

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ГРЕЧКА ОЛЕКСАНДРА ВЯЧЕСЛАВІВНА



УДК 669.018.54 (043.3)

**РОЗРОБКА ЖАРОТРИВКОГО СПЛАВУ З ПІДВИЩЕНИМИ
ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИМИ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ
ВЛАСТИВОСТЯМИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОНАГРІВАЧІВ**

05.02.01 – матеріалознавство

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Кам'янське – 2019

Дисертація є кваліфікаційною науковою працею на правах рукопису.

Робота виконана в Запорізькому національному університеті Міністерства освіти і науки України, м. Запоріжжя.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор, лауреат Державної премії України в галузі науки та техніки
Міщенко Валерій Григорович,
Запорізький національний університет Міністерства освіти і науки України, завідувач кафедри прикладної фізики і наноматеріалів, м. Запоріжжя

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник,
Гайдук Сергій Валентинович,
Національний університет «Запорізька політехніка» Міністерства освіти і науки України, професор кафедри фізичного матеріалознавства, м. Запоріжжя

доктор технічних наук,
Дергач Тетяна Олександрівна,
Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» Міністерства освіти і науки України, провідний науковий співробітник лабораторії експериментальних наукових досліджень, м. Дніпро

Захист відбудеться «26» грудня 2019 року о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 09.091.02 Дніпровського державного технічного університету за адресою: вул. Дніпробудівська, 2, ауд. 442, м. Кам'янське, 51918.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Дніпровського державного технічного університету за адресою: вул. Дніпробудівська, 2, м. Кам'янське, 51918 та на сайті спеціалізованої вченої ради К 09.091.02 за електронною адресою: <https://www.dstu.dp.ua/uni/index.html#science>

Автореферат розісланий «25» листопада 2019 року.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради К 09.091.02,
к. т. н., доцент



Н.О. Непошивайленко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Електричні печі опору непрямої дії є одними з найбільш поширених печей, які використовуються в металургійній, машинобудівній та хімічній промисловості. Термін експлуатації печі до капітального ремонту безпосередньо пов'язаний з терміном служби нагрівальних елементів, отже, збільшення терміну служби нагрівача є важливим завданням, як з наукової й технічної, так і з економічної точок зору. Однією з основних умов, що забезпечує тривалий термін експлуатації нагрівача, є температурний цикл, як комбінація параметрів терміну нагріву печі, витримки при заданій температурі, охолодження і нового нагріву. Тому при проектуванні електричних печей опору основним є питання раціонального вибору жаротривкого матеріалу для нагрівальних елементів, який забезпечував би високі технологічні та експлуатаційні властивості в конкретних умовах роботи печі.

В Україні для виготовлення нагрівачів електричних печей опору дотепер широко застосовують жаротривкі залізо-хром-алюмінієві (Fe-Cr-Al) сплави, недоліком яких є понижена пластичність при кімнатній температурі. Оскільки виробництво нагрівальних елементів включає операцію холодної деформації сплавів, тому їх понижена пластичність призводить до підвищеної витрати металу та зниження ефективності виробництва. Збільшення обсягів застосування промислових електричних печей опору в різних галузях промисловості потребує поліпшення властивостей жаротривких Fe-Cr-Al сплавів і виготовлених з них нагрівачів. Перспективним шляхом вирішення цієї проблеми є вдосконалення хімічного складу сплавів і температурно-деформаційних параметрів виробництва нагрівальних елементів. Отже збільшення технологічної пластичності при кімнатній температурі з одночасним збереженням високих показників жаротривкості Fe-Cr-Al сплавів для підвищення ефективності виробництва нагрівачів електричних печей та інших жаротривких виробів є актуальною науково-практичною задачею, що сприяє економії металу та природних ресурсів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана у рамках проведення наукових робіт кафедри прикладної фізики та наноматеріалів Запорізького національного університету: госпдоговірної роботи з ПрАТ “Електрометалургійний завод “Дніпроспецсталь”, договір №5/13/20130757 від 01.10.2013 “Розробка ресурсозберігаючих технологій роботи термічних печей металургійного виробництва” (номер державної реєстрації 0113U008094); науково-дослідної роботи за рахунок коштів державного бюджету №9/13 “Розробка математичної моделі розподілу напружень у важко навантажених зубчастих колесах і створення прогресивної технології їх виготовлення” (номер державної реєстрації 0113U000804).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення технологічної пластичності та експлуатаційної довговічності жаротривкого залізо-хром-алюмінієвого сплаву з високим електричним опором.

Для досягнення зазначеної мети в роботі були визначені такі *завдання*:

- виконати аналіз сучасних тенденцій розробки жаротривких залізо-хром-алюмінієвих сплавів з високим електричним опором;
- визначити матеріали та методи дослідження їх властивостей;
- розробити систему багатокомпонентного легування і мікролегування, оптимізувати хімічний склад розробленого сплаву методом регресійного аналізу;
- встановити залежність механічних властивостей залізо-хром-алюмінієвого сплаву від режимів деформації та температури рекристалізації, розробити рекомендації щодо вдосконалення режимів термічної обробки. Дослідити вплив обробки пароплазмовим розрядом (ППР) та розробити рекомендації щодо режимів обробки розробленого сплаву ППР;
- провести дослідно-промислове випробовування розробленого жаротривкого залізо-хром-алюмінієвого сплаву.

Об'єкт дослідження – процеси структуроутворення та підвищення фізико-механічних властивостей жаротривких сплавів з високим електричним опором.

Предмет дослідження – фізико-механічні та експлуатаційні властивості жаротривких залізо-хром-алюмінієвих сплавів для електронагрівачів.

Методи досліджень. В роботі застосовано теоретичні та експериментальні методи досліджень, а саме: світлова металографія, електронна мікроскопія, рентгеноструктурний та рентгеноспектральний аналізи, методи випробовування на розтяг, згин та ударну в'язкість, випробовування на жаротривкість і живучість. Розрахунки та опрацювання отриманих результатів проводили із застосуванням комп'ютерних програм OpenOffice Calc та Mathcad 7+.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

1. *Розроблено* нову систему багатокомпонентного легування та мікролегування Ti-Zr-Be високохромистого феритного сплаву, яка сприяє утворенню термостабільної карбідної фази сприятливої морфології, що розширює можливості підвищення їхньої технологічної пластичності на 45 %, жаротривкості на 17 % та живучості на 10 %.

2. *Вперше* отримані регресійні залежності, які дозволяють розрахувати величину жаротривкості та технологічної пластичності для заданого хімічного складу залізо-хром-алюмінієвого сплаву легованого титаном і цирконієм.

3. *Вперше* встановлено позитивний вплив обробки пароплазмовим розрядом поверхні дроту з Fe-Cr-Al сплавів з високим електричним опором на якість поверхні і розміри дефектів поверхневого шару металу, що забезпечує підвищення живучості виробів на 15 %.

4. *Удосконалено* режими термомеханічної і термічної обробки залізо-хром-алюмінієвого сплаву, які сприяють формуванню необхідної топографії надлишкових карбідних фаз і забезпечують стабільний структурний стан розробленого сплаву в процесі експлуатації.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Розроблено хімічний склад сплаву підвищеної жаротривкості з високим електричним опором (патент України № 112264), який рекомендовано до використання як матеріал для виготовлення нагрівачів електричних печей та інших виробів з робочою температурою 900...1150°C.

2. Визначено раціональний режим обробки пароплазмовим розрядом, що забезпечує підвищення живучості розробленого жаротривкого сплаву 03X22Ю5ТЦ, при таких параметрах розряду: щільність струму розряду 3...4 А/см², швидкість циркуляції електроліту 3 л/хв, електроліт – 10% водний розчин сульфату амонію NH₄(SO₄)₂, атмосферний тиск, температура електроліту 75...85°C, час витримки – 360 с, характер течії електроліту – ламінарний.

3. Показано, що використання розробленого сплаву 03X22Ю5ТЦч в якості нагрівачів в установці ПВС-410 в корпусі 2 цеху № 7 ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат» дозволяє знизити виробничі витрати на одну піч на 145 тис. грн./на рік.

4. Отримані теоретичні та практичні результати впроваджені в навчальний процес на кафедрі прикладної фізики і наноматеріалів Запорізького національного університету при проведенні лекційних та практичних занять з дисциплін «Системи технологій», «Авіаційне матеріалознавство», «Проектування та виробництво заготовок деталей машин авіаційної техніки» для студентів спеціальності 105 «Прикладна фізика та наноматеріали».

Особистий внесок здобувачки полягає в формулюванні наукової задачі, мети і основних завдань досліджень, обґрунтуванні положень наукової новизни, встановленні практичної значимості результатів, формулюванні загальних висновків. Здобувачка самостійно виконала науковий аналіз літературних джерел за темою дисертації, здійснила обґрунтування методів досліджень, провела обчислювальні та експериментальні дослідження, виконала математичну обробку результатів досліджень.

Внесок автора у роботи, які виконані у співавторстві, полягає в наступному:

– у проведенні аналізу літературних джерел, встановленні основних шляхів підвищення експлуатаційних властивостей залізо-хром-алюмінієвих (FeCrAl) сплавів [1].

– у встановленні сумісного впливу режимів деформації та температури рекристалізації на механічні властивості залізо-хром-алюмінієвих сплавів, а також дослідженні за допомогою фрактографічного аналізу зламів поверхонь впливу температури рекристалізації на технологічну пластичність сплаву 03X22Ю5ТЦч [2, 5].

– у аналізі основних способів очищення поверхні стрічки та дроту з прецизійних Fe-Cr-Al сплавів від дефектів, залишків змащування та окалини, виконанні досліджень поверхні дроту, а також наданні пропозицій щодо додаткової обробки поверхні пароплазмовим розрядом, як перспективної технології очищення і полірування – для підвищення корозійної тривкості та забезпечення високої якості поверхні дроту або стрічки зі сплаву на основі Fe-Cr-Al [3, 7, 8].

– у розробці математичної моделі залежності жаротривкості і пластичності від хімічного складу залізо-хром-алюмінієвого сплаву, а також у побудові тривимірних графічних зображень регресійних залежностей у програмі Mathcad 7+ [4, 6].

– у визначенні аналогів жаротривкого залізо-хром-алюмінієвого сплаву і формулюванні формули винаходу [9].

Апробація результатів дисертації. Основні наукові та практичні результати дисертаційних досліджень доповідалися та отримали позитивну оцінку на: XIII Міжнародній науково-технічній конференції «Нові конструкційні сталі та стопи і методи їх оброблення для підвищення надійності та довговічності виробів» (Запоріжжя, 2014); XXV Міжнародній науково-технічній конференції «Стародубовські читання» (Дніпропетровськ, 2015); Міжнародній науково-технічній конференції «Надійність і безпека технологічного обладнання RSTE-2015» (Дніпропетровськ, 2015); IV Міжнародній науково-практичній конференції «Титан 2016: виробництво та використання в авіабудуванні» (Запоріжжя, 2016); XIV Міжнародній конференції «Проблеми корозії та протикорозійного захисту конструкційних матеріалів» (Львів, 2018).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 9 друкованих праць, у тому числі: 6 статей у наукових фахових виданнях, з яких 1 включено до міжнародної наукометричної бази даних Scopus, 2 тез доповідей в збірках матеріалів міжнародних конференцій та 1 патент України на винахід.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків загальним обсягом 160 сторінок. Основний текст з 15 таблицями та 39 рисунками викладено на 112 сторінках, список використаних літературних джерел зі 138 бібліографічних найменувань розміщено на 14 сторінках, 4 додатки розміщено на 11 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи; сформульовано мету і завдання дослідження; охарактеризовано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів; надано інформацію про апробацію роботи та її зв'язок з науково-дослідними темами; зазначено кількість публікацій за темою дисертації і окреслено особистий внесок здобувача в публікаціях, підготовлених за участю співавторів, наведено відомості про апробацію результатів дисертаційної роботи.

У **першому розділі** «*Стан питання, мета і завдання досліджень*» виконано аналіз сучасного стану напрямків розробки жаротривких залізо-хром-алюмінієвих сплавів, які застосовуються для виготовлення нагрівальних елементів електричних печей опору та вимоги до них.

Показано, що основними заходами при створенні сучасних Fe-Cr-Al сплавів є багатокомпонентне легування та мікролегування, а саме:

- уточнення верхньої та нижньої границі концентрації хрому в сплаві для роботи при температурах 900...1150°C;

- обмеження вмісту вуглецю до рівня, при якому негативний його вплив на жаротривкість сплаву через масове утворення карбідів хрому типу Me_3C , Me_7C_3 , Me_{23}C_6 буде мінімальним;

- легування елементами, які утворюють комплексні дрібнодисперсні карбонітриди, рівномірно розташовані по тілу та границях зерен, що позитивно впливає на подрібнення зерен та підвищення пластичних властивостей сплаву.

За результатами проведеного аналізу обґрунтовано доцільність розробки нового сплаву з підвищеними фізико-механічними та експлуатаційними властивостями, сформульовано мету та задачі дослідження, а також визначені шляхи і методи їх реалізації.

У другому розділі *«Вибір матеріалу та методик досліджень»* наведено опис матеріалів та методів досліджень проведених в даній роботі.

Дослідження впливу легування та термічної обробки на формування структури, фізико-механічних, технологічних та експлуатаційних властивостей проводили на сплавах феритного класу – 03X15Ю5, 03X23Ю5, 03X23Ю5Т, 03X27Ю5Т, 03X22Ю5ФБч та сплаві, розробленому на їхній основі.

Дослідження впливу комплексного легування на характер розподілу зміцнюючих фаз по границях зерен і в тілі зерна, на форму, тип і топографію карбідів і карбонітридів у структурі сплавів після деформації і різних температурних обробок проводили методом світлової мікроскопії на мікроскопі МІМ-8. Змінення параметрів кристалічної ґратки фериту досліджуваних сплавів залежно від температури нагріву визначали на дифрактометрі ДРОН-1 в мідному випромінюванні з монохроматизацією дифрагованих променів. Фрактографічний аналіз зламів поверхонь зразків сплаву здійснювали методом растрової електронної мікроскопії на приладі «ISM-T300». Для дослідження тонкої структури сплавів використовували метод просвічуальної електронної мікроскопії на мікроскопі JSM-6510.

Механічні властивості визначали методом випробування на розтяг згідно ДСТУ EN 10002-1:2006 на розривній машині типу «Ейвері».

Жаротривкість визначали в процесі витримки зразків при високих температурах в печах відновлення і сепарації ПВС-410 ТОВ «ЗТМК». Випробування на живучість проводили згідно ГОСТ 2419-78 за методом В.

Третій розділ *«Розробка багатокомпонентної системи легування жаротривкого залізо-хром-алюмінієвого сплаву»* присвячено вибору легувальних елементів та розробці хімічного складу залізо-хром-алюмінієвого сплаву, призначеного для виготовлення нагрівачів електричних печей з робочою температурою 900...1150°C.

Вперше розроблено і запатентовано жаротривкий залізо-хром-алюмінієвий сплав 03X22Ю5ТЦч. Розробка хімічного складу виконана шляхом додаткового легування титаном, цирконієм, берилієм та забезпеченням раціональної структури, що дозволило отримати високу технологічну пластичність, зберігаючи при цьому високий рівень жаротривкості. Хімічний склад та основні

властивості дослідних (жаротривкість H^{1100} та технологічна пластичність δ_{200}) сплавів наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Хімічний склад та основні властивості дослідних сплавів

№ з/ п	Концентрація легувальних елементів, % мас.													δ_{200} , %	H^{1100} , год.
	Cr	Al	Si	Mn	Ti	Zr	Be	Ba	PЗМ	C	N	S	P		
1	19,50	4,50	0,10	0,05	0,05	0,05	0,005	0,0005	0,0010	0,020	0,008	0,012	0,011	22	4565
2	22,80	6,00	0,30	0,30	0,20	0,20	0,050	0,0015	0,0100	0,050	0,020	0,015	0,015	21	4690
3	22,60	5,24	0,15	0,12	0,15	0,11	0,020	0,0010	0,0050	0,030	0,014	0,015	0,012	23	4760
4	19,91	5,05	0,12	0,14	0,12	0,13	0,010	0,0007	0,0020	0,028	0,017	0,013	0,015	22	4595
5	22,73	5,64	0,27	0,24	0,18	0,16	0,040	0,0011	0,0030	0,030	0,012	0,014	0,013	21	4710
6	19,10	4,36	0,08	0,04	0,03	0,04	0,002	0,0001	0,0008	0,010	0,004	0,012	0,011	19	4540
7	23,15	6,23	0,36	0,42	0,24	0,26	0,080	0,0020	0,0130	0,060	0,023	0,018	0,017	18	4560
8	22,10	5,30	0,21	0,17	0,15	0,20	0,011	0,0010	0,0070	0,030	0,013	0,013	0,014	21,5	4610

Встановлено, що введення таких компонентів, як титан, цирконій і берилій дозволяє одержати жаротривкий сплав з високим показником відносного видовження, що характеризує технологічну пластичність сплаву. Запропонований хімічний склад обумовлює його дрібнозернисту структуру і високу технологічну пластичність при збереженні високого рівня корозійної тривкості, отже, поліпшені технологічні та експлуатаційні властивості сплаву сприяють збільшенню строку експлуатації виробів з нього.

Визначення хімічного складу, що забезпечує отримання оптимальних експлуатаційних властивостей сплаву, здійснювалось за допомогою регресійного аналізу результатів експерименту. Досліджено вісім плавів з різним хімічним складом (таблиця 1), реалізована репліка 2⁵⁻².

Параметрами оптимізації обрано наступні найбільш важливі для досліджуваних сплавів властивості:

1) жаротривкість H^{1100} ($Y1$), враховуючи високу температуру експлуатації нагрівачів електричних печей 900...1150°C;

2) пластичність в холодному стані δ_{200} ($Y2$), яка є важливою технологічною характеристикою при виготовленні нагрівачів.

В якості факторів, які найбільш впливають на механічні та експлуатаційні властивості залізо-хром-алюмінієвих сплавів були обрані концентрації основних легувальних елементів – вуглецю і азоту, хрому, алюмінію, титану, цирконію. Вказані елементи чинять найбільший вплив на процеси структуроутворення при деформаційних і термічних обробках.

Інтервали варіювання факторів були визначення з урахуванням аналізу літературних джерел про вплив легувальних елементів C, N, Cr, Al, Ti, Zr на структуроутворення та властивості жаротривких сплавів. Оскільки вуглець і азот діють в одному і тому ж напрямку на параметри оптимізації дослідних

сплавів, окрім концентрації в сплаві Cr, Al, Ti, Zr, у якості фактору впливу було обрано також сумарний вміст вуглецю і азоту (C+N). Рівні та інтервали варіювання дослідного легувального комплексу представлені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Рівні та інтервали варіювання факторів

Найменування	Вміст легувальних елементів, % мас.				
	C+N (x_1)	Cr (x_2)	Al (x_3)	Ti (x_4)	Zr (x_5)
Верхній рівень (+)	0,08	23	6,2	0,24	0,26
Основний рівень	0,055	21	5,3	0,14	0,15
Нижній рівень (-)	0,03	19	4,4	0,04	0,04
Інтервал варіювання	0,025	2	0,9	0,1	0,11

В результаті відповідних розрахунків отримані рівняння регресії в натуральних величинах для оптимізації хімічного складу жаротривкого сплаву. Регресійний аналіз з використанням методу найменших квадратів дав можливість скласти рівняння регресійної залежності жаротривкості та технологічної пластичності від хімічного складу Fe-Cr-Al сплаву з титаном і цирконієм. Результати регресійного аналізу у вигляді рівнянь регресії та оцінка їх адекватності представлені у таблиці 3.

Таблиця 3 – Результати регресійного аналізу – рівняння регресії та оцінка їх адекватності

Рівняння регресії	Дисперсія параметру оптимізації, S_y^2	Довірчий інтервал, Δb	Критерій Фішера, F	
			Розрахунковий	Табличний
$H^{100} = 14253,59 - 201340,40(C+N) - 460,53Cr - 291,66Al + 14320,60Ti - 338,72Zr + 10801,94Cr(C+N) - 218294,44Ti(C+N)$	318,75	$\pm 10,3$	0,075	4,5
$\delta_{200} = 341,6(C+N) + 0,995Cr - 0,855Al + 7,5Ti - 10,45Zr - 4,0125Cr(C+N) - 1006,7Ti(C+N)$	1,94	$\pm 0,8$	0,0015	4,5

Із застосуванням пакету прикладних програм «Mathcad 7+» були побудовані поверхні відгуку, а також їх проекції, що дають наочне просторове зображення регресійних залежностей, що наведені на рис. 1 та рис. 2. При цьому розглядали сумісний вплив двох будь-яких легувальних елементів при фіксованому значенні інших елементів. На підставі такого графічного представлення зроблено висновки про спільний вплив легувальних елементів.

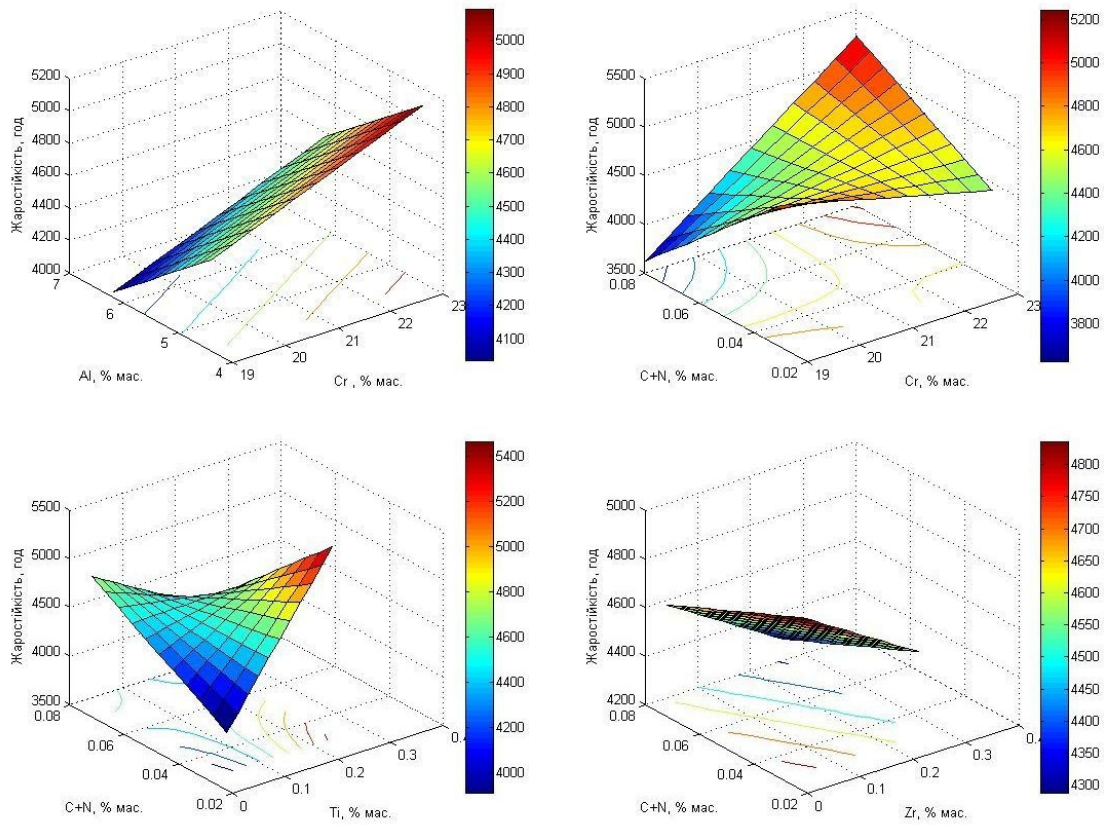


Рисунок 1 – Вплив концентрації легувальних елементів на жаротривкість

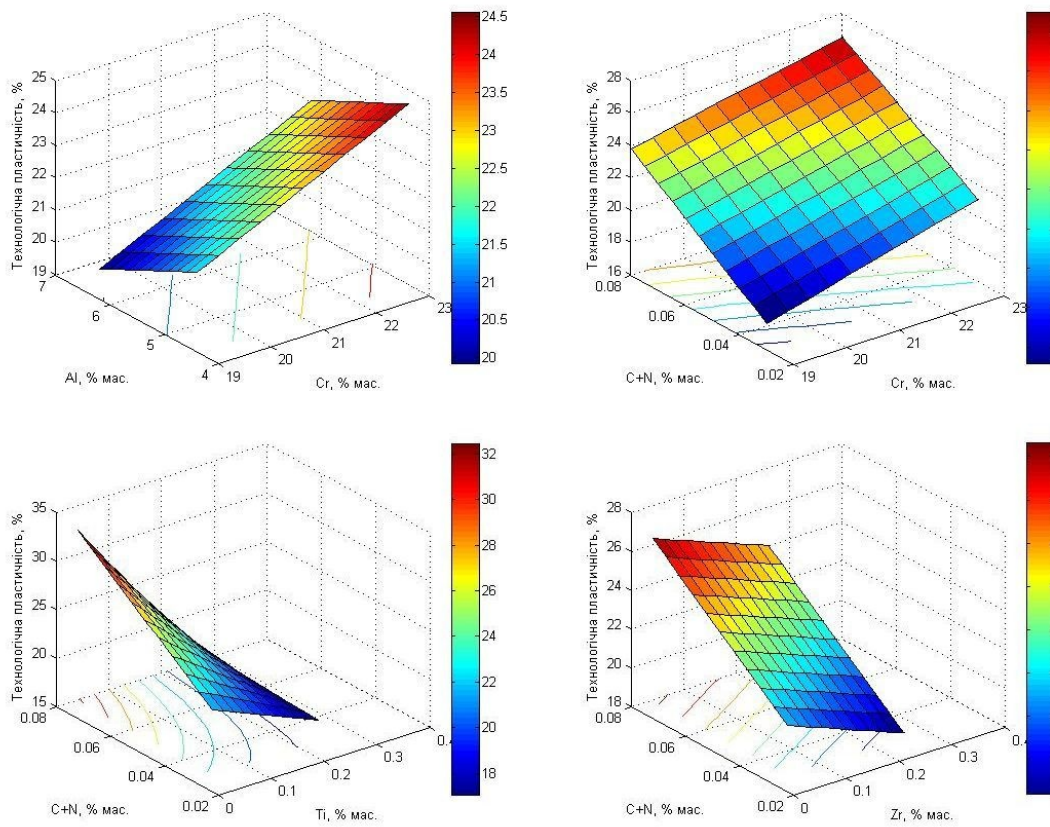


Рисунок 2 – Вплив концентрації легувальних елементів на пластичність

Аналіз тривимірних графічних залежностей (рис. 1, 2) показав, що найбільш сильний вплив на експлуатаційні властивості залізо-хром-алюмінієвого сплаву чинить вміст у сплаві хрому та алюмінію. Вміст у сплаві 19,50-22,80 мас. % Cr та 4,50-6,00 мас. % Al забезпечує високі показники жаротривкості при робочих температурах електропечей 900°C...1150°C. При концентрації хрому понад 22,80 мас. %, його вплив на жаротривкість є несуттєвим, а технологічна пластичність при гарячій та холодній обробці сплаву суттєво знижується. Нижнє значення (4,5 %) вмісту алюмінію відповідає початку утворення на поверхні сплаву щільної оксидної плівки, яка підвищує жаротривкість сплаву; при вмісті алюмінію більше 6,00 мас. % спостерігається зниження технологічної пластичності сплаву, що призводить до ускладнень при його деформаційній обробці, особливо в холодному стані, а утворювана поверхнева оксидна плівка, яка складається переважно з оксиду алюмінію Al_2O_3 , є чутливою до механічних пошкоджень.

Оскільки, максимальні показники жаротривкості і технологічної пластичності були досягнуті при вмісті в сплаві 22,00-23,00 мас. % Cr та 5,00-5,50 мас. % Al, подальша побудова тривимірні графіків велася з урахуванням цих даних.

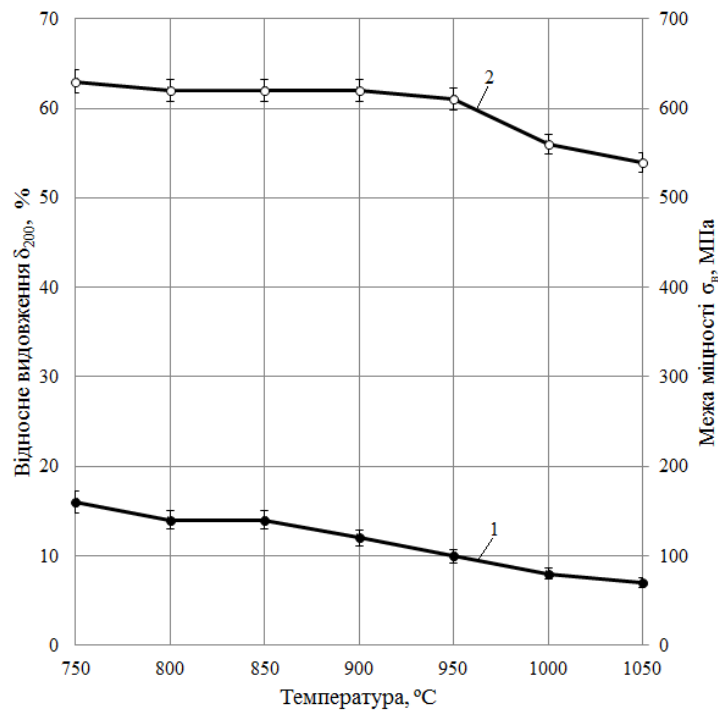
Встановлено, що на експлуатаційні властивості сплаву помітно впливає співвідношення між кількістю хрому, титану, цирконію та вмістом в сплаві вуглецю та азоту. Обмеження вмісту вуглецю (до 0,05 мас. %) обґрунтовано його негативним впливом на жаротривкість сплаву через масове утворення карбідів хрому $(Fe,Cr)_3C$, $(Fe,Cr)_7C_3$, $(Fe,Cr)_{23}C_6$, що призводить до зменшення вмісту хрому в твердому розчині, особливо по границях зерен, і, згідно з літературними даними, підвищує схильність сплаву до міжкристалітної корозії при довготривалій високотемпературній експлуатації. Титан, при спільному введенні його з цирконієм, утворює комплексні дрібнодисперсні карбонітриди, рівномірно розташовані по тілу та границях зерен, що позитивно впливає на подрібнення зерен та підвищення пластичних властивостей сплаву. Показано, що введення титану і цирконію, як більш активних, ніж хром, карбідо- і нітридоутворюючих елементів, зменшує шкідливий вплив вуглецю та азоту за рахунок зв'язування їх у стійкі первинні карбіди, нітриди та карбонітриди типу MeC , MeN , $MeCN$. Запобігаючи збідненню металевої основи хромом легування титаном та цирконієм дозволяє підвищити жаротривкість розробленого сплаву на 17% в порівнянні з серійним аналогом (03X23Ю5Т).

Розроблено оптимальний хімічний склад жаротривкого залізо-хром-алюмінієвого сплаву: вуглець – $\leq 0,05$ мас. %, хром – 22,0-23,0 мас. %, алюміній – 4,5-6,0 мас. %, титан – 0,05-0,2 мас. %, цирконій – 0,05-0,2 мас. %.

У четвертому розділі «Формування структури і фізико-механічних властивостей жаротривкого сплаву» описано особливості технологічного переділу виробництва сплаву 03X22Ю5ТЦч, встановлено характер сумісного впливу режимів деформації та температури рекристалізації на механічні властивості залізо-хром-алюмінієвого сплаву.

Для отримання необхідної сприятливої кінцевої структури і високого рівня механічних властивостей сплаву 03X22Ю5ТЦч, а також уникнення

сильного укрупнення зерна та зниження через це показників технологічної пластичності, необхідно особливо ретельно обирати режими гарячої деформації, зокрема при останньому обтисненні. На рис. 3 наведено залежність механічних властивостей гарячекатаного сплаву 03Х22Ю5ТЦч від температури рекристалізації. Хоча з ростом температури термічної обробки спостерігається зниження показників відносного видовження, для забезпечення більш повної рекристалізації підкату перед холодною деформацією (волочінням) була обрана термічна обробка при температурі 850°C і охолодження в воду.

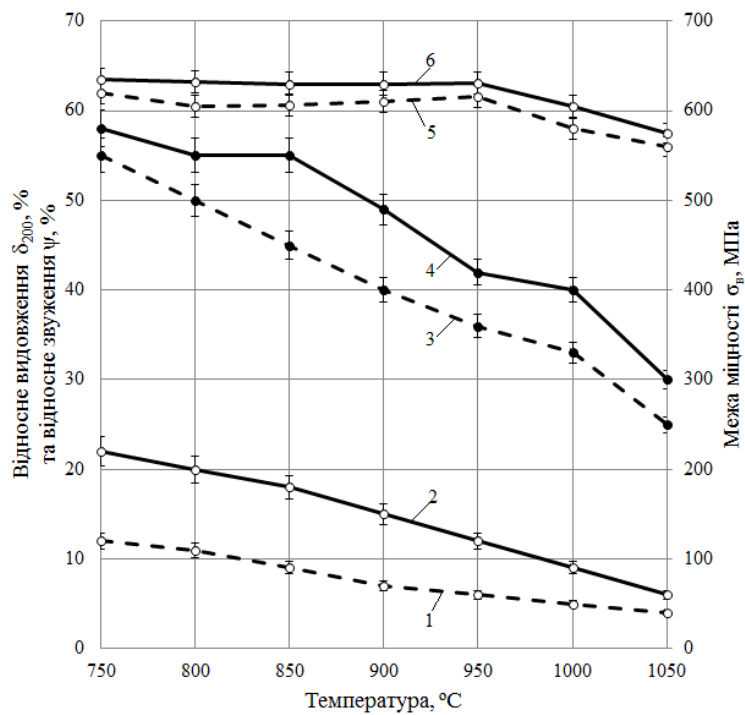


1 – відносне видовження δ_{200} , 2 – межа міцності σ_v

Рисунок 3 – Залежність механічних властивостей гарячекатаного сплаву 03Х22Ю5ТЦч від температури рекристалізації.

Більш високих показників механічних властивостей сплав 03Х22Ю5ТЦч набуває після холодної деформації та наступної рекристалізації. На рис. 4 наведені порівняльні залежності механічних властивостей холодноотягнутих сплавів 03Х23Ю5Т і 03Х22Ю5ТЦч від температури рекристалізації.

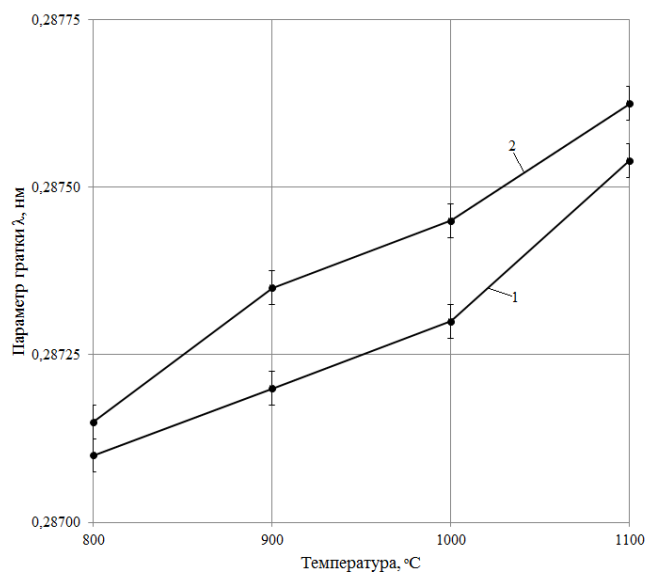
Встановлено, що розроблений сплав 03Х22Ю5ТЦч має високі показники механічних властивостей ($\delta_{200}=22\%$, $\psi=58\%$, $\sigma_v=620$ МПа) після температури рекристалізації 750°C, зберігає досить високі механічні характеристики до температури 850°C і перевищує за цими показниками відомий аналог, сплав 03Х23Ю5Т, майже у 2 рази. Подальше підвищення температури рекристалізації призводить до зниження механічних властивостей сплаву 03Х22Ю5ТЦч ($\delta_{200}=6\%$, $\psi=30\%$, $\sigma_v=575$ МПа) перевищуючи при цьому показники стандартизованого сплаву 03Х23Ю5Т ($\delta_{200}=4\%$, $\psi=25\%$, $\sigma_v=560$ МПа).



1 – відносне видовження δ_{200} (03X23Ю5Т), 2 – відносне видовження δ_{200} (03X22Ю5ТЦч),
 3 – відносне звуження ψ (03X23Ю5Т), 4 – відносне звуження ψ (03X22Ю5ТЦч),
 5 – межа міцності σ_b (03X23Ю5Т), 6 – межа міцності σ_b (03X22Ю5ТЦч)

Рисунок 4 – Порівняльні залежності механічних властивостей холоднотягнутих сплавів 03X23Ю5Т і 03X22Ю5ТЦч від температури рекристалізації.

За результатами проведених рентгеноструктурних досліджень побудовано графік залежності параметру ґратки твердого розчину сплаву 03X22Ю5ТЦч від температури витримки, що наведений рис. 5.



1 – 03x22Ю5ТЦч, 2 – 03X23Ю5Т

Рисунок 5 – Порівняльні залежності параметру ґратки твердого розчину сплавів 03X23Ю5Т і 03X22Ю5ТЦч від температури витримки.

Аналіз приведених даних показує, що з ростом температури витримки спостерігається збільшення параметру ґратки твердого розчину. При цьому, необхідно зазначити, що при витримці в інтервалі температур 1000...1100°C спостерігається різке зростання параметру ґратки, що пояснюється активізацією розчинення карбідної фази та насиченням твердого розчину вуглецем та азотом. Збільшення розмірів кристалічної ґратки призводить до зміни властивостей фериту і спричиняє значне зниження показників відносного видовження сплаву.

Порівняння кривих температурної залежності границі міцності σ_b , відносного видовження δ_{200} , відносного звуження ψ і параметру кристалічної ґратки, що наведені на рис. 3, 4, 5, свідчить про співпадіння тенденції зниження механічних властивостей сплаву із збільшенням параметру кристалічної ґратки твердого розчину. Встановлено, що підвищення температури сприяє значному зростанню розмірів зерен, і викликає високотемпературну крихкість.

На рис. 6 наведені результати фрактографічного аналізу зламів поверхонь, які дозволяють встановити природу впливу температури рекристалізації на технологічну пластичність сплаву 03X22Ю5ТЦч.

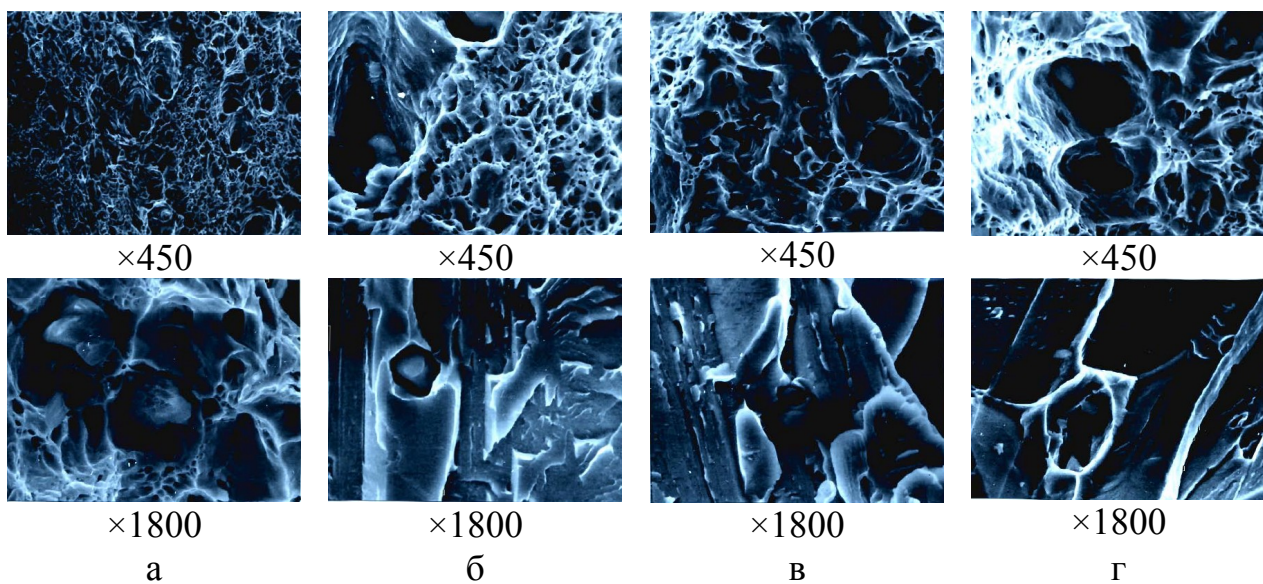
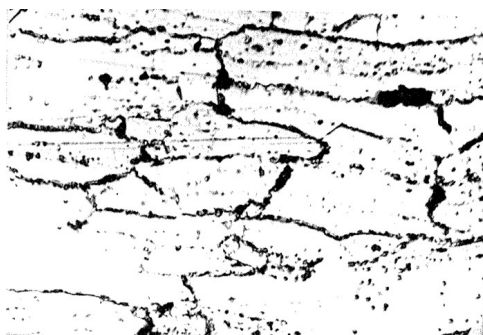


Рисунок 6 – Фрактограми зламів сплаву 03X22Ю5ТЦч після витримки 1000 год. при температурі: а – 800°C, б – 900°C, в – 1000°C, г – 1100°C.

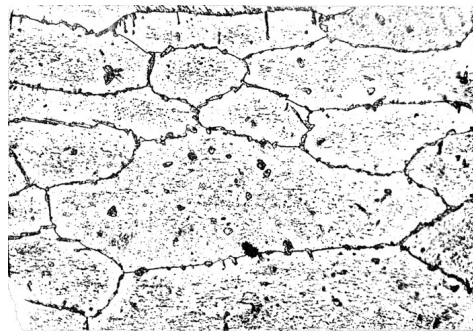
Встановлено, що після холодної пластичної деформації і наступної термічної обробки при температурі 800°C форма зерен сталі 03X22Ю5ТЦч мала вермикулярну та овальну форму, а карбіди – переважно неправильну форму і брали активну участь у руйнуванні металу за ямочним типом (рис. 6, а). Підвищення температури витримки до 900°C сприяло деякому зниженню енергоємності руйнування, що підтверджується зменшенням кількості чашок в'язкого зламу на одиницю поверхні (рис. 6, б). Ця тенденція зберігалась і після підвищення температури витримки до 1000°C і вище. Відзначено також, що змінився сам механізм руйнування: в'язкий чашковий злам поступився чистому квазізламу (рис. 6, в), також помітно зменшилась роль неметалевої фази у

процесі руйнування. Фасетки крупного квазізламу збільшилися після витримки при 1100°C (рис. 6, г).

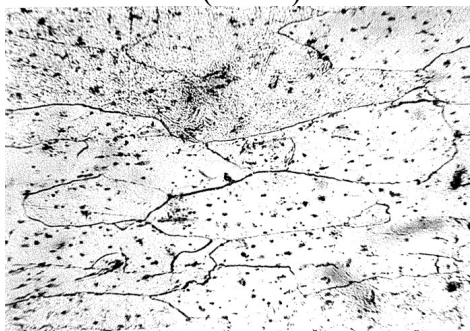
Результати металографічних досліджень наведено на рис. 7. Мікроструктура зразків сталі після витримки при температурі 800°C свідчить про незавершеність процесу рекристалізації, що підтверджується наявністю в структурі зерен, які мають витягнуту форму вздовж напрямку прикладеної деформації (текстуру деформації). Крім того, при порівняно низьких температурах обробки, утворюється карбонітридна фаза, якій властиво коагулювати в таких умовах (рис. 7 а). При подальшому підвищенні температури витримки відбувається поступове розчинення карбонітридної фази, яке супроводжується різким збільшенням розмірів зерен (рис. 7 б, в, г). Легування залізо-хром-алюмінієвого сплаву титаном і цирконієм забезпечує утворення дрібнодисперсних карбідів і нітридів титану та цирконію зі сприятливою формою і рівномірним їх розподілом у сталі.



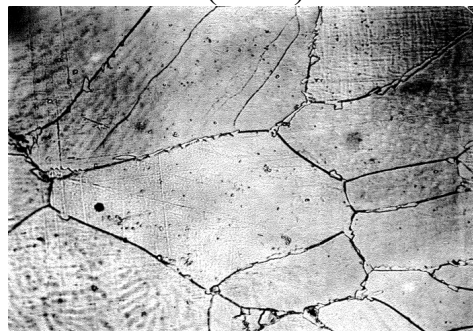
а (×400)



б (×400)



в (×400)



г (×400)

Рисунок 7 – Структура сплаву 03X22Ю5ТЦч після витримки 1000 год. при температурі: а – 800°C, б – 900°C, в – 1000°C, г – 1100°C.

Таким чином, доведено, що існує чітка залежність між характером руйнування та показником пластичності: зміна механізму руйнування, який посилюється помітним зростанням розмірів зерен сплаву 03X22Ю5ТЦч, призвела до зниження пластичності. Отже, підвищення температури термічної обробки призводить до розчинення карбонітридної фази, та сприяє швидкому росту розмірів зерен і, відповідно, зміні механізму руйнування: в'язкий чашковий злам поступився чистому квазізламу. Це обумовило різке зниження показників відносного видовження сплаву 03X22Ю5ТЦч з 22 % до 5 %.

Встановлено раціональний режим термічної обробки сплаву 03X22Ю5ТЦч, яка полягає в нагріванні до 750...820°C і наступному охолодженні у воду для запобігання різкого зниження пластичності.

Встановлено позитивний вплив обробки ППР поверхні дроту або стрічки зі сплавів з високим електричним опором. Обробка ППР дозволяє очистити поверхню від технологічного мастила, згладжує мікрорельєф, знижує шорсткість, підвищує корозійну стійкість поверхні. Зміна корозійної поведінки оброблюваних виробів в агресивних середовищах обумовлена позитивним впливом на морфологію та топографію поверхневих шарів виробу. До того ж використання даної технології дає можливість розширення технічних можливостей, здешевлення процесу очищення поверхні дроту внаслідок того, що не потребує використання різних видів технологічного обладнання при обробці різної форми поверхні.

На рис. 8 представлено макроструктуру поверхонь дроту зі сплаву 03X22Ю5ТЦч до початку обробки ППР, після обробки на протязі 30 с та 6 хв. Відзначено, що поверхня дроту до її обробки ППР нерівна з хаотично розташованими раковинами і заглибленнями, які характеризуються значними опуклостями та увігнутостями. На поверхні металу, також спостерігаються кольори мінливості і окалина з різним забарвленням від жовтого до синього. (рис. 8 а).

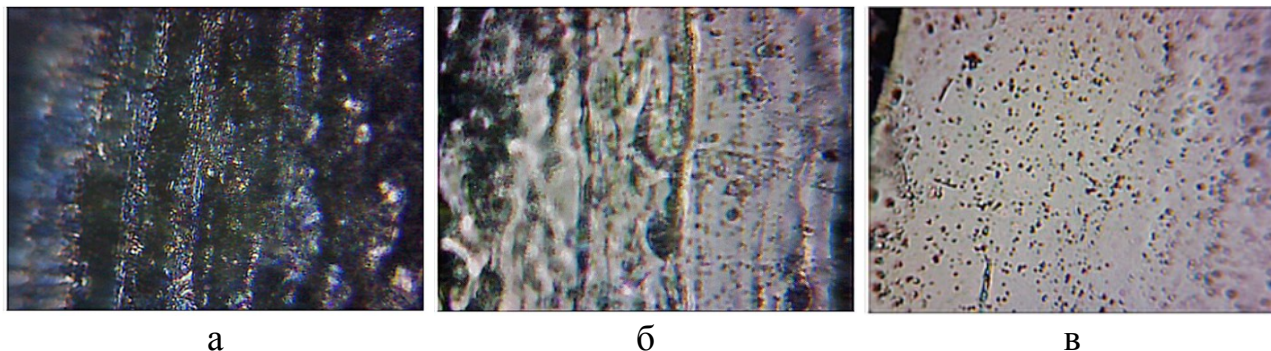


Рисунок 8 – Макроструктура (топографія) поверхні дроту зі сплаву 03X22Ю5ТЦч: а – початковий стан поверхні, б – поверхня, оброблена на протязі 30 с, в – поверхня, оброблена на протязі 6 хв. ($\times 100$).

Після обробки ППР (рис. 8 б, в) поверхня набула металевий блиск, зменшилася глибина і кількість раковин і механічних нерівностей, а отже і площа дотику з корозійноактивним середовищем. Крім того, при наявності гостроокресленого профілю дна западин між мікронерівностями, чим вище висота останніх, тим більшою мірою відбувається руйнування металу в цих западинах під дією корозії, яка проникає вглиб металу. Дефекти та неметалеві включення викликають електрохімічну неоднорідність металу, інтенсифікують процеси виникнення і протікання локальної корозії.

Запропоновано, раціональний режим обробки поверхні дроту або стрічки ППР для очищення їх від дефектів поверхні, технологічних мастил та окалини при таких параметрах розряду: щільність струму розряду 3...4 А/см², швидкість

циркуляції електроліту 3 л/хв, електроліт – 10% водний розчин сульфату амонію $\text{NH}_4(\text{SO}_4)_2$, атмосферний тиск, температура електроліту 75...85°C, час витримки – 360 с, характер течії електроліту ламінарний.

У п'ятому розділі «Промислове випробування і економічна доцільність впровадження залізо-хром-алюмінієвого сплаву» наведено результати дослідно-промислових випробувань зразків сплавів 03X23Ю5, 03X23Ю5Т, 03X22Ю5ФБч та 03X22Ю5ТЦч в реальних умовах магній-термічного виробництва на ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат».

Зі стрічки розміром 3,5×35 були виготовлені зигзагоподібні нагрівачі, встановлювали в піч ПВС-410. Досліджувані зразки працювали при робочих температурах 780...1020°C (900...1150°C на поверхні нагрівального елементу) при дотриманні технологічного процесу виробництва титану губчастого до перегорання. Порівняльні показники жаротривкості в повітряному середовищі досліджуваних сплавів наведено на рис. 9.

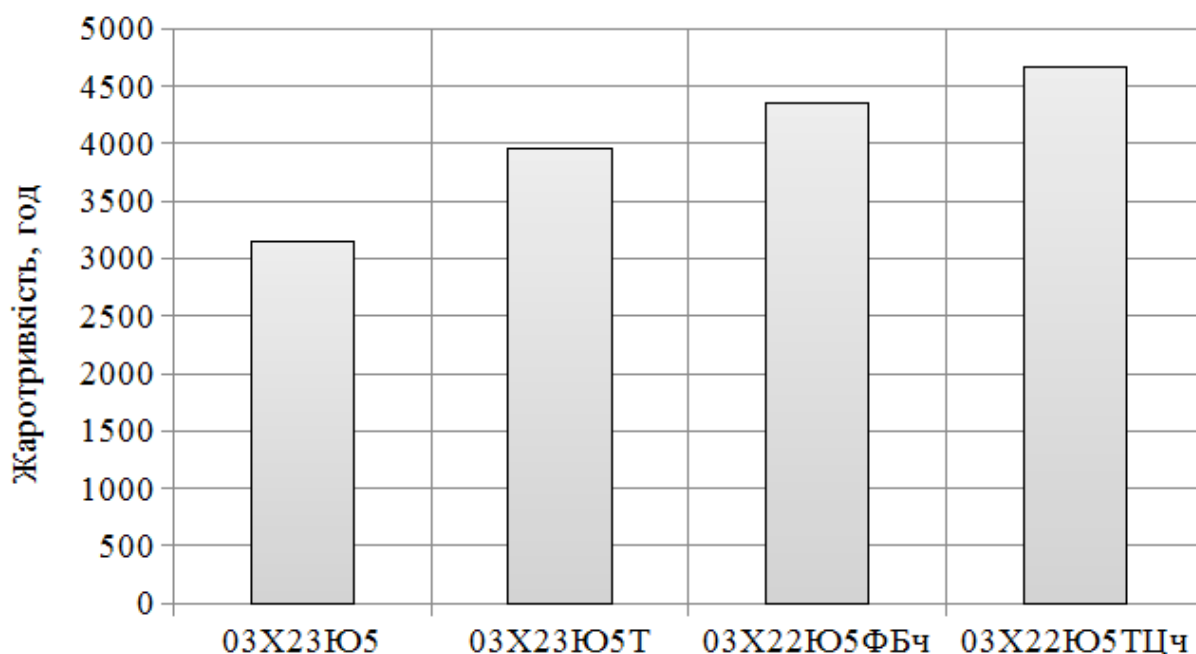


Рисунок 9 – Порівняльні показники жаротривкості в повітряному середовищі досліджуваних сплавів

В результаті проведених випробувань встановлено, що кращу жаротривкість має розроблений сплав 03X22Ю5ТЦч (4665 год.) в порівнянні з відомими серійними аналогами (03X23Ю5 – 3150 год., 03X23Ю5Т – 3960 год.) відповідно.

Живучість сплавів 03X23Ю5, 03X23Ю5Т, 03X22Ю5ФБч та 03X22Ю5ТЦч визначали згідно ГОСТ 2419-78 за методом В. Для сплавів цього класу живучість при температурі 1300°C становить не менше 80 год. Окрім того досліджували вплив обробки пароплазмовим розрядом стрічки з сплавів типу Fe-Cr-Al на підвищення показників живучості. Результати досліджень наведено на рис. 10.

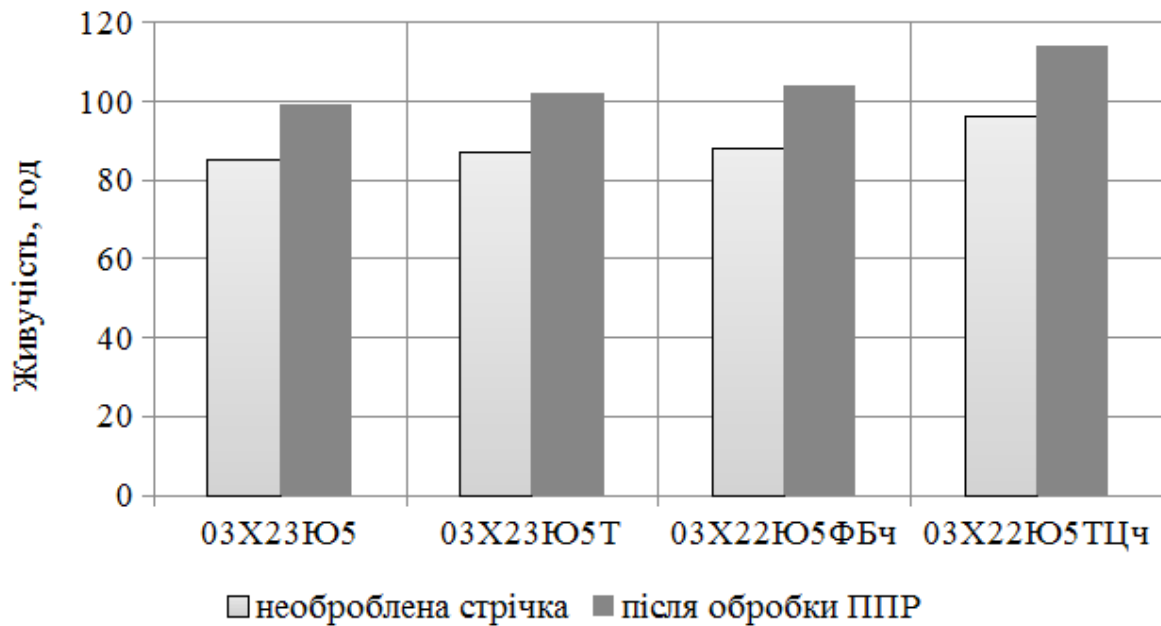


Рисунок 10 – Показники живучості сплавів при температурі випробовування 1300°C

Показано, що найкращою живучістю володіє сплав 03X22Ю5ТЦч, окрім того, використання обробки ППР, що згладжує мікрорельєф і знижує шорсткість поверхні, сприяє підвищенню корозійної тривкості та суттєвому поліпшенню показників живучості всіх досліджуваних сплавів (в середньому на 15%).

Дослідно-промислові випробування підтвердили доцільність використання розробленого сплаву 03X22Ю5ТЦч в якості жаротривкого матеріалу для виготовлення нагрівальних елементів шахтних електричних печей опору. Отже, доведено, що комплексне модифікування Fe-Cr-Al сплавів з додатковою обробкою ППР здатне істотно підвищити їхні експлуатаційні та технологічні властивості.

Використання розробленого жаротривкого сплаву в якості нагрівачів в установці ПВС-410 в корпусі 2 цеху № 7 ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат» дозволить знизити виробничі витрати 145 тис. грн./на рік на одну піч. Економічна ефективність від впровадження розробленого сплаву в виробництво досягається за рахунок більш високого показника електричного опору та більш низької вартості в порівнянні з хромонікелевими сплавами. Окрім того, враховуючи більш тривалий термін експлуатації сплаву 03X22Ю5ТЦч виготовлення з нього нагрівачів дозволить збільшити міжремонтний період та зменшити тривалість простоїв печей.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішене нове науково-технічне завдання, яке спрямоване на створення жаротривкого залізо-хром-алюмінієвого сплаву з підвищеними показниками технологічної пластичності і жаротривкості для

застосування в умовах агресивного середовища і високих температур експлуатації. Основні наукові та практичні результати дисертації полягають у наступному:

1. Проаналізовано особливості розробки жаротривких залізо-хром-алюмінієвих сплавів, які застосовуються для виготовлення нагрівальних елементів електричних печей опору. Виконано аналіз основних напрямків підвищення технологічних та експлуатаційних властивостей сплавів системи Fe-Cr-Al. Встановлено, що перспективним шляхом поліпшення властивостей даних сплавів є вдосконалення хімічного складу і температурно-деформаційних параметрів виробництва нагрівальних елементів.

2. Розроблено нову систему багатокомпонентного легування та мікролегування Ti-Zr-Be залізо-хром-алюмінієвого сплаву, яка захищена патентом України на винахід № 112264, з підвищеною жаротривкістю на 17 % в агресивному середовищі магнійтермічного виробництва губчастого титану і підвищеним на 45 % показником технологічної пластичності.

3. Вперше, за допомогою статистичних методів обробки результатів експерименту, оптимізовано хімічний склад, отримані рівняння регресії та побудовані тривимірні графічні залежності властивостей (пластичності та жаротривкості) від хімічного складу сплаву Fe-Cr-Al з титаном і цирконієм, що дозволило знайти оптимальний хімічний склад жаротривкого залізо-хром-алюмінієвого сплаву: вуглець – $\leq 0,05$ мас. %, хром – 22,0-23,0 мас. %, алюміній – 4,5-6,0 мас. %, титан – 0,05-0,2 мас. %, цирконій – 0,05-0,2 мас. %.

4. З'ясовано вплив температури рекристалізації на технологічну пластичність сплаву 03X22Ю5ТЦч. Показано, що існує залежність між характером руйнування і показником пластичності: зміна механізму руйнування, який посилюється помітним зростанням розмірів зерен залізо-хром-алюмінієвого сплаву, призводить до зниження пластичності на 44 %. Визначено, що найкращий показник технологічної пластичності 22 % має сплав 03X22Ю5ТЦч, режим термічної обробки для якого полягає в нагріванні в межах 750...820°C з наступним охолодженням у воді з метою запобігання утворенню σ -фази і, відповідно, різкого зниження пластичності.

5. Вперше показано позитивний вплив обробки пароплазмовим розрядом поверхні дроту із сплавів з високим електроопором на шорсткість, кількість і розміри дефектів поверхневого шару. Запропоновано раціональний режим обробки поверхні дроту або стрічки ППР для очищення їх від дефектів поверхні, технологічних мастил та окалини при таких параметрах розряду: щільність струму розряду 3...4 А/см², швидкість циркуляції електроліту 3 л/хв, електроліт – 10 % водний розчин сульфату амонію NH₄(SO₄)₂, атмосферний тиск, температура електроліту 75...85°C, час витримки – 360 с, характер течії електроліту ламінарний.

6. Розроблений жаротривкий сплав 03X22Ю5ТЦч впроваджено у ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат» з очікуваним економічним ефектом 145 тис. грн./на рік на одну піч, за рахунок більш тривалого терміну експлуатації нагрівачів, збільшення міжремонтного періоду та зменшення тривалості простоїв печей. Отримані наукові та практичні результати

впроваджені в навчальний процес на кафедрі прикладної фізики і наноматеріалів Запорізького національного університету при проведенні лекційних та практичних занять з дисциплін «Системи технологій», «Авіаційне матеріалознавство», «Проектування та виробництво заготовок деталей машин авіаційної техніки» для студентів спеціальності 105 «Прикладна фізика та наноматеріали».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Мищенко В. Г., Гречка А. В. Жаростойкие стали для шахтных печей сопротивления магнитермического производства титана. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Стародубовские чтения*. 2013. Вип. 67. С. 128 – 130 (*Наукове фахове видання України*)

2. Міщенко В. Г., Гречка О. В. Особенности формирования структуры та властивостей жаростойких сталей у металургійному виробництві. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Стародубовские чтения*. 2014. Вип. 73. С. 117 – 120 (*Наукове фахове видання України*)

3. Мищенко В. Г., Тутык В. А., Гречка А. В. Исследование влияния качества поверхности материала на эксплуатационные свойства нагревательных элементов. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Стародубовские чтения*. 2015. Вип. 80. С. 210 – 215 (*Наукове фахове видання України*)

4. Міщенко В. Г., Гречка О. В., Меньяло О. І. Вплив легувальних елементів на експлуатаційні властивості жаростойких сплавів. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2015. №7 (296). С. 87 – 91 (*Наукове фахове видання України, включено до НБД “Scopus”, “Index Copernicus”, “Ulrich’s Web Global Serials Directory”*)

5. Міщенко В. Г., Гречка О. В. Формування структури і властивостей жаротривкої сталі 03X22Ю5ТЦч у процесі деформаційно-термічної обробки. *Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів : спецвипуск журналу “Фізико-хімічна механіка матеріалів”*. 2018. № 12. С. 113 – 117 (*Наукове фахове видання України*)

6. Гречка О. В., Міщенко В. Г. Оптимізація хімічного складу жаростойкого сплаву для виготовлення нагрівальних елементів. *Математичне моделювання*. 2018. № 2 (39). С. 218 – 223 (*Наукове фахове видання України, включено до НБД “Index Copernicus”*)

Наукові праці, які свідчать про апробацію матеріалів дисертації:

7. Мищенко В. Г., Гречка А. В. Исследование возможностей повышения свойств сплава на основе Fe-Cr-Al. *Нові конструкційні сталі та стопи і методи їх оброблення для підвищення надійності та довговічності виробів : збірка матеріалів XIII міжнар. наук.-техн. конф., Запоріжжя : ЗНТУ, 2014. С. 15 – 16*

8. Гречка О. В., Міщенко В. Г. Підвищення якості поверхневої обробки Fe-Cr-Al сплавів для виготовлення нагрівачів промислових електричних печей

опору. *Титан 2016 : виробництво та використання в авіабудуванні* : тези доповідей IV міжнар. наук.-практ. конф. Запоріжжя: АТ „Мотор Січ”, 2016. С. 90 – 92

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

9. Жаростійкий сплав : пат. 112264 Україна : МПК С22С38. № а 2015 07714 ; заявл. 10.02.2016 ; опубл. 10.08.2016, Бюл. № 15

АНОТАЦІЯ

Гречка О. В. Розробка жаротривкого сплаву з підвищеними фізико-механічними властивостями для електронагрівачів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – матеріалознавство. Дніпровський державний технічний університет Міністерства освіти і науки України, Кам'янське, 2019. Спеціалізована вчена рада К 09.091.02.

Дисертацію присвячено вирішенню актуальної науково-технічної задачі з розробки жаротривкого сплаву з високим електричним опором типу 22Cr-5Al-Ti-Zr, який використовується як матеріал для виготовлення нагрівачів електричних печей з температурою роботи 900...1150°C.

Проведено аналіз літературних даних щодо основних напрямків підвищення технологічних та експлуатаційних властивостей сплавів системи Fe-Cr-Al. Встановлено, що перспективним шляхом поліпшення властивостей даних сплавів є вдосконалення хімічного складу і температурно-деформаційних параметрів виробництва нагрівальних елементів.

Розроблено нову систему багатокомпонентного легування та мікролегування Ti-Zr-Be залізо-хром-алюмінієвого сплаву. Оптимізовано хімічний склад, отримані рівняння регресії залежності властивостей (пластичності та жаротривкості) від хімічного складу Fe-Cr-Al сплаву з титаном і цирконієм.

Вивчено вплив температури рекристалізації на технологічну пластичність сплаву 03X22Ю5ТЦч. Встановлено раціональний режим термічної обробки сталі 03X22Ю5ТЦч, яка полягає в нагріванні до 750...820°C і наступному охолодженні у воду для запобігання різкого зниження пластичності. Показано позитивний вплив обробки пароплазмовим розрядом (ППР) поверхні дроту із сплавів з високим електроопором на шорсткість, кількість і розміри дефектів поверхневого шару. Запропоновано раціональний режим обробки поверхні дроту або стрічки ППР для очищення їх від дефектів поверхні, технологічних мастил та окалини.

Доцільність проведених науково-технічних досліджень підтверджена використанням розробленого жаротривкого сплаву 03X22Ю5ТЦч в якості матеріалу для виготовлення нагрівальних елементів на ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат».

Ключові слова: нагрівальні елементи, жаротривкі сплави, сплави з високим електричним опором, залізо-хром-алюмінієві (Fe-Cr-Al) сплави,

оптимізація, рівняння регресії, оксидна плівка, технологічна пластичність, жаротривкість, живучість.

АННОТАЦИЯ

Гречка А. В. Разработка жаростойкого сплава с повышенными физико-механическими свойствами для электронагревателей. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.01 – материаловедение. Днепропетровский государственный технический университет Министерства образования и науки Украины, Каменское, 2019. Специализированный ученый совет К 09.091.02.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-технической задачи по разработке жаростойкого сплава с высоким электрическим сопротивлением типа 22Cr-5Al-Ti-Zr, который используется в качестве материала для изготовления нагревателей электрических печей с температурой работы 900...1150°C.

Проведен анализ литературных данных по основным направлениям повышения технологических и эксплуатационных свойств сплавов системы Fe-Cr-Al. Установлено, что перспективным путем улучшения свойств данных сплавов является совершенствование химического состава и температурно-деформационных параметров производства нагревательных элементов.

Разработана новая система многокомпонентного легирования и микролегирования Ti-Zr-Be железо-хром-алюминиевого сплава. Оптимизирован химический состав, получены уравнения регрессии зависимости свойств (пластичности и жаростойкости) от химического состава Fe-Cr-Al сплава с титаном и цирконием.

Изучено влияние температуры рекристаллизации на технологическую пластичность сплава 03X22Ю5ТЦч. Установлен рациональный режим термической обработки стали 03X22Ю5ТЦч, которая заключается в нагревании до 750...820°C с последующим охлаждением в воду для предотвращения резкого снижения пластичности. Показано положительное влияние обработки пароплазменным разрядом (ППР) поверхности проволоки из сплавов с высоким электросопротивлением на шероховатость, количество и размеры дефектов поверхностного слоя. Предложен рациональный режим обработки поверхности проволоки или ленты ППР для очистки их от дефектов поверхности, технологических смазок и окалина.

Целесообразность проведенных научно-технических исследований подтверждена использованием разработанного жаростойкого сплава 03X22Ю5ТЦч в качестве материала для изготовления нагревательных элементов на ООО «Запорожский титано-магниевый комбинат».

Ключевые слова: нагревательные элементы, жаростойкие сплавы, сплавы с высоким электрическим сопротивлением, железо-хром-алюминиевые (Fe-Cr-Al) сплавы, оптимизация, уравнение регрессии, оксидная пленка, технологическая пластичность, жаростойкость, живучесть.

ABSTRACT

Grechka A. V. Development of a heat-resistant alloy with improved physico-mechanical properties for electric heaters. – Qualifying scientific work on the rights of manuscript.

The thesis for the degree of the candidate of technical sciences in specialty 05.02.01 – materials science. Dniprovskiy State Technical University of Education and Science Ministry of Ukraine, Kamyanske, 2019. Specialized Academic Council K 09.09.1.02.

The dissertation is devoted to the solution of the actual scientific and practical task of developing a heat-resistant alloy with high electrical resistance of type 22Cr-5Al-Ti-Zr, which is used as a material for the manufacture of heaters of electric furnaces with a operating temperature of 900...1150°C.

The analysis of literary data on the main ways of improving the technological and operational properties of Fe-Cr-Al alloys has been carried out. It has been established that a prospective way to improve the properties of these alloys is to enhance the chemical composition and temperature-strain parameters of the production of heating elements.

A new system of multicomponent alloying and microalloying with titanium, zirconium and beryllium of an iron-chromium-aluminum alloy has been developed. The developed chemical composition made it possible to obtain an iron-chromium-aluminum alloy with increased heat resistance and technological ductility. The chemical composition has been optimized, regression equations are obtained, three-dimensional graphical dependences of the properties (technological ductility and heat resistance) on the chemical composition of the Fe-Cr-Al alloy with titanium and zirconium are constructed.

The effect of the recrystallization temperature on the technological ductility of the 03Cr22Al5TiZr alloy was investigated. A rational mode of heat treatment of steel has been developed. It consists in heating to 750 ... 820°C followed by cooling into water to prevent a sharp decrease in ductility. It was found that the steam-plasma charge treatment has a positive effect on the surface of the wire made from alloys with high electrical resistance. A rational mode of treatment of the surface of the wire or strip with the use of steam-plasma charge for removal of surface defects, technological lubrication and oxide scale is suggested.

The expediency of the conducted scientific and technical researches is confirmed by pilot tests of the developed heat-resistant alloy 03Cr22Al5TiZr. The alloy was used as a heat-resistant material for the manufacture of heating elements of electric resistance furnaces at Limited Liability Company «Zaporozhye Titanium & Magnesium Combine». The economic efficiency from introducing the developed alloy into production is achieved by a higher electrical resistance and lower cost in comparison with nickel-chromium alloy.

Key words: heating elements, heat-resistant alloys, superior resistance heating alloys, iron-chromium-aluminium (Fe-Cr-Al) alloys, optimization, regression equations, oxide film, technological ductility, heat resistance, durability.

ГРЕЧКА ОЛЕКСАНДРА ВЯЧЕСЛАВІВНА

**«РОЗРОБКА ЖАРОТРИВКОГО СПЛАВУ З ПІДВИЩЕНИМИ ФІЗИКО-
МЕХАНІЧНИМИ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ ДЛЯ
ЕЛЕКТРОНАГРІВАЧІВ»**

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Спеціальність 05.02.01 – матеріалознавство

Підписано до друку 20.11.2019. Формат 60×90/16.
Папір друк. Друк – різнограф. Ум. друк. Арк. 0,9.
Тираж – 100. Замовлення №55/19.

Видавець і виготовлювач
Дніпровський державний технічний університет
51918, Кам'янське, вул. Дніпробудівська, 2.

Свідectво про внесення суб'єкта видавничої справи
до державного реєстру видавництв серія ДК №5399 від 26.07.2017 р.