

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО"**

КУЗІН ОЛЕГ АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 621.791: 621.785: 539.4



**КЕРУВАННЯ ВЛАСТИВОСТЯМИ ПОВЕРХОНЬ
КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ І СПЛАВІВ СПРЯМОВАНИМ ВПЛИВОМ
НА СКЛАДОВІ ЇХ СТРУКТУРИ**

Спеціальність 05.03.06 – зварювання та споріднені процеси і технології

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі смарт технологій з'єднань та інженерії поверхні в Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Копилов Вячеслав Іванович
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
професор кафедри смарт технологій з'єднань та інженерії поверхні

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Черв'яков Микола Олегович
Інститут електрозварювання
ім. Є. О. Патона НАН України,
провідний науковий співробітник відділу металургії і технології зварювання високолегованих сталей і сплавів
доктор технічних наук, професор
Биковський Олег Григорович
Національний університет «Запорізька політехніка»,
професор кафедри «Обладнання та технології зварювального виробництва»
доктор технічних наук, професор
Самотугін Сергій Савелійович
Приазовський державний технічний університет,
завідувач кафедри «Наноінженерія в галузевому машинобудуванні»

Захист відбудеться " 11 " травня 2021 р. о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.15 Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37, корп. 23, ауд. 216.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий " 3 " квітня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



В.М. Пащенко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток цифрового машинобудування вимагає розробки і використання міждисциплінарних концепцій і моделей поведінки неоднорідних матеріалів при дії технологічних і експлуатаційних навантажень. У зв'язку з цим, проблема створення внутрішніх та зовнішніх поверхонь поділу із заданими термодинамічними, фізичними і механічними характеристиками займає одне із провідних місць у технологічних процесах обробки матеріалів. Важливе значення у проектуванні технологій формування заданого структурно-енергетичного стану поверхонь поділу має виявлення зв'язку між результатами цифрового представлення структури сплавів і моделями їх поведінки.

Управління структурно-енергетичним станом поверхонь поділу під час технологічних обробок вимагає врахування багаторівневого характеру їх структури, наявності в ній різноякісних елементів, що характеризують атомно-кристалічну і дефектну будову. Значний внесок у розвиток таких підходів зробили вітчизняні і зарубіжні вчені: В.І. Архаров, О.Г. Биковський, В.П. Бондаренко, В.І. Большаков, С.А.Клименко, В.І. Копилов, П.І. Лобода, Б.А. Ляшенко, М.В. Новіков, В.І. Похмурський, С.С. Самотугін, М.О. Черв'яков, К.А. Ющенко, М.А. Штремель, M. Guttman, R. Phillips, L. Priester, V. Randle, M. Shimada, H.G. Suzuki, T. Watanabe.

Отримання виробів із заданим життєвим циклом вимагає встановлення зв'язку між структурою, властивостями, енергетичними параметрами поверхонь поділу конструкційних сплавів та опором утворенню міжзеренних пошкоджень.

Моделі, які на даний час використовують для оцінки впливу поверхонь поділу сплавів на їх властивості, можуть давати результати тільки в окремих випадках. Тому існує гостра необхідність розробки і застосування системних методів, придатних для вирішення таких складних завдань міждисциплінарного характеру як керування структурно-енергетичним станом поверхонь поділу.

У зв'язку з цим набуває важливого значення розробка і використання нових підходів до моделювання і аналізу механічної поведінки граничних зон поділу виробів з врахуванням їх енергії. Розробка таких підходів дозволяє вирішувати актуальну науково-технічну проблему – оптимізацію режимів технологічних обробок виробів із заданим життєвим циклом. Їх розвиток дає можливість проводити наукове обґрунтування технологічних рішень по підвищенню опору до утворення міжзеренних пошкоджень і тріщин в деталях, що працюють в умовах інтенсивних навантажень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Результати роботи є узагальненням теоретичних обґрунтувань і досліджень з проблеми керування властивостями поверхонь виробів із застосуванням моделей та методів спрямованого впливу на складові їх структури. Робота виконувалась на кафедрі смарт технологій з'єднань та інженерії поверхні Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» згідно наступних держбюджетних тем: «Оцінка впливу складу металокерамічних і

металовуглецевих високодисперсних структур, отриманих в умовах плазмового напилення багатокомпонентних покриттів на фізичні і міцнісні характеристики» (номер держреєстрації 0116U006135), «Методика оцінки безпеки руху за параметрами контактної довговічності вузлів тертя рухомого складу залізниць у завданнях судової експертизи» (номер держреєстрації 0113U000921), «Методика досліджень причин руйнування деталей і вузлів рухомого складу за фрагментарно відображеною інформацією про роботу конструкції» (номер держреєстрації 0114U000614), «Розробка методичних рекомендацій по встановленню причин відмови функціонування елементів транспортної інфраструктури на основі інформації, що містяться у матеріалах, які подані на дослідження» (номер держреєстрації 0117U000688).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є створення наукових основ, моделей та методів управління структурно-енергетичним станом поверхонь поділу структурних складових при отриманні виробів з підвищеними параметрами надійності з врахуванням умов їх експлуатації.

Для досягнення поставленої мети сформульовано та вирішено наступні основні завдання:

1. Провести аналіз проблемних питань, які присвячені підвищенню властивостей конструкційних сталей і сплавів шляхом управління структурно-енергетичним станом поверхонь поділу.

2. Розробити і обґрунтувати принципи створення багаторівневих моделей, що описують вплив параметрів структури різного рівня ієрархії на технологічні і експлуатаційні властивості сплавів.

3. Побудувати інваріантну модель полікристалічних систем зі змінними параметрами зеренної структури і структурно-енергетичного стану поверхонь поділу різного рівня ієрархії.

4. На основі побудованої моделі дослідити основні тенденції і відповідні їм закономірності впливу структурно-енергетичного стану поверхонь поділу на властивості конструкційних сталей; визначити кількісні параметри мікроструктури, при яких зростає опір крихкому руйнуванню сплавів; провести наукове обґрунтування технологічних рішень по формуванню мікроструктури, що забезпечує виведення полікристалічних систем із області нестабільності експлуатаційних властивостей.

5. З використанням результатів теоретико-експериментальних досліджень зв'язку кількісних параметрів мікроструктури і структурно-енергетичного стану поверхонь поділу розробити принципи оптимізації технологій отримання і обробки конструкційних сталей і сплавів, а також надати практичні рекомендації зі встановлення раціональних режимів термічної обробки, зварювання, поверхневого зміцнення, що забезпечують підвищення експлуатаційних характеристик полікристалічних систем відповідних виробів.

Об'єкт дослідження – внутрішні та зовнішні поверхні поділу конструкційних сталей і сплавів та виробів.

Предмет дослідження – опір утворенню міжзеренних пошкоджень і інтеркристалітному руйнуванню конструкційних сталей і сплавів під дією силового навантаження в залежності від структурно-енергетичного стану внутрішніх поверхонь поділу; технологічні режими керування структурою для усунення інтеркристалітного сколу; підвищення експлуатаційної надійності виробів.

Методи дослідження. В роботі використана загальна системна методологія, згідно якої розглядалась складна ієрархічна будова сплавів, що досліджувались. Аналіз структури проводився на основі концепції інваріантного моделювання. Застосовували енергетичний та структурно-феноменологічний підходи механіки, суть яких полягає у розгляді структури на різних рівнях ієрархії, встановленні її керівних параметрів та побудові відповідної узагальненої моделі.

Вплив структурно-енергетичних характеристик внутрішніх поверхонь поділу на властивості сплавів аналізували методами фізичного матеріалознавства. Використовували металографічні дослідження, сканувальну та електронну мікроскопію, рентгеноструктурний, мікрорентгеноспектральний та фрактографічний аналізи, оже-електронну мікроскопію. Визначали також мікротвердість, ЛМ-твердість, проводили механічні випробування на розтяг і ударний згин при температурах від -196°C до $+100^{\circ}\text{C}$. Виконана оцінка структурно-енергетичного стану поверхонь поділу зерен після іонно-плазмового травлення зразків, здійснено системне комп'ютерне моделювання властивостей полікристалічних сплавів. Проведені дослідження міцнісних параметрів їх поверхонь за допомогою відкритого пакету скінчено-елементного аналізу FEniCS на мові Python.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

1. Вперше запропоновані наукові основи і експериментально обґрунтований концептуальний підхід вибору раціональних технологій обробки деталей шляхом використання сукупності системних, енергетичних та градієнтних моделей в якості цифрових двійників структури поверхонь поділу для отримання виробів із заданим життєвим циклом.

2. На основі розвитку наукових принципів системного аналізу проведено фізичне обґрунтування оптимальних режимів методів інженерії поверхні для формування структури, яка за своєю організацією відповідає умовами експлуатації виробів. Розроблена методологія побудови ієрархічних моделей структури полікристалічних металічних матеріалів, створені алгоритми для визначення взаємозв'язків між властивостями і структурно-енергетичним станом локальних об'ємів сплавів, який формується при технологічних обробках.

3. З використанням енергетичного підходу опису континуальних нелокальних середовищ побудовані математичні співвідношення моделі полікристалічних систем. Показано, що на схильність до утворення міжзеренних

пошкоджень і руйнування сплавів мають вплив не тільки абсолютні значення параметрів властивостей мікрооб'ємів, але і їх градієнт.

4. На основі розроблених градієнтних моделей поверхонь поділу було встановлено, що в залежності від кутів між границями у стиках зерен, змінюється структурно-енергетичний стан даної області та його здатність до утворення мікрodefektів. При величинах кутів в межах $130^{\circ} \dots 140^{\circ}$ маємо незначну здатність до утворення мікрodefektів, а при $140^{\circ} \dots 180^{\circ}$ – формуються зони з високою спроможністю до утворення міжзеренних пошкоджень і руйнування при дії навантаження.

5. Використання побудованих моделей дозволило запропонувати розрахунково-експериментальний метод оцінювання впливу розмірних характеристик кристалітів, які утворюють поверхні поділу, на рівень зернограничної енергії, кількісних параметрів полікристалів на утворення міжзеренних пошкоджень і інтеркристалітне руйнування виробів.

6. Встановлено вплив кількісних характеристик мікроструктури на міжзеренне руйнування сталей. Наявність в структурі до 5% зерен, які відрізняються на три номери еталонної шкали, посилює схильність сталей до утворення міжзеренних пошкоджень та відпускнуї крихкості. Найменша частка інтеркристалітного сколу виявлена в зразках при відсутності різнозернистості. При появі в структурі понад 10% зерен, що відрізняються на 1..2 номери, в зломі спостерігається 50..70% міжзеренного руйнування. Показано, що сталь 40X є більш чутливою до утворення потрійних стиків з високим градієнтом енергії при термічній обробці, ніж сталі 40XНМ і 40XC.

7. З використанням розроблених в роботі модельних уявлень запропонований кількісний критерій оцінки схильності сталей до міжзеренного руйнування при дії зовнішніх навантажень. Встановлено, що при значенні континуального критерія зміни мікротвердості до 3000 частка міжзеренного сколу є невеликою, від 3000 до 6000 – стабільною (10..12 %), а понад 6000 – катастрофічною. Визначено, що зміна властивостей покращувальних сталей при розвитку відпускнуї крихкості залежить від енергетичних параметрів внутрішніх поверхонь поділу. Збільшення інтенсивності зношування сталей 40XНМ, 40X і 40XC відповідно на 7%, 14% і 38% після окрихчення пропорційне частці потрійних стиків зерен з високим градієнтом енергії, що знаходиться в кореляції з кількістю міжзеренного руйнування в зразках, які випробовані на ударний згин.

8. Після плазмового зміцнення в поверхневому шарі коліс локомотивів формується градієнтна структура, властивості якої суттєво відрізняються в різних зонах. Локальні зони зміцнення, що містять поверхні поділу з близькими значеннями зернограничної енергії, характеризуються більш високим опором до утворення розсіяних пошкоджень, мікроскопічних тріщин і зношування. Зародження тріщин після плазмового зміцнення відбувається в зонах, де присутні поверхні поділу, в яких зерногранична енергія наближається до поверхневої енергії утворення тріщини.

9. Дослідження нероз'ємних з'єднань рейок Р65 після термітного зварювання показали розвиток значної структурної неоднорідності в зоні литого металу. Утворення дефектів в підшвах нероз'ємного з'єднання рейок в значній мірі пов'язано з впливом енергетичних характеристик поверхонь поділу і стиків зерен на формування розсіяних і локалізованих пошкоджень при зварюванні. Наявність поверхонь поділу в потрійних стиках зерен з великою різницею енергій сприяє переходу від розсіяних пошкоджень до локалізованих поперечних тріщин і їх поширенню в пошкодженому матеріалі нижньої частини нероз'ємного з'єднання рейок при термітному зварюванні.

10. Запропоновані нові методологічні підходи зернограничного конструювання структури дозволили визначити шляхи управління структурно-енергетичним станом поверхонь поділу при використанні технологій зварювання, термічної обробки, легування, мікролегування та поверхневого зміцнення, що забезпечують підвищення параметрів довговічності, ресурсу і безвідмовності виробів при зменшенні вартості їх життєвого циклу.

Практичне значення одержаних результатів. Практичне значення полягає у визначенні впливу кількісних характеристик мікроструктури і енергетичного стану поверхонь поділу на утворення міжзеренних пошкоджень і інтеркристалітне руйнування сплавів при виборі раціональних технологій зварювання, інженерії поверхні, що використовуються в машинобудуванні.

Запропоновано комплексне мікролегування бором і РЗМ, яке за рахунок зміни структурно-енергетичного стану поверхонь поділу структурних складових, забезпечує підвищення прогартовуваності, опору крихкому руйнуванню, зменшує схильність до утворення міжзеренних пошкоджень і відпускнуї крихкості покращувальних сталей.

Представлені рекомендації по підвищенню фізико-механічних властивостей сталей регулюванням параметрів поверхневих зон, які реалізовані в енерго- і ресурсозберігаючих технологіях підвищення зносотривкості і довговічності деталей машин. Розроблено нові машинобудівні сталі (АС 985128, 1073323, 1560609, 1693087, патенти Росії 2016126, 2016124, патенти України 3085, 3086), а також технологічні процеси їх термічної обробки.

Вибір раціональних режимів технологічних обробок дозволив зменшити на 40% дефектність нероз'ємних з'єднань підшв рейок при термітному зварюванні, збільшити на 30...40% зносотривкість гребенів бандажів коліс локомотивів після плазмового зміцнення. Розроблені режими технологічної обробки для отримання виробів з підвищеною експлуатаційною надійністю, запропоновані науково-обґрунтовані рішення при аналізі причин виходу з ладу високонавантажених конструкцій.

Отриманий в роботі критерій міжзеренної міцності використовується при аналізі причин руйнування залізничних конструкцій у Львівському науково-дослідному інституті судових експертиз. З його застосуванням проводиться оптимізація технологій виготовлення деталей візків трамвайних вагонів (ТзОВ «Інтерпет») і комбінованих агрегатів обробки ґрунту (ТзДВ «Львівський завод фрезерних

верстатів»), які працюють в умовах інтенсивних динамічних і контактних навантажень.

Результати роботи впроваджені у навчальний процес.

Особистий внесок здобувача. У дисертаційній роботі наведені результати тривалих досліджень, виконаних за безпосередньої участі і під науковим керівництвом автора. Основні теоретичні та практичні результати (визначення мети роботи, постановка задачі дослідження, інваріантна модель структури сплавів, функціонально-градієнтна модель великокутової границі зерна, розрахункові схеми, алгоритми, одержані експериментальні результати, їх аналіз та узагальнення, знайдені в результаті розрахунків оптимальні параметри структури полікристалічних систем, що забезпечують високий опір інтеркристалітному руйнуванню сплавів, технологічні рекомендації по підвищенню експлуатаційної надійності і працездатності деталей), які становлять основний зміст роботи, автором отримано особисто.

У колективних публікаціях [5-7, 11, 13-22, 49-51, 54-66] автору належать результати проведених експериментальних досліджень, їх узагальнення, систематизація і опис; в роботах [23-39, 41-47] запропоновані основні технічні рішення, постановка задач досліджень, формулювання наукових висновків; в роботах [9, 10] результати отримані на основі використання багаторівневих моделей при аналізі життєвого циклу деталей; в роботі [8] запропоновано підхід до технологічного керування експлуатаційними властивостями трибосистем з врахуванням явищ самоорганізації, що супроводжують їх роботу; у роботах [12, 40] використання нелокальних моделей пошкоджуваних середовищ при аналізі впливу структурних характеристик на роботу вузлів тертя.

Апробація результатів дисертації.

Основні наукові положення і прикладні результати, викладені в дисертації, доповідались і обговорювались на наступних міжнародних конференціях: «Нові конструкційні сталі і сплави і методи їх обробки для підвищення надійності і довговічності виробів» (Запоріжжя, 1995) [48], «Конструкційні та функціональні матеріали» (Львів, 1997) [49], «Іван Фещенко-Чопівський вчений і патріот» (Львів, 2009) [52], Міжнародних науково-практичних конференціях «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, 2008-2019) [50, 51, 53-57], «12 Міжнародний симпозиум українських вчених-механіків у Львові» (Львів, 2015) [58], «Прогресивні технології в машинобудуванні» (Львів, 2016, 2017) [59, 60], «13-ий Міжнародний симпозиум українських інженерів-механіків у Львові» (Львів, 2017) [61], VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивні технології у машинобудуванні» (Івано-Франківськ, 2019) [62], Scientific and Practical Conference «Energy optimal technologies, logistic and safety on transport» (Львів, 2019) [25], X Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (Чернігів, 2020) [63], VI Міжнародна науково-технічна конференція «Актуальні проблеми інженерної

механіки та технології машинобудування» (Миколаїв, 2020) [64], VI Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні технології промислового комплексу» (Херсон, 2020) [65], Міжнародна наукова конференція «Матеріали для роботи в екстремальних умовах - 10» (Київ, 2020) [66].

Публікації. За темою дисертації опубліковано 68 праць, у тому числі 41 стаття у провідних фахових виданнях, 12 статей опубліковано у виданнях, які внесені до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science, одержано 6 авторських свідоцтв і патентів; 19 публікацій в матеріалах міжнародних та національних конференцій, два підручники, які рекомендовані Міністерством освіти і науки України.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, семи розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел, додатків. Загальний обсяг роботи 490 сторінок; вона містить 185 рисунків, 55 таблиць, а також список використаної літератури з 418 позицій.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** стисло розкрита суть і стан наукової проблеми, обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету і задачі досліджень, викладено наукову новизну, практичну цінність одержаних результатів, показано зв'язок дисертації з науковими програмами. Висвітлено особистий внесок здобувача в роботу, наведено відомості про апробацію її результатів, вказано кількість публікацій за темою, представлено структуру дисертації.

У **першому розділі** подано критичний аналіз проблемних питань теорії створення сплавів і виробів із заданими фізико-механічними властивостями та практики керування ними шляхом зміни структурно-енергетичного стану поверхонь поділу. Дані підходи детально розглянуті в роботах С.А. Фірстова, В.П. Бондаренко, В.І. Большакова, Г.Д. Сухомліна, А.О. Лебедева, В.Є. Паніна, Г.М. Полетаєва, В.Н. Чувільдієва, V. Randle, M. Shimada, T. Watanabe.

Представлені сучасні уявлення про атомно-кристалічну будову великокутових, спеціальних і малокутових поверхонь поділу зерен, а також їх потрійних стиків. Особлива увага приділена уявленням про міжзеренне окрихчення сталей при технологічних обробках.

Вплив поверхонь поділу різного типу на утворення міжзеренних пошкоджень і інтеркристалітне руйнування полікристалічних сплавів при дії силових навантажень до кінця не вивчено. Встановлена низька енергія поширення інтеркристалітних тріщин в полікристалах і значна роль структури поверхонь поділу зерен в цих процесах. Керована зміна структурно-енергетичного стану поверхонь поділу зерен структурних складових є важливим резервом підвищення робочих властивостей металовиробів. В зв'язку з чим дані питання відокремились в науковий напрямок технологічних процесів обробки матеріалів – «інженерія границь зерен і зернограничне конструювання структури».

Слід відмітити, що залишається відкритим питання про роль структури поверхонь поділу з високим рівнем енергії та їх приграничних зон в процесах міжзеренного руйнування. Тому є актуальною розробка і застосування моделей, придатних для таких складних завдань міждисциплінарного характеру, як керування структурно-енергетичним станом поверхонь поділу.

Дані про зміну властивостей поверхонь поділу сплавів під час технологічних обробок в значній мірі відсутні і їх отримання має важливе значення для розвитку цифрового машинобудування. Вирішення цих питань дозволяє проводити одночасне проектування матеріалів, технологічних процесів їх обробки при створенні виробів із підвищеною експлуатаційною надійністю.

Розвиток технологій формування поверхонь із заданим структурно-енергетичним станом вимагає розробки і використання нових методологічних підходів. Такі методи, що базуються на принципах системного аналізу, необхідні для розробки моделей структури, які дозволяють враховувати її гетерогенність, дискретність, будову на різних за масштабом рівнях.

Експериментальними дослідженнями показано значний вплив потрійних стиків і границь зерен, що виходять на поверхню виробів, на їх поведінку. Існуючі уявлення про визначальну роль площі поверхонь поділу в конкретному сплаві слід доповнити сучасним даними про будову самих границь і їх стиків, що є активними елементами структури полікристалів.

Враховуючи сучасний рівень знань про будову поверхонь поділу, стає очевидною необхідність визначати кількісні характеристики та умови їх отримання, щоб забезпечити найбільш високий комплекс властивостей сплавів. В зв'язку з цим проблема розвитку наукових основ керування структурно-енергетичним станом поверхонь поділу вимагає розробки нових підходів і засобів для оцінки їх впливу на різних масштабних рівнях.

На основі проведеного аналізу сформульовано мету та завдання досліджень.

У другому розділі подано обґрунтування вибору матеріалів, методики досліджень дисертаційної роботи. Об'єкти досліджень виготовляли за загальною технологічною схемою.

Представлена коротка характеристика досліджених матеріалів, основні режими їх термічної обробки. Виділено групи конструкційних сталей і виробів, для яких важливе значення має встановлення зв'язку між структурно-енергетичним станом внутрішніх граничних поверхонь і опором до утворення міжзеренних пошкоджень. Вивчали сталі 12ХН3А, 20ХН3А; 40, 40Р, 40Х, 40ХГ, 40ХГР, 40ХГМР, 40ХНМ, 40ХС і 60С2, 60С2ХА, 70, нероз'ємні з'єднання залізничних рейок після термітного зварювання, поверхні гребенів бандажів коліс локомотивів, що пройшли плазмове зміцнення. Вивчення вибраних об'єктів дозволило виявити загальні закономірності впливу характеристик поверхонь поділу на властивості сплавів.

Із сталевого прокату виготовляли заготовки, які відпалювали при температурах 840...870 °С і піддавали гартуванню після нагріву в соляній ванні від температур

870...1070 °С. Далі проводили відпуск при температурі 600 °С. Частину зразків відпускали повторно при температурі максимального окрихчення 525 °С з витримкою 2 год і наступним повільним охолодженням.

Розроблені принципи вибору раціональних технологій отримання виробів шляхом використання сукупності інваріантних, енергетичних та градієнтних моделей структури полікристалів. Побудову інваріантних моделей проводили на основі гістограм розподілу зерен за розмірами, кутів між поверхнями поділу, що утворюють потрійні стики, площі границь навколо зерен певних розмірів. Інформацію про структуру сплавів розміщували у матриці. На головній діагоналі матриці ставили характеристику зерен у групі певного розміру. Зліва і справа від головної діагоналі представляли дані про взаємодію окремих груп зерен. Такою інформацією є площа границь між зернами різного розміру, віддаль між нерівноважними стиками, яка визначається при дослідженні структур.

Дискретне описання і матрична форма представлення інваріантної моделі структури сталей після покращення включає в себе рівні ієрархії і кількість елементів, що відповідають кількості груп зерен різних розмірів (рис.1).

A_1	$Y_{1.2}$
$Y_{2.1}$	A_2

Рис. 1. Матрична форма представлення інваріантної моделі структури сталі після покращення: A_1 , A_2 – характеристики зерен в першій і другій групах розподілу за розмірами; $Y_{1.2}$ – описує взаємодію між зернами першої і другої розмірних груп і включає площу і енергетичні характеристики границь між ними; $Y_{2.1}$ – описує взаємодію між зернами першої і другої розмірних груп і базується на характеристиках потрійних стиків зерен цих груп.

Для аналізу впливу домішок, легуючих і мікролегуючих елементів на характеристики поверхонь поділу в роботі запропонована модель градієнтної будови великокутових границь зерен. При переході від об'ємної частини зерна до великокутової границі формується перша зона з підвищеною густиною лінійних дефектів. Наступна зона характеризується пористою структурою, яка пов'язана з обривом дислокацій в першій зоні. В результаті взаємодії насиченої вакансіями кристалічної ґратки з фазами формується третя зона нестехіометричного перехідного шару, в якому утворюються з'єднання, що мають змінний хімічний склад.

Важливим фактором, який визначає властивості поверхонь поділу зерен, є їх пустотно-шорстка пориста структура. При критичному значенні вільного об'єму пустот границя перетворюється в дві невзаємодіючі поверхні – тріщину. У випадку крихкого міжзеренного руйнування і відсутності пластичної деформації поблизу границь енергія руйнування (A_H) визначається співвідношенням:

$$A_H \geq 2\lambda_L - \lambda_B, \quad (1)$$

де λ_L – поверхнева енергія; λ_B – вільна енергія границі зерна. В зв'язку із тим, що енергія поверхонь поділу λ_B залежить від зернограничної структури, енергія міжзеренного руйнування A_H також залежить від структури. Присутність в структурі зерен, які різняться кількістю сторін і радіусом кривизни, буде підвищувати концентрацію вакансій в зернах з вигнутими границями і відповідно впливати на розподіл домішок в приграничних зонах.

У третьому розділі запропоновані підходи до моделювання структури внутрішніх поверхонь поділу при виборі режимів термічної обробки покращувальних сталей з підвищеною довговічністю.

На основі континуального опису полікристалічних систем з врахуванням структури запропоновано варіант побудови моделі їх поведінки в умовах дії зовнішніх навантажень. Для дослідження міцнісних параметрів провели побудову модельних наближень, що дозволяють описувати поведінку полікристалічних матеріалів на мезорівні. При аналізі ролі структури поверхонь поділу зерен з високим рівнем енергії в процесах міжзеренного руйнування використали модель Кокса-Хірта, згідно якої зерно поділяється на приграничну зону і внутрішню частину. Чим вищою є енергія поверхні поділу зерна, тим більше вона містить дефектів.

Умова локального руйнування записується у вигляді (1). Деградацію матеріалів на рівні структури враховували за допомогою змінної скалярної природи – пошкоджуваності. Будували модель, розглядаючи тільки силові навантаження. Введемо функцію вільної енергії системи, яка залежить від історії деформації і її поточного значення:

$$f(t) = \int_0^t K(t, \tau) g(\hat{\epsilon}) d\tau, \quad (2)$$

де $K(t, \tau)$ - ядро спадковості; $g(\hat{\epsilon})$ - функція, що енергетично враховує зміну внутрішніх параметрів; $\hat{\epsilon}$ - тензор деформацій.

Приймемо апріорно властивість адитивності вільної енергії і тому представимо вільну енергію в довільний момент часу $t = t_*$ у виді:

$$f(t = t_*) = f^H + f^H, \quad (3)$$

де f^H - вільна енергія, що задається поточними значеннями тензора деформацій; f^H - вільна енергія, що задається історією зміни навантажень на тіло.

Значення f^H можна на модельному рівні трактувати також і як величину λ_B у виразі (1). Приймемо, що f^H залежить від внутрішньої будови - структури матеріалу і зв'яжемо f^H зі скалярною змінною пошкодженістю ω за допомогою наступного виразу:

$$f^H = f^H \left(\omega, |\bar{\nabla} \omega|, \frac{1}{V_0} \int_V \omega dV \right), \quad (4)$$

де ω - рівень пошкодженості; $\bar{\nabla}$ - оператор Гамільтона; V_0 - характерний розмір досліджуваної області; $|\dots|$ - символ модуля вектора.

Вираз (4) враховує той факт, що вільна енергія тіла в точці залежить від локальних структурних змін, так і змін в деякій області. Тобто на механічну поведінку тіла має вплив не тільки абсолютне значення величин, але і їх градієнт, а також середній розподіл величини в деякому околі.

Особливо це проявляється в областях, які характеризуються високим рівнем енергії, а також розподілом деградаційних структурних характеристик в локальних об'ємах.

Запишемо співвідношення (2) із врахуванням представлення (3):

$$\sigma = \frac{\partial f}{\partial \hat{e}} = \frac{\partial f^I}{\partial \hat{e}} + \frac{\partial f^H}{\partial \hat{e}}. \quad (5)$$

Для ізотропного пружного тіла отримаємо:

$$\frac{\partial f^0}{\partial \hat{e}} = Ke\hat{I} + 2G(\hat{e} - \frac{1}{3}e\hat{I}), \quad (6)$$

де K – модуль об'ємного стиску; G – модуль зсуву; $e = \hat{e} \cdot \hat{I} = \vec{\nabla} \cdot \vec{u}$ – перший інваріант тензора напружень; \hat{I} – одиничний тензор.

Для перетворення другого виразу (5) набір змінних, що описують нелокальну пошкодженість матеріалу, подамо у вигляді:

$$\vec{\omega}^* = \left(\omega, |\vec{\nabla} \omega|, \frac{1}{V_0} \int \omega dV \right), \quad (7)$$

де $\vec{\omega}^*$ - вектор узагальненої пошкодженості.

Для спрощення запису зробимо наступне позначення:

$$a_1 = \omega, \quad a_2 = |\vec{\nabla} \omega|, \quad a_3 = \frac{1}{V_0} \int \omega dV, \quad (8)$$

в результаті вираз (7) матиме наступний вигляд:

$$\vec{\omega}^* = (a_1, a_2, a_3). \quad (9)$$

Другий доданок співвідношення (5) подано у вигляді:

$$\frac{\partial f^H}{\partial |\vec{\omega}^*|} \cdot \frac{\partial |\vec{\omega}^*|}{\partial \hat{e}} = \frac{|\vec{\omega}^*|}{1 - |\vec{\omega}^*|} Ke\hat{I} + \frac{|\vec{\omega}^*|}{1 - |\vec{\omega}^*|} 2G(\hat{e} - \frac{1}{3}e\hat{I}). \quad (10)$$

У виразі (10), з метою збереження інваріантності математичних перетворень, був зроблений перехід від вектора «узагальненої» пошкодженості до його модуля.

Вибір множника $\frac{|\vec{\omega}^*|}{1 - |\vec{\omega}^*|}$ пов'язаний із необхідністю на функціональному рівні враховувати нелінійність динаміки пошкодженості конструкцій.

З врахуванням виразу (9) співвідношення (5) буде мати вигляд:

$$\hat{\sigma} = \frac{K}{1 - |\vec{\omega}^*|} e\hat{I} + \frac{2G}{1 - |\vec{\omega}^*|} (\hat{e} - \frac{1}{3}e\hat{I}). \quad (11)$$

З врахуванням (7) і (8) вираз (11) матиме вигляд:

$$\hat{\sigma} = \left(\frac{1}{1 - \left(\sum_{i=1}^3 \alpha_i a_i \right)^{1/2}} \right) \left(Ke\hat{I} + 2G(\hat{e} - \frac{1}{3}e\hat{I}) \right). \quad (12)$$

де в математичному поданні $\left(\sum_{i=1}^3 \alpha_i a_i \right)^{1/2}$ показане узагальнене трактування модуля вектора у функціональному просторі за рахунок введення додаткових числових констант α_i , $i=1,2,3$.

Для отримання розрахункових залежностей згідно співвідношень (5) – (12) використаємо рівняння рівноваги:

$$\vec{\nabla} \cdot \hat{\sigma} = 0, \quad (13)$$

і отримаємо

$$\vec{\nabla} \cdot \left(\frac{K(x)}{1 - \sqrt{\alpha_1 (\omega(x))^2 + \alpha_2 (|\vec{\nabla} \omega(x)|)^2 + \alpha_3 \left(\frac{1}{V_0} \int_V \omega dV \right)^2}} (\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) \hat{I} + \frac{2G(x)}{1 - \sqrt{\alpha_1 (\omega(x))^2 + \alpha_2 (|\vec{\nabla} \omega(x)|)^2 + \alpha_3 \left(\frac{1}{V_0} \int_V \omega dV \right)^2}} \left(\vec{\nabla} \otimes \vec{u} - \frac{1}{3} (\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) \hat{I} \right) \right) = 0, \quad (14)$$

де \vec{u} - вектор переміщень; \otimes - символ тензорного добутку.

Вищенаведене рівняння є основою для розрахунків і встановлення напружено-деформованого стану матеріалу на мезорівні з врахуванням нелокальності пошкоджень в зернограничних областях.

Потрійні зеренні стики є одним із видів лінійних дефектів, вздовж яких мають контакт три зернограничні поверхні, що характеризуються підвищеними енергетичними параметрами.

Енергії границь, що утворюють потрійний стик і кути між ними, визначають співвідношеннями Херінга-Янга:

$$\frac{\sigma_1}{\sin \lambda_1} = \frac{\sigma_2}{\sin \lambda_2} = \frac{\sigma_3}{\sin \lambda_3}, \quad (15)$$

де σ_1 , σ_2 , σ_3 - енергії границь, що утворюються потрійний стик; λ_1 , λ_2 , λ_3 - кути напроти відповідних границь.

Як видно із співвідношення (15), енергетично рівноважним та найбільш міцним є стик, в якому $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 120^\circ$. У випадку відмінності кутів λ_i від 120° , можливо енергетична нерівність границь σ_i , що призводить до появи градієнту властивостей в зоні стику, який часто є джерелом руйнування.

Оцінку градієнта провели на основі співвідношення:

$$\Delta = |\sigma_1 - \sigma_2| = \left| \sigma_1 - \sigma_1 \cdot \frac{\sin \lambda_2}{\sin \lambda_1} \right|, \quad (16)$$

де $|\dots|$ - модуль числа; Δ - приріст енергії границь зерен в області потрійного стику.

Прийемо, що керівним кутом є λ_1 , а на λ_2 і λ_3 накладемо умову:

$$\lambda_2 = \lambda_3 = \frac{1}{2}(360 - \lambda_1). \quad (17)$$

В цьому випадку вираз (16) матиме вигляд:

$$\Delta = |\sigma_1 - \sigma_2| = \sigma_1 \left| 1 - \frac{\sin\left(\frac{1}{2}(360 - \lambda_1)\right)}{\sin \lambda_1} \right| = \sigma_1 \left| 1 - \frac{\sin\left(\frac{\lambda_1}{2}\right)}{\sin \lambda_1} \right|. \quad (18)$$

В безрозмірній формі (18) перетворюється у наступне рівняння:

$$\Delta = \left| 1 - \frac{\sin\left(\frac{\lambda_1}{2}\right)}{\sin \lambda_1} \right|. \quad (19)$$

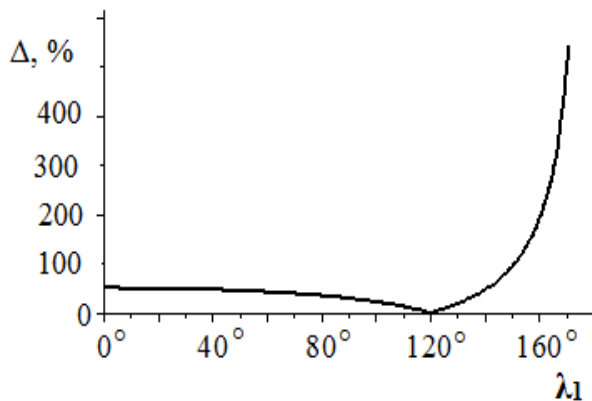


Рис. 2. Залежність приросту енергії Δ границь зерен в області потрійного стику в безрозмірній формі від кута λ_1 .

Графічне представлення (рис. 2) отриманої залежності (19) показує, що при зміні кута λ_1 виділяються три зони приросту енергії Δ в області потрійного стику.

Знаходження λ_1 в межах $(140^\circ; 180^\circ)$ вказує на відсутність

термодинамічної рівноваги в стику, суттєву різницю енергії границь, що його формують, і здатність до утворення мікродофектів в умовах навантаження.

Показано використання розроблених моделей для передбачувальної діагностики поведінки сталей 40X, 40XНМ, 40ХС в умовах контактних навантажень. Зміна стану поверхонь поділу досягала термічною обробкою заготовок – гартуванням від температур $860^\circ \dots 1050^\circ \text{C}$ і умовами відпуску.

Дослідженнями встановлено, що в сталі 40X після нагріву до 860°C , витримки 30 хв виявляються зерна розміром до 21,5 мкм. Підвищення температури до 950°C приводить до появи груп зерен розміром від 20 мкм до 210 мкм. Після витримки при 1050°C формується однорідна зеренна структура (рис. 3, а, б). Результати визначення кутів в потрійних стиках зерен сталі 40X після витримки під гартування 30 хв і 80 хв представлені в табл. 1.

Потрійні стики, які утворені границями, що мають найбільшу різницю значень зернограничної енергії, виявлено після нагріву до 950°C .

Їх кількість при витримці під гартування 30 хв складає 3.3%, а 80 хв – 16.67%.

Дослідження зносотривкості сталі (рис. 3, в) показали, що із підвищенням температури до 950°С інтенсивність зношування зростає на 16%, а після гартування від 1050°С знижується на 20% у порівнянні зі зразками, які загартовані від 860°С при витримці 30 хв. Збільшення часу витримки під гартування до 80 хв сприяє росту інтенсивності зношування сталі на 46% після гартування від 950°С. Підвищення зносотривкості сталі після гартування від 1050°С в значній мірі пов'язано зі зменшенням кількості локальних об'ємів структури з високим градієнтом зернограничної енергії.

Таблиця 1

Частка кутів між границями в потрійних стиках зерен сталі 40Х після гартування і відпуску 600°С

Витримка під гартування 30 хв							
Витримка під гартування 80 хв							
Температура гартування	Частка в загальній кількості заміряних кутів, %						
	40°	61°	81°	101°	121°	141°	161°

	60°	80°	100°	120°	140°	160°	180°
860°С	0,00	3,33	16,67	30,00	36,67	13,33	0,00
	0,00	0,00	13,33	30,00	53,33	3,33	0,00
900°С	0,00	3,33	10,00	46,67	26,67	13,33	0,00
	0,00	6,67	6,67	36,67	40,00	10,00	0,00
950°С	3,33	3,33	10,00	30,00	33,33	16,67	3,33
	10,00	3,33	10,00	20,00	20,00	16,67	16,67
1050°С	0,00	3,33	6,67	40,00	43,33	6,67	0,00
	0,00	6,67	16,67	20,00	40,00	16,67	0,00

При дії контактних навантажень міжзеренні пошкодження переважно виникають в локальних зонах, енергія яких наближена до поверхневої. Такими зонами є границі, які розміщені між потрійними стиками з підвищеним градієнтом енергії. Тому площу таких границь вводили в наповнення ієрархічних моделей, які описують вплив полікристалічної структури на контактну довговічність сталі (рис. 1).

Результати визначення матричного параметра структури покращеної сталі 40Х, що загартована від різних температур, показали суттєвий вплив розміру зерен і енергетичного стану їх поверхонь поділу на зносотривкість сталі (рис. 4, а).

Збільшення інтенсивності зношування відбувається за наявності стиків з високим градієнтом зернограничної енергії, кути між границями в яких знаходяться в діапазоні від 40°...60° до 161°...180° (табл. 1).

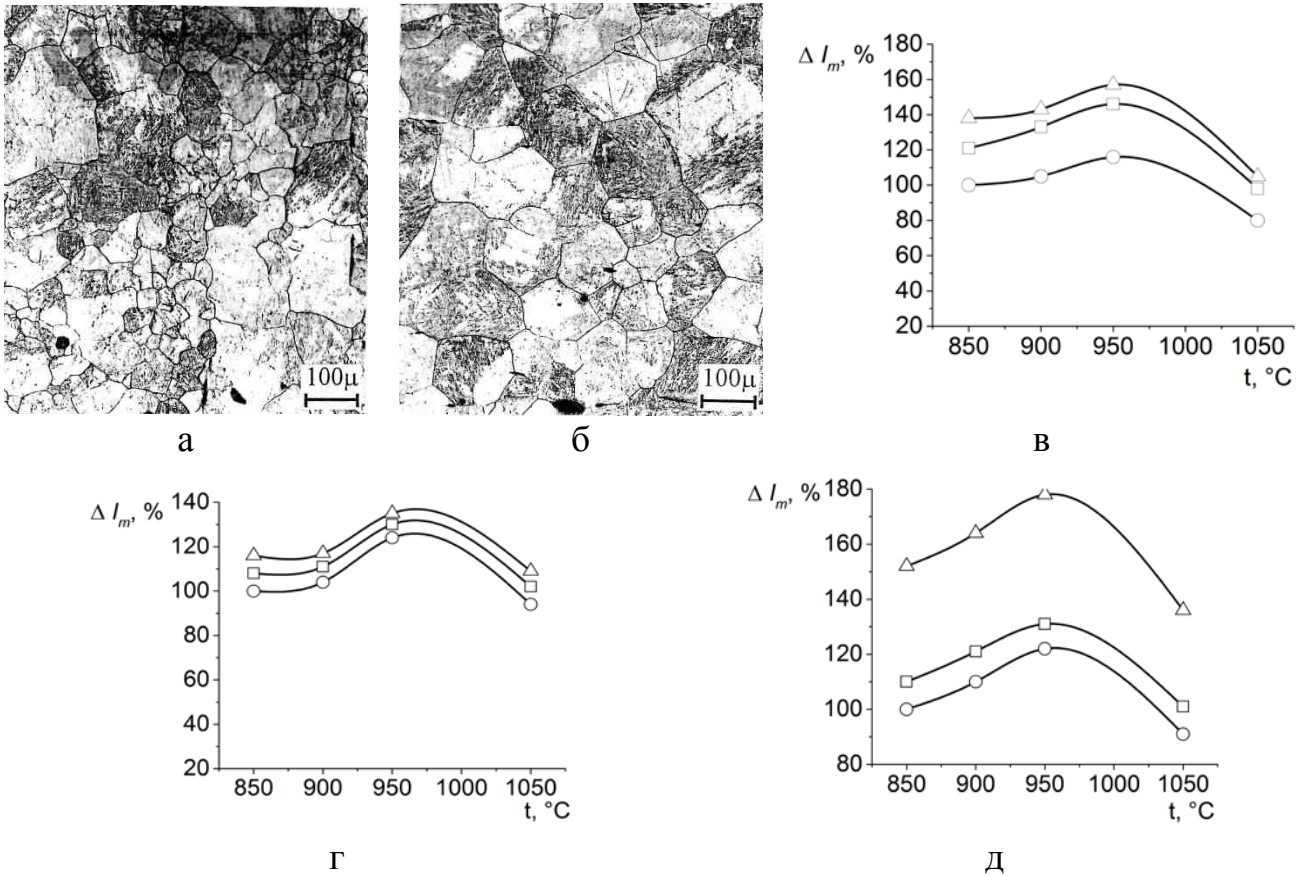


Рис. 3. Структури сталі 40X після гартування від 950 °С (а) і 1050°С (б) та зміна інтенсивності зношування покращених сталей 40X(в), 40XHM(г), 40XC (д) в залежності від температури і часу витримки під гартування: -о- – час витримки під гартування 30 хв; -□- – час витримки під гартування 80 хв; -Δ- – час витримки під гартування 80 хв, після покращення проведено повторний відпуск при 525° С та повільне охолодження (за 100 % прийнято масову інтенсивність зношування зразка після гартування від 860° С з часом витримки 30 хв і відпуску 600° С).

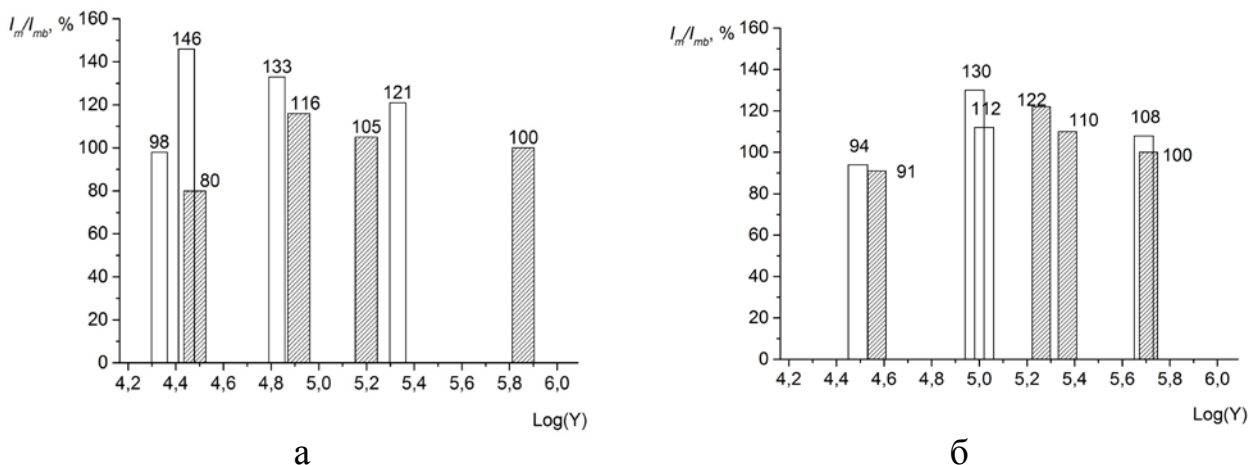


Рис. 4. Залежність відносного зношування (I_m / I_{mb}) від матричного параметра структури (Y) сталей 40X(а) і 40XHM (б). За I_{mb} прийнята масова інтенсивність зношування після гартування від 860°С з витримкою 30 хв. і відпуску при 600°С: ▨ – витримка при нагріві під гартування 30 хв.; □ – витримка при нагріві під гартування 80 хв.

Аналіз мікроструктури показав, що середня віддаль між потрійними стиками з підвищеним градієнтом енергії складає 0.01..0.02 мм і відповідає розмірам тріщин в сталі 40X при переході від розсіяних до локалізованих пошкоджень. Із ростом кількості потрійних стиків, що утворені границями з більшою різницею енергії, після нагріву сталі до 950 °С прискорюється стадія розвитку локалізованого пошкодження при контактних навантаженнях.

Отримані закономірності впливу структурно-енергетичного стану границь зерен на зносотривкість сталі 40X були підтверджені при дослідженнях сталей, які леговані нікелем, молібденом і кремнієм.

В сталі 40ХНМ частка потрійних стиків зерен, які утворені границями із суттєвою різницею по величині зернограничної енергії, складає 6.67% після гартування від 950°С. Відсутність таких стиків виявлена після гартування від 1050 °С. Випробовування на зношування показали, що із зростанням температури нагріву до 950 °С зносотривкість зменшується, а після нагріву до 1050 °С – зростає (рис. 3, г). Підвищення інтенсивності зношування спостерігається, коли значення матричного параметра (Y) знаходиться в межах 4.98..5.36 (рис. 4, б). Такі величини досягаються у випадках появи різнозернистості після гартування від температури 950 °С, формування потрійних стиків зерен і поверхонь поділу з підвищеним градієнтом енергії.

В сталі 40XC після всіх термічних обробок виявлені потрійні стики, границі яких утворюють кути 161°..180°. Після гартування від 1050°С кількість стиків, в яких поверхні поділу суттєво відрізняються за величиною зернограничної енергії, зменшується. Інтенсивність зношування зразків сталі 40XC зростає після гартування від 950°С і стає меншою після гартування від 1050 °С (рис. 3, д).

Зміна структурно-енергетичного внутрішніх поверхонь розділу після повторного відпуску при 525 °С протягом 2 год і охолодження з піччю суттєво впливає на інтенсивність зношування сталей (рис. 3). Негативний вплив окрихчування менше проявляється в сталі 40ХНМ, в якій при термічній обробці формуються поверхні поділу з мінімальним градієнтом зернограничної енергії.

У четвертому розділі представлені результати досліджень експлуатаційної надійності покращувальних сталей при спрямованому впливі на границі поділу зерен легуванням.

Криві розподілу числа випадків (N) появи границь певної глибини (t) складаються з ряду максимумів (рис. 5). Для всіх досліджуваних сталей в окрихченому стані криві розподілу зміщені відносно кривих для в'язкого стану в сторону більших глибин канавок.

Кількісний аналіз мікроструктури, будови зломів після ударних випробовувань сталей 40X, 40XC, 60C2, 60C2XA представлені у табл. 2.

В сталі 40X підвищення температури гартування з 870 °С до 1070 °С і зміни зеренної структури сприяють зміщенню порога холодноламкості в сторону високих температур на 25 °С у в'язкому стані і на 56 °С в окрихченому.

Із ростом температури гартування сталі 40XC до 1070 °С відбувається значне падіння ударної в'язкості у в'язкому стані і ще більше в окрихченому.

**Характеристики мікроструктури, опору крихкому руйнуванню,
схильності до окрихчення та будови зламів сталей**

Марка сталі	Температура гартування T, °C	Стан сталі	Діаметр зерна D, мкм	KCU, МДж/м ²	t ₅₀ , °C	Δt ₅₀ , °C	Частка міжзеренного руйнування, %
40X	870	Вязк.	18	1,4	-80	65	5
		Окр.		1,2	-15		45
	1070	Вязк.	50/40	1,1	-55	96	15
		Окр.		0,90	41		82
40XC	870	Вязк.	24	1,3	-43	70	5
		Окр.		0,73	27		55
	1070	Вязк.	36/168	1,04	-32	108	25
		Окр.		0,56	76		100
60C2	870	Вязк.	48	0,88	13	37	15
		Окр.		0,57	50		45
	970	Вязк.	70	1,12	-7	57	10
		Окр.		0,53	50		65
60C2XA	870	Вязк.	25/70	0,75	13	77	30
		Окр.		0,54	90		85
	970	Вязк.	31/70	0,75	13	77	10
		Окр.		0,62	90		90

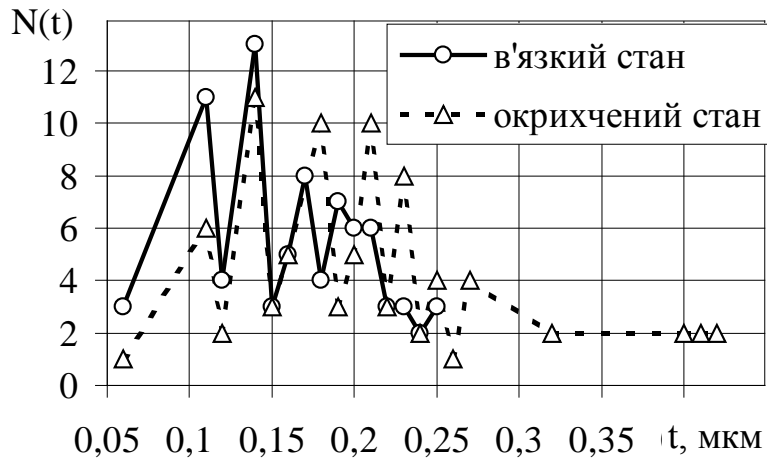
Примітка: В чисельнику приведено середній діаметр зерна в групі малих зерен, в знаменнику середній діаметр в групі великих зерен.

В сталі 60C2 гартування від температури 970 °C приводить до підвищення ударної в'язкості та кількості в'язкої складової в зломі на всьому температурному інтервалі випробувань, зміщенню кривої холодноламкості в область низьких температур на 20 °C. Підвищення температури гартування сталі 60C2XA до 970 °C не впливає на положення кривої холодноламкості сталі у в'язкому стані.

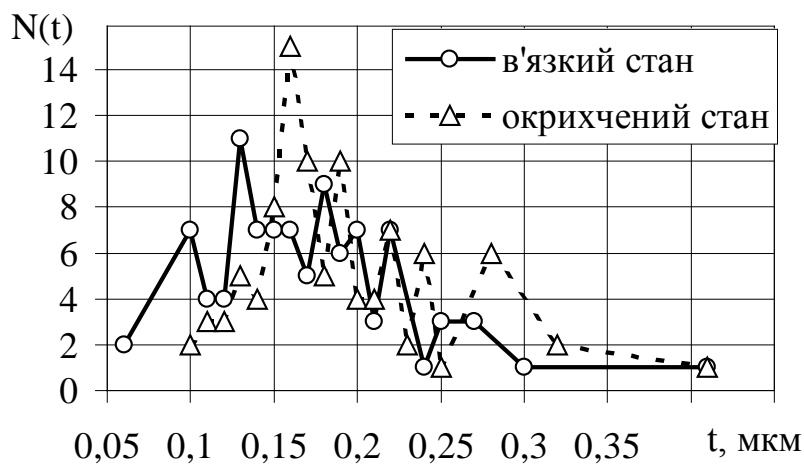
Аналіз процесів руйнування показав поширення тріщин по границях з більшою глибиною канавки травлення, тобто з вищим рівнем зернограничної енергії.

Фрактографічними дослідженнями встановлено, що в умовах крихкого руйнування вплив кремнію проявляється у зменшенні в'язкої складової злomu у поліпшених зразках і у збільшенні частки міжзеренного руйнування в зразках після окрихчувального відпуску (табл. 2).

Мікроренгеноспектральний аналіз зломів показав, що в досліджених сталях на міжзеренних поверхнях окрихчених зразків виявляються сегрегації карбідотвірних елементів. В окрихчених зразках виявляється сегрегації кремнію на окремих ділянках міжзеренного руйнування, а також потрійних стиках зерен.



а



б

Рис. 5. Залежність числа границ зерен певної глибини $N(t)$ від глибини зернограничної канавки t для покращених сталей, загартованих від температури 870°C : а - 60С2; б - 60С2ХА.

Методом оже-електронної мікроскопії встановлено, що в сталі 40ХС, яка загартована від 870°C , на поверхні в'язкого злому підвищується вміст вуглецю. На ділянках міжзеренного руйнування виявляється фосфор і хром (рис. 6).

В зломі сталі 60С2 після окрихчувальної обробки поряд із фосфором виявляється присутність азоту і сірки.

Розраховували значення матричних параметрів сталей після термічної обробки. Результати використовувались для побудови залежності частки міжзеренного руйнування в зразках, випробуваних при температурі напівкрихкості, від матричного параметра, що характеризує зеренну структуру сталей (рис. 7). Встановлено, що оптимальні значення матричного параметру досягаються як за рахунок подрібнення і підвищення однорідності зерен, так і зменшення частки границ зерен з високим рівнем енергії. На основі отриманих результатів запропоновані нові сталі, які мають експлуатаційні властивості вищі відомих сталей і захищені патентами України (3085, 3086) і Російської Федерації (2016124, 2016126)

Особливості виділення карбідної фази впливають на міжзеренне руйнування сталей після покращення.

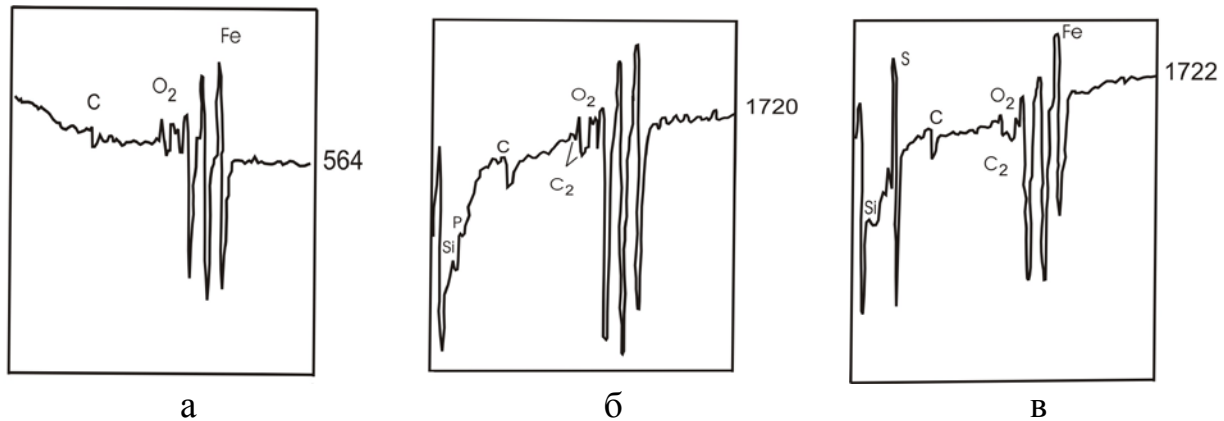


Рис. 6. Спектри оже-електронів поверхонь руйнування покращених сталей 40ХС від 870°С в окрихченому стані: а - ділянка транскристалітного сколу; б, в – міжзеренного.

Із підвищенням вмісту вуглецю зміщення порогу холодноламкості Δt_{50} в сторону високих температур після вторинного відпуску зростає, у легованих сталях більше, ніж у вуглецевих (табл. 3).

Фрактографічними дослідженнями показано, що зростання вмісту вуглецю збільшує частку міжзеренного мікрорельєфу за рахунок в'язкого. У легованих сталях міжзеренний відкол поширеніший. Карбідні частинки міжзеренних зломів поділяються на декілька розмірних груп. У сталях 20 і 40 крихкому руйнуванню сприяє виділення карбідів розміром понад 2 мкм на границях і 0,8... 1,0 мкм в тілі зерен. У сталі 12ХНЗА границі однорідніші, ніж в сталі 40Х. Після окрихчувальної обробки густина карбідних виділень по границях істотно зростає, що сприяє появі канавок травлення більшої глибини (рис. 8).

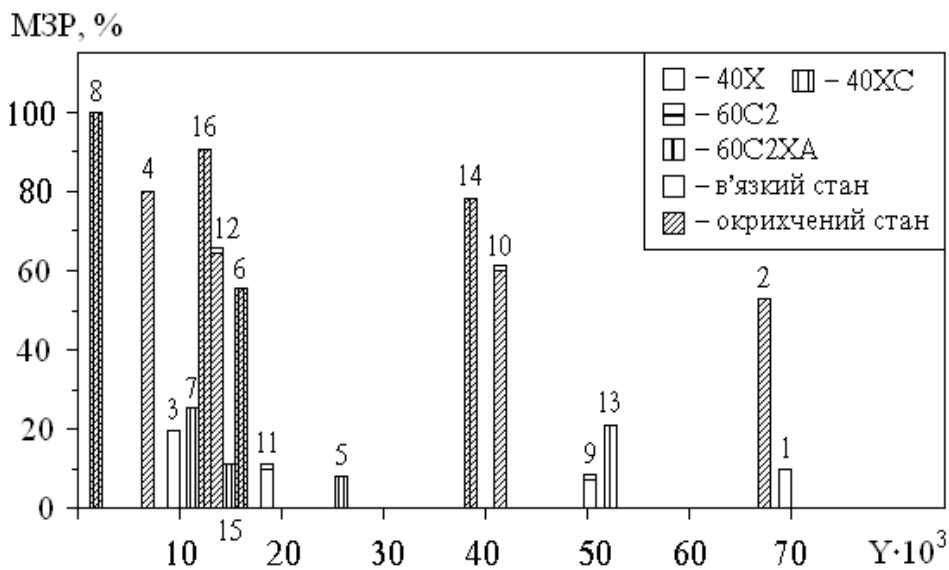


Рис. 7. Залежність частки міжзеренного руйнування від матричного параметру покращених сталей: 1, 2, 5, 6, 9, 10, 13, 14 - гартування від температури 870 °С; 11, 12, 15, 16 - гартування від температури 970 °С; 3, 4, 7, 8 - гартування від температури 1070 °С

Вплив хімічного складу на критичну температуру крихкості і мікромеханізм руйнування сталей

Марка сталі	T ₅₀ °C	Ступінь окрихчення Δt ₅₀	Частка крихкого мікрорельєфу на зламі при t ₅₀ , %		
			Ямкового	Квазівідкольного	
				Череззеренного	Міжзеренного
20	-120	12	10 ± 2	90 ± 1	0
	-108		5 ± 2	90 ± 1	5 ± 2
12ХНЗА	-115	45	10,5 ± 0,5	85,2 ± 1	7 ± 0,5
	-70		6,2 ± 0,8	55,2 ± 1,2	38 ± 0,5
20ХНЗА	-80	50	8 ± 2	82 ± 1	10 ± 2
	-30		4 ± 2	46 ± 1	50 ± 1
40	-90	20	9,5 ± 0,4	90,5 ± 1,5	2 ± 0,8
	-70		3,7 ± 0,5	84,3 ± 1,6	12 ± 0,6
40Х	-80	65	4,8 ± 0,5	85,2 ± 0,8	10 ± 0,5
	-15		3,5 ± 1,0	41,5 ± 1,0	55 ± 0,5

Примітка: В чисельнику подані дані після первинного відпуску, у знаменнику - після окрихчувального.

Визначення ролі карбідної фази в процесах руйнування поліпшених сталей за допомогою інваріантних моделей структури проводили з врахуванням міжфазних поверхонь (рис. 9).

Зниження матричного параметру структури за рахунок зростання площі міжфазних границь при виділенні зернограничних карбідів супроводжується збільшенням частки інтеркристалітного руйнування сталей.

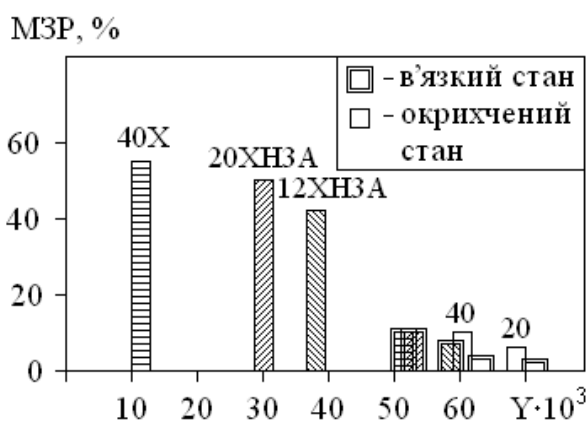
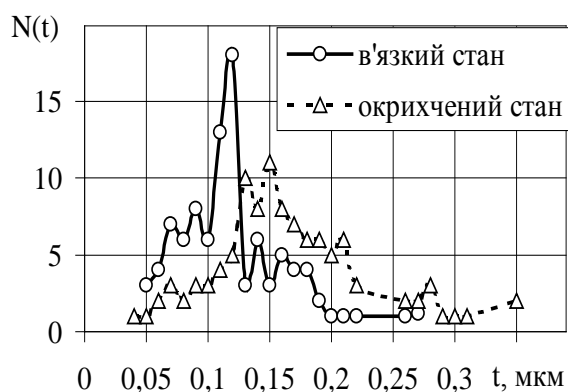


Рис. 8. Залежність кількості границь зерен певної глибини $N(t)$ від глибини зернограничної канавки t для сталі 40Х

Рис. 9. Залежність частки міжзеренного руйнування від матричного параметру структури сталей

При реалізації інваріантних моделей структури виявлено, що збільшення частки границь зерен з густиною карбідів понад $16 \cdot 10^4 \text{ мм}^{-1}$ сприяє зміщенню порогу холодноламкості в сторону високих температур на $45 \dots 65 \text{ }^\circ\text{C}$ і підвищенню міжзеренного рельєфу в крихкій зоні руйнування.

В п'ятому розділі розглянуто застосування моделювання структури при розробці мікролегування для підвищення конструкційної міцності сталей.

Дослідження властивостей локальних об'ємів зерен дозволило запропонувати критерій схильності до міжзеренного руйнування сталей (табл. 4).

Оцінювали схильність до утворення міжзеренних пошкоджень сталей за допомогою функціоналу, який враховує розподіл мікротвердості у структурі матеріалу на мезорівні:

$$P = F(H_\mu(x)). \quad (20)$$

Введено континуальний критерій зміни мікротвердості:

$$F(H_\mu(x)) = \frac{H_{\mu гр} - H_{\mu зер}}{H_{\mu зер} \frac{\langle d \rangle}{2}} = g, \quad (21)$$

де $H_{\mu гр}$ - мікротвердість границі зерна; $H_{\mu зер}$ - мікротвердість зерна; $\langle d \rangle$ - середній розмір зерна.

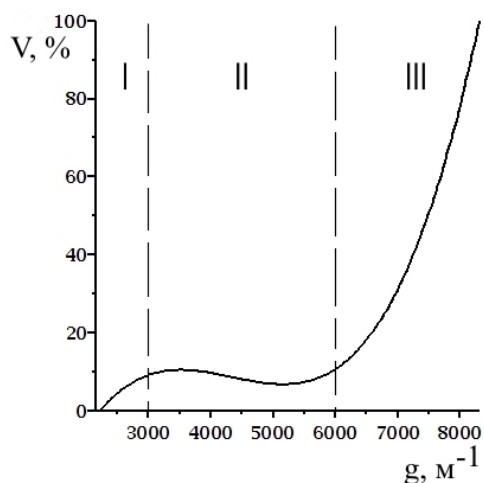
На основі інтерполяції експериментальних результатів отримана функціональна залежність частки міжзеренного руйнування від відносного градієнту властивостей сплавів в локальних об'ємах. Встановлено, що сталі розділяються на три групи – з малою, стабільною і катастрофічною схильністю до міжзеренного руйнування (рис. 10).

Таблиця 4

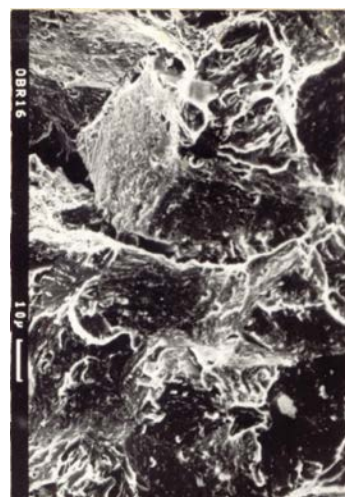
Вплив окрихчувального відпуску на поріг холодноламкості, кількість міжзеренного руйнування, характеристики стану локальних об'ємів зерна і градієнт властивостей

Марка сталі	Стан сталі	Зміщення порогу холодноламкості ΔT_{50}	Частка міжзеренного руйнування, %	Мікротвердість, 10^7 Н/м^2		Значення функціоналу F , м^{-1}
				зерна	границі	
40	В'язкий	22	2	235	246	2340
	Крихкий		12	237	266	6118
40Х	В'язкий	68	10	246	265	3861
	Крихкий		55	249	288	7831

Показано використання розробленої методології для вирішення прикладних задач. Вхідними даними, що визначають області використання розроблених моделей, є характеристики структури матеріалів, які в загальному подаються у вигляді n -вимірному вектору. Так при $n \geq 4$ необхідно використовувати системні моделі (рис. 1), при $n = 2 \dots 3$ - континуальні моделі інтеркристалітного руйнування ((14)), а при $n = 1$ - функціонально-градієнтну модель великокутової границі зерна (рис. 2).



а



б

Рис. 10. Залежність міжзеренного руйнування від параметру g (а): I - зона малого (незначного) міжзеренного руйнування; II - зона стабільного міжзеренного руйнування; III - зона катастрофічного міжзеренного руйнування; фрактограма сталі 40X в окрихченому стані (б).

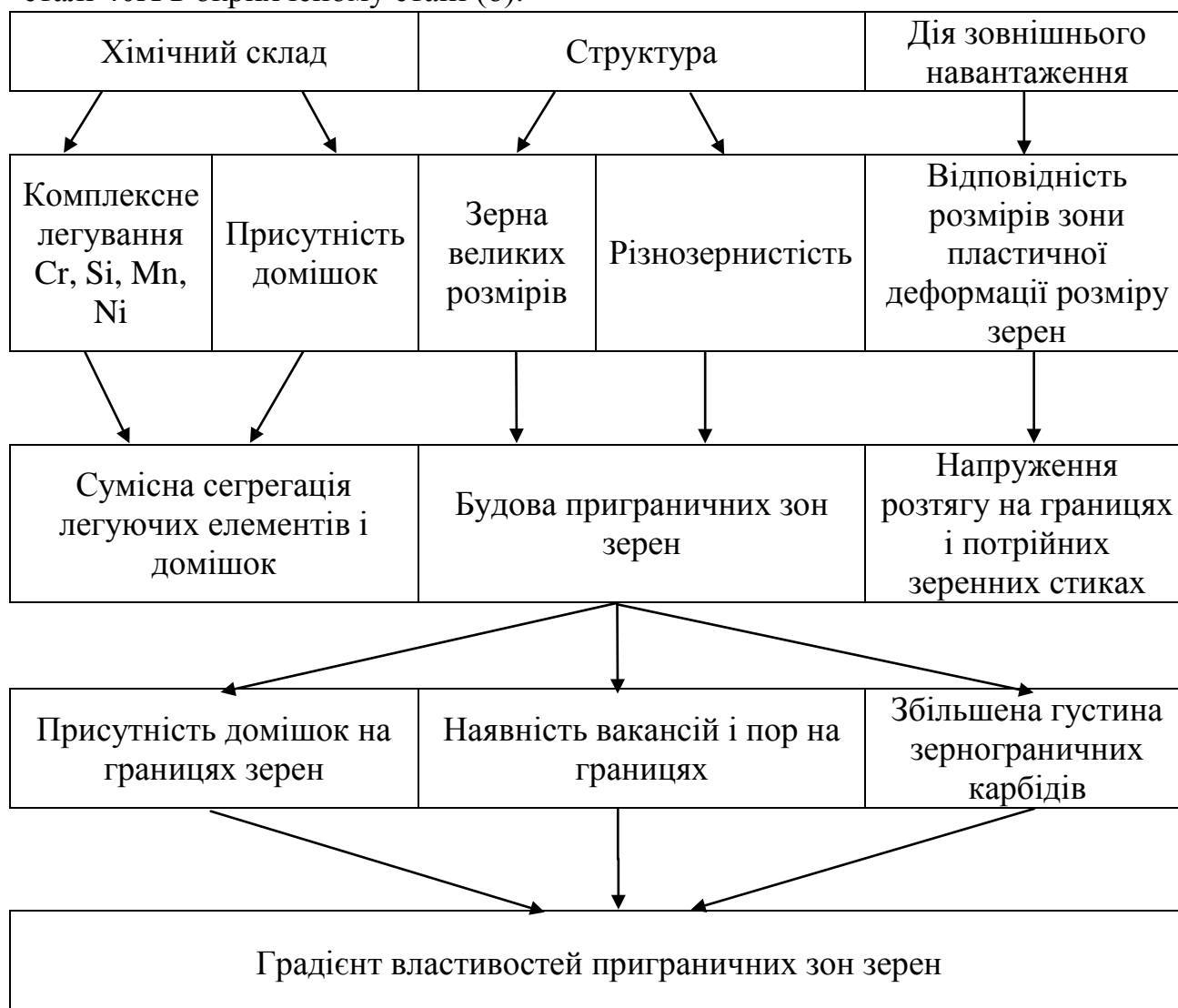


Рис. 11. Фактори, що сприяють утворенню міжзеренних пошкоджень і інтеркристалітному руйнуванню покращуваних сталей

Форма зернограничних карбідів має суттєвий вплив на процеси деформації і утворення пошкоджень в сталях. В умовах зовнішнього навантаження сферичні карбіди сприяють відшаруванню по границях карбід-матриця, а пластинчастої форми – об'ємному розтріскуванню, що підтверджується більшим вмістом легуючих елементів на міжзеренних поверхнях зломів. Схильність до утворення міжзеренних пошкоджень і тріщин визначається хімічним складом, структурою і напружено-деформованим станом виробів (рис. 11).

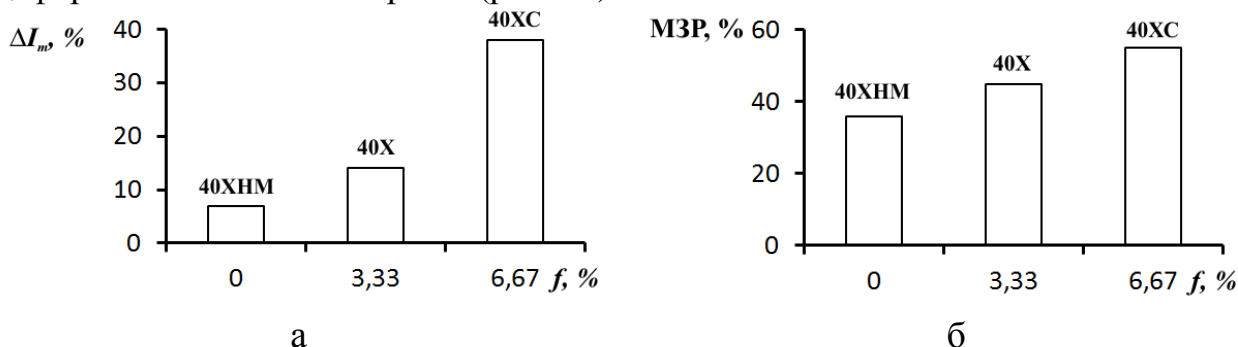


Рис. 12. Залежність приросту інтенсивності зношування (а) і кількості міжзеренного руйнування при температурі напівкрихкості (б) після окрихчувальної обробки покращених сталей 40X, 40XNM, 40XC від частки потрійних стиків з високим градієнтом енергії границь зерен (сталі гартували від температури 860°C).

Таблиця 5

Вплив мікролегування на критичну температуру крихкості і мікромеханізм руйнування сталей в поліпшеному стані і після окрихчувальної обробки

Марка сталі	t ₅₀ , °C	t _{вип} , °C	Частка мікрорельєфу на зламі, %		
			В'язкого	Череззеренного	Міжзеренного
40ХГ	-50	-40	9,2 ± 1,6	80,8 ± 1,5	10,0 ± 1,2
	-38	-20	14,5 ± 2,1	27,2 ± 2,1	58,3 ± 2,0
40ХГР	-30	-20	7,8 ± 1,3	74,2 ± 1,0	18,0 ± 1,6
	-13	0	6,5 ± 1,5	10,0 ± 1,3	83,5 ± 2,2
40ХГР з мішметалом	-42	-30	16,0 ± 1,4	75,8 ± 1,4	13,2 ± 1,3
	-26	-5	14,0 ± 1,7	16,6 ± 1,6	69,6 ± 1,8
40ХГР з празеодимом	-52	-40	14,5 ± 1,2	75,3 ± 1,6	10,2 ± 1,4
	-39	-20	16,5 ± 1,5	22,2 ± 2,0	61,3 ± 2,0
40ХГР з цирконієм	-55	-40	15,2 ± 1,5	77,2 ± 1,5	7,6 ± 1,3
	-42	-10	20,8 ± 1,8	26,0 ± 1,8	53,2 ± 2,1
40ХГР з молібденом	-72	-60	11,6 ± 1,4	83,2 ± 1,8	5,2 ± 1,6
	-60	-40	19,3 ± 1,2	39,4 ± 1,7	41,3 ± 1,9

Примітка: Чисельник - дані для сталей у в'язкому стані; знаменник - в окрихченому.

Важливе значення в процесах руйнування відіграє структурно-енергетичний стан поверхонь поділу зерен. Інтенсивність зношування і міжзеренне руйнування при ударі в окрихченому стані зростає в залежності від частки потрійних стиків зерен, в яких границі суттєво відрізняються по рівню енергії (рис. 12).

Дослідження мікролегованих сталей показали, що найбільшу схильність до розвитку оберненої відпускну крихкості проявляють сталі з добавками бору (табл. 5). Так в сталі 40ХГР після окрихчувального відпуску поріг холодноламкості зміщується в сторону високих температур на 30...35 °С. Введення мішметалу, празеодиму і цирконію підвищує ударну в'язкість і зміщує поріг холодноламкості сталі 40ХГР після вторинного відпуску в сторону низьких температур відповідно на 10...15, 23...28, 30...35 °С. Але найбільш інтенсивно знижує схильність до окрихчення добавка молібдену.

Фрактографічний аналіз показав, що введення бору зменшує долю мікрів'язкого руйнування, сприяє появі інтеркристалітного злому.

При введенні бору зростає кількість потрійних стиків, в яких є границі з високим градієнтом енергії. При комплексному мікролегуванні бором, цирконієм і молібденом кількість таких стиків зменшується (табл. 6).

При розрахунку системних моделей виявлено суттєве зменшення матричного параметру структури сталі 40ХГР після окрихчувального відпуску, яка руйнується по механізму інтеркристалітного сколу (рис. 13). Зростання матричного параметру і зменшення частки міжзеренного руйнування при введенні РЗМ обумовлено зменшенням густини зернограничних карбідів, а в сталях з цирконієм і молібденом також їх подрібненням. Крім того в цих сталях зменшується розмір зерен. Запропоновано механізм впливу мікродобавок на опір крихкому руйнуванню досліджених сталей після гартування і високого відпуску.

Таблиця 6

Частка кутів між границями в потрійних стиках зерен мікролегованих сталей після покращення.

Сталь	Частка в загальній кількості заміряних кутів, %						
	40°...60°	61°...80°	81°...100°	101°...120°	121°...140°	141°...160°	161°...180°
40ХГ	0	0	20.00	30.00	26.67	23.33	0
40ХГР	0	13.33	13.33	20.00	33.33	16.67	3.33
40ХГР з РЗМ	0	3.33	13.33	33.33	40.00	6.67	3.33
40ХГР з Pr	0	0	13.33	30.00	50.00	6.67	0
40ХГР з Zr	0	3.33	13.33	46.67	6.67	30.00	0
40ХГР з Mo	0	6.67	10.00	30.00	40.00	13.33	0

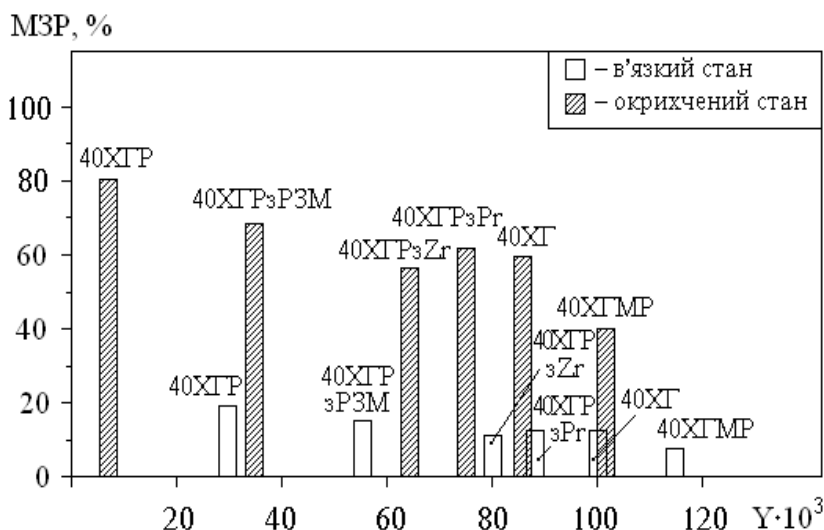


Рис. 13. Вплив мікролегування на матричний параметр і частку міжзеренного руйнування сталей.

В шостому розділі наведено результати досліджень прикладних проблем підвищення конструкційної міцності порошкових і вилитих виробів шляхом регулювання структурно-енергетичного стану поверхонь поділу складових структури.

У п. 6.1 розглянуто деформовані маловуглецеві сталі, які широко використовуються для штампування деталей, що працюють в умовах дії знакозмінних і динамічних навантажень.

Досліджували полосові заготовки сталі 17Г1С після холодного прокатування. Виявлено, що їх руйнування при штампуванні відбувалось внаслідок вичерпання пластичності після прокатування. В зв'язку із цим розробили режими термічної обробки для підвищення технологічної пластичності заготовок. Після прокатування проводили нагрів до температур 400°C...550°C. Усунення сегрегацій на внутрішніх поверхнях розділу досягались охолодженням у воді.

Для визначення пошкодженості після прокатування сплаву оцінювали розсіювання характеристик твердості. Великим значенням коефіцієнта Вейбула m відповідає низький ступінь пошкодженості, меншим – вищий рівень.

Аналіз розподілу твердості зразків показав збільшення коефіцієнта m після відпуску зразків при температурі 500°C (рис. 14), що вказує на кращу організацію структури і заліковування дефектів, які утворились при прокатуванні в умовах дорекристалізаційного нагріву.

Запропоновані режими технологічних обробок, що забезпечують підвищення пластичності і втомної міцності деталей, які отримують із холоднокатаних заготовок маловуглецевої сталі.

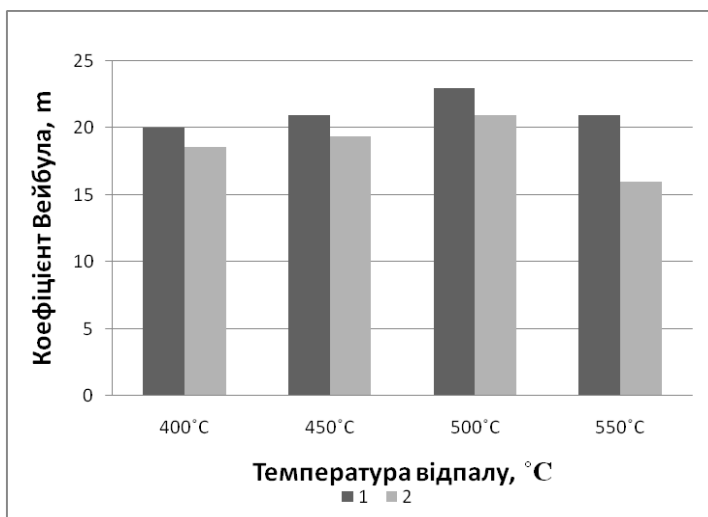


Рис. 14. Вплив технологічної і термічної обробок на коефіцієнт гомогенності, Вейбула (m) сталі 17Г1С: 1 – головка зразка; 2 – зона рівномірного видовження

У п. 6.2 показано використання розробленої методології при отриманні порошкових виробів із заданим життєвим циклом.

Контактні пластини струмоприймачів електровозів виготовляють з матеріалів на основі металів і графіту методом порошкової металургії, що дозволяє зменшувати зношування контактного проводу. Хімічний склад досліджених пластин, режими обробки тиском, значення електричного опору і коефіцієнт гомогенності Вейбула m показані в табл. 7.

Аналіз твердості, коефіцієнта розподілу Вейбула показав, що для сплавів 1 і 3 зі збільшенням тиску рихтування після спікання коефіцієнт гомогенності (m) зростає, що свідчить про зменшення пошкоджуваності. Для сплаву 2 є характерним найбільше значення коефіцієнта гомогенності Вейбула (m) після тиску 19,2 МПа. Інтенсивність зношування знаходиться в кореляції з коефіцієнтом гомогенності Вейбула (m) і пошкоджуваністю сплавів при технологічних обробках (рис. 15).

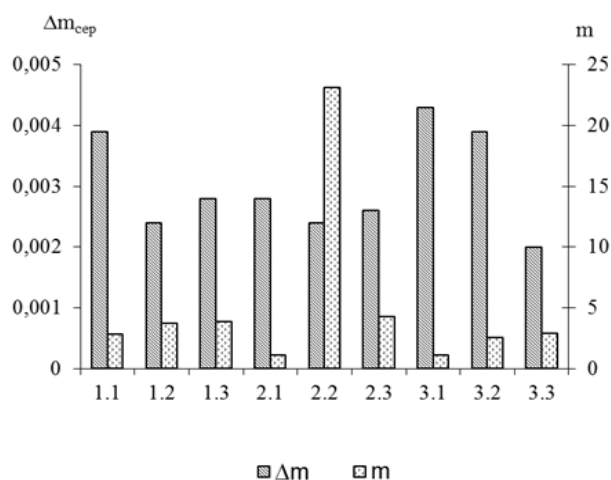


Рис. 15. Втрата маси ($\Delta m_{\text{сер}}$, гр) при зношуванні і коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m) для сплавів 1, 2, 3.

Дослідження тріщин, що утворились біля відбитків після замірів твердості при різних навантаженнях, показали, що у значній мірі їх поширення відбувається по границях часточок порошків.

Найбільше тріщини утворюються на границях Fe-Fe, причому їх роль зростає зі збільшенням навантаження на кульку. Використання дисперсних порошків однакової розмірності, підвищення однорідності напружено-деформованого стану сприяє росту опору міжзеренному знеміцненню порошкових виробів.

Таблиця 7

Хімічний склад, питомий електроопір і коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m) пластин струмоприймачів електровозів, виготовлених методом порошкової металургії

№ пластины	Хімічний склад пластины, ваг, %	Тиск рихтування, МПа	Питомий електроопір ρ , ом•м	Коефіцієнт гомогенності Вейбулла, m
1.1	Fe – 72,10	12,1	$82,500 \cdot 10^{-8}$	2,87
1.2	Cu – 26,90	19,2	$88,347 \cdot 10^{-8}$	3,74
1.3	Sn – 0,54 C – 0,46	27,3	$91,348 \cdot 10^{-8}$	3,89
2.1	Fe – 65,08	12,1	$83,985 \cdot 10^{-8}$	1,10
2.2	Cu – 30,68	19,2	$88,7133 \cdot 10^{-8}$	23,11
2.3	Sn – 3,79 C – 0,45	27,3	$103,203 \cdot 10^{-8}$	4,27
3.1	Fe – 60,11	12,1	$70,351 \cdot 10^{-8}$	1,11
3.2	Cu – 35,20	19,2	$75,494 \cdot 10^{-8}$	2,54
3.3	Sn – 4,24 C – 0,45	27,3	$78,757 \cdot 10^{-8}$	2,94

У п. 6.3 показана можливість використання технологічної спадковості структурно-енергетичного стану внутрішніх поверхонь поділу для підвищення параметрів надійності виробів після обробки різанням.

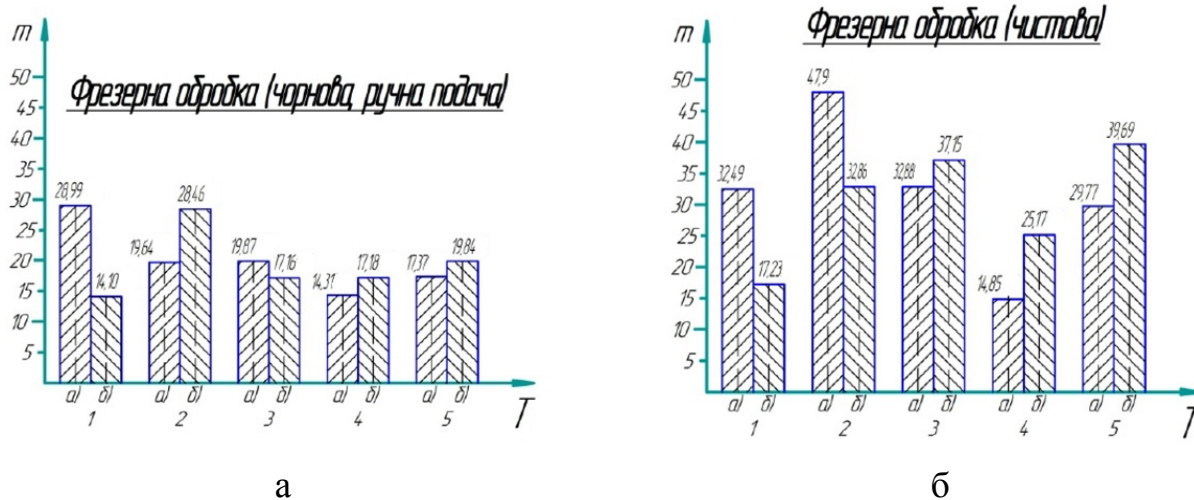


Рис. 16. Коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m) на поверхнях литої заготовки після чорнової та чистової фрезерних обробок: а, б – виливки, отримані з однієї плавки (1, 4 – розлиті в холодні кокілі; 2, 3, 5 – розлиті в підігріті кокілі), Т – порядковий номер експериментального дослідження.

Дослідження проводили на заготовках із сплаву АК, які відливали в холодні і підігріті форми, а також фрезерували за режимами чорнової і чистової обробок.

Аналіз результатів оцінки розсіювання характеристик твердості дозволив встановити, що збільшення віддалі від живильників сприяє підвищенню, а прискорена кристалізація та спрямоване тепловідведення – зменшенню технологічної пошкоджуваності об'ємів вилівка при затвердінні.

Результати оцінки коефіцієнта Вейбулла показали зростання пошкодженості поверхневих шарів після чорнового механічного оброблення (рис. 16). Зниження силових характеристик процесу різання на чистових режимах зменшує пошкодженість поверхні заготовки. При чорнових обробках питома кількість пустот на одиницю площі границь, які виходять на поверхню заготовки, що обробляється, наближається до критичного вільного об'єму. Після чистових обробок зменшується їх кількість і роль, як концентраторів напружень.

У цьому розділі представлено управління структурно-енергетичним станом внутрішніх поверхонь розділу з метою підвищення параметрів надійності виробів при плазмовому зміцненні і термітному зварюванні.

У п. 7.1 показано використання розробленої концепції при поверхневому зміцненні.

Для підвищення ресурсу колісних пар проводять плазмове зміцнення гребенів бандажів локомотивів. Встановлено, що після плазмової обробки формується шар термічного зміцнення товщиною 2.6..2.7 мм, який можна поділити на три зони: різнозернисті (розмір зерен від 6 до 20 мкм), однорідних зерен (15..18 мкм), і дрібних зерен (до 7 мкм). Результати визначення кутів в потрійних стиках різних зон шару плазмового зміцнення показані в табл. 8.

На глибині 0.45 мм шару плазмового зміцнення присутні поверхні поділу, кути між якими в потрійних стиках знаходяться в діапазоні від 61°..180°, які мають значну різницю за енергіями. На глибині 1.4 мм кути між поверхнями поділу в потрійних стиках зерен знаходяться в діапазоні 81°..160°, що вказує на підвищення їх однорідності розподілу за енергіями. В зоні дрібнозернистості структури (на глибині 2.6 мм) зростає частка поверхонь поділу зерен з однаковим рівнем енергії, кути між якими в потрійних стиках наближаються до 120°. Із зростанням віддалі від контактної поверхні твердість зменшується від HRC 31 до твердості незміцненого металу HRC 26, а мікротвердість від $H_{\mu}=3700$ МПа до $H_{\mu}=2580$ МПа.

Таблиця 8

Частка кутів між границями в потрійних стиках зерен градієнтного шару бандажа залізничного колеса після плазмового зміцнення

Віддаль від поверхні, 10^{-3} м	Частка в загальній кількості замірених кутів						
	40°	61°	81°	101°	121°	141°	161°

	60°	80°	100°	120°	140°	160°	180°
0,45	0,00	6,67	16,67	23,33	23,33	26,67	3,33
1,4	0,00	0,0	3,33	56,67	33,33	6,67	0,00
2,6	0,00	0,0	14,33	26,67	46,67	12,33	0,00

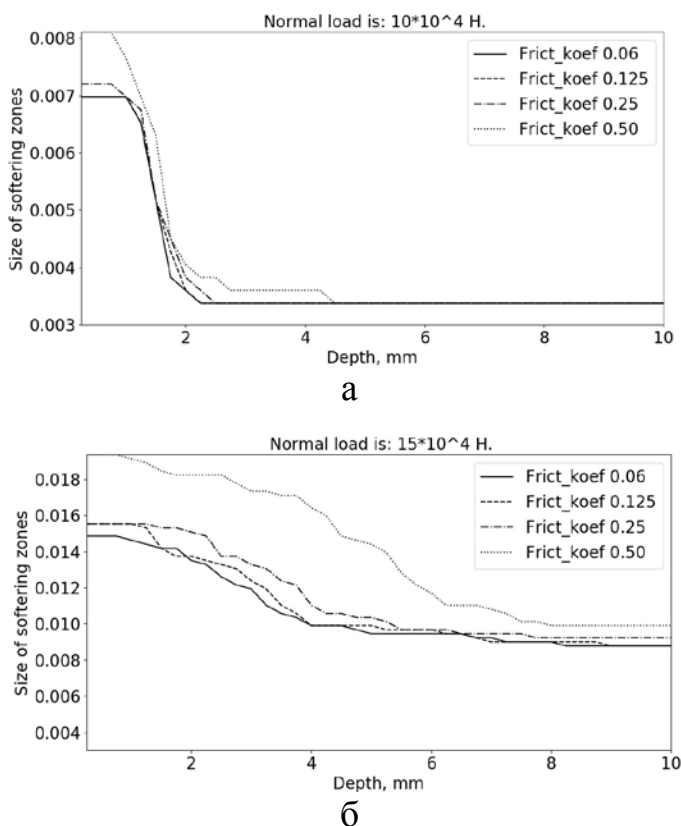


Рис. 17. Значення величини зони знеміцнення при вертикальних (нормальних) навантаженнях: а – $10 \cdot 10^4$ Н, б – $15 \cdot 10^4$ Н.

FEniCS та його реалізації на мові Python проведено дослідження напруженого стану і розмірів зон знеміцнення бандажів коліс (рис. 17 а, б) при навантаженнях близьких до експлуатаційних. Встановлено, що для навантажень до $10 \cdot 10^4$ Н слід проводити плазмову обробку на глибину 1.8..2.3 мм, при $12 \cdot 10^4$ Н – 2.8..3.3 мм, а при $15 \cdot 10^4$ Н – 3.8..4.5 мм.

У п. 7.2 представлені результати досліджень впливу структурно-енергетичного стану внутрішніх поверхонь поділу на утворення міжзеренних пошкоджень і тріщин при термітному зварюванні.

Таблиця 9

Частка кутів між поверхнями поділу в потрійних стиках зерен фериту та зносотривкість різних зон центральної частини нероз'ємного з'єднання рейок після термітного зварювання

Місце вирізки зразка	Частка в загальній кількості заміряних кутів, %							Втрата маси зразків Δm , гр
	40°	61°	81°	101°	121°	141°	161°	
	60°	80°	100°	120°	140°	160°	180°	
Головка	0,00	3,33	16,67	26,67	40,00	13,33	0,00	0,0041
Шийка	0,00	3,33	16,67	26,67	43,33	6,67	3,33	0,0055
Підшва	6,67	3,33	20,00	26,67	6,67	26,67	10,00	0,0065

В різних зонах градієнтного шару зносотривкість суттєво змінюється. При переході від поверхні на глибині 1.5 мм зносотривкість досягає найвищого значення, хоча мікротвердість зменшується від 3700 МПа до 3600 МПа.

Висока зносотривкість цієї зони пов'язана із підвищенням однорідності розподілу великокутових поверхонь поділу зерен за енергіями, у порівнянні із іншими зонами.

Наявність поверхонь поділу зерен, що суттєво відрізняються за енергіями, сприяє зниженню зносотривкості зміцненого шару внаслідок прискореного переходу матеріалу від розсіяних до локалізованих пошкоджень.

На основі розробленої в роботі моделі (14) і розрахунків з використанням пакету МСЕ-аналізу

Розвиток швидкісного залізничного транспорту збільшує використання термітного зварювання. Незначні відхилення від оптимальних режимів технологічного процесу сприяють утворенню поперечних тріщин в підшвах рейок. Для їх усунення проводили вивчення мікроструктури різних зон нероз'ємного з'єднання рейок Р65.

Дослідження показали, що найбільше перліту знаходиться у верхній частині головки рейки, а найменше – у підшві. Середній розмір ділянок фериту в центральній частині нероз'ємного з'єднання складає 76.16 мкм, у головці рейки і 217.74 мкм внизу підшви.

Аналізом кутів в центральній частині нероз'ємного з'єднання виявлено зростання частки поверхонь поділу зерен фериту з більшою величиною енергії у підшві рейки (табл. 9), які здатні до утворення міжзеренних пошкоджень.

Дослідженнями зносотривкості виявлено її найбільше значення у верхній частині головки рейки. Інтенсивність зношування підшви зростає на 50..55%. Наявність у підшві рейки потрійних стиків з кутами між поверхнями поділу зерен 160° .. 180° вказує на суттєву різницю енергій, їх здатність до утворення міжзеренних пошкоджень.

Це є одним із вирішальних факторів, який сприяє появі поперечних тріщин в підшвах рейок після термітного зварювання.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

В роботі вирішена важлива науково-технічна проблема ефективного підвищення експлуатаційної надійності виробів на основі розробленої методології з вибору раціональних режимів технологічних обробок. Використання моделювання при отриманні оптимального структурно-енергетичного стану поверхонь поділу забезпечило формування мікроструктури елементів конструкцій, яка максимально відповідає умовам їх експлуатації. При цьому отримані наступні результати та висновки:

1. Вперше запропонована нова концепція оптимізації технологічних процесів отримання виробів з підвищеною експлуатаційною надійністю управлінням структурно-енергетичним станом поверхонь поділу. Важливою ланкою запропонованої концепції підвищення опору інтеркристалітному руйнуванню деталей при технологічних обробках є градієнт енергії в локальних об'ємах, що утворені поверхнями поділу структурних складових. Збільшення опору утворенню міжзеренних пошкоджень і інтеркристалітних тріщин за рахунок термічної обробки, легування і мікролегування досягається у випадку зниження частки потрійних стиків поверхонь поділу з високим градієнтом енергії.

2. Запропонована модель утворення міжзеренних пошкоджень при зовнішніх навантаженнях в залежності від енергії поверхонь поділу. Присутність в потрійних стиках поверхонь поділу структурних складових, які суттєво відрізняються за величиною енергії, сприяє утворенню міжзеренних пошкоджень і тріщин у виробках. Розсіяні пошкодження утворюються на поверхнях поділу між потрійними стиками зерен з високим градієнтом енергії. Ефективність моделі

експериментально підтверджена при оптимізації технологій термічної обробки. Проведені дослідження дозволили на 48...53% підвищити опір зношуванню покращувальних економнолегованих сталей тільки за рахунок коректування технологічних режимів процесів гартування і відпуску в залежності від їх хімічного складу.

3. Побудована інваріантна модель структури сплавів, яка враховує кількісні характеристики елементів різного рівня ієрархії та їх зміни при дії зовнішніх навантажень. Для реалізації моделей на рівні числових оцінок створена методологія використання цифрових двійників структури полікристалів, що отримані на основі матричного подання системної моделі з її наповненням кількісними характеристиками зерен та поверхонь їх поділу. Отримана модель дозволила визначити роль мікролегування, легування і термічної обробки у формуванні параметрів структурно-енергетичного стану поверхонь поділу, що визначають їх схильність до утворення міжзеренних пошкоджень і інтеркристалітного руйнування сплавів.

4. Вперше з використанням розроблених системних моделей, емпіричних зв'язків між параметрами структури і опором до міжзеренного руйнування сталей встановлені значення матричного параметру моделей, при яких досягається підвищення фізико-механічних властивостей сталей. Ступінь впливу різноякісних елементів структури на опір до утворення міжзеренних пошкоджень і інтеркристалітне руйнування сплавів визначається структурно-енергетичним станом елементів більш високого рівня ієрархії – поверхонь поділу і стиків конгломератів, що утворені зернами різних розмірів.

5. Вперше експериментальними дослідженнями і реалізацією моделей на рівні числових оцінок показано:

- кристалізація сплавів в нерівноважних умовах приводить до зростання частки поверхонь поділу структурних складових із більшою величиною енергії, підвищує неоднорідність їх розподілу;

- покращення сприяє рівномірному розподілу поверхонь поділу за енергіями, а окрихчувальна обробка призводить до зростання статистичної ваги поверхонь поділу з її високим рівнем;

- наявність в структурі сплавів до 5% зерен, що відрізняються на три номери еталонної шкали, посилює схильність до відпускнуї крихкості з повним міжзеренним руйнуванням;

- присутність в структурі 10% зерен, що відрізняються на два номери призводить до появи половини міжзеренного руйнування в крихких зламах; найменша схильність до інтеркристалітного сколу виявляється в окрихчених зразках при відсутності різнозернистості.

6. Розроблено критерій оцінки сталей до інтеркристалітного сколювання. В залежності від його значення сталі розділяються на три групи – з малою, стабільною і катастрофічною схильністю до міжзеренного руйнування.

7. Виявлена присутність кремнію на потрійних стиках зерен, а також домішок на поверхнях поділу, яка призводить до утворення зон полегшеного

зародження мікротріщин і їх поширення по поверхнях поділу із більшою величиною енергії. При наявності в сталях хрому і марганцю вирішальну роль в процесах міжзеренного руйнування відіграє утворення пошкоджень і тріщин на міжфазних поверхнях карбід – матриця. Вперше з використанням запропонованого критерія схильності до міжзеренного руйнування показано, що збільшення частки поверхонь поділу зерен з густиною карбідів понад $16 \cdot 10^4 \text{ мм}^{-1}$ сприяє зміщенню порога холодноламкості в сторону високих температур, підвищенню кількості міжзеренного рельєфу в зломах.

8. Експлуатаційна надійність бандажів коліс локомотивів при формуванні градієнтної структури під час плазмового зміцнення гребенів суттєво залежить від енергетичних параметрів поверхонь поділу складових структури зони контактної взаємодії колесо-рейка. Зростання частки поверхонь поділу зі значною різницею в рівні зернограничної енергії зменшує зносотривкість локальних об'ємів зміцненого шару. При підвищенні однорідності розподілу поверхонь поділу зерен за енергіями ефективно зростає опір утворенню міжзеренних пошкоджень, стійкість до руйнування при контактній взаємодії.

9. Встановлено, що характеристики енергетичного стану поверхонь поділу мають суттєвий вплив на утворення дефектів при термітному зварюванні залізничних рейок. Утворення в потрійних стиках фериту поверхонь поділу із значною різницею енергій сприяє формуванню розсіяних міжзеренних пошкоджень, їх переходу до локалізованих поперечних тріщин, які поширюються в нероз'ємних з'єднаннях рейок під час зварювання. Управління параметрами поверхонь поділу зерен дає можливість запобігати утворенню дефектів при проведенні технологічних процесів зварювання.

10. З використанням розроблених у роботі підходів запропонована і перевірена методика розв'язання інженерно-практичних завдань формування структури покращувальних сталей, порошкових, литих, зміцнених і зварних виробів з підвищеним опором до утворення міжзеренних пошкоджень і інтеркристалітного руйнування. Розроблені технічні рішення захищені авторськими свідоцтвами і патентами.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Кузін О.А. Керування властивостями мікролегованих сталей за допомогою параметрів внутрішніх поверхонь розділу / О.А. Кузін// Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2000. – № 5. – С. 101-106. (*Наукометричні бази Scopus, Web of Science*)

2. Кузін О.А. Використання інваріантного моделювання при дослідженні впливу параметрів зеренної структури на експлуатаційні властивості сталі/ О.А. Кузін // Вісник Державного університету «Львівська політехніка» Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні і приладобудуванні. – №290. – Львів: Львівська політехніка. 1995. – С.35-39.

3. Кузін О.А. Оптимізація мікроструктури сталей під час використання інваріантних моделей/ О.А. Кузін// Вісник Державного університету «Львівська політехніка» «Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні і приладобудуванні». – № 394. – Львів: Львівська політехніка, 2000. – С. 124-129.

4. Кузін О.А. Роль изменения свойств локальных объемов зерен в процессах интеркристаллитного разрушения сталей после улучшения/ О.А. Кузін// European multi science journal. – 2018. – № 15. – С. 27-29. (**Наукометрична база РИНЦ**)

5. Кузін О.А. Вплив карбідної фази на руйнування поліпшених сталей/ О.А. Кузін, Т.П. Коврова, Т.М. Мещерякова // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 1999. – №2. – С. 67-70. (**Наукометричні бази Scopus, Web of Science**) – *Здобувач проводив визначення порогу холодноламкості сталей 40 і 40Х, оцінку енергії поверхонь поділу зерен, узагальнив результати досліджень.*

6. Кузін О.А. Особливості руйнування покращеної сталі 40Х в умовах контактної взаємодії / О.А. Кузін, С.А. Беспалов, Т.М. Мещерякова // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2001. – № 3. – С. 115-117. (**Наукометричні бази Scopus, Web of Science**) – *Здобувач приймав участь в металографічних дослідженнях, аналізі впливу структури на руйнування сталей.*

7. Кузін О.А. Використання математичних моделей механіки для визначення оптимальних параметрів мікроструктури сплавів з підвищеною зносостійкістю/ О.А. Кузін, Р.А. Яцюк, М.О. Кузін// Фізико-хімічна механіка матеріалів – 2009. – № 4. – С. 105–109. (**Наукометричні бази Scopus, Web of Science**) – *Здобувач запропонував методи оцінки параметрів роботоздатності бінарних полікристалічних систем, алгоритм розрахунку оптимальних характеристик структури.*

8. Stotsko Z.A. Use of modern tribology approaches for correcting the behaviour of adaptive biomechanical friction units/ Z.A. Stotsko, O.A. Kuzin, M.O. Kuzin// Archives of Materials Science and Engineering. – 2018. – V. 92, I. 2. – P. 49-52. (**Наукометричні бази Scopus, Directory of Open Access Journals, Google Scholar, Index Copernicus**) – *Здобувач запропонував підхід до технологічного керування експлуатаційними властивостями трибосистем з врахуванням явищ самоорганізації.*

9. The use of mathematical and computer modeling in solving the problems of rail transport expert examination/ N. Kuzin, T. Meshcheryakova, O. Kuzin [and others]// Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics. – 2016. - № 15 (4). – P. 93-98. (**Наукометричні бази Web of Science, Index Copernicus, Google Scholar, POL-index, PBN, BazTech, ICM-CEON, DOAJ, CrossRef, MatSciNet, zbMath**) – *Здобувачем запропоновано використання узагальнених нелінійних функціоналів, що враховують пріоритетність розгляду областей знеміцнення, які описуються градієнтними моделями суцільних середовищ.*

10. Kopylov V. Improving contact durability of polycrystalline systems by controlling the parameters of large-angle grain boundaries/ V. Kopylov, O. Kuzin, N. Kuzin// Eastern-European Journal of enterprise technologies. – 2019. - № 5/12 (101). –

Р. 14-22. (*наукометричні бази Scopus, CrossRef, Index Copernicus Journals Master List, Applied Science & Technology Source*) – Здобувач запропонував методику ієрархічного моделювання для визначення впливу кількісних параметрів мікроструктури на експлуатаційну надійність виробів.

11. Kuzin O. Continual description of polycrystalline systems taking into account their structure/ O. Kuzin, B. Lukiyanets, N. Kuzin// Технологический аудит и резервы производства. – 2019. - № 1/1 (45). – С. 25-30. (*наукометричні бази EBSCO, Directory of Open Access Journals (DOAJ), EconBiz, IDEAS, Index Copernicus*) – Здобувач запропонував критерій схильності до міжзеренного руйнування покращувальних сталей, провів експериментальне визначення відносного градієнту властивостей приграничних зон.

12. Кузін М.О. Використання нелокальних моделей пошкоджуваних середовищ для аналізу життєвого циклу високонавантажених конструкцій/ М.О. Кузін, Т.М. Мещерякова, О.А. Кузін// Вісник ОНДІСЕ. – 2019. – № 5. – С. 67-70. – Здобувач запропонував використовувати нелокальні моделі пошкоджуваних середовищ при аналізі впливу структурних характеристик на роботу вузлів тертя.

13. Determination of the optimal parameters of functional gradient materials using mathematical modeling approaches/ B.A. Lyashenko, Z.A. Stotsko, O.A. Kuzin [and others]// Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2019. – V. 92, Issue 1-2. – P. 13-18. (*наукометричні бази Scopus, Directory of Open Access Journals, Index Copernicus, Google Scholar*) – Здобувач запропонував методику експериментальних досліджень для оптимізації параметрів 3-D градієнтних матеріалів.

14. Analysis of friction interaction and optimization of detail surface hardening technologies using non-local mathematical models/ B.A. Lyashenko, Z.A. Stotsko, O.A. Kuzin [and others]// Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2020. – V. 100, Issue 1. – P. 21-25. (*наукометричні бази Scopus, Directory of Open Access Journals, Index Copernicus, Google Scholar*) – Здобувач запропонував підходи до вибору раціональних технологічних режимів, що підвищують контактну довговічність сталі 40X13.

15. The use of computational contact mechanics approaches to assess the performance of parts bearing stress concentrators/ B.A. Lyashenko, Z.A. Stotsko, O.A. Kuzin [and others]// Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2020. – V. 103, Issue 1. – P. 25-32. (*наукометричні бази Scopus, Directory of Open Access Journals, Index Copernicus, Google Scholar*) – Здобувач провів дослідження мікроструктури, запропонував алгоритм використання результатів досліджень гребенів залізничних коліс для оптимізації технологій поверхневого зміцнення.

16. Кузін О.А. Вплив технологічної спадковості на параметри надійності виробів / О.А. Кузін, Я.М. Кусий, В.Г. Топільницький // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2015. – №1/1 (21). – С. 15-21 (*Наукометричні бази*

РИНЦ, Ulrich's Periodicals Directory, Index Copernicus, DRIVER) – Здобувач обґрунтував доцільність використання методів визначення розсіяної пошкодженості для оцінювання технологічної спадковості виробів.

17. Кусий Я.М. Вплив технологічного маршруту оброблення на формування міжзеренної пошкодженості / Я.М. Кусий, О.А. Кузін, М.О. Кузін // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2016. – № 1/5 (79). – С. 39-47 (**Наукометричні бази Scopus, РИНЦ, Ulrich's Periodicals Directory, Index Copernicus**). – Здобувач використав метод *LM-твердості* для визначення технологічної пошкодженості виливків, провів аналіз отриманих результатів.

18. Kuzin O. Analysis of technological damageability of castings manufactured in sand molds / O. Kuzin, J. Kusyi, N. Kuzin // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2017. – № 3 (35). – С. 17-23. (**Наукометричні бази Index Copernicus, Drive, Base, Ulrich's, Periodicals Directory, РИНЦ**) – Здобувач визначив розсіяння характеристик твердості різних зон виливка.

19. Nazarovets O.B. Features of structure changing of copper wires in terms of the complex action of current and high temperatures/ O.B. Nazarovets, V.L. Gudym, O.A. Kuzin // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Science, III (b). – 2015. – Issue 54. – P. 47-52. (**Наукометричні бази Index Copernicus, Google Scholar, Directory of Research Journal Indexing, Ulrich's Web Global Serials Directory**) – Здобувач дослідив вплив структури на характер руйнування мідного сплаву в умовах температурних навантажень.

20. Кузін О.А. Роль технологічних режимів у формуванні пошкодженості контактних пластин електровозів, отриманих методом порошкової металургії / О.А. Кузін, О.С. Мінеєв, М.О. Кузін // Залізничний транспорт України. – 2015. – № 6. – С. 33-40. (**Наукометрична база РИНЦ**) – Здобувач визначив значення розсіяння характеристик твердості контактних пластин струмоприймачів електровозів.

21. Фетисова М.М. Влияние состояния межфазных и межзеренных границ на склонность улучшаемых сталей к хрупкому разрушению/ М.М. Фетисова, О.А. Кузін, Т.П. Коврова // Адгезия расплавов и пайка материалов. – 1987. – № 19. – С.68-72. – Здобувач провів виплавлення і термічну обробку сталей, випробовування на ударний згин зразків, аналіз результатів досліджень.

22. Фетисова М.М. Влияние микролегирования бором и РЗМ на межзеренное разрушение улучшаемых сталей / М.М. Фетисова, О.А. Кузін, Т.П. Коврова // Капиллярные и адгезионные свойства расплавов. – Киев: Наукова думка, 1987 – С.110-114. – Здобувач провів термічну обробку сталей, запропонував механізм впливу мікродобавок на структуру поверхонь поділу зерен.

23. Фетисова М.М. Особенности химического и фазового состава приграничных зон зерен и зернограничное разрушение улучшаемых сталей / М.М. Фетисова, О.А. Кузін, Н.Н. Рачковская, Т.П. Коврова // Адгезия расплавов и пайка материалов. – 1992. – №27. – С.64-69. – Здобувач приймав участь у фрактографічних дослідженнях сталей 40ХС і 60С2, запропонував механізм впливу кремнію, вуглецю і азоту на міжзеренне руйнування сталей.

24. Кузін О.А. Оцінка структурно-енергетичного стану внутрішніх поверхонь розділу і його вплив на інтеркристалітне руйнування литих сталей / О.А. Кузін [та ін.] // В зб.: Науковий вісник. Проблеми деревообробки на рубежі ХХІ століття. – Вип. 9.5. – Львів: Прест. Інформ. – 1999. – С.249-252. – *Здобувач провів виплавлення сталей 30ХН3А, 30Х2Н4А, дослідив розподіл поверхонь поділу зерен по глибині рівчаків після іонно-плазмового травлення зразків.*

25. Kopylov V. Improving the energy efficiency of operation of the structures of the rolling stock by means of surface engineering/ V. Kopylov, O. Kuzin, N. Kuzin// MATEC Web of Conferences. 2nd International Scientific and Practical Conference “Energy-Optimal Technologies, Logistic and Safety on Transport” (EOT-2019). – 2019 – V. 294. (<https://doi.org/10.1051/mateconf/201929401008>) (*Наукометрична база Web of Science*) – *Здобувач провів експериментальні дослідження впливу відносної енергії поверхонь поділу зерен на зносотривкість сталі 40ХНМ.*

26. Кузін О.А. Вплив мікроструктури матеріалу костилів на їх руйнування / О.А. Кузін, Т.М. Мещерякова, М.О. Кузін //Залізничний транспорт України. – 2006. – №6. – С. 89-91. (*Наукометрична база РИНЦ*) – *Здобувач провів металографічні дослідження костилів залізничної колії після експлуатації на прямих і кривих ділянках малих радіусів.*

27. Фетисова М.М. Влияние раскисления и термической обработки на хладностойкость литой стали / М.М. Фетисова, О.А. Кузін, В.И. Кушпир, [и др.] // Вестник Львовского политехн. ин-та. Технология машиностроения и динамическая прочность машин. – № 190. – Львов: Вища школа. 1985. – С.87-89. – *Здобувач виплавив сталі, мікролеговані бором, алюмінієм, кальцієм і титаном, визначив їх ударну в'язкість і прогартовуваність.*

28. Фетисова М.М. Выбор оптимального химического состава улучшаемых борсодержащих сталей для холодной высадки / М.М. Фетисова, О.А. Кузін, В.И. Кушпир // Вестник Львовского политехн. ин-та. Оптимизация производственных процессов и технический контроль в машиностроении и приборостроении. – №228. – Львов: Вища школа. 1988. – С.69-71. – *Здобувач провів термічну обробку і випробовування на малоциклову втому мікролегованих сталей.*

29. Якубович Т.І. Вплив термічної обробки на зносостійкість валкової сталі/ Т.І. Якубович, О.А. Кузін, А.В. Страз // Вісник Львівського політехн. ін-ту. Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні і приладобудуванні. – №246. – Львів: Світ 1990. – С.79-81. – *Здобувач провів термічну обробку сталі 4Х4ВМФС, приймав участь у випробуваннях на зношування зразків.*

30. Кузін О.А. Оптимізація технології виплавки сталі електрошлакового переплаву для підвищення експлуатаційних властивостей литого шарошкового бурового інструменту / О.А. Кузін, Ю.О. Бистров, Н.М. Рачковська [та ін.]// Вісник Львівського політехн. ін-ту. Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні і приладобудуванні. – №255. – Львів: Світ 1991. – С.25-27. – *Здобувач провів металографічні дослідження і аналіз причин утворення тріщин при кристалізації біметалічних виливків.*

31. Кузін О.А. Вплив пластичної деформації на властивості литого інструменту електрошлакового переплаву / О.А. Кузін, Р.А. Яцюк, Т.М. Мещерякова // Вісник Державного університету «Львівська політехніка» Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні і приладобудуванні. – №281. – Львів: Львівська політехніка, 1994. – С.30-32. – *Здобувач приймав участь у визначення порога холодноламкості сталей, аналізі результатів фрактографічних досліджень.*

32. Мещерякова Т.М. Вплив внутрішніх поверхонь розділу на схильність до водневого окрихчення жароміцних сталей / Т.М. Мещерякова, О.А. Кузін, Р.А. Яцюк // Вісник Державного університету «Львівська політехніка» Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні і приладобудуванні. – №303. – Львів: Львівська політехніка, 1996. – С. 88-92. – *Здобувач провів визначення кількості поверхонь поділу зерен від глибини канавок після іонно-плазмового травлення сплавів, аналіз впливу зеренної структури на утворення пошкоджень у середовищі водню.*

33. Кузін О. Вплив термічної обробки на зношувальну стійкість сталі 38ХС /О. Кузін, С. Беспалов // Вісник Державного університету «Львівська політехніка» Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні і приладобудуванні. – №321. – Львів: Львівська політехніка, 1998 – С. 49-51. – *Здобувач провів оцінку впливу площі поверхонь поділу на зносотривкість сталі 38ХС після покращення.*

34. Кузін О. Використання іонно-плазмового травлення для аналізу структурно-енергетичного стану внутрішніх поверхонь розділу / О. Кузін, Т. Мещерякова, С. Беспалов // Вісник Державного університету «Львівська політехніка» Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні і приладобудуванні. – №359. – Львів: Львівська політехніка. 1999 – С.73-76. – *Здобувач провів дослідження поверхонь поділу зерен в сталі 60С2 у в'язкому і окрихченому станах.*

35. Кузін О.А. Структура і процеси зношування покращених сталей 40Х і 40ХНМ/ О.А. Кузін, С.А. Беспалов, П.Ю.Волосевич [та ін.]// Вісник НУ «Львівська політехніка». Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні і приладобудуванні. – 2001. – № 422. – С. 104-113. – *Здобувач провів аналіз впливу кількісних параметрів мікроструктури сталей 40Х і 40ХНМ після покращення на їх зносотривкість.*

36. Кузін О.А. Металознавчі аспекти руйнування кисневих балонів під час експлуатації / О.А. Кузін, Р.А. Яцюк, Т.М. Мещерякова [та ін.]// Вісник НУ «Львівська політехніка». Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні і приладобудуванні. – 2004. – № 515. – С. 122-128. – *Здобувач дослідив структуру і визначив механічні властивості матеріалів кисневих балонів, які зруйнувались під час експлуатації.*

37. Кузін О.А. Роль структури в процесах зношування ферито-перлітних сталей / О.А. Кузін, Т.М. Мещерякова, М.О. Кузін // Вісник ДНУЗТу – 2011. –

№ 37. – С.224-229. – *Здобувачем проведено визначення кількісних параметрів мікроструктури ферито-перлітних сталей.*

38. Кузін О.А. Вибір параметрів технологічної обробки маловуглецевої сталі з використанням підходів механіки / О.А. Кузін, Т.М. Мещерякова, М.О. Кузін // Українська академія друкарства. Поліграфія та видавнича справа. Науково-технічний збірник. – 2012. – № 2 (58). – С. 124-131. – *Здобувач дослідив вплив термічної обробки на коефіцієнт гомогенності Вейбула і пошкоджуваність сталі 17Г1С після прокатування.*

39. Кузін О.А. Структура і міжзеренна пошкоджуваність сталей/ О.А. Кузін, М.О. Кузін // Українська академія друкарства. Наукові записки. Науково-технічний збірник. – 2013. – № 4 (45). – С. 99-117. – *Здобувач провів дослідження мікроструктури, будови зломів сталей 40Х, 40ХС, 60С2, 60С2ХА, факторів, що сприяють утворенню міжзеренних пошкоджень.*

40. Кузін О.А. Будова приграничних зон зерен і міжзеренне руйнування сталей / О.А. Кузін, М.О. Кузін// Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – 2013. – № 760. – С. 94-100. – *Здобувач провів аналіз моделей, що описують вплив будови поверхонь поділу зерен на опір сталей до утворення міжзеренних пошкоджень.*

41. Кузін М.О. Вплив мікроструктури на стійкість проти спрацювання нероз'ємних з'єднань рейок після термітного зварювання/ М.О. Кузін, О.А. Кузін, Т.М. Мещерякова // Наукові записки. Українська академія друкарства. Науково-технічний збірник. – 2006. – №2 (10). – С. 85-97. – *Здобувач провів дослідження зносотривкості зразків та параметрів їх структури.*

Авторські свідоцтва і патенти

42. А.с. 1560609 ССРСР. Сталь / М.М. Фетисова, Э.И. Плешаков О.А. Кузин и др. – Заявл. 19.01.1987. – Опубл. 30.04.1990. Бюл. № 18. – *Здобувач приймав участь у виплавленні запропонованої сталі визначенні її ударної в'язкості.*

43. А.с. 1693087 ССРСР. Способ термической обработки сталей / О.А. Кузин, Т.И. Якубович, М.М. Фетисова – Заявл. 6.10.1989. – Опубл. 23.11.1991. Бюл. № 43. – *Здобувач проводив термічну обробку штампованої сталі 4Х4ВМФС.*

44. Патент України №3085. Сталь. МК С22 С38/32/ Н.М. Рачковська, О.А. Кузін. – Заявл. 08.07.1991. – Опубл. 26.12.1994. Бюл. № 5-1. – *Здобувач проводив виплавлення і термічну обробку запропонованої сталі.*

45. Патент України №3086. Сталь. МК С22 С38/12/ О.А. Кузін, Н.М. Рачковська. – Заявл. 07.08.1991. – Опубл. 26.12.1994. Бюл. № 5-1. – *Здобувач проводив виплавлення, термічну обробку і визначення властивостей при випробовуваннях на розтяг запропонованої сталі.*

46. Патент Российской Федерации №2016126 МК С22 С38/32/ Н.М. Рачковская, О.А. Кузин. – Заявл. 08.07.1991. – Опубл. 15.07.1994. Бюл. № 13. – *Здобувач проводив виплавлення і термічну обробку запропонованої сталі.*

47. Патент Российской Федерации №2016124 МК С22 С38/12/ О.А. Кузин, Н.М. Рачковская. – Заявл. 08.07.1991. – Опубл. 15.07.1994. Бюл. № 13. – *Здобувач проводив виплавлення, термічну обробку і визначення властивостей при випробовуваннях на розтяг запропонованої сталі.*

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

48. Кузін О.А. Використання інваріантного моделювання для підвищення експлуатаційної надійності конструкційних сталей / О.А. Кузін // Нові конструкційні сталі і сплави та методи їх обробки для підвищення надійності і довговічності виробів / Тези доп. VI Міжнар. наук.-техн. конф. – Запоріжжя, 1995. – С.20.

49. Принципи вибору різноякісних характеристик внутрішніх поверхонь розділу з метою підвищення властивостей конструкційних сталей / О.А. Кузін [та ін.]// Конструкційні та функціональні матеріали: Тез. доп. II Міжнар. конф. – Львів, 1997. – С.123. – *Здобувач провів дослідження розподілу поверхонь поділу зерен за глибиною рівчаків травлення в покращувальних сталях.*

50. Кузін О.А. Роль структури в процесах зношування нероз'ємних з'єднань рейок після термітного зварювання / О.А. Кузін, Т.М. Мещерякова, М.О. Кузін // Тези 68-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2008. – С. 109. – *Здобувач дослідив кількісні параметри мікроструктури нероз'ємних з'єднань рейок.*

51. Кузін О.А. Вплив відпускнуї крихкості на процеси зношування конструкційних сталей / О.А. Кузін, Т.М. Мещерякова// Тези 69-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2009. – С. 256. – *Здобувач дослідив зносотривкість сталей 40, 40ХС і 40ХНМ після покращення, а також окрихчувальної обробки.*

52. Кузін О.А. Оптимізація структурно-енергетичного стану внутрішніх поверхонь розділу з використанням інваріантних моделей / О.А. Кузін // Наукові праці міжнародної наукової конференції «Іван Фещенко-Чопівський вчений і патріот». – Львів, 2009. – С. 61.

53. Кузін О.А. Оптимізація мікроструктури для усунення інтеркристалітного руйнування покращувальних сталей / О.А. Кузін // Тези 70-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2010. – С. 283-284.

54. Кузін О.А. Шляхи підвищення експлуатаційних характеристик контактних пластин струмоприймачів електровозів / О.А. Кузін, Т.М. Мещерякова, О.С. Мінеєв, М.О. Кузін // Тези 71-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2011. – С. 361-363. – *Здобувач дослідив вплив хімічного складу на зносотривкість контактних пластин.*

55. Кузін О.А. Використання підходів механіки для оптимізації параметрів технологічної обробки маловуглецевої сталі / О.А. Кузін, Т.М. Мещерякова, М.О. Кузін // Тези 72-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2012. – С. 262-264. – *Здобувач провів дослідження зносотривкості покращувальних сталей 40X, 40XC і 40XHM.*

56. Кузін О.А. Міжзеренне руйнування економнолегованих сталей після покращення / О.А. Кузін, Т.М. Мещерякова, М.О. Кузін // Тези 73-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2013. – С. 260-261. – *Здобувач приймав участь у проведенні експериментів, узагальненні результатів досліджень.*

57. Кузін О.А. Оптимізація параметрів технологічної обробки контактних пластин струмознімачів електровозів з використанням підходів механіки / О.А. Кузін, Т.М. Мещерякова, М.О. Кузін [та ін.]// Тези 73-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2013. – С. 262-263. – *Здобувачем проведено визначення коефіцієнта гомогенності Вейбула в контактних пластинах струмознімачів електровозів.*

58. Кузін О. Вплив умов отримання, виливків на формування технологічних пошкоджень / Олег Кузін, Ярослав Кусий, Володимир Топільницький // Тези доповідей 12 міжнародного симпозіуму українських інженерів-механіків. Львів, 28-29 травня, 2015. – С. 115-116. – *Здобувач приймав участь в проведенні експериментів, провів аналіз технологічної пошкодженості виливків в залежності від умов кристалізації.*

59. Кусий Я.М. Роль технологічних пошкоджень у формуванні поверхневих концентраторів напружень литих заготовок / Я.М. Кусий, О.А. Кузін, В.Т. Топільницький // Збірник праць V-ої Всеукраїнської наукової технологічної конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні», 8-12 лютого 2016 р. – С. 57-60. – *Здобувач приймав участь в проведенні експериментів, визначив технологічну пошкодженість вилитої заготовки.*

60. Кусий Я.М. Оцінка технологічної пошкоджуваності виливків за параметрами розсіювання характеристик твердості / Я.М. Кусий, О.А. Кузін // Збірник наукових праць VI-ої Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні». – Львів, 2017. – С. 62-65. – *Здобувач приймав участь у проведенні експериментів, визначив технологічну пошкоджуваність вилитої заготовки в залежності від її розмірів.*

61. Кусий Я. Оцінка пошкоджуваності заготовок після лиття в піщані форми / Я. Кусий, О. Кузін, В. Топільницький // Матеріали 13-го Міжнародного симпозіуму українських інженерів-механіків у Львові. – Львів, 2017. – С. 160 – 161. – *Здобувач приймав участь в проведенні експериментів, провів оцінку технологічної пошкодженості вилівка.*

62. Кусий Я.М. Роль розміщення елементів конструкцій у формуванні технологічних пошкоджень виливка/ Я.М. Кусий, О.А. Кузін// Збірник наукових праць 8 Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивні технології у машинобудуванні». – Івано-Франківськ – Яремче, 2019. – С. 152-154. – *Здобувач провів вимірювання розсіяння характеристик твердості для оцінювання рівня технологічної пошкоджуваності різних зон виливка.*

63. Копылов В.И. Структура границ зерен и износостойкость материалов после плазменной обработки/ Копылов В.И., Кузин О.А., Кузин Н.О., Люшенко Е.О.// Матеріали Х Міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем». – Чернігів, 2020. – С. 63-66. – *Здобувач дослідив кількісні параметри мікроструктури шару плазмового зміцнення.*

64. Kopylov V.I. Using the capabilities of open CAE-systems for optimizing surface engineering technologies/ Kopylov V.I., Kuzin O.A., Kuzin N.O.// VI Міжнародна науково-технічна конференція «Актуальні проблеми інженерної механіки та технології машинобудування». м. Миколаїв. – 2020. – С. 63-65. – *Здобувач провів експериментальні дослідження параметрів властивостей поверхневого шару після плазмового зміцнення.*

65. Копилов В.І. Особливості мікроструктури і утворення дефектів в рейкових з'єднаннях при термітному зварюванні / Копилов В.І., Кузін О.А., Кузін М.О., Єрко О.О., Люшенко Є.О. // Матеріали VI-ої Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу – 2020», випуск 6. – Херсон: ХНТУ, 2020. – С. 38-39. – *Здобувач дослідив мікроструктуру зони термітного зварювання залізничних рейок.*

66. Копилов В.І. Використання моделей і методів управління границями зерен для підвищення експлуатаційних властивостей покращувальних сталей/ Копилов В.І., Кузін О.А., Кузін М.О. // Матеріали Міжнародної наукової конференції «Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 10». – Київ: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2020. – С. 238-241. – *Здобувач дослідив вплив структурно-енергетичного стану поверхонь поділу зерен на утворення міжзеренних пошкоджень, визначив параметри мікроструктури сталей з підвищеною довговічністю.*

Публікації, які додатково відображають наукові результати дисертації:

67. Кузін О.А. Металознавство та термічна обробка металів. Підручник/ О.А. Кузін, Р.А. Яцюк. – Львів: Афіша. – 2002. – 300 с. (Рекомендований Міністерством освіти і науки України як підручник для вищих навчальних закладів; лист № 14/18.2-672 від 17.05.2001 р.)

68. Кузін О.А. Металознавство та термічна обробка металів. Підручник/ О.А. Кузін, Р.А. Яцюк. – К.: Основа, 2005. – 324 с.

Здобувач запропонував концепцію підручника, написав розділи 1, 2, 3, 6...17.

АНОТАЦІЯ

Кузін О. А. Керування властивостями поверхонь конструкційних сталей і сплавів спрямованим впливом на складові їх структури. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – зварювання та споріднені процеси і технології. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2021

Дисертаційна робота присвячена вибору режимів технологій зварювання, термічної обробки, легування, мікролегування, плазмового зміцнення для отримання виробів з підвищеною експлуатаційною надійністю керуванням структурно-енергетичним станом поверхонь поділу структурних складових з врахуванням експлуатаційних чинників.

На основі ієрархічного моделювання будови полікристалів запропоновані нові підходи і створено алгоритми для визначення взаємозв'язків між структурою поверхонь поділу конструкційних матеріалів і їх експлуатаційною надійністю.

З використанням розроблених моделей структури виявлені механізми впливу домішок, легуючих і мікролегуємих елементів на параметри міцності поверхонь поділу зерен.

Визначені технологічні режими управління структурно-енергетичним станом поверхонь поділу, що забезпечують усунення інтеркристалітного руйнування сплавів.

Реалізація запропонованих підходів використана для підвищення експлуатаційної надійності нероз'ємних з'єднань рейок після термічного зварювання, шару плазмового зміцнення гребенів залізничних коліс, порошкових виробів шляхом оптимізації кількісних параметрів поверхонь поділу.

Ключові слова: зварювання, легування, мікролегування, термічна обробка, плазмове зміцнення, інженерія поверхні, зернограничне конструювання структури, інтеркристалітне руйнування.

АННОТАЦИЯ

Кузин О.А. Управление свойствами поверхностей конструкционных сталей и сплавов направленным воздействием на составляющие их структуры. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.03.06 – сварка, родственные процессы и технологии. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» МОН Украины, Киев, 2021.

Диссертация посвящена выбору режимов технологий сварки, термической обработки, легирования, микролегирования, плазменного упрочнения для получения изделий с повышенной эксплуатационной надежностью управлением структурно-энергетическим состоянием поверхностей раздела структурных составляющих с учетом эксплуатационных факторов.

На основе иерархического моделирования строения поликристаллов предложены новые подходы и созданы алгоритмы для определения взаимосвязей между структурой поверхностей раздела конструкционных материалов и их эксплуатационной надежностью.

С использованием разработанных моделей структуры выявлены механизмы влияния примесей, легирующих и микролегирующих элементов на параметры прочности поверхностей раздела зерен.

Определены технологические режимы управления структурно-энергетическим состоянием поверхностей раздела, которые обеспечивают устранение интеркристаллитного разрушения сплавов.

Реализация предложенных подходов использована для повышения эксплуатационной надежности неразъемных соединений рельсов после термитной сварки, слоя плазменного упрочнения гребней железнодорожных колес, порошковых изделий путем оптимизации количественных параметров поверхностей раздела.

Ключевые слова: сварка, легирование, микролегирование, термическая обработка, плазменное упрочнение, инженерия поверхности, зернограничное конструирование структуры, интеркристаллитное разрушение.

ABSTRACT

Kuzin O.A. Control of surface properties of structural steels and alloys by directed action on their constituent structures. - Manuscript.

Dissertation for academic degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.03.06 – Welding and related processes and technologies. – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2021.

The dissertation is devoted to the selection of modes of welding technologies, heat treatment, alloying, microalloying, plasma hardening to obtain products with increased operational reliability by controlling the structural and energy state of the interface, taking into account operational factors.

The principles of using system approaches for the physical substantiation of the optimal modes of surface engineering technologies, depending on the operating conditions of the products, have been developed. An invariant model of the structure of polycrystalline materials with elements of different hierarchical levels has been constructed, which makes it possible to evaluate the influence of its quantitative parameters on the resistance to softening of interfaces and the ability of alloys to form grain-boundary damage.

Using the energy approach for describing continuous nonlocal media, mathematical relations are constructed for the model of polycrystalline systems. It is shown that the tendency to the formation of intergranular damage and destruction of alloys is influenced not only by the absolute values of the parameters of the properties of microvolumes, but also by their gradient.

On the basis of the system and continual models of the gradient structure of the interfaces between the structural components developed in the work, the parameters of the local volumes of alloys in which damage occurs during technological treatments and external loads are revealed.

The developed algorithms made it possible to assess the strength of the interfaces between the structural components, revealed the regularities of the formation of intergranular damage and intercrystalline cracks in structural alloys and products after technological treatments. A criterion is proposed that characterizes the tendency to intergranular fracture of structural steels and alloys. In accordance with the quantitative characteristics of the gradient of changes in properties near the interfaces, polycrystalline materials have a low, stable, and catastrophic tendency to intergranular fracture.

Recommendations are presented for improving the operational reliability of alloys and products by adjusting the parameters of the interfaces, which are implemented in energy and resource-saving technologies and tested in production conditions.

Hardening from the temperatures at which the graininess of the improved steels is formed is accompanied by the formation of triple joints of grains, the interfaces of which differ significantly in energy. The interfaces between the joints with high energy values correspond to the dimensions of the scattered damage that are formed under external loads. It is shown that an increase in the duration of vital parts is achieved with a decrease in the number of local volumes with an increased energy level in alloys. Large-angle interfaces with minimal energy differences are formed under conditions of optimal temperature and time modes of heat treatment. The use of methods of hierarchical modeling and computational materials science allows the implementation of technical solutions to improve the operational reliability of products at a lower cost of their life cycle.

On the basis of ideas about the role of the structural-phase state of interfaces in the processes of formation of intergranular damage, using the energy criterion of the strength of grain interfaces, the mechanisms of the influence of impurities, alloying and microalloying elements on the intercrystalline fracture of improved steels are revealed. The role of technological treatment modes in the formation of local volumes of surface layers of products with a high energy gradient is shown.

The results of quantitative and qualitative studies of the influence of technological treatments and the chemical composition of alloys on the strength of interfaces and the processes of softening of border zones have been carried out.

The modes of technological treatments are established, in which the structural-energy state of the interfaces is formed under the conditions of welding, alloying, microalloying, plasma hardening and heat treatment, which provides an increase in the resistance to intercrystalline destruction of products under contact and dynamic loads.

The implementation of the approaches developed in this work is used to increase the operational reliability of permanent rail joints after thermite welding, the surfaces of the flanges of railway wheels during plasma hardening, powder products by optimizing the quantitative parameters of the microstructure and the structural-energy state of the interfaces.

Key words: welding, alloying, microalloying, heat treating, plasma hardening, surface engineering, grain boundary structure design, intercrystalline fractures.

Підписано до друку 31.03.2021.
Формат 60×84 $\frac{1}{16}$. Умовн. друк. арк. 2,55.
Зам. № 3/21. Тираж 100 прим.

Видруковано у Дослідно-видавничому центрі
Наукового товариства ім. Шевченка

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру
суб'єктів видавничої справи ДК № 884 від 04.04.2002 р.