

Міністерство освіти і науки України  
Запорізький національний технічний університет

КУНИЦЬКА ІРИНА МИКОЛАЇВНА

УДК 669.24:620.183

ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ДЕФОРМАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ  
ПРОКАТКИ СПЕЦІАЛЬНИХ СТАЛЕЙ З УРАХУВАННЯМ ЇХ ВПЛИВУ НА  
СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ

05.16.01 – Металознавство та термічна обробка металів

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Запоріжжя – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на Державному підприємстві «Український науково-дослідний інститут спеціальних сталей, сплавів та феросплавів ДП «УкрНДІспецсталь» Міністерства економічного розвитку і торгівлі України, м. Запоріжжя.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент **Климов Олександр Володимирович**, Запорізький національний технічний університет МОН України, декан інженерно-фізичного факультету фізико-технічного інституту, доцент кафедри фізичного матеріалознавства.

Офіційні опоненти:

лауреат премії ім. Г.В. Курдюмова НАН України, доктор технічних наук, старший науковий співробітник **Бобирь Сергій Володимирович**, Інститут чорної металургії імені З.І. Некрасова НАН України, старший науковий співробітник відділу проблем структуроутворення та властивостей чорних металів.

лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, доктор технічних наук, професор **Міщенко Валерій Григорович**, Запорізький національний університет МОН України, завідувач кафедри прикладної фізики.

Захист відбудеться «22» листопада 2016 р. о 13<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 17.052.01 у Запорізькому національному технічному університеті за адресою: 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64, ауд. 153.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Запорізького національного технічного університету за адресою: 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64 та на сайті університету у розділі «Наука» – «Спеціалізована вчена рада».

Автореферат розісланий «19» жовтня 2016 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
Д 17.052.01

О.А. Мітяєв

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Винятково важливими проблемами виробництва конкурентоспроможного сортового прокату спеціальних сталей є забезпечення підвищеного, регламентованого стандартами рівня фізико-механічних властивостей та досягнення ресурсозбереження під час тривалого деформаційно-термічного перероблення. Однією з ефективних технологій отримання такого прокату є високотемпературна термомеханічна обробка (ВТМО). Структура та властивості прокату конструкційних, корозійностійких, підшипникових сталей після ВТМО визначаються процесами рекристалізації аустеніту, яка при гарячій прокатці є недостатньо вивченою та заслуговує особливої уваги.

Перспективним напрямком розвитку ВТМО є реалізація ресурсозберігаючих технологій суміщеної (комплексної) деформаційно-термічної обробки в прокатних цехах, що дозволить використовувати тепло прокатного нагріву під час операцій гартування, нормалізації, відпалу. При цьому усувається термообробка або скорочується її тривалість в термічних цехах. Важлива роль у вирішенні цих питань пов'язана, по-перше, із проектуванням та створенням сучасних модульних ліній комплексної деформаційно-термічної обробки прокату. По-друге – з використанням ефективних процесів формування структури в ході гарячої прокатки, що дозволить отримати найбільші структурні та ресурсозберігальні ефекти при термообробці спеціальних сталей в лініях сортопрокатних станів.

У зв'язку з цим актуальним стає установлення впливу технологій суміщеної деформаційно-термічної обробки, з урахуванням особливостей структуроутворення та кінетики рекристалізації аустеніту при багатопрохідній гарячій деформації, на рівень фізико-механічних властивостей сортового прокату спеціальних сталей.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертація виконана в рамках держбюджетних та госпдоговірних науково-дослідних робіт, проведених Державним підприємством «Український науково-дослідний інститут спеціальних сталей, сплавів та феросплавів ДП «УкрНДІспецсталь»: НДР «Розроблення для запланованих при техпереозброєнні спецметалургії нових сортопрокатних станів» (2003 р., № держреєстрації 0101U001685); НДР «Аналіз сучасного стану та прогнозування розвитку перспективних технологій виробництва спеціальних сталей, сплавів та феросплавів» (2005-2006 рр., х/д № 337мч-05); НДДТР «Розроблення ресурсозберігаючої технології регульованої пластичної деформації, суміщеної з термічною обробкою прокату для отримання підвищених фізико-механічних властивостей спецсталей» (2008-2009 рр., № держреєстрації 0108U006989); НДР «Аналіз стану та прогнозування розвитку перспективних енергозберігаючих деформаційно-термічних технологій виробництва конкурентоспроможних спецсталей та сплавів» (2011 р., № держреєстрації 0111U009039); НДР «Експертні дослідження (аналіз) стану проектування та експлуатації в передових країнах ліній для суміщеної деформаційно-термічної обробки прокату спеціальних сталей» (2016 р., г/д № 15/49-01).

**Мета та завдання дослідження.** Мета роботи – установити особливості структуроутворення та кінетики рекристалізації аустеніту при багатопрохідній гарячій деформації та розробити технології суміщеного деформаційно-термічного оброблення для отримання сортового прокату спеціальних сталей з підвищеним рівнем фізико-механічних властивостей.

Для досягнення мети в роботі були поставлені та вирішені такі **завдання**:

- провести аналіз сучасних уявлень із формування мікроструктури та властивостей прокату спеціальних сталей в процесі багатопрохідної гарячої пластичної деформації, у тому числі суміщеної з термічною обробкою, що виконується з використанням тепла прокатного нагріву;
- дослідити кінетику рекристалізації аустеніту та особливості формування динамічно рекристалізованих зерен при багатопрохідній гарячій деформації;
- установити особливості виділення в рекристалізованому аустеніті вторинних карбідів, сульфідів та інших фаз в гарячедеформованих корозійностійких та підшипникових сталях;
- розробити модель структуроутворення аустеніту при гарячій прокатці спеціальних сталей;
- розробити технологічні схеми суміщеної деформаційно-термічної обробки; провести порівняльні дослідження мікроструктури та механічних властивостей прокату спеціальних сталей після суміщеної деформаційно-термічної обробки та традиційної термообробки з окремого нагріву;
- розробити рекомендації до технологічних завдань стосовно температурних та деформаційних режимів, обладнання для проектування нових модульних ліній та реалізації технологій комплексної деформаційно-термічної обробки сортового прокату спеціальних сталей.

*Об'єкт дослідження* – процеси структуроутворення та кінетика рекристалізації аустеніту при багатопрохідній гарячій деформації спеціальних сталей.

*Предмет дослідження* – закономірності впливу температурно-деформаційних параметрів прокатки на формування фізико-механічних властивостей сортового прокату спеціальних сталей із суміщеною деформаційно-термічною обробкою.

*Методи дослідження.* Металографічні дослідження виконані оптичною світловою мікроскопією. Структуру границь зерен, дислокаційну структуру, будову та склад фаз досліджували методами електронної та растрової мікроскопії, оже-спектроскопії, мікрорентгеноспектрального аналізу. Вивчення кінетики процесу рекристалізації здійснено за допомогою кількісної металографії, дюрометрії та мікродюрометрії. Визначені механічні властивості при нормальних температурах.

**Наукова новизна одержаних результатів.** В роботі розглянуто шляхи подальшого розвитку уявлень із структуроутворення та кінетики рекристалізації аустеніту в процесі багатопрохідної гарячої пластичної деформації. Уточнено вплив динамічної рекристалізації при гарячій прокатці на рівень фізико-механічних властивостей спеціальних сталей після комплексної (суміщеної) деформаційно-термічної обробки.

Основні положення наукової новизни:

1. Вперше побудована діаграма кінетики рекристалізації гарячедеформованого аустеніту сталі 10X17H13M2T, за допомогою якої визначається розвиток процесу рекристалізації при температурах гарячої прокатки.

Уточнено процеси структуроутворення аустеніту під час гарячої прокатки за температурно-деформаційними режимами, які використовуються в умовах сортопрокатних станів. Установлено, що в корозійностійких аустенітних сталях 10X17H13M2T та 12X18H10MT рекристалізація може починатися вже в осередку деформації внаслідок динамічної рекристалізації, а упродовж післядеформаційної витримки вона іде значно повільніше. Одержані дані вказують на можливість використання динамічної рекристалізації в кожному проході для отримання найбільшого об'єму рекристалізації при гарячій прокатці.

2. Вперше підтверджено ефект формування зародків рекристалізованих зерен аустеніту в осередку деформації на основі розрахунків енергії активації процесу динамічної рекристалізації для умов гарячої прокатки сталі 10X17H13M2T.

3. Вперше запропоновано для оцінки розвитку рекристалізації при гарячій прокатці використовувати температурний критерій, що являє собою температуру, при якій утворюється 50 % динамічно рекристалізованих зерен. Це дозволяє оптимізувати температурно-деформаційні параметри та зменшити розмір зерна спеціальних сталей завдяки розвитку процесу динамічної рекристалізації.

4. Запропоновано пакетний механізм та уточнено процеси динамічної рекристалізації: локалізація гарячої деформації в грубих смугах (пакетах) ковзання, перерозподілення та взаємодія дислокацій внаслідок різної густини дефектів по обидва боки границі зсувного пакету, формування зародків динамічно рекристалізованих зерен з великокутовими границями. Отримані нові експериментальні дані, що вказують на можливість існування зв'язку між зсувним механізмом гарячої деформації та утворенням динамічно рекристалізованих зерен.

5. Розширено уявлення про особливості дифузійних процесів на границях аустенітного зерна під впливом гарячої деформації та рекристалізації підшипникових сталей типу ШХ15. Виявлено збільшення концентрації вуглецю і хрому на границях вихідних та динамічно рекристалізованих зерен, що вказує на значний вплив динамічної рекристалізації на можливість зменшення протяжності та товщини карбідної сітки при подальшому охолодженні. Це сприятиме прискоренню процесів сфероїдизації карбідів під час відпалу прокату підшипникових сталей.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у розробленні удосконалених технологій комплексної деформаційно-термічної обробки прокату корозійностійких, підшипникових і конструкційних сталей. Запропоновано технологічні схеми, схеми розташування обладнання, розроблені рекомендації до технологічних завдань (ТЛЗ) на проектування модульних ліній суміщеної обробки.

В результаті дослідно-промислового та лабораторного випробування гартування, нормалізації, відпалу в умовах прокатних станів ПАТ «Дніпроспецсталь» та ДП «УкрНДІспецсталь» одержано підвищення рівня фізико-механічних властивостей прокату спеціальних сталей. Покращено техніко-економічні показники виробництва прокату за рахунок зменшення тривалості

термообробки на 77 % для термополіпшуваних конструкційних сталей; на 27 % для підшипникових сталей із сфероїдизуючим відпалом. Показано можливість виключення окремого нагріву в термічних цехах під нормалізацію конструкційних сталей та гартування корозійностійких сталей.

При використанні режимів деформаційно-термічної обробки в підшипникових сталях зменшено виділення карбідної сітки по границям зерна та розмір карбідів, покращено мікроструктуру зернистого перліту після відпалу, забезпечені нормативні вимоги сучасних стандартів. Технологія деформаційно-термічної обробки впроваджується у виробництво сортового прокату підшипникових сталей із сфероїдизуючим відпалом на стані 325 на ПАТ «Електрометалургійний завод «Дніпрспецсталь» ім. А.М. Кузьміна» (акт від 16.08.2016 р.).

Одержані в роботі результати можуть бути використані на діючому обладнанні та після реконструкції прокатно-термічного виробництва металургійних заводів. Отримання найбільш конкурентоспроможної продукції можливе в умовах створення нових модульних ліній суміщеної деформаційно-термічної обробки прокату спеціальних сталей.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати дисертаційної роботи одержані автором особисто. У друкованих працях за темою дисертації, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать: вибір методики та проведення промислових і лабораторних експериментів [2–8, 10, 13, 17]; металографічні та дюрOMETричні дослідження зразків, графічні залежності кінетики рекристалізації, зміни твердості та мікротвердості [3, 5, 10, 14, 15], перерозподілу вуглецю та хрому [6, 7, 9] під впливом гарячої деформації корозійностійких та підшипникових сталей; розрахунок ефективної енергії активації процесів рекристалізації [4]; розроблення, випробування та впровадження у виробництво сортового прокату технологій суміщеної деформаційно-термічної обробки спеціальних сталей [7, 11–13, 16, 17]. Наукові та експериментальні результати роботи одержано при підтримці керівника НДР із даного напрямку в ДП «УкрНДІспецсталь» – завідувача лабораторії фізичного металознавства, головного метролога, к.т.н. Спектора Якова Ісааковича.

**Апробація результатів дисертації.** Результати досліджень і матеріали дисертації доповідалися й обговорювалися на Міжнародній науково-технічній конференції «Теория и практика процессов пластической деформации» (Москва, 2004), Міжнародних науково-технічних семінарах «Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов» (Москва, 2006, 2011, 2014), IV-й Євразійській науково-практичній конференції «Прочность неоднородных структур» (Москва, 2008), VI-й Міжнародній конференції «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов» (Харків, 2005), Міжнародних конференціях «Современное материаловедение: достижения и проблемы» (Київ, 2005), «HighMatTech» (Київ, 2007, 2009, 2011, 2013), Міжнародних науково-практичних конференціях «Нові конструкційні сталі та стопи і методи їх оброблення для підвищення надійності та довговічності виробів» (Запоріжжя, 2005, 2008, 2010, 2014), «Строительство, материаловедение, машиностроение (Серия: Стародубовские чтения)» (Дніпропетровськ, 2011). В повному обсязі робота обговорювалася на розширеному семінарі кафедри фізичного

матеріалознавства, на засіданні міжкафедрального тематичного семінару Запорізького національного технічного університету.

**Публікації.** Основний зміст та результати роботи наведено в 17 друкованих працях, з них 5 в наукових зарубіжних виданнях, 5 в наукових фахових виданнях України, 7 в збірниках матеріалів і тез доповідей на науково-технічних конференціях.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертація складається з вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи – 184 сторінки друкованого тексту, у тому числі основного тексту – 131 сторінка, 12 таблиць, 49 рисунків, список використаних джерел з 167 найменувань на 20 сторінках, 5 додатків на 17 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обгрунтовано вибір і актуальність теми, сформульовані мета і завдання досліджень, а також наукова новизна і практичне значення отриманих результатів. Відзначено особистий внесок автора та наведено відомості про апробацію і публікації результатів дисертаційної роботи.

У **першому розділі** представлено аналіз літературних даних із впливу рекристалізації аустеніту при гарячій деформації на формування фізико-механічних властивостей спеціальних сталей при суміщеній деформаційно-термічній обробці. Відзначено, що під час багатопрохідної гарячої пластичної деформації легованих сталей мало вивченими є кінетика рекристалізації та структуроутворення аустеніту.

Установлено, що кінетика рекристалізації аустеніту в процесі гарячої прокатки вивчена упродовж витримки після деформації при різних температурах. Це пов'язано із значно меншим часом перебування металу в осередку деформації, ніж тривалість міждеформаційної паузи. Тому динамічна рекристалізація при гарячій прокатці є одним з питань, яке вивчалось у дисертації.

Роботами М.Л. Бернштейна, В.Д. Садовського, С.В. Добаткіна, Я.І. Спектора, Ю.В. Яценко та інших вчених показано, що вплив деформаційно-термічної обробки на покращення мікроструктури та властивостей спеціальних сталей визначається як пластичною деформацією аустеніту між прокатними валками, так і зміною структури в ході післядеформаційної паузи. Разом з тим, докладно не розглянута можливість регулювання розміру зерна, величини, морфології та розподілення карбідних, інтерметалідних та інших фаз під дією динамічної рекристалізації в сортовому прокаті конструкційних, корозійностійких, підшипникових сталей.

Показано, що для отримання конкурентоспроможного прокату спеціальних сталей потрібне нове сучасне прокатне і термічне обладнання та ресурсозберігаючі технології.

Обгрунтовано доцільність уточнення особливостей рекристалізації в процесі гарячої прокатки та розроблення удосконаленої технології деформаційно-термічної обробки конструкційних, корозійностійких, підшипникових сталей. Показано актуальність поставлених в роботі наукових і практичних завдань.

У **другому розділі** наведено дані про матеріали та методи досліджень. Досліджували аустенітні корозійностійкі сталі 10X17H13M2T, 12X18H10MT, 08X18H10T, підшипникові сталі ШХ15 та ШХ15СГ-В, конструкційну сталь 42ХМ.

Дослідження кінетики рекристалізації аустеніту здійснено на корозійностійких сталях 10X17H13M2T и 12X18H10MT в умовах однопрохідної та двопрохідної прокатки на лабораторному прокатному стані ДУО-250 ДП «УкрНДІспецсталь» при температурах 1000...1150 °С. Багатопохідну деформацію вивчено в процесі гарячого крутіння при 1100 °С на пластомірі «Irsid» (Франція) із регульованими ступенем деформації в кожному проході, кількістю проходів та тривалістю міждеформаційних пауз.

Випробування технології суміщеної деформаційно-термічної обробки спеціальних сталей проведено на прокатному стані ДП «УкрНДІспецсталь» та сортопрокатних станах 1050/950 і 325 ПАТ «Дніпроспецсталь».

Кінетика рекристалізації аустеніту вивчена металографічним методом, вимірюванням твердості та мікротвердості. Визначали об'єм рекристалізації точковим методом Глаголева, середній розмір рекристалізованих зерен аустеніту методом випадкових січних за ГОСТ 5639-82 на 100...600 зернах при збільшенні  $\times 530$  та  $\times 500$  на мікроскопах «MeF» (Reichert, Австрія) і «Неофот» («Карл Цейс», Німеччина).

Ультрадрібнозернисту структуру зразків сталі 10X17H13M2T після гарячого крутіння досліджено на фольгах на електронному мікроскопі Э-125 К.

Стан границь зерен аустеніту в сталі ШХ15 після гарячого крутіння вивчено на поверхні зламів зразків методом електронної оже-спектроскопії на оже-спектрометрі LAS 2000 («Рібер», Франція). Зображення зламів отримували на растровому електронному мікроскопі «Стереоскан». Аналіз розподілу хрому в карбідних смугах сталі ШХ15СГ при дослідженні режимів гомогенізації виконували на електронно-зондовому мікроаналізаторі МС-46 («САМЕСА», Франція).

Фазовий склад сульфідної евтектики та дисперсних карбідів по границях зерен аустеніту корозійностійких сталей із вмістом сірки 0,015...0,030 % досліджено на растровому електронному мікроскопі з мікроаналізатором SUPRA 40 WDS, («Карл Цейс», Німеччина).

Після деформаційно-термічної обробки дослідження та оцінку мікроструктури проводили металографічним методом. Механічні властивості визначали випробуваннями на розтягування згідно ГОСТ 1497-84, ударну вязкість згідно ГОСТ 9454-78. Вимірювали твердість за Вікерсом згідно ГОСТ 2999-75 на японському приладі «Akashi» при навантаженні 98,07 Н; мікротвердість на приладі ПМТ-3 при навантаженні 0,049 Н та 1,962 Н за методикою ГОСТ 9450-76.

У **третьому розділі** наведено результати вивчення особливостей кінетики та механізму рекристалізації аустеніту в процесі гарячої прокатки при температурах 1000...1150 °С корозійностійких сталей 10X17H13M2T і 12X18H10MT. Отримано графічні залежності кінетики рекристалізації сталей (рис. 1).

Однопрохідною прокаткою із ступенем деформації 23 % для сталі 10X17H13M2T при 1150 °С отримано 35 % динамічно рекристалізованих зерен. При 1050 °С та 1100 °С зафіксовано початкові стадії динамічної рекристалізації –

відповідно 2 і 6 % нових зерен (рис. 2). В сталі 12X18H10MT об'єм динамічно рекристалізованої структури складає 31 % при 1150 °С та 15 % при 1100 °С.

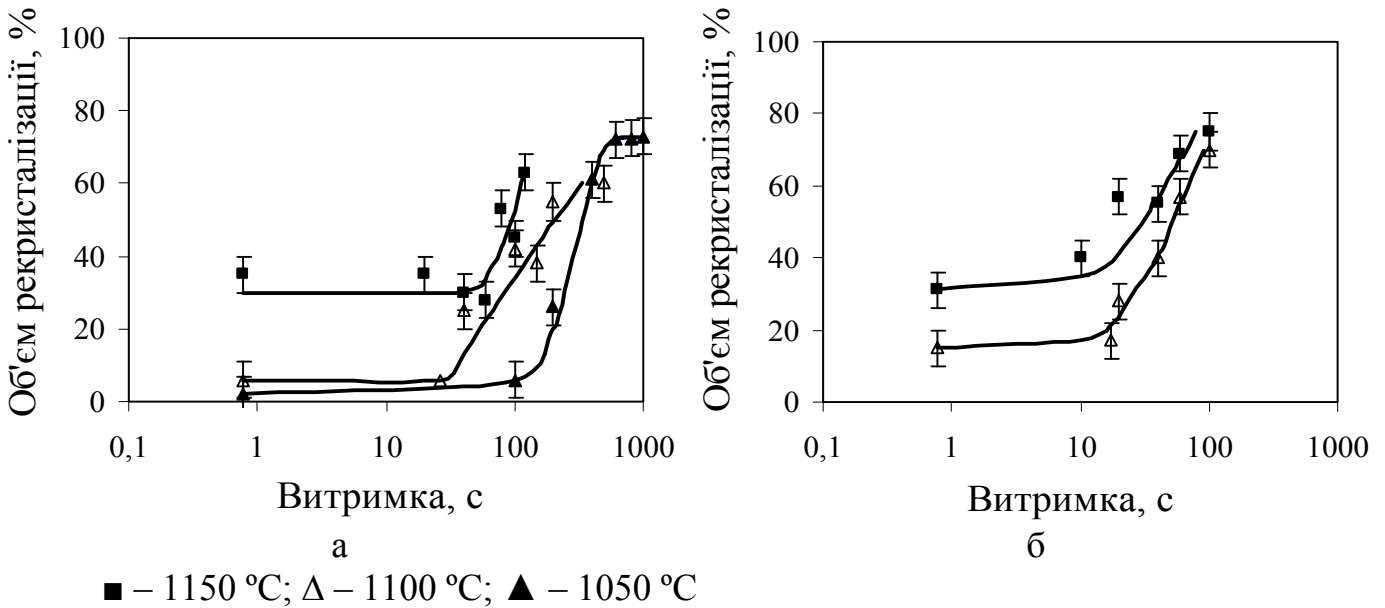
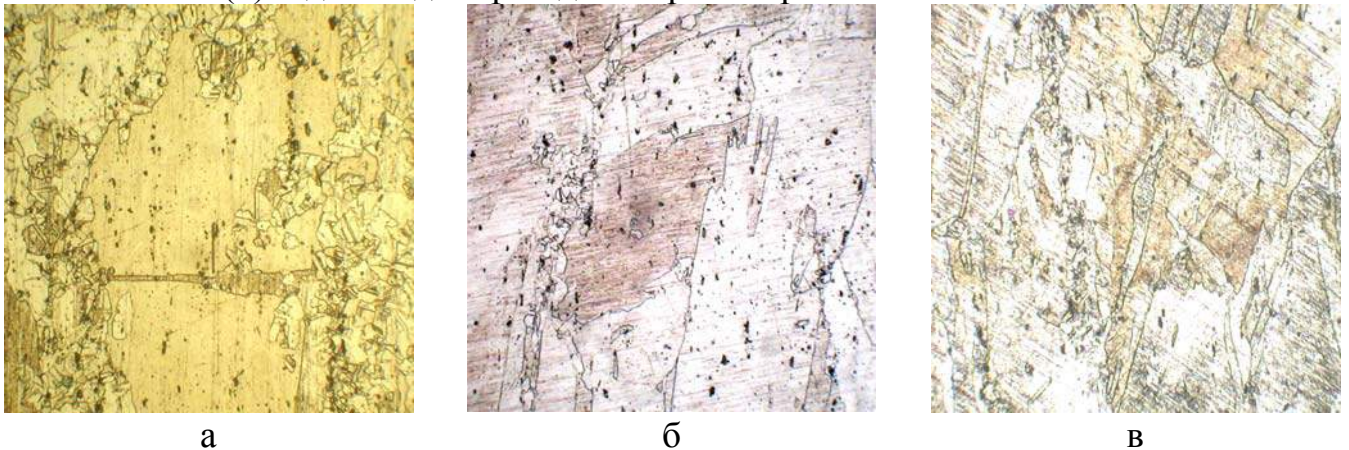


Рисунок 1 – Кінетика рекристалізації сталей 10X17H13M2T (а) та 12X18H10MT (б) під час однопрохідної гарячої прокатки.

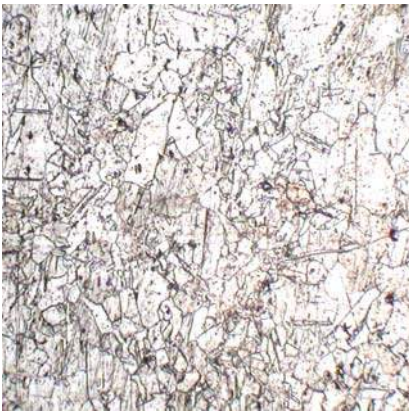


а – 1150 °С; б – 1100 °С; в – 1050 °С

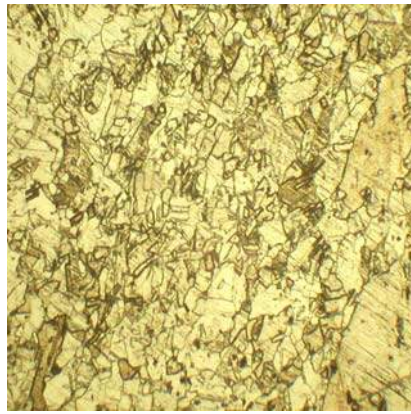
Рисунок 2 – Мікроструктура сталі 10X17H13M2T з динамічно рекристалізованими зернами при гарячій прокатці (x220).

Рекристалізація сталі 10X17H13M2T продовжувалася після витримки 40...100 с, а утворення 60...70 % нових зерен відповідало витримкам 400...1000 с (рис. 3). На основі отриманих графічних залежностей побудована діаграма кінетики рекристалізації аустеніту сталі 10X17H13M2T, за якою можна визначити розвиток процесу рекристалізації при температурах гарячої прокатки (рис. 4).

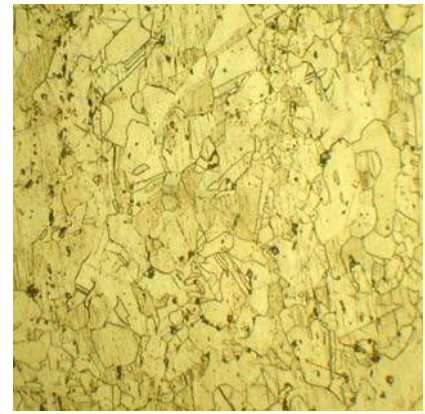
Установлено, що при температурах прокатки 1150 °С і 1100 °С мікротвердість  $H_{\mu p}$  перших рекристалізованих зерен в мікроструктурі, зафіксованій безпосередньо після виходу метала із осередку деформації, знаходиться на рівні 292 та 318 одиниць відповідно. Мікротвердість цих зерен є вищою за мікротвердість зерен, рекристалізованих упродовж витримки після прокатки – (272...284)  $H_{\mu p}$  при 1150 °С та (286...298)  $H_{\mu p}$  при 1100 °С (рис. 5).



а



б



в

а – 1150 °C, 80 с, 53 %; б – 1100 °C, 500 с, 60 %; в – 1050 °C, 600 с, 72 %

Рисунок 3 – Мікроструктура сталі 10X17H13M2T після гарячої прокатки при різних температурах і витримках; % – об'єм рекристалізації (х220).

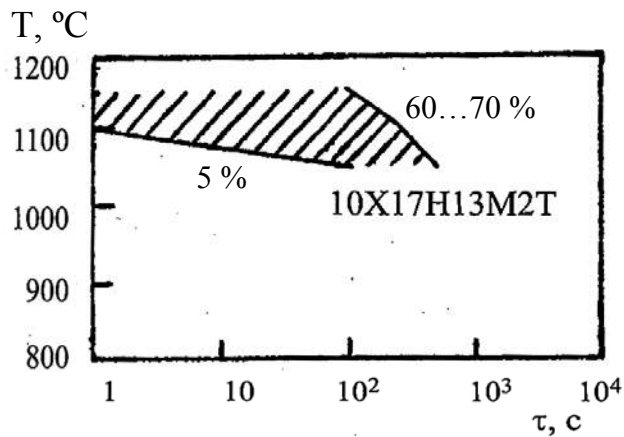
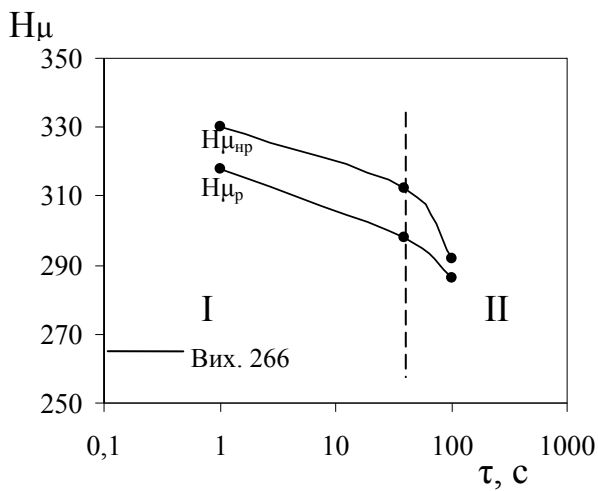
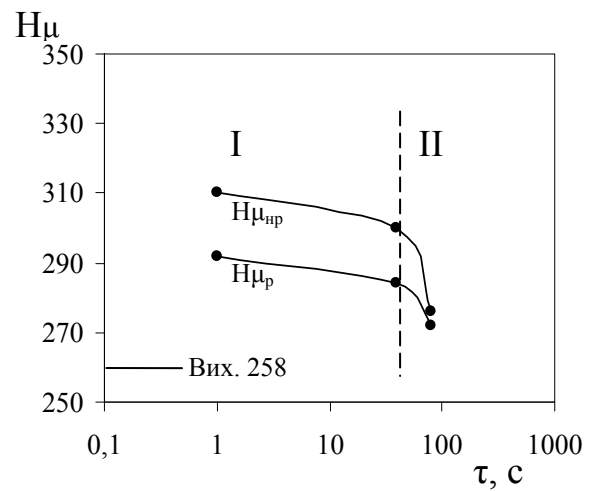


Рисунок 4 – Діаграма кінетики рекристалізації аустеніту сталі 10X17H13M2T після гарячої прокатки ( $\epsilon = 23\%$ ) та витримки. Заштрихована область відповідає початку (5 %) та завершенню (60...70 %) рекристалізації.



а



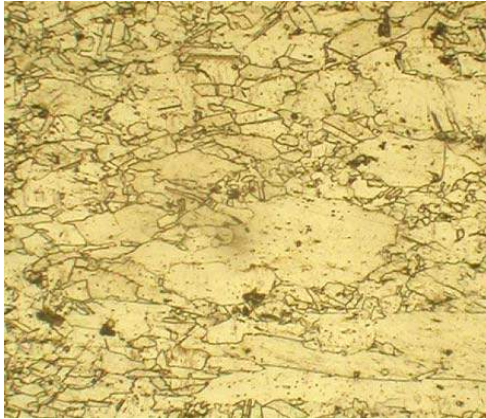
б

а – 1100 °C; б – 1150 °C; I – зона незначного зменшення мікротвердості; II – зона з інтенсивним зниженням мікротвердості

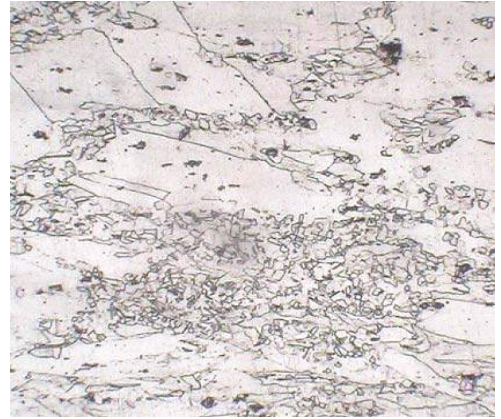
Рисунок 5 – Зміна мікротвердості рекристалізованих ( $H_{\mu p}$ ) та нерекристалізованих ( $H_{\mu np}$ ) зерен сталі 10X17H13M2T упродовж витримки після гарячої прокатки.

Установлено, що після двохпрохідної прокатки при 1100 °С кількість динамічно рекристалізованих зерен досягає 15...20 % у порівнянні із такою ж кількістю нових зерен, що утворюються після однопрохідної прокатки та витримки 40 с (рис. 6).

Показано, що в умовах уповільненого розвитку рекристалізації під час післядеформаційної витримки, динамічна рекристалізація в осередку деформації є основною складовою рекристалізації сталей при гарячій прокатці. На основі встановлених особливостей рекристалізації сталей 10X17H13M2T та 12X18H10MT уточнено мікроструктурну модель процесу рекристалізації аустеніту при гарячій прокатці (рис. 7).



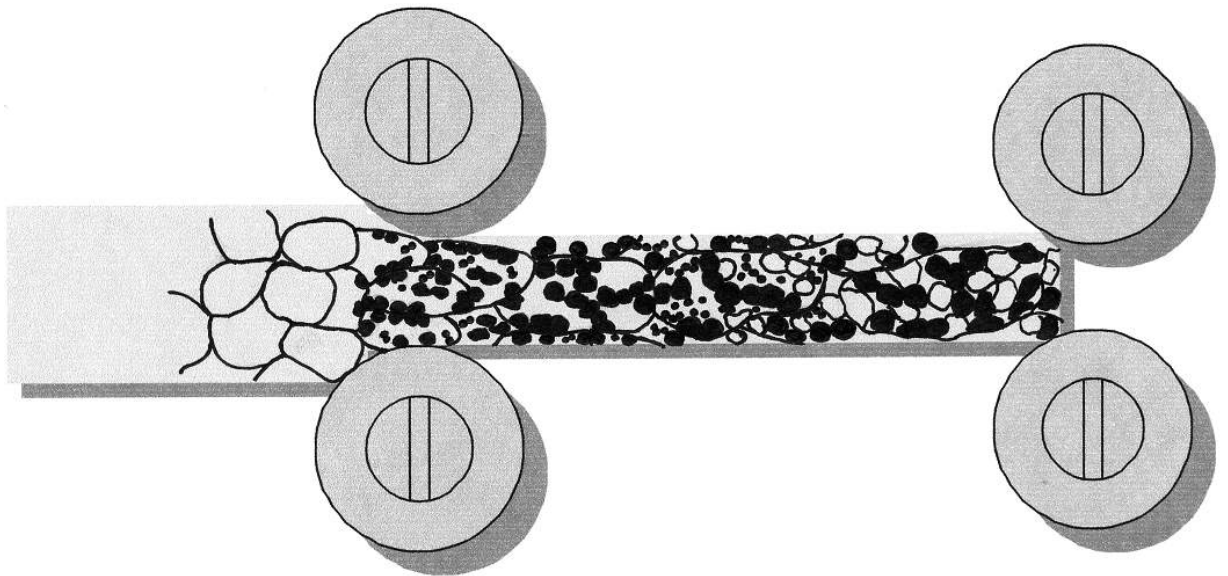
а



б

а – ступінь деформації за прохід  $\epsilon_{\text{пр}} = 15 \%$ , міждеформаційна пауза  $\tau_{\text{м.п.}} = 20$  с (в печі); б –  $\epsilon_{\text{пр}} = 25 \%$ ,  $\tau_{\text{м.п.}} = 2$  с (на повітрі)

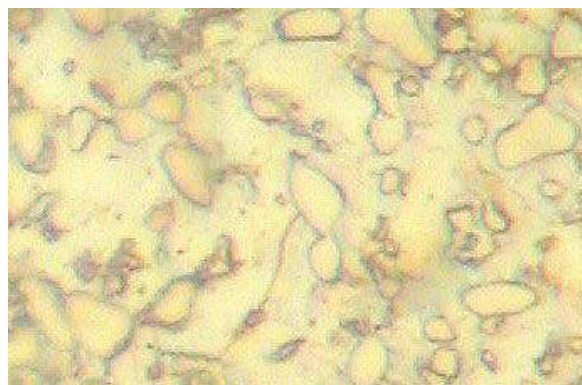
Рисунок 6 – Мікроструктура сталі 10X17H13M2T з динамічно рекристалізованими зернами у кількості 15 % (а) та 20 % (б) після двохпрохідної прокатки при 1100 °С. (x220).



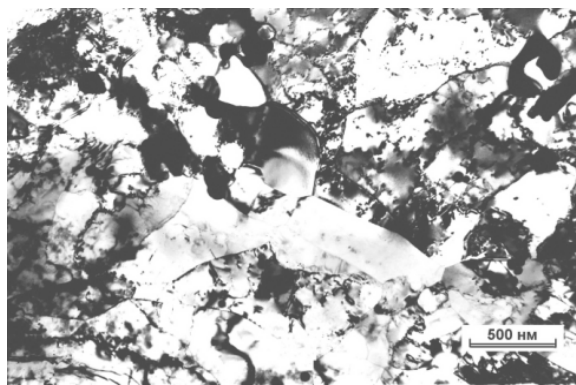
● – динамічно рекристалізовані зерна; ○ – статично рекристалізовані зерна

Рисунок 7 – Мікроструктурна модель рекристалізації аустеніту при гарячій прокатці.

Показано принципову можливість формування ультрадрібного динамічно рекристалізованого зерна в процесі багатопрохідної гарячої деформації. Крутінням сталі 10X17H13M2T при 1100 °С за 78 проходів і ступенем гарячої пластичної деформації до руйнування 1680 % отримано динамічно рекристалізоване зерно аустеніту розміром 0,8...2 мкм (рис. 8), об'єм рекристалізації становить 80 %.



а



б

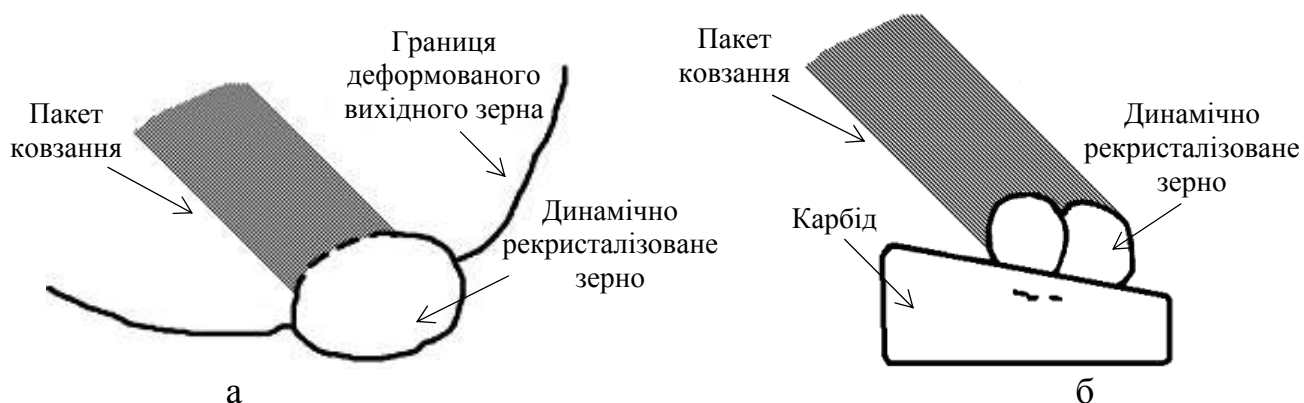
а – світлова мікроскопія,  $\times 1870$ ; б – просвічувальна електронна мікроскопія на фольгах,  $\times 42000$

Рисунок 8 – Ультрадрібне зерно в сталі 10X17H13M2T після багатопрохідного крутіння при 1100 °С.

Експериментальні результати із вивчення рекристалізованої структури, отриманої в процесі прокатки, вказують на можливість існування зв'язку між зсувним механізмом гарячої пластичної деформації та утворенням динамічно рекристалізованих зерен. Значна локалізація деформації в грубих смугах (пакетах) ковзання передбачає, що пакет об'єднує найменш деформовані зони з мінімальною густиною дислокацій, розташовані у самому пакеті, та зони із максимальною густиною дислокацій, переважно на границях пакетів. Різна густина дислокацій по обидва боки зсуваного пакету та вихід рухомого пакету на різні структурні перешкоди є факторами, що сприяють прискореному перерозподілу дислокацій в цих ділянках та утворенню зародків динамічно рекристалізованих зерен з великокутовими границями. Запропоновано пакетний механізм динамічної рекристалізації в осередку деформації (рис. 9).

Розрахунком ефективної енергії активації динамічної рекристалізації було підтверджено формування зародків динамічно рекристалізованих зерен аустеніту в сталі 10X17H13M2T. За допомогою релаксаційного та кінетичного лінеаризованих рівнянь Ареніусу встановлено, що ефективна енергія активації зародження динамічно рекристалізованих зерен знаходиться на рівні 89,25 кДж/моль, а енергія активації процесу статичної рекристалізації дорівнює 294,3 кДж/моль.

На підставі аналізу кінетики рекристалізації зроблено висновок, що ефект динамічної рекристалізації, який полягає у прискоренні рекристалізації у порівнянні із уповільненою рекристалізацією під час міждеформаційної паузи, може бути використаний для вибору параметрів прокатки з метою подрібнення зерна.



а – на границях вихідного зерна; б – на міжфазних границях аустеніт-карбонітрид (в об'ємі вихідного зерна)

Рисунок 9 – Схема пакетного механізму утворення динамічно рекристалізованих зерен.

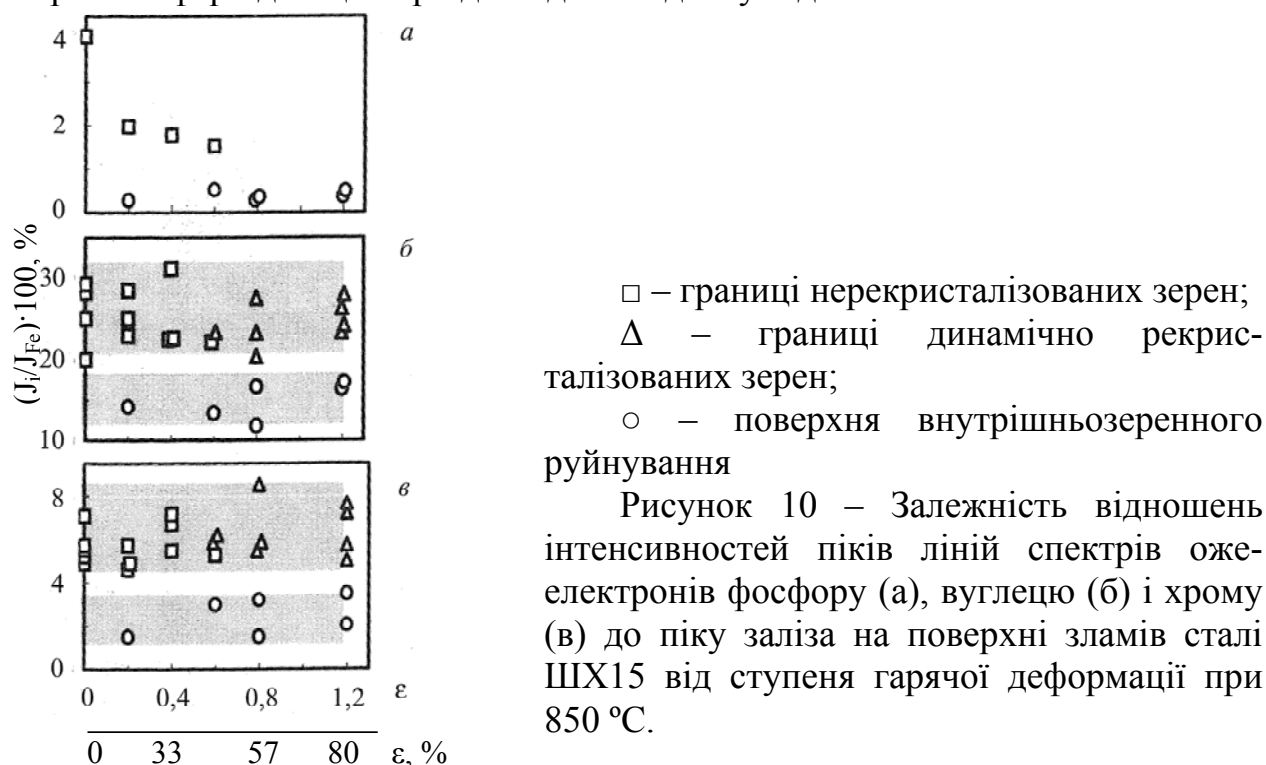
Для оцінки розвитку динамічної рекристалізації запропоновано використовувати температурний критерій, що являє собою температуру утворення 50 % рекристалізованих зерен протягом витримки 10 с (табл. 1). Оскільки за цей період об'єм рекристалізації, особливо для високолегованих сталей, змінюється незначно, приймається, що більшість рекристалізованих зерен утворилися в осередку деформації. Це дозволить оптимізувати температурно-деформаційні параметри та зменшити розмір зерна спеціальних сталей завдяки процесу динамічної рекристалізації.

Таблиця 1 – Температури, що відповідають 50 % об'єму рекристалізації спеціальних сталей за період післядеформаційної витримки 10 с

| Матеріал          | Тип сталі                    | T, °C |
|-------------------|------------------------------|-------|
| Сталь 30ХГСНА     | Конструкційна                | 910   |
| Сталь ШХ15        | Підшипникова                 | 925   |
| Сталь 40ХНВА      | Конструкційна                | 965   |
| Сталь 45Г17Ю3     | Аустенітна                   | 980   |
| Сталь 10Х5Г2МБ    | Конструкційна високоміцна    | 1015  |
| Сталь 03Х16Н15М3Б | Корозійностійка              | 1075  |
| Сплав ХН77ТЮР     | Жароміцний сплав             | 1095  |
| Сталь Х18Н10Т     | Корозійностійка              | 1130  |
| Сталь 10Х17Н13М2Т | Корозійностійка              | 1140  |
| Сталь Х18Н11Т     | Корозійностійка              | 1140  |
| Сталь 110Х18М     | Підшипникова корозійностійка | 1170  |

У четвертому розділі наведено результати досліджень розподілу домішок та надлишкових фаз у рекристалізованому аустеніті гарячедеформованих спеціальних сталей. Установлені особливості початкових стадій виділення карбідів по границям зерен гарячедеформованого крутинням при 850 °C аустеніту сталі ШХ15. Дослідженням поверхні зламів зразків методом електронної оже-спектроскопії встановлено збагачення вуглецем і хромом границь вихідних деформованих зерен та

динамічно рекристалізованих зерен (рис. 10). Зазначено, що процеси динамічної рекристалізації та подрібнення зерна в осередку деформації можна розглядати в якості ефективних інструментів зменшення протяжності і товщини карбідної сітки, прискорення сфероїдизації карбідів під час відпалу підшипникових сталей.



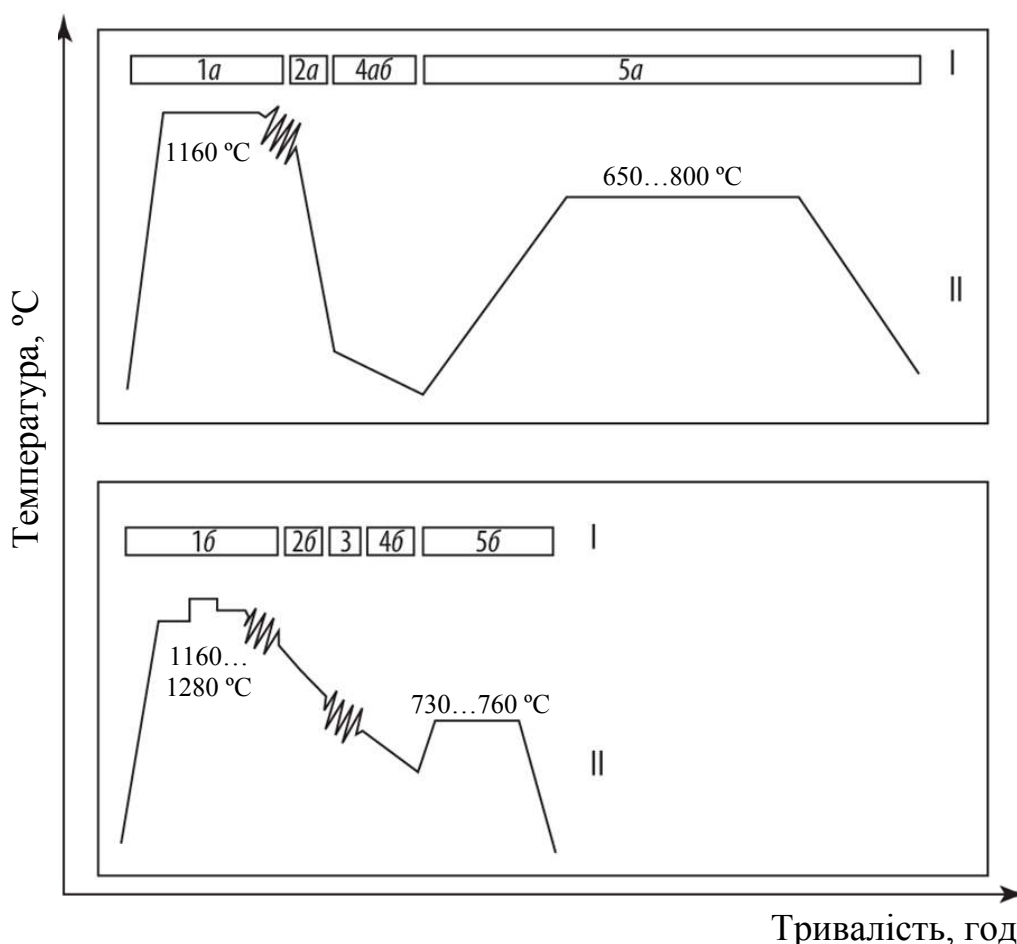
Дослідженням прокату корозійностійких сталей 08X17H13M2T, 08X18H10T з вмістом сірки 0,015...0,030 % установлено утворення сульфідів титану як з рідкої фази, так і у твердому розчині. Виявлено, що в сталях містяться смуги із пластин сульфідів титану типу  $Ti_2S$  рожевого забарвлення, які є складовими евтектики, рядки із окремих сульфідів титану типу  $TiS$  та  $Ti_2S$ , витягнутих вздовж напрямку прокатки. На границях аустенітного зерна присутні плівки дисперсних частинок. За результатами мікрорентгеноспектрального аналізу встановлено, що у складі фаз по границях зерен є вуглець, сірка, титан, молібден і хром. Це дозволило класифікувати частинки як складні багатофазні виділення – карбіди типу  $TiC-Me_{23}C_6$  та карбіди титану  $TiC$ -сульфіди  $Ti_2S$  з вмістом сірки у кількості 1,35...16 %.

З метою сфероїдизації евтектичних сульфідів титану, а також розчинення надлишкових фаз на границях зерен обрано оптимальний режим гомогенізуючого нагріву. Встановлено, що під дією гомогенізації відбувається суттєве підвищення ударної в'язкості до 94...119 Дж/см<sup>2</sup> та забезпечуються вимоги стандарту за цим показником (не менше 75 Дж/см<sup>2</sup>).

У п'ятому розділі наведено результати із розроблення ресурсозберігаючих технологій суміщеної (комплексної) деформаційно-термічної обробки підшипникових, корозійностійких, конструкційних сталей і створення прокату з підвищеним рівнем фізико-механічних властивостей. Представлено результати дослідно-промислових випробувань в умовах прокатних станів ПАТ «Дніпрспецсталь» та ДП «УкрНДІспецсталь» технологій гартування, нормалізації, сфероїдизуючого відпалу цих сталей. За допомогою діаграм кінетики

рекристалізації аустеніту, температурного критерію динамічної рекристалізації проведено вибір температур прокатки та тривалості міждеформаційних пауз.

Для підшипникової сталі ШХ15СГ-В розроблено технологію сфероїдизуючого відпалу в лінії прокатного стану (рис. 11). Випробування технології показало, що тривалість відпалу зменшується на 27 % у порівнянні із діючою технологією. Це досягнуто внаслідок структурних змін, які відбуваються в металі під час гомогенізуючого відпалу заготовки перед деформацією, гарячої прокатки при 900 °С та регульованого післядеформаційного охолодження.



а) 1а – нагрів та прокатка заготовки; 2а – проміжне прискорене охолодження прокату для запобігання виділенню карбідної сітки в мікроструктурі; 4а – кінцеве охолодження розкату на повітрі на приймальному рольгангу та холодильнику прокатного стану; 4б – розрізання на прутки, пакетування та передавання на термообробку; 5а – сфероїдизуючий відпал в термічному та калібрувальному цехах;

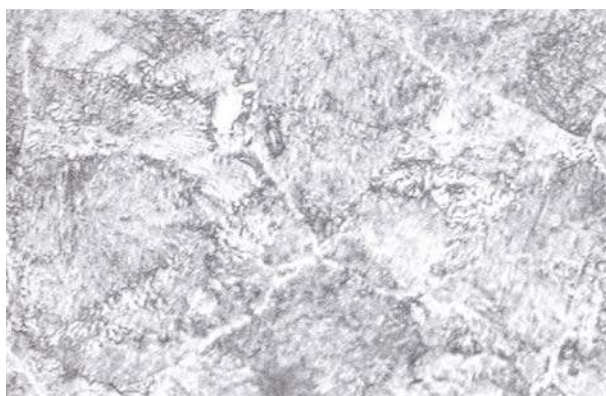
б) 1б – гомогенізуючий нагрів заготовки та регульована прокатка; 2б – проміжне прискорене охолодження; 3 – низькотемпературна прокатка (у тому числі з перерваним прискореним охолодженням); 4б – гаряче (або тепле) розрізання на прутки і передавання на термообробку; 5б – скорочений сфероїдизуючий відпал прокату або підкату для калібрування (в печах на ділянці прокатного цеху)

Рисунок 11 – Технологічні (I) та термкінетичні (II) схеми гарячої деформації та термообробки під час виробництва сортового прокату підшипникових сталей за діючою технологією (а) та технологією суміщеної деформаційно-термічної обробки у потоці прокатних станів (б). Тривалість залежить від маси садки.

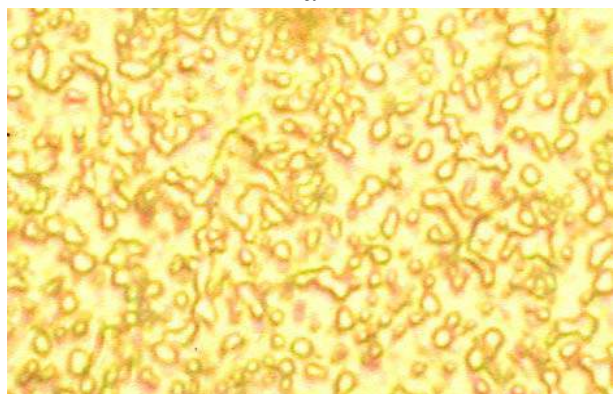
Зменшення карбідної ліквідації за рахунок проведення гомогенізуючого нагріву та утворення структури динамічно рекристалізованого аустеніту під час регульованої прокатки дозволило уникнути утворення карбідної сітки по границях зерен, зформувати дисперсні виділення зародків сфероїдизованого перліту в гарячедеформованому прокаті сталі ШХ15СГ. Після відпалу мікроструктура являє собою сфероїдизований перліт (рис. 12). Очікуване річне ресурсозбереження при виключенні спеціального нагріву для усунення карбідної сітки складе 103 т умовного палива на 1000 т садок металу.



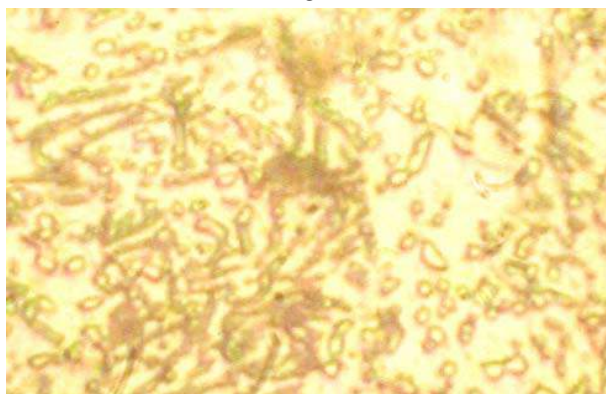
а



б



в



г

а, в – прокатка та сфероїдизуючий відпал за режимами суміщеної деформаційно-термічної обробки; б, г – гаряча прокатка та відпал за діючою технологією

Рисунок 12 – Карбідна сітка після прокатки (а, б,  $\times 850$ ) та сфероїдизований перліт після відпалу (в, г,  $\times 1000$ ,  $\times 2$ ) в мікроструктурі сталі ШХ15СГ-В.

Для корозійностійких сталей 08X18N10T-У, 08X17N13M2T-У з вмістом сірки 0,015...0,030 % розроблена технологія гартування в умовах прокатного стану. Особливостями технології є використання гомогенізуючого нагріву перед деформацією з метою сфероїдизації пластинчастих сульфідів титану, а також нагрів металу безпосередньо після прокатки до температур гартування для розчинення дисперсних карбідних та сульфідних фаз на границях аустенітного зерна. Показано, що очікуване річне ресурсозбереження внаслідок виключення окремого нагріву під гартування складе 30 т умовного палива на 1000 т садок металу.

Проведено гартування на прокатному стані 1050/950 ПАТ «Дніпроспецсталь» та на лабораторному стані ДУО-250 ДП «УкрНДІспецсталь» термополіпшуваної конструкційної сталі 42ХМ. Встановлено, що використання тепла прокатного нагріву при гартуванні призводить до скорочення тривалості термообробки на 77 % у порівнянні з гартуванням і відпуском в термічному цеху.

Прокатка у низькотемпературному інтервалі сприяла об'єму динамічної рекристалізації на рівні ~50 % та подрібненню зерна до розміру № 10 у порівнянні з № 8 при традиційній термічній обробці, підвищенню дисперсності продуктів перетворення гарячедеформованого аустеніту. В результаті отримано зростання на 10..15 % границі міцності (з 808 до 887...940 МПа), на 22 % відносного видовження (з 59 до 70...72 %) та збереження ударної в'язкості на необхідному рівні. Механічні властивості відповідають вимогам стандарту.

З метою реалізації технології комплексної деформаційно-термічної обробки в лініях прокатних станів розроблені технологічні та термодинамічні схеми процесів та схеми розміщення обладнання для термообробки сортового прокату діаметром 8...300 мм (у тому числі діаметром 7...12 мм в бунтах), каліброваного прокату діаметром 2...45 мм (у тому числі діаметром 2...6 мм в бунтах). Розроблено рекомендації для технологічних завдань на проектування модульних ліній деформаційно-термічної обробки прокату спеціальних сталей. Отримані результати будуть використані при реконструкції прокатно-термічного виробництва та дооснащенні діючих прокатних станів.

Результати випробування технології сфероїдизуючого відпалу за режимами деформаційно-термічної обробки використовуються під час виробництва сортового прокату підшипникових сталей на стані 325 на ПАТ «Електрометалургійний завод «Дніпроспецсталь» ім. А.М. Кузьміна» (технологічна інструкція ТИ 143-НА-10-16, акт від 16.08.2016 р.).

## ВИСНОВКИ

З метою вирішення важливого науково-технічного завдання з розвитку ресурсозберігаючих технологій виробництва конкурентоспроможного сортового прокату спеціальних сталей з покращеними фізико-механічними властивостями в дисертаційній роботі установлені особливості процесів структуроутворення та рекристалізації аустеніту при багатопрхідній гарячій деформації, розроблені технології суміщеної деформаційно-термічної обробки.

Основні висновки за результатами роботи такі:

1. Під час дослідження гарячої прокатки корозійностійких сталей 10X17H13M2T та 12X18H10MT встановлено, що при температурах 1050...1150 °C і ступенем деформації 15...25 % за один прохід рекристалізація може починатися вже в осередку деформації внаслідок динамічної рекристалізації. При 1150 °C в цих сталях утворюється 30...35 % динамічно рекристалізованих зерен.

Установлено, що під час прокатки з післядеформаційною витримкою 1...40 с рекристалізація іде значно повільніше, ніж рекристалізація в осередку деформації.

Кількість рекристалізованих зерен та їх розмір визначаються динамічною рекристалізацією в кожному проході.

Вперше побудована діаграма кінетики рекристалізації аустеніту сталі 10X17H13M2T, яка дозволяє визначити розвиток процесу рекристалізації при температурах гарячої прокатки.

2. Для оцінки розвитку рекристалізації при гарячій прокатці запропоновано температури, при яких утворюється ~50 % динамічно рекристалізованих зерен. Вперше пропонується використовувати температурний критерій для вибору температурно-деформаційних параметрів з метою подрібнення зерна аустеніту спеціальних сталей завдяки розвитку процесу динамічної рекристалізації.

3. Уточнені процеси динамічної рекристалізації в осередку гарячої деформації. Запропоновано пакетний механізм утворення динамічно рекристалізованих зерен. Встановлено, що процес динамічної рекристалізації пов'язаний із дією зсувного механізму пластичної деформації, коли при високих температурах відбувається значна локалізація деформації в грубих смугах (пакетах) ковзання.

4. На основі розрахунків енергії активації процесу динамічної рекристалізації при гарячій прокатці підтверджено ефект формування зародків рекристалізованих зерен аустеніту сталі 10X17H13M2T безпосередньо в осередку деформації. Ефективна енергія активації динамічної рекристалізації має величину 89,25 кДж/моль, а статичної рекристалізації 294,3 кДж/моль.

5. Установлено, що при гарячій деформації підшипникової сталі ШХ15 відбувається збільшення концентрації вуглецю та хрому (до початку виділення надлишкових карбідів) на границях вихідних і динамічно рекристалізованих зерен аустеніту під впливом динамічної рекристалізації. Це сприятиме зменшенню протяжності та товщини карбідної сітки при подальшому охолодженні, прискоренню процесів сфероїдизації карбідів під час відпалу прокату підшипникових сталей.

6. Розроблені технологічні схеми, перелік обладнання, рекомендації для технологічних завдань на проектування нових модульних ліній та реалізації технологій суміщеної деформаційно-термічної обробки сортового прокату спеціальних сталей.

7. Випробуванням технологій гартування, термополіпшення, сфероїдизуючого відпалу з використанням тепла прокатного нагріву отримано підвищення рівня фізико-механічних властивостей корозійностійких, конструкційних та підшипникових сталей, забезпечено вимоги стандартів. Тривалість термообробки сталей зменшено на 27...77 % у порівнянні із термообробкою в термічному цеху.

8. Технологія комплексної деформаційно-термічної обробки підшипникових сталей, що включає прокатку, переривчасте прискорене охолодження та наступний сфероїдизуючий відпал по уточнених режимах, використовується на ПАТ «Дніпроспецсталь» для сортового прокату стана 325.

9. Очікуваний річний ресурсозберігаючий ефект від реалізації технології суміщеної деформаційно-термічної обробки складе для підшипникових сталей при виключенні спеціального нагріву для усунення карбідної сітки 103 т умовного

палива на 1000 т садок металу; для корозійностійких сталей при виключенні окремого нагріву під гартування – 30 т умовного палива на 1000 т садок металу.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Термокинетические диаграммы рекристаллизации аустенита при горячей прокатке специальных сталей / Я.И. Спектор, И.Н. Куницкая, Ю.В. Яценко, А.Н. Тумко // МиТОМ. – 2008. – № 7. – С. 6 – 9.
2. Термокинетические диаграммы и механизмы рекристаллизации при многопроходной горячей деформации специальных сталей / Я.И. Спектор, И.Н. Куницкая, А.Н. Тумко, А.В. Ноговицын, В.Е. Ольшанецкий // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2009. – № 1. – С. 11 – 17.
3. Куницкая И.Н. Динамическая рекристаллизация специальных сталей при многопроходной горячей деформации / И.Н. Куницкая, Я.И. Спектор, В.Е. Ольшанецкий // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2010. – № 2. – С. 45 – 49.
4. Об энергетике структурообразования при горячей деформации прокаткой аустенитной стали / И.Н. Куницкая, В.Е. Ольшанецкий, Я.И. Спектор, А.В. Ноговицын // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2009. – № 2. – С. 17 – 23.
5. Куницкая И.Н. Структурные и кинетические особенности динамической рекристаллизации легированного аустенита при многопроходной горячей деформации / И.Н. Куницкая, Я.И. Спектор, В.Е. Ольшанецкий // МиТОМ. – 2011. – № 10. – С. 39 – 42.
6. Эффекты термомеханической обработки проката подшипниковой стали / Я.И. Спектор, А.Г. Пригунова, Ю.В. Яценко, И.Н. Куницкая // Сталь. – 2006. – № 3. – С. 79 – 82.
7. Перспективы развития сортамента, качества и энергосберегающих технологий производства проката из специальных сталей и сплавов для высокотехнологических стратегических отраслей промышленности / Я.И. Спектор, И.Н. Куницкая, А.С. Сальников, А.Н. Тумко, М.Е. Сажин, Ю.В. Деркач // Черные металлы. – 2014. – № 2. – С. 15 – 23.
8. Совмещенная деформационно-термическая обработка проката коррозионностойких и подшипниковых сталей / Ю.В. Артамонов, Я.И. Спектор, И.Н. Куницкая, И.Н. Логозинский, М.Е. Сажин, А.Н. Тумко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2012. – № 3. – С. 65 – 67.
9. Оптимизация структурного состояния стали ШХ15 методами термомеханической обработки / И.Н. Куницкая, Я.И. Спектор, А.В. Климов, Д.В. Ткач // Технологические системы. – 2014. – № 4. – С. 36 – 42.
10. Спектор Я.И. Особенности междеформационного разупрочнения и рекристаллизации горячедеформированного аустенита высоколегированных сталей / Я.И. Спектор, Ю.В. Яценко, И.Н. Куницкая // Теория и практика процессов пластической деформации: междунар. науч.-техн. конф., 26-27 окт. 2004 г.: тезисы докл. – Москва, 2004. – С. 225 – 226.

11. Особенности и проблемы совмещения термообработки и деформации сортового проката специальных сталей / Я.И. Спектор, Ю.В. Яценко, Ю.В. Артамонов, И.Н. Куницкая // Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов: 6-я междунар. конф.: сб. докл. – Харьков: НН ХФТИ, ИПЦ: «Контраст», 2005. – Часть 1. – С. 161–169.

12. Перспективные технологии совмещенной деформационно-термической обработки проката специальных сталей / Я.И. Спектор, А.В. Ноговицын, Ю.В. Артамонов, А.Н. Тумко, Ю.В. Яценко, И.Н. Куницкая // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. трудов. – Вып. 45, ч. 4. – Дн-вск. – ПГАСА. – 2008. – С. 18 – 31.

13. Структурные и энергосберегающие эффекты совмещенной деформационно-термической обработки специальных сталей / Я.И. Спектор, Ю.В. Артамонов, И.Н. Куницкая, В.Е. Ольшанецкий, А.Н. Тумко // Строительство, материаловедение, машиностроение: междунар. науч.-практич. конф: сб. науч. трудов. – Вып. 58. – Дн-вск.: ПГАСА, 2011. – С. 651 – 654. – (Серия: Стародубовские чтения 2011).

14. Формирование структур рекристаллизации в аустените при совмещенной деформационно-термической (термомеханической) обработке специальных сталей / И.Н. Куницкая, Я.И. Спектор, В.Е. Ольшанецкий, Ю.В. Артамонов // Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов: науч.-техн. семинар: тезисы докладов. – М.: НИТУ «МИСиС», 2011. – С.18.

15. Куницкая И.Н. Особенности структурообразования и кинетики рекристаллизации аустенита при многопроходной горячей деформации специальных сталей и сплавов / И.Н. Куницкая, Я.И. Спектор, В.Е. Ольшанецкий // HighMatTech: междунар. конф.: тезисы докладов – Киев: Академперіодика, 2013. – С. 66.

16. Концепция развития деформационно-термической обработки специальных сталей в потоке прокатных станов / И.Н. Логозинский, А.Н. Тумко, А.С. Сальников, Ю.В. Артамонов, Я.И. Спектор, И.Н. Куницкая // Сталь. – 2012. – № 9. – С. 53 – 58.

17. Особенности термоулучшения с прокатного нагрева конструкционной стали / А.Н. Тумко, И.Н. Куницкая, Я.И. Спектор, И.Ф. Сойников // Новые конструкционные стали и сплавы и методы их обработки для повышения надежности и долговечности изделий: XI междунар. науч.-практич. конф.: тезисы докладов – Запорожье: ЗНТУ, 2008. – С. 141 – 143.

## АНОТАЦІЯ

Куницька І.М. Оптимізація температурно-деформаційних параметрів прокатки спеціальних сталей з урахуванням їх впливу на структуру та властивості. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.01 – Металознавство та термічна обробка металів. – Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, 2016.

Розроблено технології суміщеної деформаційно-термічної обробки підшипникових, конструкційних, корозійностійких сталей. Досягнуто покращення фізико-механічних властивостей та зменшення тривалості термообробки прокату спеціальних сталей у порівнянні із термообробкою в термічних цехах, що визначається впливом динамічної рекристалізації на зменшення розміру зерна, протяжності та товщини карбідної сітки, прискорення сфероїдизації карбідів.

Впроваджується на стані 325 ПАТ «Дніпроспецсталь» технологія деформаційно-термічної обробки сортового прокату підшипникових сталей із сфероїдизуючим відпалом.

Ключові слова: сортовий прокат, багатопрхідна гаряча деформація, динамічна рекристалізація, аустеніт, спеціальні сталі, мікроструктура, властивості, ресурсозберігаючі технології, суміщена деформаційно-термічна обробка.

## АННОТАЦІЯ

Куницкая И.Н. Оптимизация температурно-деформационных параметров прокатки специальных сталей с учетом их влияния на структуру и свойства. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов. – Запорожский Национальный технический университет, Запорожье, 2016.

Диссертационная работа посвящена изучению особенностей структурообразования и кинетики рекристаллизации аустенита при многопроходной горячей деформации с целью оптимизации температурно-деформационных параметров прокатки и улучшения свойств сортового проката специальных сталей. Диссертация имеет практическую и научную ценность. Разработаны ресурсосберегающие технологии совмещенной деформационно-термической обработки проката подшипниковых, конструкционных, коррозионностойких сталей.

Показана принципиальная возможность получения конкурентоспособного проката специальных сталей с высоким уровнем физико-механических свойств после совмещенной деформационно-термической обработки за счет реализации эффектов динамической рекристаллизации при горячей прокатке.

Прокаткой коррозионностойких аустенитных сталей 10X17H13M2T и 12X18H10MT при 1050...1150 °C установлено, что рекристаллизация начинается уже в очаге деформации. В этих сталях при 1150 °C образуется 30...35 % динамически рекристаллизованных зерен. При выдержке 1...40 с после прокатки рекристаллизация идет значительно медленнее. Построена диаграмма кинетики рекристаллизации аустенита стали 10X17H13M2T. Для оценки развития динамической рекристаллизации и получения ~50 % объема рекристаллизации разработан температурный критерий динамической рекристаллизации. Этот критерий целесообразно использовать при выборе температурно-деформационных параметров с целью измельчения зерна специальных сталей при горячей прокатке.

Установлено, что под действием динамической рекристаллизации в горячедеформированном при 850 °C аустените подшипниковой стали ШХ15

происходит обогащение углеродом и хромом (до начала выделения избыточных карбидов) как на границах исходных зерен, так и на границах динамически рекристаллизованных зерен. Это уменьшает протяженность и толщину карбидной сетки, замедляет ее появление при последеформационном охлаждении, а также ускоряет формирование сфероидизированных карбидов при отжиге проката подшипниковых сталей.

Научной ценностью работы является уточнение процессов структурообразования и кинетики рекристаллизации при горячей прокатке, предложен пакетный механизм образования динамически рекристаллизованных зерен. Подтвержден эффект формирования зародышей рекристаллизованных зерен аустенита в очаге деформации на основании расчетов энергии активации процесса динамической рекристаллизации в условиях горячей прокатки стали 10X17H13M2T.

Для реализации технологии совмещенной деформационно-термической обработки разработаны технологические и термокинетические схемы, предложено оборудование, которые рекомендуется использовать при будущей реконструкции прокатно-термического производства с созданием новых модульных линий деформационно-термической обработки и дооснащении действующих прокатных станов.

В результате опытно-промышленного опробования технологий совмещенной деформационно-термической обработки показано сокращение длительности сфероидизирующего отжига проката подшипниковых сталей на 27 %; закалки конструкционных сталей – на 77 %. При этом обеспечены требования стандартов по микроструктуре и механическим свойствам специальных сталей. Технология совмещенной деформационно-термической обработки сортового проката подшипниковых сталей со сфероидизирующим отжигом внедряется на стане 325 на ПАО «Днепроспецсталь». Наибольшие ресурсосберегающие и структурные эффекты могут быть реализованы в условиях создания современных модульных линий, совмещающих в одном технологическом процессе горячую прокатку и термообработку с использованием тепла прокатного нагрева.

Ключевые слова: сортовой прокат, многопроходная горячая деформация, динамическая рекристаллизация, аустенит, специальные стали, микроструктура, свойства, ресурсосберегающие технологии, совмещенная деформационно-термическая обработка.

## SUMMARY

Kunitskaya I.N. Optimization of temperature-deformation parameters of rolling with respect to their influence on structure and properties of special steels. – Manuscript.

Candidate of Tech. Sciences. Thesis. Specialty 05.16.01 – Metallurgy and heat treatment of metals. – Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, 2016.

The technologies of combined deformation-heat treatment were developed for structural, corrosion-resistant and bearing steels. Improvement of physical and mechanical properties and shortening of heat treatment time are obtained for rolled section of special steels, as compared to the treatment in thermal workshop. Technological control of

dynamic recrystallization decreases the grain size, length and thickness of carbide network, and accelerates the formation of carbide spheroids.

For bearing steel with spheroidizing annealing, the technology of combined deformation-heat treatment is introduced in mill 325 at PJSC «Dneprospetsstal».

Key words: rolled section, multipass hot deformation, dynamic recrystallization, austenite, special steels, microstructure, properties, energy-saving technologies, combined deformation-heat treatment.