроустановки, яке виконане для забезпечення роботи електроустановки (не з метою електробезпечності), наприклад, робоче заземлення нейтралі трансформатора;

- заземлення блискавкозахисту – це заземлення блискавкоприймача, з метою захисту об'єкта від прямого удару блискавки;

- захисне заземлення – це заземлення, яке виконане з метою електробезпечності, тобто з'єднання відкритих провідних частин (ВПЧ) із заземлювачем для захисту від непрямого дотику та від наведеного напруги.

в) об'єкти відмінності мають як негативний (темні об'єкти на світлому фоні) так і позитивний (світлі об'єкти на темному фоні) контраст. Тому відбувається постійна переадаптація від яскравих об'єктів з позитивним контрастом на темні з негативним контрастом. За восьмигодинний робочий день за монітором користувач кидає приблизно 30000 поглядів на екран, око працює з перевантаженням і не може достатньо адаптуватися до цієї ситуації. Такі особливості призводять до напруження м'язового та світло-сприймаючого апарату очей, що є однією з причин виникнення астенопічних явищ (різь в очах, біль в очах, ломить у надбрівній ділянці, розпливчастість контурів, нечіткість зображення). Постійний погляд на матове скло екрана монітора зменшує частоту кліпання очей, що призводить до висихання та викривлення роговиці ока, погіршує зір (синдром Сікка). Робота користувача за пульсуючим екраном монітора, що не відповідає нормативним вимогам щодо обмеження пульсації (блимання), викликає дискомфорт і втому (загальну і зорову). Робота з дзеркальною відбиваючою і неплоскою зовнішньою поверхнею екрана монітора, на якій з'являються численні відбиті відблиски, призводить до виникнення у користувача астенопічних явищ та функціональних змін ока. Неправильний розподіл яскравості в полі зору, тобто поверхні периферії (стеля, стіни, меблі і т.п.) висвітлені краще ніж центр поля зору, призводить до порушення основних зорових функцій ока. Засліплююча дія світильників у приміщенні, на робочому місці з ПК викликає не тільки астенопічні явища, але й функціональні порушення очей користувача.

Кольоровий шрифт збільшує навантаження на зір, оскільки складові кольорів мають різні довжини хвиль і видимі на різній віддалі. Око потребує точнішої адаптації, ніж при чорно-білому зображенні.

г) для уникнення механічних травм при виготовленні зразків необхідно працювати на справному станку, своєчасно проводити заміну деталей, термін експлуатації яких вже закінчився та використовувати захисні окуляри та рукавиці; для виключення травмування органів зору передбачено застосування захисних окулярів, які служать для захисту очей від ушкоджень частками твердих тіл, що летять попереду, знизу і збоку. Ці окуляри оснащені фігурними боковинами, що відкидаються. Застосовувати прозорий екран для захисту очей робітника від поранень частками, що відлітають.

д) об'єктиви-ахромати мають корекцію тільки для середніх кольорів видимої частини спектра, з цієї причини при білому світлі вони дають зображення з не чіткими контурами, пофарбованими головним чином по краю поля зору. Щоб погасити всі кольори, в яких об'єкт не має корекції, застосовують жовто-зелений світлофільтр. З огляду на те, що об'єктиви-апохромати мають корекцію майже для всіх кольорів видимої частини спектра, жовто-зелені світлофільтри для них зайві.

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

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

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

насос від решти обсягу, і вимикається напруження катода і висока напруга. Треба тільки простежити, щоб форвакуумний насос не працював «на повітря», а переключити його на закритий обсяг, наприклад на відкачку боксу з фотопластинками [39-41].

4.3 Заходи з виробничої санітарії

а) параметри мікроклімату і чистоти повітря визначають в залежності від категорії фізичних робіт, для певних робочих місць (постійних і непостійних). Постійне робоче місце – це місце, на якому працюючий знаходиться понад 50% робочого часу або більше 2-х годин безперервно. Якщо при цьому робота здійснюється в різних пунктах робочої зони, то постійним робочим місцем вважається вся ця зона. Непостійне робоче місце – це місце, на якому працюючий знаходиться менше 50% робочого часу або менше 2-х годин безперервно.

Необхідно враховувати, що:

- для постійних робочих місць визначаються оптимальні та допустимі параметри мікроклімату в холодний та теплий період року;
- для непостійних робочих місць визначаються тільки допустимі параметри мікроклімату в холодний та теплий період року.
- в холодний період року на постійних робочих місцях: температура оптимальна 18-20 °С, допустима 17-23 °С; відносна вологість: оптимальна 40-60 %, допустима 75 %; швидкість переміщення повітря: оптимальна не більше 0,2 м/с, допустима не більше 0,3 м/с;
- в холодний період року на непостійних робочих місцях допустима температура: 15-24 °С; допустима відносна вологість: 75 %; допустима швидкість переміщення повітря: не більше 0,3 м/с;
- в теплий період року на постійних робочих місцях: температура оптимальна 21-23 °С, допустима 18-27 °С; відносна вологість: оптимальна 40-60

%, допустима 40-60 %; швидкість переміщення повітря: оптимальна не більше 0,3 м/с, допустима не більше 0,2-0,4 м/с;

– в теплий період року на непостійних робочих місцях допустима температура 17-29 °С; допустима відносна вологість: 65 %⁴⁵ при температурі 26 °С; допустима швидкість переміщення повітря: 0,2-0,4 м/с.

б) Виробниче освітлення організується і нормується залежно від:

– розряду зорової роботи, тобто її характеристики (найменшого розміру об'єкта який різниться, світлості фону, контрасту об'єкта з фоном);

– виду і системи освітлення.

Також необхідно врахувати, що передбачається оптимальне (необхідне) освітлення виробничих приміщень і робочих місць:

– природне (бокове або верхнє);

– штучне: робоче, аварійне, евакуаційне, охоронне, чергове [42-44].

4.4 Заходи з пожежної безпеки

Категорію виробництва за пожежною небезпекою (А, Б, В, Г, Д) споруд (приміщень) цеху (ділянки, підстанції) визначають на основі аналізу речовин і матеріалів, що використовуються у виробництві, відповідно до категорії виробництва з пожежної безпеки, визначають ступінь вогнестійкості приміщення цеху (дільниці, підстанції).

Охоронно-пожежна сигналізація неадресного типу влаштована на неадресних (порогових) датчиках. Обладнання розраховане на цілодобову роботу і відповідає необхідним вимогам пожежної безпеки. До складу системи ОПС входить панель, блок управління і індикації та програмне забезпечення.

Панель системи ОПС призначена для прийому сповіщень від шлейфів сигналізації з пожежними та охоронними сповіщувачами або інших приладів, перетворення сигналів, видачі сповіщень про пожежу і/або проникненні з

включенням оповіщення та інших виконавчих пристроїв і передачі сповіщень на пульт централізованого спостереження.

Система ОПС на неадресних (порогових) сповіщувачах дозволяє:

- контролювати стан пожежних, охоронних шлейфів сигналізації;
- видавати повідомлення про пожежу та/або проникненні на блоці індикації;
- включати систему оповіщення та інші виконавчі пристрої комплексної системи безпеки;
- передавати повідомлення на Пульт централізованого спостереження, якщо він передбачений проектом.

Разом із системою ОПС можуть працювати такі види охоронних датчиків, як:

- інфрачервоні, що реагують на рух;
- магнітоконтатні, що реагують на розмикання дверей;
- акустичні, що реагують на розбивання скла.

Порогова охоронно-пожежна сигналізація – може працювати як автономно, так і в складі комплексної системи безпеки спільно з відеоспостереженням, контролем доступу і системою підвищення ефективності управління. Істотно розширюються можливості по управлінню обладнанням і обробці інформації, що надходить - при наявності модулів «Моніторинг» або «Центральний пост» на моніторі охоронця автоматично видається інформація про пожежу із зазначенням місця його виникнення на графічному плані підприємства. В охоронюваних приміщеннях встановлюються порогові пожежні або охоронні сповіщувачі, які об'єднуються в шлейфи сигналізації [45, 46].

4.5 Заходи безпеки в умовах НС

Підвищення міцності промислових споруд, а також їх стійкості до дії ударної хвилі, по-перше, пов'язано із значними затратами, а по-друге, все ж

неповністю гарантують їх збереження в епіцентрі ядерного вибуху. У зв'язку із цим проведення робіт по зміцненню тих чи інших споруд може плануватись і здійснюватися лише в цілях захисту особливо цінного, унікального обладнання або в тих випадках, коли окремі важливі споруди мають значно меншу міцність, ніж інші, і «підтягнувши» їх міцність до середніх по заводу величин, можна без великих затрат підвищити стійкість об'єкту в цілому.

Вибір заходів, які забезпечують підвищення стійкості об'єкту, визначається різними місцевими умовами в кожному конкретному випадку. Найбільш ефективними являються заглиблення, зменшення парусності і висоти споруд. Міцність і жорсткість конструкцій можна підвищити встановленням контрфорсів, підкосів, додаткових рамних конструкцій, розпірок і відтяжок. Стійкість незначних по розмірам споруд підвищується шляхом обсіпки нижньої частини їх стін ґрунтом (піском і т.п.). Цей же спосіб значно підвищує захисні властивості споруд по відношенню до дії радіаційних випромінювань.

Захист обладнання і готової продукції передбачає розміщення деяких видів обладнання і продукції у заглиблення в приміщеннях, а також підготовку індивідуальних захисних пристроїв.

Надійно захистити все обладнання від впливу ударної хвилі практично неможливо, оскільки доводити міцність цехових споруд до захисних властивостей сховищ економічно недоцільно. Задача полягає в тому, щоб звести до мінімуму небезпеку руйнування і пошкодження особливо цінного обладнання, унікальних шліфувальних, токарних, розточних і зубофрезерних станків, пресів і кувальних машин, насосного обладнання, розрахунково-аналітичних машин і т. д.

Для зменшення руйнування обладнання підсилюють його найбільш слабкі деталі та вузли, виготовляють їх з'ємними і створюють запаси для заміни пошкоджених. Стійкість обладнання від падіння під дією ударної хвилі ядерного вибуху підвищують шляхом надійного закріплення на фундаменті, створення контрфорсів, заглиблень. Запас найбільш нестійких деталей і вузлів для важливого унікального обладнання слід утримувати в спорудах, які забезпечили б їх збереження при дії ударної хвилі.

Підвищення стійкості обладнання може бути досягнуто також шляхом заміни застарілих зразків новими, які найбільш відповідають вимогам до їх стійкості, а також скороченням числа типомodelей станків, що використовуються, що в подальшому значно спростить проведення ремонтних і відновлювальних робіт; заміною горючих і вибухонебезпечних змащувально-охолоджувальних рідин (наприклад, сульфофрезолу, фрезолу, керосину) емульсіями; впровадженням в процеси термічної обробки с.в.ч. і т. п.

Важливе значення має і раціональне розміщення обладнання. Найбільш цінне і нестійке обладнання і прилади слід розміщувати в найбільш міцних приміщеннях, важкі станки, машини і агрегати повинні розташовуватись на нижніх поверхах споруд. Машини і станки великої цінності рекомендується розміщувати не в основних промислових, а у окремо розташованих спорудах, які мають легкі конструкції і конструкції, які важко горять, руйнування їх не приведе до руйнування цього обладнання.

Особливо велике значення має стійкість і розгалуженість систем енергетичного забезпечення (електроенергія, газо-, паро- і теплопостачання, забезпечення стисненим повітрям).

До числа заходів, які можуть бути рекомендовані для підвищення стійкості роботи систем енергопостачання, відносять: перенос інженерних і енергетичних комунікацій у підземні колектори, розміщення найбільш відповідальних пристроїв (центральні диспетчерські і розподільчі пункти, компресорні і аварійні електричні станції) в захищених спорудах з підвищеною ступенем стійкості до впливу ударної хвилі; кільцювання всіх енергетичних систем; побудова захищених автономних джерел електро- і водопостачання, резервних ємностей і резервуарів; придбання пересувних електростанцій і насосних агрегатів з двигунами внутрішнього згорання; обладнання пристосувань для роботи підприємств на різних видах палива; кооперування постачання групи підприємств, тобто створення умов і можливостей для використання джерел електро-, газо-, тепло- і водопостачання, кисневих станцій, складів палива одного підприємства для забезпечення потреб іншого.

Стійкість систем електропостачання підвищується базуванням підприємств на декількох енергоджерелах, віддалених один від іншого на таку відстань, щоб виключити можливість руйнування їх одним ядерним вибухом. При живленні підприємства від районної енергосистеми лінії електропередач необхідно підводити не менш ніж із двох напрямків, а приймальні підстанції (ЦРП, РП) розташовують одна від одної на можливо більшій відстані. Доцільні і такі заходи, як забезпечення захисту існуючих і побудова резервних підстанцій, перевід енергопостачання із повітряного на підйомно-кабельне, встановлення автоматичних роз'єднувачів для відімкнення ділянок сітей у випадку перевантаження і короткого замикання. Споруди цивільної оборони забезпечуються автономними джерелами енергопостачання.

Система водопостачання також повинна базуватися на двох і більше незалежних вододжерелах, віддалених один від одного на відповідну відстань. Рекомендується встановлювати додаткові бурові скважини (артезіанські скважини), кільцювати розвідні сіті, захищати гідранти і водорозбірні колонки, впроваджувати автоматичні і напівавтоматичні пристрої, які б відключали б пошкоджені ділянки без порушення роботи іншої частини сіті.

На сітях газопостачання і теплофікації слід передбачити заходи проти втрачання газу (пари, води) у випадку руйнування магістральних ліній і внутрішньої сіті у пошкоджених або зруйнованих спорудах. Це досягається шляхом встановлення на вводах в споруди або на відводах магістральних ліній автоматичних запірних пристроїв, які відмикають лінії при руйнуванні. Встановлюють і задвижки дистанційного управління, які дозволяють відімкнути сіті із одного центра управління.

Сіті зв'язку можна вважати підготовленими з точки зору цивільної оборони, якщо забезпечений захист вузлів зв'язку і розподільчих шаф, а повітряні лінії зв'язку на території підприємства переведені на підземно-кабельні. Стійкість засобів зв'язку може бути підвищена шляхом прокладання другого живлення фідерів на автоматичну телефонну станцію і радіовузол заводу, придбання пересувних електростанцій для зарядки акумуляторів АТС і

для живлення радіовузла при повному відключенні постійних джерел електроенергії.

Важливе значення має планове накопичення ультракороткохвильових радіостанцій, телефонних апаратів і телефонного кабелю польового типу для створення тимчасових ліній зв'язку на випадок виходу із ладу постійних. Необхідно також мати незмінний резерв запасних частин і деталей для ремонту всіх засобів зв'язку.

Попередження або зменшення до мінімуму можливих руйнувань, пожеж і втрат від додаткової дії вторинних факторів ураження ядерного вибуху в значній мірі залежать від проведення інженерно-технічних заходів, направлених на підвищення загальної стійкості всього інженерно-технічного комплексу підприємства і його окремих елементів. Крім цього, ця задача досягається розосередженням (вивозом) наднормативних запасів вибухових і вогненебезпечних речовин на безпечній відстані від самого підприємства, а також від інших населених пунктів та об'єктів. Таке розосередження вибухових та вогненебезпечних матеріалів здійснюється в основному при виникненні погрози нападу супротивника, однак уже у мирний час для цього слід підготовляти склади у загородній зоні.

Роботи із вибуховими речовинами рекомендується сконцентрувати в спеціальних окремо розташованих спорудах, щоб виключити джерела додаткової небезпеки при здійсненні цих робіт у різних цехах. На багатьох підприємствах запаси горючих рідин (нафта, бензин, керосин, масла і т. п.) містяться не в підземних сховищах, а в наземних резервуарах та інших ємностях. В цих випадках такі ємності повинні бути уже в мирний час обваловані, тобто оточені валами ґрунту такої висоти, щоб вони були здатні втримати весь об'єм рідини при руйнуванні резервуару.

Створення обмежувальних земляних валів (дамб) являється також одним із ефективних способів захисту об'єктів, розташованих в низинних ділянках місцевості, від катастрофічного затоплення в результаті руйнування поблизу розташованих гідропоруд.

Для попередження виникнення джерел хімічного зараження можна рекомендувати наступні заходи: розосередження складів отрутохімікатів, а також обладнання їх пристосуваннями, які забезпечують швидку нейтралізацію отруйних речовин (змивання водою; обробка залізним купоросом приміщень, небезпечних із-за наявності ціаністих сполук; обробка кислот лугами і т. п.); виготовлення міцної і надійної тари; настил підлог в складах отрутохімікатів із кислотоупорних і лугостійких матеріалів; створення запасів нейтралізуючих речовин; ізоляція (відгородження) в цехах небезпечних ділянок (травлення, ціанування, азотування та ін.); забезпечення робочих небезпечних і сумісних з ними ділянок спеціальними засобами індивідуального захисту (промислові протигази, захисний одяг) [47, 48].

5 ЕКОНОМІКО-ОРГАНІЗАЦІЙНА ЧАСТИНА

5.1 Актуальність теми з позиції маркетингу

Оптимізація процесу термообробки для сплавів, що відрізняються підвищеною термічною стійкістю, може бути вельми вигідною з точки зору маркетингової стратегії.

Вдосконалення характеристик матеріалів: Упровадження інноваційних методів термообробки, котрі підвищують термічну витривалість або механічну міцність сталі, може стати основною перевагою для компаній у сфері інженерії та виробництва, які застосовують ці сплави.

Зниження енергоспоживання та витрат: Поліпшення в процесах термообробки, що призводять до зниження енергетичних витрат або вартості виробництва, можуть стати важливою конкурентною перевагою у бізнесі.

Доступ до нових сегментів ринку: Удосконалена термічна обробка може підкреслити нові можливості застосування теплостійких сталей, зокрема у виробництві енергетичного обладнання, авіабудуванні чи у сфері конструкцій, які потребують підвищеної термостійкості.

Маркетингові заходи: Тема може бути використана для організації рекламних кампаній, участі в виставках, конференціях, написанні статей для спеціалізованих видань та інших маркетингових активностей.

Співробітництво та партнерські відносини: Розробка нових технологій у сфері термічної обробки відкриває можливості для співпраці з іншими компаніями через партнерства чи ліцензування.

Важливо зосередитися на дослідженні ринку, розумінні потреб споживачів та демонструванні переваг власних продуктів або технологій в порівнянні з конкурентами. Також доцільно займатися партнерськими ініціативами та активно участь у профільних заходах для зміцнення репутації та позиції компанії на ринку.

5.2 Послідовний аналіз

Вдосконалення зварних ливарних жароміцних нікелевих сплавів охоплює аналіз сфер їх використання та переваг для кінцевих користувачів (див. табл. 5.1). Ключові елементи цих матеріалів, включно з їх фазовим складом, є вирішальними у визначенні характеристик, таких як міцність при високих температурах, еластичність, опір корозії та термічна кондуктивність. Результати таких досліджень можуть застосовуватися для поліпшення виробничих процесів, впровадження інноваційних методів контролю якості та розроблення нових жаростійких нікелевих матеріалів.

Таблиця 5.1 – Опис ідеї

Вміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для споживачів (користувачів)
Удосконалення хімічного складу зварних ливарних жароміцних нікелевих сплавів	Авіаційна промисловість, енергетичне машинобудування.	Підвищення надійності та ресурсу авіаційних двигунів
		Зменшення витрат на обслуговування та ремонт обладнання в екстремальних температурних умовах.

Дослідження інтерметалідних фаз у нікелевих жароміцних сплавах несе в собі ключ до вдосконалення технологій виробництва та контролю якості, відкриваючи шлях до створення нових сплавів, які задовольнятимуть сучасні вимоги до довговічності та термостійкості у промисловості.

Виконаний аналіз характеристики потенційного ринку (табл. 5.2).

Таблиця 5.2 – Попередня характеристика потенційного ринку

Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
Головні конкуренти	"Укрсплав", "Нікопольський завод феросплавів", "Precision Castparts Corp." (США), "VDM Metals GmbH" (Німеччина).
Динаміка ринку (якісна оцінка)	Стабільне зростання попиту на жароміцні сплави через розвиток високотехнологічних галузей.
Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Високі вимоги до якості продукції, значні стартові інвестиції.
Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Дотримання міжнародних стандартів ASTM і ISO, національних стандартів DSTU, сертифікація відповідно до вимог авіаційної та енергетичної промисловості.

Підвищення властивостей зварних нікелевих сплавів важливе для різних галузей, таких як енергетика, авіація, автомобілебудування, хімічна промисловість та суднобудування. Вимоги до них різноманітні: висока теплостійкість, міцність, стійкість до корозії тощо. Розуміння цих вимог дозволяє налаштовувати виробництво сплавів з урахуванням потреб клієнтів.

Таблиця 5.3 – Попередня характеристика потенційних клієнтів

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів (користувачів)
Підвищена стійкість деталей до високотемпературного впливу та корозії.	Виробники авіаційних двигунів, компанії теплоенергетичного сектора.	Авіаційна промисловість акцентує на легкості та міцності сплавів, теплоенергетика – на довговічності та жаростійкості.	Високий рівень механічних властивостей сплавів, стабільність характеристик при тривалому застосуванні.

SWOT-аналіз для підвищення властивостей зварних ливарних жароміцних нікелевих сплавів є ключовим інструментом стратегічного планування. Цей аналіз допомагає виявити сильні та слабкі сторони проекту, а також потенційні можливості та загрози. Отримані результати наведені у таблиці 5.4.

Успішна реалізація проекту вимагає максимального використання сильних сторін та ефективного керування слабкими. SWOT-аналіз підкреслює необхідність оптимізації можливостей та зменшення загроз для досягнення максимального успіху проекту.

Таблиця 5.4 – SWOT- аналіз

Сильні сторони:	Слабкі сторони:
Підвищення термічної стійкості, оптимізація властивостей сплаву, зменшення вартості виробництва, збільшення ресурсу деталей, розширення сфери застосування.	Високі витрати на НДДКР, складність технологічного процесу, обмеженість сировинної бази, потреба в кваліфікованих кадрах.
Можливості:	Загрози:
Розширення ринку збуту, залучення інвестицій, створення нових робочих місць, підвищення конкурентоспроможності на міжнародному ринку, співпраця з науковими інститутами.	Зміна законодавчих норм, зростання цін на сировину, поява інноваційних матеріалів конкурентів, висока конкуренція на ринку.

Початковим етапом у створенні ринкової стратегії є визначення підходу до охоплення ринку, який визначає, як продукт чи послуга буде представлена на ринку та яким чином будуть досягнуті цільові групи потенційних споживачів. У контексті поліпшення термічної обробки теплостійких сталей, розглядається декілька можливих цільових груп (див. табл. 5.5).

Ці стратегії охоплення ринку дозволяють налаштовувати маркетингові та продажні зусилля з метою досягнення успіху на ринку теплостійких сталей. Важливо розробляти індивідуальний підхід до кожної цільової групи та пристосовувати стратегії відповідно до їхніх унікальних потреб і вимог.

Таблиця 5.5 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
Виробники авіаційної техніки, компанії енергетичного сектору, виробники медичного обладнання.	Висока за умови демонстрації технічних переваг.	500-1000 тонн на рік для авіаційної галузі, 300-600 тонн для енергетичного сектору, 100-300 тонн для медичної індустрії.	Висока серед провідних світових виробників та нових гравців з інноваційними розробками.	Складна через високі вимоги до якості та необхідності довготривалих досліджень і розробок.

Було визначено зацікавлені сторони та їх порядок важливості, що призвело до створення Мапи зацікавлених сторін. Ця карта допомагає візуально показати зв'язки між різними зацікавленими сторонами. Для кращого зображення їх взаємодії були створені три концентричні зони. Центральна зона Мапи зацікавлених сторін відображає сферу відповідальності та компетенцій ініціатора проекту. Тут розташовані ключові зацікавлені сторони, які мають прямий зв'язок з ініціатором, що спрощує процес управління проектом.



Рисунок 5.1 - Карта стейкхолдерів

Були розраховані витрати на оплату праці, враховуючи розподіл робочого часу одного працівника, необхідного для виконання конкретного етапу виготовлення авіаційних дисків. У цих розрахунках також враховувалася сума єдиного соціального внеску (ЄСВ), що є важливою складовою витрат на працю. Отримані результати представлені у таблицях 5.6 і 5.7, які детально розглядають витрати на оплату праці та відповідні обов'язкові внески в соціальні фонди для забезпечення адекватної фінансової оцінки трудових ресурсів, використаних на кожному етапі виробничого процесу авіаційних дисків.

Таблиця 5.6 – Склад, чисельність та фонд заробітної плати

Посада	Кількість осіб	Посадовий оклад, грн	Преміальний відсоток до окладу, %	Сума премій, грн	Місячна заробітна плата	Річний фонд оплати праці, грн	ЄСВ, грн
Науковий керівник	1	16000	20	3200	19200	230400	50688
Старший науковий співробітник	2	10500	20	2100	12600	151200	33264
Молодший науковий співробітник	2	9800	20	1960	11760	141120	31046,4
Лаборант	3	6500	20	1300	7800	187200	41184
Разом	8	42800	–	8560	51360	709920	156182,4

Розрахунок вартості матеріалів. До цієї статті належать витрати на придбання основних матеріалів для проведення дослідження, а також для виготовлення макетів та дослідних зразків (табл. 5.7)

Таблиця 5.7 – Розрахунок матеріальних витрат

Матеріальні витрати	Виробнича програма	Обсяг сировини	Ціна за одиницю, грн	Сума, грн
Папір	–	3 блоків	170	510
Ручка	–	20 од.	15	300
Олівець	–	20 од.	10	200
Зразки	80	80 од.	250	20000
Реактиви	–	10 од.	900	9000
Змінні лінзи	–	2 од.	3200	6400
Тара зразків	–	14 од.	50	700
Разом				37110

Розрахунок вартості матеріалів. До цієї статті належать витрати на електропостачання, водопостачання тощо (табл. 5.8).

Таблиця 5.8 – Розрахунок вартості спожитих послуг

Вид послуг	Виробнича програма	Обсяг послуг	Тарифи	Сума, грн
Електропостачання	—	450 кВт	2,64 грн/ кВт	1188
Водопостачання	—	6 м ³	25 грн/м ³	150
Теплопостачання	—	2.24 Гкал	1380 грн/Гкал	3091,2
Охоронна система	—	1	1500	1500
Утилізація реактивів	8 одиниць	8	200 грн	1600
Разом				7529,2

Визначили річну суму амортизації з урахуванням первісної вартості основних засобів та норми амортизації при терміні експлуатації у 5 років (табл. 5.9).

Таблиця 5.9 – Розрахунок амортизації

Група основних засобів	Кількість	Первісна вартість ОЗ	Вартість обладнання	Річні амортизаційні відрахування	Витрати на поточний ремонт у розмірі 2%
Металографічний мікроскоп	2	98 287	196574	27520,36	3931,48
Електронний мікроскоп	1	1357110	1357110	189995,4	27142,2
Прилад для контролю хімічного складу сплавів	1	941240	941240	131773,6	18824,8
Комп'ютер	4	26547	106188	14866,32	2123,76
Принтер	2	14521	29042	4065,88	580,84
Разом	10	2437705	2630154	368221,56	52603,08

Відображаємо кошторис витрат на основі даних ,вказаних в табл. 5.6-5.9. В табл. 5.10 наведено кошторис витрат на проведення науково-дослідницьких робіт.

Таблиця 5.10 – Кошторис витрат

Калькуляційні статті	Витрати, грн
1	2
Фонд заробітної плати, рік	709920
ЄСВ, рік	156182
Матеріальні витрати, рік	37110

Кінець таблиці 5.10

1	2
Вартість спожитих послуг, рік	7529
Амортизація обладнання, рік	368222
Поточний ремонт, рік	52603
Виробнича собівартість	1331566
Адміністративні витрати 50%	354960
Повна собівартість	1686526

Розрахунок економічного ефекту виконувався на основі того, що використання модифікованого ливарного жароміцного сплаву ЖСЗЛС-М для зварних конструкцій дозволяє отримати якісний бездефектний зварний шов. Причому, характеристики міцності цього ливарного корозійностійкого сплаву значно вищі, ніж у серійного сплаву ЖСЗЛС, що дозволяє збільшити термін експлуатації деталей газотурбінних двигунів. Також, використання сплаву ЖСЗЛС-М дозволяє розширити номенклатуру зварних виробів через полегшення процесу зварювання.

Таблиця 5.11 – Орієнтовна ціна матеріалів для виготовлення сплавів ЖСЗЛС та ЖСЗЛС-М

Назва матеріалу	Ціна, грн/кг	Вміст % ЖСЗЛС	Ціна 1 кг ЖСЗЛС	Вміст % ЖСЗЛС-М	Ціна 1 кг ЖСЗЛС-М
1	2	3	4	5	6
Нікель Ni	970	66,809	648,05	63,248	613,51
Вуглець C	126	0,08	0,1	0,09	0,11
Хром Cr	388	16,2	62,86	14,3	55,48
Алюміній Al	600	2,7	16,2	3,0	18,0
Титан Ti	400	2,7	10,8	3,0	12,0
Молібден Mo	2400	3,5	84,0	1,8	43,2
Вольфрам W	2200	3,5	77,0	6,8	149,6
Кобальт Co	1250	4,5	56,25	4,5	56,25
Тантал Ta	8100	—	—	2,9	234,9

Кінець таблиці 5.11

1	2	3	4	5	6
Гафній Hf	16000	–	–	0,35	56,0
Бор	700	0,011	0,08	0,012	0,08
Разом	–	100%	955,34	100%	1239,13

Економічна ефективність використання нового матеріалу визначається наступним чином:

$$E = (C_6 K_e - C_n) \cdot N, \text{ грн.},$$

де C_6 – собівартість базового виробу;

K_e – коефіцієнт експлуатаційного ресурсу

C_n – собівартість нового виробу

$$E = (955,34 \cdot 1,5 - 1239,13) \cdot 1 = 139,88 \text{ грн.}$$

Отже, економія на виготовленні 1 кг зварного жароміцного корозійностійкого дослідного нікелевого сплаву ЖСЗЛС-М становить 139,88 грн при коефіцієнті експлуатаційного ресурсу 1,5. Це свідчить про те, що додавання невеликої кількості гафнію та танталу до складу серійного сплаву ЖСЗЛС дозволяє знизити його собівартість через підвищення показників міцності, які в свою чергу безпосередньо впливають на збільшення терміну експлуатації зварних деталей газотурбінного двигуна. Також покращуються властивості зварювання, що розширює номенклатуру використання розробленого сплаву.

ВИСНОВКИ

Зварювання методом АДЗ зразків-темплетів промислового сплаву ВЖЛ12Э двома видами присадних матеріалів: дослідним складом ЖСЗЛС-М і серійним присадним дротом ЭП367 показало, що сплав не зварюється, в обох випадках у зоні зварного шва виявлено зовнішні та внутрішні тріщини, а також групові пори, що виходять на поверхню.

Зварювання зразків-темплетів дослідного сплаву ЖСЗЛС-М і промислового сплаву ЖСЗЛС двома видами присадних матеріалів показало, що сплави мають однаковий рівень зварюваності, в обох випадках у зоні зварювання не виявлено тріщин і дефектів типу групових пор. На поверхні спостерігаються поодинокі пори.

Порівняльні дослідження зварюваності сплавів показало, що найгіршою зварюваністю володіє промисловий ливарний жароміцний не корозійно-стійкий сплав ВЖЛ12Э. Зварюваність дослідного сплаву ЖСЗЛС-М, перебуває на рівні промислового ливарного зварюваного корозійностійкого сплаву ЖСЗЛС.

При цьому характеристики міцності дослідного ливарного зварюваного корозійностійкого сплаву ЖСЗЛС-М істотно вищі, ніж у сплаву ЖСЗЛС і перебувають на рівні сплаву ВЖЛ12Э.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Кишкин С.Т., Логунов А.В., Луковкин А.И. и др. Проблемы прочности. — 1984, №7. — С. 46-49.
2. Кузнецов Н.Д., Цейтлин В.И. Эквивалентные испытания газотурбинных двигателей М.: Машиностроение, 1976. — 214 с.
3. Власенко А. М. Матеріалознавство та технологія металів : підручник для здобувачів професійної (професійно-технічної) освіти / А. М. Власенко. — Київ : Літера ЛТД, 2019. — 224 с
4. Фізика металів. Навчальний посібник. / Я.Дутчак, А.Фреїк, В.Чобанюк, М.Галушак — Київ НМК ВО: 1993, -162с.
5. Каблов Е.Н., Голубовский Е.Р. Жаропрочность никелевых сплавов. — М.: Машиностроение, 1998. — 463 с.
6. Матеріали і технології для лопаток вітчизняних промислових газотурбінних двигунів: монографія / Г.П. Мьяльніца, А.М. Верховлюк, А.В. Нарівський, О.Й. Шинський, Ю.Г. Квасницька, І.І. Максютя . — К.: Наукова думка. 2022 р. — 254 с. <https://doi.org/10.15407/978-966-000-1810-5>.
7. Конспект лекцій (2 частини) з дисципліни «Спеціальні сталі та сплави в газотурбобудуванні» для студентів спеціальності 132 «Матеріалознавство» усіх форм навчання / Укл.: В.Я. Грабовський, О.А. Глотка. — Запоріжжя: ЗНТУ, 2017. — 136с.
8. Newman R. P, Gurney T. R. British Weld. — 1964, J, 11. — Pp. 341–352.
9. Galls R.R, Sokol G.J. Effect of Closure Weld Configuration on the Fatigue Strenth of Omega Seals, KAPL — 2000, 21, Reactor Metallurgy Report № 24. — 1964, 2 Metallurgy — Pp. 1,11.
10. Savage W. F. Weld. Des. Fab. — December 1969, 42. — Pp. 56 — 58.
11. Pepe J. J., Savage W. F. Weld J. — 1967, 46, 41 IS. — 422 S.
12. Duvall D. S., Owczarski W. A. Weld. J. — 1967, 46. — Pp. 423 — 432.
13. Yeniscavich W. Methods of High-Alloy Weldability Evaluation, Proceedings of a Symposium Spansored by the Welding Research Council. — 1970. — Pp. 2 — 12.

14. Stickler R., Vinckier A. Westinghouse Res., Lab. Rep. – 1960, 10 – 0103 – 3 – R17.
15. Lienert T.J., Babu S.S., Acoff V.L., Zhou N.Y., DeGuire E., Lampman S.? Riley B. ASM handbook. Welding Fundamentals and Processes. – 2011, 6. – 897p.
16. Weiss B., Grotke G.E., Stickler R. Weld. J. – 1970, 49. – Pp. 471 – 487.
17. Сорокин Л. И. Свариваемость жаропрочных сплавов, применяемых в авиационных газотурбинных двигателях // Сварочное производство. – 1997. – №4. – С. 4–11.
18. Сорокин Л. И. Классификация жаропрочных никелевых сплавов по их стойкости против образования трещин при термической обработке сварных соединений / Л. И. Сорокин, В. И. Тупикин // Автоматическая сварка. – 1985. – № 5. – С. 23–25.
19. Сорокин Л. И. Свариваемость жаропрочных никелевых сплавов : (обзор). Ч. 2 / Сорокин Л. И. // Сварочное производство. – 2004. – №10. – С. 8–17.
20. Сорокин Л. И. Свариваемость жаропрочных никелевых сплавов в состаренном состоянии / Сорокин Л. И. // Автоматическая сварка. – 1983. – № 7. – С. 12–16.
21. Сорокин Л. И. Сравнительная оценка влияния титана и алюминия на свойства жаропрочного металла, наплавленного аргонодуговым способом / Л. И. Сорокин // Сварочное производство. – 1982. – №4. – С. 22–25.
22. Особенности технологии сварки трением соединений из сплавов ВКНА–25 и ЭП975 / В. И. Лукин, В. Г. Ковальчук, М. Л. Саморуков [и др.] // Сварочное производство. – 2010. – №10. – С. 28–33.
23. Исследование свариваемости литых жаропрочных никелевых сплавов с 6% алюминия / К.А. Ющенко, Н.И. Пинчук, А.А. Наконечный [и др.] // Автоматическая сварка. – 1985. – № 10. – С. 18–23.
24. Стойкость сварных соединений жаропрочного никелевого сплава типа Хастеллой Н против образования горячих трещин / К. А. Ющенко, В. Н. Липодаев, М. В. Бельчук [и др.] // Автоматическая сварка. – 1986. – № 9. – С. 10–12.

25. Зависимость свариваемости сплавов ЭП693 и ЭП99 от свойств шихтовых материалов, применяемых при их выплавке / [Л. И. Сорокин, В. И. Тупикин, А. М. Иринин, Н. Я. Зорин] // Автоматическая сварка. – 1984. – № 4. – С. 53–54.
26. Сорокин Л. И. Сравнительная оценка присадочных проволок при аргонодуговой сварке жаропрочных сплавов / Л. И. Сорокин, Ю. С. Багдасаров, В. И. Тупикин // Сварочное производство. – 1993. – №10. – С. 31–33.
27. Исследование свариваемости никелевых суперсплавов и разработка технологии ремонта лопаток газовых турбин / [К. А. Ющенко, В. С. Савченко, Л. В. Червякова и др.] // Автоматическая сварка. – 2005. – № 6. – С. 3–6.
28. Сливинский А. А. Структура и свойства сварных соединений жаропрочного сплава на основе никеля / А. А. Сливинский, П. Файт // Автоматическая сварка. – 2003. – №5. – С. 7–13.
29. Характер образования горячих трещин при сварке литых жаропрочных никелевых сплавов / К. А. Ющенко, В. С. Савченко, Н. О. Червяков, А. В. Звягинцева // Автоматическая сварка. – 2004. – № 8. – С. 35–40.
30. Влияние технологических приемов на стойкость сварных соединений никелевых сплавов против образования трещин при термической обработке / Ю. С. Багдасаров, Л. И. Сорокин, Б. Ф. Якушин, С. Ф. Моряшев // Сварочное производство. – 1983. – № 4. – С. 23–26.
31. Сорокин Л. И. Присадочные материалы для сварки жаропрочных никелевых сплавов: (Обзор). Часть 1 / Л. И. Сорокин // Сварочное производство. – 2003. – № 4. – С. 35–40.
32. Сорокин Л. И. Присадочные материалы для сварки жаропрочных никелевых сплавов: (Обзор). Часть 2 / Л. И. Сорокин // Сварочное производство. – 2003. – № 5. – С. 28–31.
33. Сорокин Л. И. Аргонодуговая наплавка бандажных полок рабочих лопаток из высокожаропрочных никелевых сплавов / Л. И. Сорокин // Сварочное производство. – 2004. – №7. – С. 36–39.
34. Сорокин Л. И. Влияние содержания в присадочном материале лантана, церия и рения на свойства жаропрочного металла, наплавленного аргонодуговым способом // Сварочное производство. – 1977. – № 10. – С. 9–11.

35. Сорокин Л. И. Заварка трещин с окисленной поверхностью на жаропрочных никелевых сплавах : (обзор) / Л. И. Сорокин // Сварочное производство. – 2004. – № 12. – С. 30–31.
36. Багдасаров Ю. С. Влияние микрохимической неоднородности на околошовное растрескивание сварных соединений никелевых сплавов при дисперсионном твердении / Ю. С. Багдасаров, Б. Ф. Якушин // Сварочное производство. – 1991. – № 8. – С. 37–40.
37. Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників [Електронний ресурс] : НПАОП 0.00-7.11-12. – На заміну наказу МНС України від 26.12.2011 № 1350 ; чинний від 2012-03-16. – К. : МНС України, 2012. – 116 с. – URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0226-12>. – (Нормативно-правовий акт охорони праці).
38. Про охорону праці [Електронний ресурс] – Чинний від 1992-10-14. : станом на 20.01.2018 р. – К.: ВР України, 1998. – URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12>. – (Закон України).
39. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом [Текст] : ДСТУ Б В.2.5-82:2016. – На заміну ДБН В.2.5-27-2006 ; чинний від 2017-04-01. – К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 109 с. – (Державний Стандарт України).
40. Правила охорони праці під час роботи з інструментом та пристроями [Електронний ресурс] : НПАОП 0.00-1.71-13. – Чинний від 2014-03-28. – К. : Міненерговугілля України, 2013. – 59 с. – URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0327-14>. – (Нормативно-правовий акт охорони праці).
41. Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями [Електронний ресурс] : НПАОП 0.00-7.15-18. – На заміну НПАОП 0.00-1.28-10 ; чинний від 2018-05-18. – К. : Мінсоцполітики України, 2018. – Режим доступу: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0508-18>. – (Нормативно-правовий акт охорони праці).
42. Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин [Електронний ресурс] :

- ДСанПіН 3.3.2.007-98. – Чинний від 1998-12-10. – К. : МОЗ України, 1998. – URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=2445>. – (Державні санітарні правила та норми).
43. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень [Електронний ресурс] : ДСН 3.3.6.042-99. – Чинний від 1999-12-01. – К. : МОЗ України, 1999. – URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va042282-99>. – (Державні санітарні норми).
44. Природне і штучне освітлення. [Текст] : ДБН В.2.5-28-2018. – На заміну ДБН В.2.5-28-2006 ; чинний з 2019-03-01. – К. : Мінрегіон України, 2018. – 133 с. – (Державні будівельні норми України).
45. Правила пожежної безпеки в Україні [Текст] : НАПБ А.01.001-14. – На заміну НАПБ А.01.001-04 ; чинний від 2014-12-30. – К. : МВС України, 2014. – 47 с. – (Нормативний акт пожежної безпеки).
46. Протипожежний захист. Знаки безпеки. Форма та колір [Текст] : ДСТУ ISO 6309:2007. – На заміну ГОСТ 12.4.026-76 в частині пунктів 1.1, 1.2, 1.4, 1.6 таблиці 5, пунктів 2.1, 2.2 таблиці 6, пунктів 4.1-4.11 таблиці 8; знаків 1.1, 1.2, 1.4, 1.6, 2.1, 2.2, 4.1-4.11 додатка 3 ; чинний від 2007-10-01. – К. : Держспоживстандарт України, 2007. – 9 с. – (Державний Стандарт України).
47. Планування і забудова територій [Текст] : ДБН Б.2.2-12:2018 – На заміну ДБН 360-92** ; ДБН Б.2.4-1-94 ; ДБН Б.2.4-3-95 ; ДБН Б.2.4-4-97 ; ДБН Б.1-2-95 ; СНиП II-89-80 ; чинний від 2018-09-01. – К. : Мінрегіон України, 2018. – 179 с. – (Державні будівельні норми).
48. Катренко Л. А. Охорона праці. Курс лекцій. Практикум [Текст] : навчальний посібник / Л. А. Катренко, Ю. В. Кіт, І. П. Піскун – 2-ге вид., стер. – Суми: ВТД «Університетська книга», 2007. – 496 с.

ДОДАТОК А