

Міністерство освіти і науки України  
Запорізький національний технічний університет

ЛУЦЕНКО ВЛАДИСЛАВ АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 621.785:621.771.25.001.8

НАУКОВІ ОСНОВИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕРМОМЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ  
КАТАНКИ ДЛЯ СТАЛЕВОГО ДРОТУ МАЛОГО ДІАМЕТРУ

05.16.01 - Металознавство та термічна обробка металів

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних  
наук

Запоріжжя – 2015

Дисертація є на правах рукопису.

Робота виконана в Інституті чорної металургії ім. З. І. Некрасова  
Національної академії наук України, м. Дніпропетровськ.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор  
**Парусов Володимир Васильович**, Інститут чорної металургії  
ім. З. І. Некрасова НАН України, завідувач відділу «Термічної обробки  
металу для машинобудування»

Офіційні опоненти:

член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор  
**Мешков Юрій Якович**, Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН  
України, головний науковий співробітник відділу «Фізика міцності та  
руйнування»

доктор технічних наук, професор **Губенко Світлана Іванівна**, Національна  
металургійна академія України, професор кафедри «Матеріалознавство»  
ім. Ю. М. Тарана-Жовніра

доктор технічних наук, професор **Вакуленко Ігор Олексійович**,  
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту  
ім. академіка В. Лазаряна, завідувач кафедри «Технологія матеріалів»

Захист відбудеться «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 р. о \_\_\_\_\_ годині на засіданні  
спеціалізованої вченої ради Д17.052.01 у Запорізькому національному  
технічному університеті за адресою: 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64,  
ауд. 153.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Запорізького національного  
технічного університету за адресою: 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64.

Автореферат розісланий «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
Д17.052.01

О.А. Мітяєв

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** При сучасній технології переробки сумарні обтиски при волочінні катанки в дріт досить великі (до 99,2%), що вимагає проведення додаткових проміжних термічних обробок. Тому підвищення пластичності металу після високотемпературної прокатки для забезпечення виготовлення сталевго дроту різного призначення без проміжної термічної обробки зі збереженням необхідних кінцевих характеристик є актуальним.

Формування мікроструктури й властивостей, найбільш придатних для холодної пластичної деформації катанки на сталевий дріт малого діаметру, можна досягти шляхом термомеханічної обробки (ТМО) катанки в потоці високошвидкісного дротового стану. При вдосконаленні ТМО сталевго катанки необхідно враховувати вплив високотемпературної деформації та наступних умов охолодження на рекристалізаційні процеси, кінетику перетворення аустеніту, співвідношення структурних складових, раціональне поєднання таких якісних характеристик, як механічні властивості, знеуглецьований шар, кількісний і якісний склад окалини.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливої та актуальної науково-прикладної проблеми: підвищення після високотемпературної прокатки пластичних властивостей металу на основі розвитку наукових положень про вплив процесів ТМО на структуроутворення та властивості катанки для сталевго дроту малого діаметру різного призначення. Встановлені закономірності дозволять удосконалити технологію термомеханічної обробки катанки, що при економії матеріальних ресурсів забезпечить виробництво сталевго дроту для металокорду (в тому числі надвисокоміцного), високоміцного бортового, канатного, легованого зварювального та низьковуглецевого.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Виконання дисертаційної роботи пов'язане з науково-тематичними планами досліджень ІЧМ НАНУ у відповідності з напрямком „Розвиток наукових основ формування залізвуглецевих сплавів та управління їх структурою й властивостями”. Дослідження, які є складовою частиною дисертаційної роботи, проведені в рамках відомчих, пошукових, конкурсних і договірних науково-дослідних робіт ІЧМ НАНУ, в яких автор сформулював завдання досліджень, розробив основні ідеї та брав безпосередню участь у їх виконанні в якості керівника або відповідального виконавця:

– "Взаємозв'язок фазових та структурних перетворень з процесами окалиноутворення та знеуглецювання у вуглецевій катанці", держ. реєстр. № 0103U005409 (відповідальний виконавець).

– "Дослідження та розвиток наукових і технологічних основ комплексної технології виробництва економнолегованих (зі зменшеним вмістом Мо і Ni) низьковуглецевих сталей для зварювального дроту відповідального призначення", держ. реєстр. № 0107U001713 (керівник роботи).

– "Оцінка можливості використання комбінованих способів видалення окалини для підвищення технологічних характеристик катанки-дроту", держ. реєстр. № 0109U002455 (керівник роботи).

– "Розробка комплексної технології отримання легованих сталей перспективного сортаменту, призначених для виготовлення катанки й зварювального дроту малого діаметру", держ. реєстр. № 0109U002459 (керівник роботи).

– "Дослідження впливу комбінованої термомеханічної обробки на закономірності фазово-структурних перетворень аустеніту високовуглецевої сталі різного хімічного складу для надвисокоміцного дроту", держ. реєстр. № 0109U002451 (керівник роботи).

– "Розробка науково обґрунтованих режимів комбінованої термічної обробки сортового прокату з легованої конструкційної сталі", держ. реєстр. № 0112U001351 (керівник роботи).

– "Дослідження та оптимізація режимів температурно-деформаційної обробки катанки різного призначення на дротовому стані 150-1 комбінату «Криворіжсталь» з метою забезпечення вимог національних і міжнародних нормативних документів", держ. реєстр. № 0197W006892 (відповідальний виконавець).

– "Розробка та дослідження технології виробництва чистих по шкідливим домішкам легованих і низьковуглецевих сталей для зварювального дроту з використанням комплексної рафінуючої обробки чавуну й конвертерного напівпродукту", держ. реєстр. № 0103U007215 (керівник роботи).

– "Розробка та дослідження технології виробництва на дротовому стані 150-1 катанки діаметром 5,5 мм із легованих молібден- і нікельвмістких сталей, що забезпечує підвищення якості готової металопродукції", держ. реєстр. № 0104U005823 (керівник роботи).

– "Розробка та дослідження наскрізної технології виробництва канатної катанки з високовуглецевої сталі за ДСТУ 3683-98, охолодженої після прокатки двостадійним способом", держ. реєстр. № 0105U004580 (керівник роботи).

– "Дослідження технологій виробництва сортового прокату й катанки в умовах РУП «БМЗ» та розробка пропозицій щодо її вдосконалення", держ. реєстр. № 0107U006777 (керівник роботи).

– "Розвиток наукових основ створення наскрізних технологій металургійного виробництва, розробки раціональних технологічних схем і вибору конструктивно-структурного складу обладнання сучасних виробничих ліній для отримання металопродукції масового та цільового призначення із заданим комплексом експлуатаційних властивостей", держ. реєстр. № 0107U001704 (відповідальний виконавець).

– "Дослідження впливу термомеханічної обробки з прокатного та окремого нагріву на якісні характеристики металу", держ. реєстр. № 0108U002339 (керівник роботи).

Науково-технічні проекти НАН України:

– "Дослідження та вдосконалення технології виробництва сортових профілів і катанки в потоці сучасних дрібносортових і дровових станів", держ. реєстр. № 0106U008278 (відповідальний виконавець).

– "Розробка науково обґрунтованих практичних пропозицій по удосконаленню виробництва катанки широкого розмірного та марочного сортаменту на сучасних високошвидкісних дровових станах", держ. реєстр. № 0107U005051 (відповідальний виконавець).

– "Створення енергозберігаючої та екологічно чистої технологічної ділянки термічної обробки металу для холодної деформації в профілі простих і складних перерізів. Розділ 1. Створення технологічної ділянки термічної обробки металу з електроконтактним нагріванням сталевих заготовок та подальшим квазіізотермічним охолодженням і очисткою поверхні для холодної деформації в профілі простих і складних перерізів", держ. реєстр. № 0108U004122 (відповідальний виконавець).

**Мета та завдання досліджень.** Метою дисертаційною роботи є на основі виявлених нових закономірностей формування структури та властивостей вдосконалити технологію термомеханічної обробки катанки, підвищивши її пластичність, що забезпечить виробництво сталевих дроту малого діаметру для металокарду (в тому числі надвисокоміцного), високоміцного бортового, канатного, легованого зварювального та низьковуглецевого при зменшенні матеріальних витрат.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні **завдання**:

– дослідити особливості впливу температурно-часових умов гарячої деформації на величину аустенітного зерна вуглецевої сталі;

– встановити закономірності кінетики перетворень високовуглецевого аустеніту при безперервному охолодженні та в ізотермічних умовах у безперервнолітій сталі 90 для високо- й надвисокоміцного дроту;

– виявити особливості впливу режимів ТМО на формування в поверхневому шарі високовуглецевої катанки мікроструктури й окалини;

– встановити взаємозв'язок структурних параметрів із якісними характеристиками високовуглецевої катанки;

– визначити в потоці високошвидкісного дротового стану вплив режимів ТМО на структуру й механічні властивості катанки зі сталі, високовуглецевої, легованої зварювальної та низьковуглецевої звичайної якості;

– використати отримані результати на металургійних підприємствах при виробництві катанки для сталевого дроту малого діаметру.

*Об'єкт дослідження* – процеси формування структури та властивостей в сталевій катанці широкого марочного складу, підданій різноманітним режимам ТМО в потоці високошвидкісного дротового стану.

*Предмет дослідження* – закономірності, які визначають вплив режимів ТМО на структуроутворення, механічні властивості та якісні характеристики катанки зі сталі, високовуглецевої, легованої зварювальної та низьковуглецевої.

**Методи дослідження.** Теоретичні дослідження роботи базуються на фундаментальних положеннях металознавства та термічної обробки металів. Для досліджень використані сталі: високовуглецева, низьковуглецева звичайної якості й легована для зварювального дроту (нікельмолібденова, кремніймарганцева) промислового виробництва та такі, що виготовлені за розробленою в роботі нормативною документацією. У дисертаційній роботі використані сучасні методи досліджень: металографічний, електронномікроскопічний, дилатометричний, мікрорентгеноструктурний, кількісний мікроаналіз структурного стану, оцінка мікротвердості, механічних властивостей катанки та дроту. Проводили математичну обробку даних лабораторних та промислових експериментів. Для прогнозування механічних властивостей сталеві катанки залежно від хімічного складу використали методи математичного моделювання. Технологічні процеси виробництва дослідно-промислових та промислових зразків виробів реалізовували за вимогами прийнятих на відповідних підприємствах нормативно-технічних документів.

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

Основні висновки та положення, що характеризують наукову новизну роботи, полягають у наступному:

**1. Вперше виявлені нові закономірності впливу температурно-часових умов гарячої деформації сталі 80 на величину аустенітного зерна.** З підвищенням температури деформації в інтервалі 850...950°C зі збільшенням часу ізотермічних витримок розмір аустенітного зерна змінюється нелінійно, що обумовлено відмінністю в інтенсивності протікання процесів метадинамічної та повторної (статичної) рекристалізації. Після деформації при температурах 850...950°C та ізотермічній витримці

утворюється аустенітне зерно меншого розміру, ніж при охолодженні й витримці при цих температурах після високотемпературної деформації. Це дає можливість встановлювати при гарячій прокатці й охолодженні потрібний температурно-часовий інтервал, необхідний для формування аустенітного зерна, від розміру якого при подальшому розпаді залежить утворення перліту різної дисперсності.

**2. Вперше встановлені закономірності впливу температури та дрібності гарячої деформації на механічні властивості високовуглецевої сталі 70...90 після ТМО.** При ТМО зниження температури гарячої деформації з 1050...1100°C до 900...950°C (примусове охолодження) і збільшення дрібності деформації (додатковий редуційно-каліруючий блок) призводять до збільшення пластичних властивостей (відносне звуження на 5%), що обумовлено зменшенням розміру аустенітного зерна й дисперсності перліту. Це дозволяє вдосконалювати режими ТМО в процесі високошвидкісної прокатки (більше 100 м/с) сталеві катанки, використовуючи примусове охолодження між чистовим та редуційно-каліруючим блоками.

**3. Вперше встановлені закономірності перетворень аустеніту сталі 90 при безперервному охолодженні та в ізотермічних умовах.** Закономірності процесів структуроутворення для сталі 90 наведені у вигляді термокінетичної та ізотермічної діаграм перетворення переохолодженого аустеніту. При відповідних швидкостях охолодження й температурах ізотермічних витримок у сталі 90 формуються різні структурні стани: надмірний зернограничний цементит, перліт, бейніт і мартенсит. З підвищенням швидкості безперервного охолодження виділення цементиту по межах зерен значною мірою пригнічується й повністю відсутнє при швидкостях понад 10°C/с та при ізотермічному розпаді. В інтервалі ізотермічних витримок при температурах 350...550°C розпад проходить за змішаною кінетикою – з утворенням перліту та бейніту, тоді як при різних швидкостях безперервного охолодження бейніт відсутній. Це дозволяє в процесі ТМО з метою забезпечення необхідного структурного стану визначити режими, температурно-швидкісні для катанки та температурно-часові для дроту з високовуглецевої сталі 90.

**4. Вперше визначений вплив рекалесценції на кінетику перетворення аустеніту сталі 90.** При розпаді переохолодженого аустеніту найбільш істотно виявляється ефект рекалесценції в інтервалі швидкостей безперервного охолодження 1,5...15,0°C/с, а при ізотермічних витримках – в інтервалі температур 400...600°C. При цьому протягом розпаду аустеніту температура збільшується, а її кінцеві значення перевищують початкові. Це дозволяє уточнювати всі тонкощі впливу тепла фазового перетворення високовуглецевого аустеніту на формування структури, що до цих пір не

враховувалось при розробці процесів ТМО з контрольованим охолодженням катанки та при патентуванні дроту.

**5. Встановлені нові закономірності впливу ТМО на формування структури та властивостей сталеві катанки, високовуглецевої, легованої зварювальної та низьковуглецевої.** Для високовуглецевої катанки, підданої ТМО з температурою охолодження після гарячої прокатки вище точки  $A_1$ , встановлені нові залежності між міжпластинчатою відстанню в перліті та іншими якісними характеристиками: глибиною зневуглецьованого шару (залежність лінійна) й кількістю окалини (залежність нелінійна). Пластичні властивості високовуглецевої катанки підвищуються в процесі ТМО у випадку прискореного охолодження після гарячої прокатки до температур  $A_1 + (200...250)^\circ\text{C}$  і подальшого охолодження зі швидкістю, яка визначається з залежності:  $V = (50...100) \times d^2$  протягом  $\tau = (100...60) \times d^2$  (де:  $V$  – швидкість охолодження,  $^\circ\text{C}/\text{c}$ ;  $d$  – діаметр прокату, см;  $\tau$  – час, с), при цьому основу мікроструктури складає сорбітовидний перліт (більше 70%), відсутня замкнута цементитна сітка, зневуглецьований шар (менше 1,8%) рівномірно розподілений по периметру катанки.

Для легованої сталі підвищення пластичних властивостей катанки забезпечується формуванням у феритній матриці достатньо рівномірно розподілених бейніто-мартенситних ділянок незначної кількості (не більше 10%), що не створює істотних перешкод руху дислокацій при холодній деформації.

Для низьковуглецевої катанки підвищення пластичності обумовлене формуванням рівномірної структури зі збільшенням співвідношення фериту до перліту.

Це дозволяє для конкретного структурного стану термомеханічно обробленої сталеві катанки, високовуглецевої (для металокорду, бортового дроту, канатної), легованої (для зварювального дроту) та низьковуглецевої, прогнозувати її здатність до волочіння без проміжної термообробки на подальшому дровому переділі.

**Практичне значення отриманих результатів.** На підставі теоретичних та експериментальних досліджень розроблені нові технологічні процеси ТМО катанки для сталевого дроту малого діаметру, які реалізовані на прокатному й дровому переділі ВАТ «Білоруський металургійний завод – керуюча компанія холдингу Білоруська металургійна компанія» (ВАТ «БМЗ»), а також в умовах ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

Запропоновані в роботі нові способи виготовлення й контролю якості сталевого прокату захищені патентами на винахід: №828, Республіка Білорусь (ВУ), С21D 1/02, С21D 8/06, опубл. 15.08.1995. Бюл. № 3 (6), №11664, Республіка Білорусь (ВУ), МПК С21D 8/06, опубл. 28.02.2009, №88799,

Україна (UA), МПК В21С 51/00, G01N 33/20, опубл. 25.11.2009, Бюл. № 22. Ці способи дозволили при виробництві високовуглецевої катанки підвищити пластичні властивості, дисперсність перліту та оперативність його визначення, забезпечити відсутність замкнутої цементитної сітки, зменшити зневуглецьований шар.

Розроблена технологія ТМО високовуглецевого дроту, що забезпечує формування сорбітної структури й відсутність бейніту (патент на винахід №86324, Україна (UA), МПК С21D 9/52, опубл. 10.04.2009, Бюл. № 7) з необхідними механічними властивостями. На базі цієї технології створені та випробувані дослідні екологічно чисті установки (одно- й багатониткові), що використовують у якості охолоджуючого середовища замість свинцю гарячий водний розчин з поверхнево активними речовинами або струйне повітряне охолодження.

Розроблені режими ТМО катанки з низьковуглецевої сталі звичайної якості та легованої для зварювального дроту, які отримали своє відображення в технічних документах ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» (СТІ 228-112-2008 та зміна №3 до режимів охолодження прокату в потоці дровового стану 150 - 1 СПЦ - 1) та ВАТ «БМЗ» (зміни до ТК 840-ПЗ-01-2007).

На підставі встановленого в роботі впливу режимів охолодження в процесі ТМО на пластичність при переробці катанки на дріт посилені вимоги до мікроструктури й властивостей, які відображені в зміні №11 до заводських технічних умов ВАТ «БМЗ» ЗТУ 840-03-2006 «Катанка сталевая сорбітизована для металокарду, бортового дроту та дроту для рукавів високого тиску» та в розроблених ТУ У 276.3-23365425-638.2008 «Дріт сталевий термічно оброблений».

Розроблені й впроваджені на ВАТ «БМЗ» режими ТМО катанки з високовуглецевої сталі (зміни до ТК 840-ПЗ-01-2002 та ТК 840-ПЗ-01-2007), у тому числі з марки 90, для високоміцного та надвисокоміцного дроту у металокарду.

Освоєння нової технології дозволило зменшити витратний коефіцієнт металу в середньому на 10%. Загальний фактичний економічний ефект від упроваджених технологічних рішень становить 31,7 мільйона гривень, частка автора – 4,44 мільйона гривень.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати дисертаційної роботи отримані здобувачем самостійно. Статті [1-4, 27 37-40, 56-58, 69] здобувачем опубліковані одноосібно. При проведенні досліджень, результати яких опубліковані у співавторстві, автору належать: проведення теоретичного аналізу [5, 10, 18, 19, 71]; постановка та проведення експериментів, дослідження впливу термомеханічної обробки на структуру та властивості катанки різного хімічного складу, обробка та аналіз результатів досліджень

[6, 7, 15, 16, 26, 53-55]; постановка та проведення експериментів, дослідження особливостей кінетики фазових перетворень сталі 90, обробка та аналіз результатів досліджень [11, 33, 35, 49-52, 63, 65]; встановлення взаємозв'язку між дисперсністю перліту, зневуглицюванням та кількістю окалини [8, 9, 14, 25, 29, 61, 62]; розробка наукових основ удосконаленої технології виробництва катанки з високовуглецевої [21, 23, 28, 36, 59, 64], низьковуглецевої [30, 41, 45] та легованої сталі [12, 20, 44, 48]; проведення промислових експериментів та науково-технологічне супроводження освоєння промислового виробництва катанки з високовуглецевої [13, 22, 24, 34, 42, 60, 66-68, 70, 72-78], низьковуглецевої [32, 43] та легованої сталі [17, 31, 46, 47]. В докторській дисертації не використані результати кандидатської дисертації здобувача.

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали дисертаційної роботи були представлені й схвалені на міжнародних наукових конференціях «Проблеми сучасного матеріалознавства (Стародубовські читання)» (Дніпропетровськ, ПДАБА, 2006, 2007, 2009 рр.); «Металургія ХХІ століття» (Жлобин, Республіка Білорусь, 2004 р.); міжнародній конференції «Сучасне матеріалознавство: досягнення та проблеми» MMS-2005 (Київ, 2005 р.); міжнародній науково-технічній конференції «Довговічність стальних канатів» Міжнародної асоціації дослідників стальних канатів (Одеса, 2005, 2007 рр.); міжнародних науково-технічних конференціях «Ливарне виробництво та металургія. Білорусь» (Республіка Білорусь: Барановичі, 2006 р., Жлобин, 2007 р., Мінськ, 2009, 2012 рр.); міжнародній науково-технічній конференції «Нові наукомісткі технології, обладнання й оснащення для обробки матеріалів тиском» (Краматорськ, 2010 р.); ІХ Міжнародній конференції «Пластична деформація металів» (Дніпропетровськ, 2011 р.).

**Публікації.** Матеріали та результати дисертації опубліковані в 78 наукових роботах, у тому числі: 55 статей – у фахових наукових журналах та збірниках, із них 36 – у виданнях іноземних держав та у виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз; 4 патенти; 13 публікацій у матеріалах, збірниках та тезах доповідей на міжнародних наукових конференціях, 6 – у додаткових виданнях.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 353 сторінки, з них 274 сторінки основного тексту, в тому числі 33 таблиці, 112 рисунків, а також список із 375 літературних джерел на 40 сторінках і додатки на 28 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтована актуальність теми, визначені мета, завдання, об'єкт, предмет та методи досліджень, сформульовані наукова новизна та практична значимість роботи, відображені особистий внесок здобувача, публікації та апробації.

**У першому розділі** проведений аналіз літературних даних, що стосуються технологій ТМО катанки, виготовленої за традиційними процесами. На ранніх етапах науково-технологічних розробок процесів ТМО перевага віддавалася двом її основним схемам, високотемпературній і низькотемпературній, які передбачають загартування на мартенсит після гарячої чи теплої деформації аустеніту. Потім були розроблені схеми ТМО, що передбачають перетворення аустеніту в ізотермічних умовах після високотемпературної та в процесі низькотемпературної деформацій. Ці схеми дозволяють отримати ферито-перлітну, перлітну або бейнітну структури, які в порівнянні з мартенситною забезпечують більш високу пластичність сталі при меншій міцності на розрив. Питанням термічної обробки металу з прокатного нагріву присвячені роботи К. Ф. Стародубова та його послідовників І. Г. Узлова, В. В. Парусова, особливостям пластичності та деформаційному старінню вуглецевого дроту приділяється увага в роботах В. П. Фетисова. Вивченню процесу ТМО прокату після гарячої деформації присвячені роботи школи М. Л. Бернштейна. Зневуглецювання поверхні металу є небажаним явищем, а фазовий склад і повнота видалення окалини визначає ефективність подальшої переробки прокату. Питанням зневуглецювання та окалиноутворення при нагріванні присвячені роботи М. В. Темлянцева, В. І. Губинського та ін.

В останні роки на ринку металопрокату з'явилася велика потреба в високовуглецевій катанці з вмістом вуглецю 0,9% і вище для надвисокоміцного дроту малого діаметру й металокорду, які раніше не вироблялися. Однак для освоєння виробництва такої катанки з безперервнолітої сталі 90 в потоці високошвидкісного дрогового стану при високотемпературній прокатці та патентуванні дроту відсутні дані про особливості кінетики перетворень високовуглецевого аустеніту в процесі ТМО при безперервному охолодженні та в ізотермічних умовах.

З метою збільшення продуктивності дрогових станів останні розробки спрямовані на збільшення швидкості прокатки (більше 100 м/с), для цього існуючі технологічні лінії з чистовими блоками додатково оснащуються редуційно-калібруючими блоками. Однак, як вплине така підвищена дрібність деформації на якісні характеристики катанки для сталевого дроту малого діаметру, мало вивчено.

Підвищення пластичності катанки забезпечить її конкурентоспроможність завдяки виключенню проміжної термообробки з технологічного циклу виготовлення сталевих дротів малих діаметрів для металокорду, бортового, канатного, легованого зварювального та низьковуглецевого.

На підставі аналізу науково-технічної літератури, патентів та з урахуванням сучасних тенденцій розвитку металургійного виробництва, зумовлених вимогами світового ринку до якості катанки для сталевих дротів малого діаметру різного призначення, обґрунтована постановка наукової проблеми й завдання дисертаційної роботи.

**Другий розділ** присвячений вибору матеріалу та методів дослідження. Хімічний склад основних досліджуваних промислових сталей наведений в таблиці 1.

Таблиця 1 – Хімічний склад основних досліджених сталей

Марка	Масова доля елементів, %									
	C	Si	Mn	Cr	P	S	Ni	Mo	Al	N
80	0,82	0,22	0,55	0,04	0,006	0,012	0,03	-	0,001	0,005
45	0,45	0,29	0,49	0,12	0,010	0,026	0,08	-	0,002	0,005
90К	0,92	0,21	0,44	0,02	0,005	0,009	0,01	-	0,001	0,004
70	0,74	0,33	0,59	0,04	0,014	0,021	0,01	-	0,001	0,007
Св-10НМА	0,08	0,22	0,55	0,02	0,007	0,017	1,19	0,42	0,012	0,007
Ст1сп	0,06	0,15	0,43	0,05	0,013	0,006	0,15	-	0,002	0,009
SAE 1005	0,05	0,10	0,25	0,10	0,015	0,007	0,14	-	0,001	0,008

Хімічний склад випущених у потоці дровового стану дослідних та дослідно-промислових партій катанки марок 70...80К (Б, БВ), 90К (Б), Св-10НМА, Св-08Г1НМА, Св-08Г2С, Ст1сп, SAE 1005...1010 відповідав нормативним вимогам (ДСТУ 3683-98, ТУ У 14-4-470-2000, ЗТУ 840-03-2006, ТУ У 271-4-548-2003, ДСТУ 2651:2005/ГОСТ 380-2005, ГОСТ 30136-95, ГОСТ 2246-70, ASTM A510М, специфікаціям та ін. НТД).

У роботі використані сучасні методи контролю, аналізу та обробки експериментальних даних. Аналіз хімічного складу сталі здійснювали на спектрометрах «ARL-3460», «Spectrolab-M», «Spectroflaim», газових аналізаторах «LECO-TN 314», «ТС-436». Механічні властивості прокату визначали за ГОСТ 1497-84 на розривних машинах «EU-100», «EDZ-40», «Р-20», «UP-500». Вимірювання твердості проводили на приладах «ТК 14-250», «ТР 5006», мікротвердості – на «ПМТ-3» та «МНТ-240».

Структурні параметри металу визначали на оптичних мікроскопах «NEOPHOT 2», «NEOPHOT 32», «Axiovert 200M MAT», автоматичному аналізаторі зображення «А-3001», електронних мікроскопах «СAMBRIGE», «РЕМ 106И», «УЕМВ-100К», «ЕМ-125».

Фазовий склад окалини визначали на дифрактометрі «ДРОН-2,0». Для вивчення розпаду аустеніту високовуглецевої сталі використовували дилатометри «МД-83» і «АД-80» конструкції ІЧМ НАНУ. Розмір дійсного зерна визначали за ГОСТ 5639-82, глибину зневугльцюваного шару – за ГОСТ 1763-68 та ISO 4954:1993, макроструктуру – за ГОСТ 10243-75, мікроструктуру – за ГОСТ 8233-56 і еталонними шкалами відповідних технічних умов.

Для оцінки експериментальних даних і прогнозування властивостей катанки використовували методи математичної статистики та математичного моделювання. Гарячу прокатку зразків з промислових сталей 80 і 45 виконували в лабораторних умовах на стані «ДУО-280» ІЧМ НАНУ. У виробничих умовах в потоці високошвидкісного дротового стану випущено дослідні та дослідно-промислові партії катанки для сталевих дротів малого діаметру з високовуглецевих, легованих зварювальних і низьковуглецевих сталей.

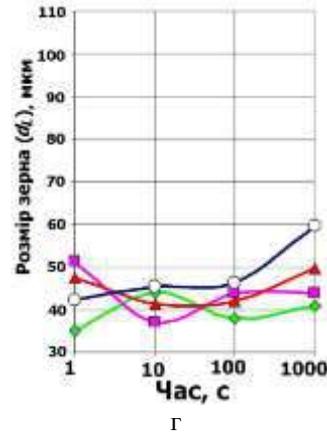
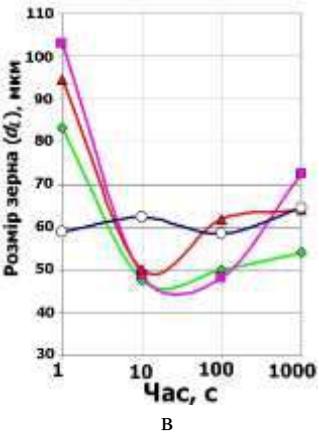
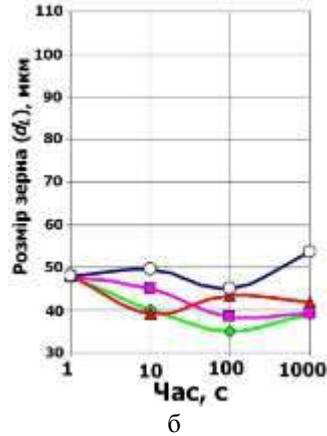
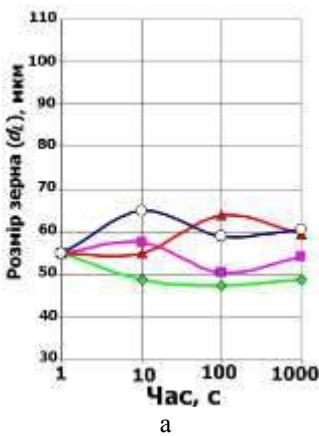
**Третій розділ** містить результати досліджень впливу температурно-часових умов обробки після гарячої прокатки на розмір аустенітного зерна в сталях 80 і 45 (див. табл. 1).

Прокатку й термічну обробку зразків здійснювали моделюванням процесів: із контрольованою температурою прокатки (КП) і контрольованим охолодженням (КО). Нагрів під прокатку здійснювали до температури  $1050 \pm 10^\circ\text{C}$ . Моделювання обробок проводили при наступних параметрах:

– КП: охолодження до температур прокатки 950, 900, 850 і  $800^\circ\text{C}$ , прокатка з подальшою ізотермічною витримкою в соляній ванні (1, 10, 100 і 1000 с) при температурах прокатки, загартування у воді;

– КО: прокатка при температурі  $1050^\circ\text{C}$  з подальшою ізотермічною витримкою (1, 10, 100 і 1000 с) в соляних ваннах з температурою 950, 900, 850 і  $800^\circ\text{C}$ , загартування у воді.

Представлені на рис. 1 діаграми свідчать про нелінійні зміни величини зерна аустеніту при зміні температури та тривалості ізотермічної витримки після високотемпературної деформації сталі 80 (див. рис. 1, а, в) і 45 (див. рис. 1, б, г).



а – сталь 80, режим КО; б – сталь 45, режим КО; в – сталь 80, режим КП;  
г – сталь 45, режим КП;

Рисунок 1 – Залежність середнього умовного діаметра зерна ( $d_L$ ) аустеніту сталі 80 і 45, підданій гарячій деформації зі ступенем 15%, від часу витримки в ізотермічних середовищах з температурою 800°C (◆), 850°C (■), 900°C (▲), 950°C (◇).

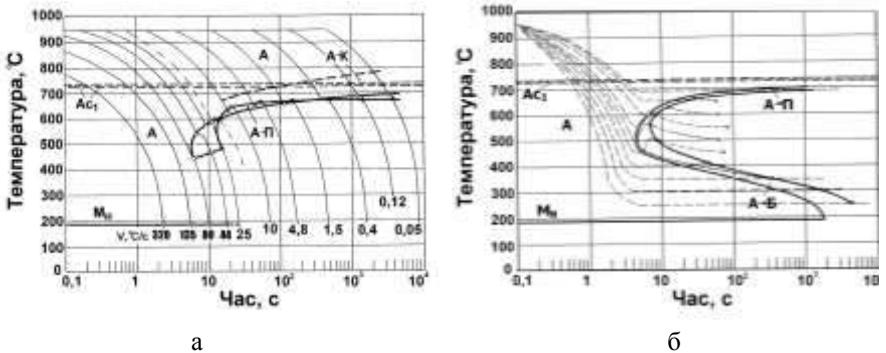
У залежності від часу ізотермічних витримок були встановлені наступні закономірності зміни величини аустенітного зерна. При температурах КП і КО 850°C найбільш повно проходять процеси метадинамічної, а більше 900°C – повторної рекристалізації, розвиток якої зі збільшенням температури інтенсифікується.

Незалежно від схеми моделювання процесів обробки ізотермічні витримки при температурах 850...950°C протягом від 10 до 100 с призводять до подрібнення, а від 100 до 1000 с – збільшення аустенітних зерен; при 800°C протягом від 10 до 1000 с розмір зерна сталі 80 практично не змінюється, а в доєвтектоїдній сталі 45 відбувається його подрібнення, що обумовлено початком  $\gamma \rightarrow \alpha$  перетворення.

При ізотермічній витримці 10 с у разі КП утворюється аустенітне зерно меншого розміру, ніж при КО, що обумовлено протіканням метадинамічної рекристалізації, при якій подрібнюється аустенітне зерно.

Зі збільшенням у сталі кількості вуглецю розмір аустенітного зерна при КП і КО збільшується, що обумовлено інтенсифікацією процесів повторної рекристалізації.

У **четвертому розділі** вивчена кінетика перетворень аустеніту високовуглецевої безперервнолітої сталі 90К (див. табл. 1) при безперервному охолодженні та в ізотермічних умовах. Перетворення аустеніту вивчали на підставі спільного аналізу дилатограм, термограм і мікроструктур. Для сталі 90К (з температурою аустенізації – 950°C) були визначені критичні точки:  $M_n = 185^\circ\text{C}$  і інтервал  $A_{c1} = 725...735^\circ\text{C}$ . Діаграми перетворень аустеніту сталі 90К при безперервному охолодженні з різними швидкостями ( $V$ ) та в ізотермічних умовах представлені на рис. 2.

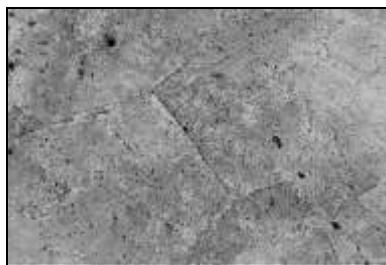


-○- – початок; -●- – кінець перетворень аустеніту; -×- – досягнення температури ізотермічної ванни;

Рисунок 2 – Діаграми перетворень аустеніту сталі 90К при безперервному охолодженні (а) та в ізотермічних умовах (б).

Відомо, що в заєвтектоїдній сталі в процесі охолодження з пересиченого вуглецем аустеніту виділяється цементит ( $A \rightarrow K$ ). З термокінетичної діаграми (див. рис. 2, а) видно, що при середній швидкості охолодження

0,05°C/с цементит виділяється у вигляді тонкої сітки по межах зерен (рис. 3, а). З підвищенням швидкості охолодження кількість виділень цементиту зменшується (рис. 3, б), і залишки цементитної сітки спостерігаються тільки при швидкостях менше 10°C/с. Мікροструктурні дослідження розпаду аустеніту в ізотермічних умовах (див. рис. 2, б) показали відсутність виділень цементитної сітки по межах зерен у всьому інтервалі досліджених температур.



а × 800



б × 800

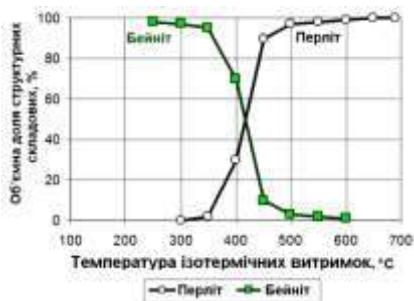
а – швидкість 0,05°C/с; б – швидкість 4,8°C/с;

Рисунок 3 – Цементитна сітка сталі 90К після аустенізації та подальшого безперервного охолодження з різною швидкістю.

За результатами мікροструктурних досліджень побудовані структурні діаграми (рис. 4) перетворень високовуглецевого аустеніту при безперервному охолодженні та після різних температур ізотермічних витримок.



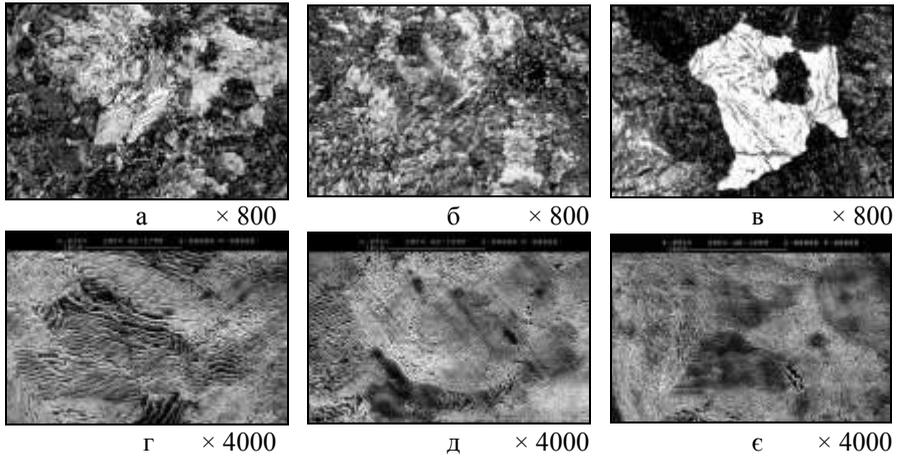
а



б

Рисунок 4 – Структурні діаграми перетворень аустеніту сталі 90К при термодинамічних (а) та ізотермічних (б) умовах.

При швидкостях безперервного охолодження менше  $25^{\circ}\text{C}/\text{c}$  розпад переохолодженого аустеніту відбувається по дифузійному механізму з утворенням перлітних структур (див. рис. 4, а) різної дисперсності (рис. 5).



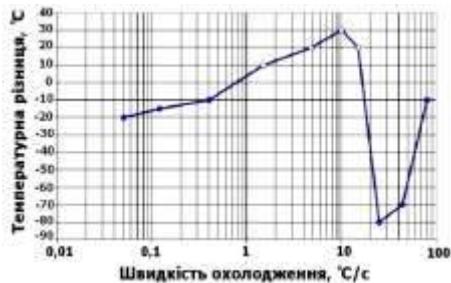
а, г – швидкість  $4,8^{\circ}\text{C}/\text{c}$ ; б, д – швидкість  $10^{\circ}\text{C}/\text{c}$ ; в, є – швидкість  $25^{\circ}\text{C}/\text{c}$ ;  
Рисунок 5 – Мікроструктура сталі 90К після аустенізації та наступного охолодження з різною швидкістю.

Середня міжпластинчата відстань у перліті при швидкостях охолодження  $4,8^{\circ}\text{C}/\text{c}$ ,  $10^{\circ}\text{C}/\text{c}$  і  $25^{\circ}\text{C}/\text{c}$  становить відповідно 0,22 мкм, 0,16 мкм і 0,13 мкм. При швидкостях вище  $80^{\circ}\text{C}/\text{c}$  розпад іде за бездифузійною, а в інтервалі  $25..80^{\circ}\text{C}/\text{c}$  – за змішаною кінетикою (див. рис. 4, а), при цьому ступінь розпаду за дифузійним або бездифузійним механізмом істотно залежить від швидкості охолодження. Структура бейніту у всьому діапазоні швидкостей безперервного охолодження не виявлена.

В сталі 90 додаткове збільшення вмісту хрому (до 0,23%) і зменшення вмісту марганцю (до 0,3%) і вуглецю (до 0,87%) при безперервному охолодженні зі швидкістю  $\sim 15^{\circ}\text{C}/\text{c}$  зменшує середнє значення міжпластинчатої відстані в перліті на  $\sim 14\%$ , а в ізотермічних умовах збільшує час розпаду на  $\sim 25\%$ .

На кінетику розпаду переохолодженого аустеніту впливають як швидкість охолодження, так і, в процесі самого розпаду, явище рекалесценції, яке характеризується збільшенням температури при переохолодженні через те, що кількість тепла, що виділяється в результаті перетворення (приховане тепло кристалізації), більша відведеного. Під час розпаду аустеніту на перліт в інтервалі швидкостей охолодження від  $1,5^{\circ}\text{C}/\text{c}$  до  $10^{\circ}\text{C}/\text{c}$  (див. рис. 2, а)

температура кінця розпаду вища температури початку на  $10^{\circ}\text{C}$  і  $30^{\circ}\text{C}$  відповідно (рис. 6), що пояснюється виділенням за короткий проміжок часу значної кількості тепла при фазовому перетворенні. В інтервалі швидкостей  $0,4...0,05^{\circ}\text{C}/\text{c}$  (див. рис. 2, а) перетворення проходить практично в ізотермічних умовах: температура початку розпаду аустеніту  $680...690^{\circ}\text{C}$ , а через малі швидкості охолодження та значний час розпаду температура кінця перетворення становить  $660...670^{\circ}\text{C}$ .



—●— — зниження; —○— — приріст температури кінця перетворення;

Рисунок 6 – Вплив рекалесценції на температурну різницю між початком і кінцем перетворення аустеніту сталі 90К при безперервному охолодженні.

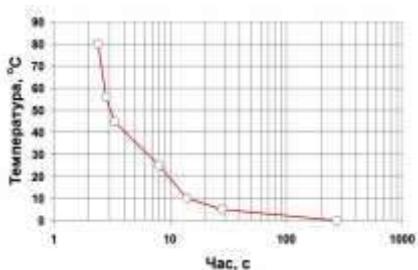


Рисунок 7 – Вплив тривалості розпаду аустеніту сталі 90К в ізотермічних умовах на температуру рекалесценції.

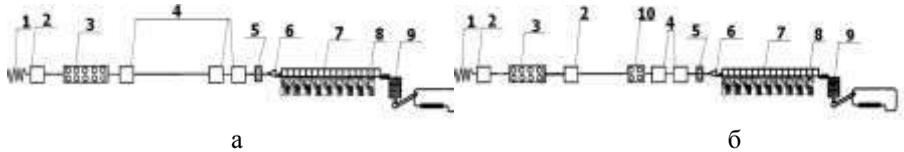
При переробці холоднодеформований дріт може піддаватися ТМО з використанням ізотермічної операції – патентування. При розпаді аустеніту в інтервалі ізотермічних витримок  $400...600^{\circ}\text{C}$  рекалесценція призводить до підвищення температури зразка (див. рис. 2, б), при цьому, чим менше часу необхідно для проходження перетворення, тим більше прояв рекалесценції (рис. 7). При температурах вище  $650^{\circ}\text{C}$  і нижче  $400^{\circ}\text{C}$  розпад аустеніту протікає практично в ізотермічних умовах. З діаграми (див. рис. 4, б) випливає, що при розпаді аустеніту сталі 90К в ізотермічних умовах є дві структурні області, перлітна та бейнітна, з температурним розпадом за змішаною кінетикою в інтервалі ізотермічних витримок при  $350...550^{\circ}\text{C}$ .

**У п'ятому розділі** виявлені нові закономірності процесів структуроутворення, механічних властивостей і окалиноутворення при ТМО високовуглецевої катанки. У потоці дротового стану катанку піддавали ТМО за схемами:

– КО – контрольоване охолодження з температур  $1050...1100^{\circ}\text{C}$  після десятикільтового (ЧБ) чистового блоку (швидкість прокатки до  $90\text{ м}/\text{с}$ ) до температури на виткоутворювачі ( $T_{\text{вo}}$ )  $700...930 \pm 20^{\circ}\text{C}$  (рис. 8, а);

– КП – контрольоване охолодження в процесі підвищеної дрібності деформації після ЧБ при  $925 \pm 25^\circ\text{C}$  перед чотирьохкільтьовим редукційно-калібруючим (РКБ) блоком (швидкість прокатки більше 100 м/с) з температурою  $T_{\text{во}} 850\text{...}930 \pm 15^\circ\text{C}$  (рис. 8, б).

Остаточне охолодження розкладених витків катанки проводили на рольгангу з різною швидкістю транспортування, кількістю відкритих кришок і працюючих вентиляторів. Режими та властивості наведені в табл. 2-3.



1 – гаряча прокатка; 2 – секція попереднього охолодження; 3 – чистовий блок; 4 – секції регульованого охолодження; 5 – трайбапарат; 6 – виткоутворювач; 7 – кришки та рольганг для охолодження витків катанки; 8 – вентилятори; 9 – виткозбірник; 10 – редукційно-калібруючий блок;

Рисунок 8 – Схема ТМО катанки з використанням контрольованого охолодження після чистового (схема КО) блоку (а) та після чистового й редукційно-калібруючого (схема КП) блоків (б).

Таблиця 2 – Механічні властивості катанки 90К, підданої ТМО за різними режимами

Схема ТМО і номер режиму	Температура			Кількість вентиляторів	Механічні властивості			
	Після ЧБ, $\pm 20^\circ\text{C}$	Перед РКБ	$T_{\text{во}}, \pm 15^\circ\text{C}$		$\sigma_{\text{в}}, \text{Н/мм}^2$	$\Psi, \%$	$\delta_5, \%$	
КО	1	1080	-	850	9	1230±55	34±3,3	12±1,4
	2	1070	-	930	9	1240±40	36±2,6	13±1,3
КП	3	1070	918	850	9	1200±25	35±3,1	12±1,2
	4	1070	920	930	9	1220±25	41±1,9	15±1,1
	5	1050	980	930	7	1220±20	40±0,8	15±0,7
Вимоги ЗТУ 840-03-2006 (зм.№11)						1165–1320	≥28	≥9

Виявлено, що для високовуглецевої катанки в ділянках з підвищеною підсадковою неоднорідністю (до 3 балу) при ТМО з температурою виткоутворювання  $850 \pm 15^\circ\text{C}$  (режими №1 і №3, див. табл. 3) через

пересичення аустеніту вуглецем утворюється замкнута цементитна сітка, а при температурах  $930 \pm 15^\circ\text{C}$  вона відсутня. Утворена замкнута цементитна сітка в катанці характеризується структурною спадковістю й не усувається навіть при подальшому патентуванні дроту, виготовленого з такого металу.

Таблиця 3 – Мікроструктурні характеристики катанки 90К, підданої ТМО за різними режимами (див. табл. 2)

Схема ТМО і номер режиму		Мікроструктурні характеристики				
		Перліт 1-го балу, %	Номер зерна	Глибина зневугле- цьованого шару, мм (%)	Замкнута цемен- титна сітка	Ліквіація, бал
КО	1	60	7–11	0,09 (1,64)	Є	2,5
	2	85	6–10	0,075 (1,36)	Немає	2,5
КП	3	70	9–11	0,08 (1,45)	Є	3
	4	80	8–11	0,07 (1,27)	Немає	3
	5	85	8–10	0,065 (1,18)	Немає	3
Вимоги ЗТУ 840-03-2006 (зм. №11)		$\geq 70$	Не норм.	$\leq 0,10$ мм ( $\leq 1,8\%$ )	Не допуск.	$\leq 3$

Виявлено, що при ТМО в результаті зниження температури гарячої деформації з  $1050 \dots 1100^\circ\text{C}$  (режим №2, див. табл. 2) до  $900 \dots 950^\circ\text{C}$  (режим №4, див. табл. 2), в результаті підвищення дрібності деформації (використання додатково редуційно-калібруючого блока), проходять процеси повторної (статичної) рекристалізації, частковий розвиток яких призводить до підвищення пластичних властивостей при зменшенні величини зерна, дисперсності перліту та міцності високовуглецевої катанки. На масиві плавок встановлено, що у високовуглецевій катанці, обробленій за схемою КП (режим №4, див. табл. 2), пластичні властивості збільшилися (відносно звуження на  $\sim 5\%$ , відносно подовження  $\sim 2\%$ ), а тимчасовий опір зменшився для сталі 90 (рис. 9) і 80 на  $20 \dots 25 \text{ Н/мм}^2$ , для сталі 70 – на  $40 \text{ Н/мм}^2$ .

Виявлені особливості структуроутворення в поверхневих шарах високовуглецевої катанки, підданої в процесі ТМО контрольованому охолодженню (за схемою КО), що включає після ЧБ прискорене охолодження водою (зі швидкостями  $1000 \dots 400^\circ\text{C/с}$  протягом  $\sim 0,3$  с) до температур  $T_{\text{во}}$  в інтервалі  $680 \dots 950^\circ\text{C}$  з наступним інтенсивним охолодженням повітрям розкладених витків на роликовому транспортері Стелмор.

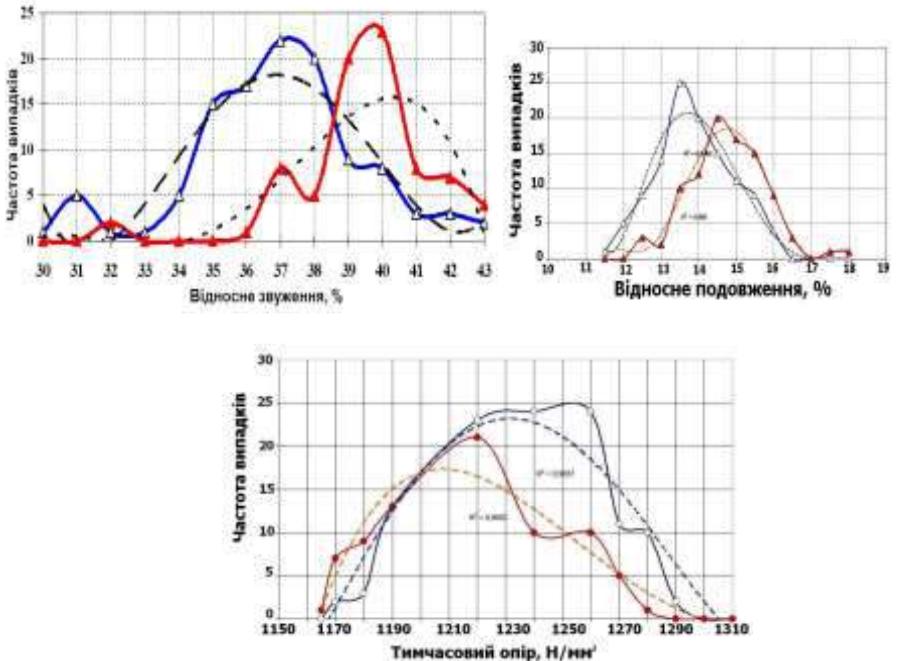
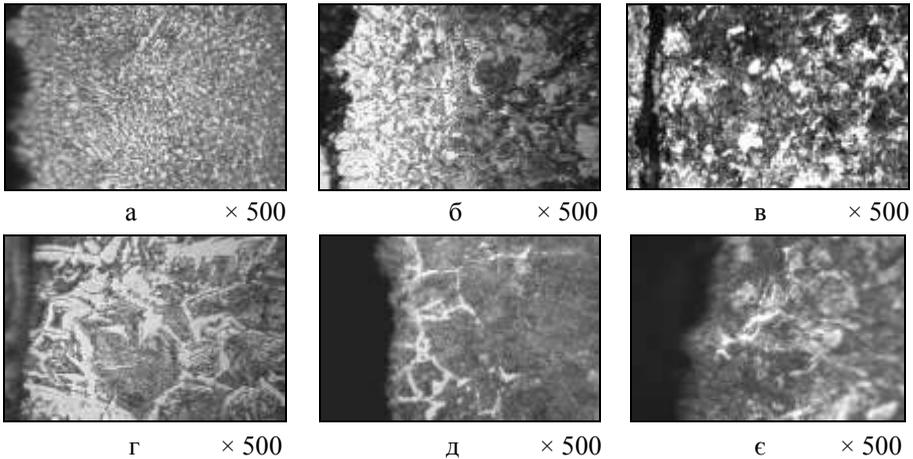


Рисунок 9 – Розподіл відносних частот за механічними властивостями катанки сталі 90 з використанням ТМО за схемами обробки: КО (-o- ; -Δ-) і КП (-●- ; -▲-).

Розподіл структурних складових у поверхневих шарах, які формально визначають глибину знеуглецьованого шару високовуглецевої катанки, може мати різний характер. Замкнутий по периметру, при цьому глибина шару значна (2,5% і більше), а в окремих місцях є ділянки сорбіту відпуску (рис. 10, а), при цьому температура  $T_{\text{во}}$  680...720°C (менше  $A_1$ ). Локальний характер розподілу з глибиною менше 2,0% (рис. 10, б, в) формується в температурному інтервалі 850...950°C.

Подальша термічна обробка (нормалізація, яка використовується на дотовому переділі) змінює морфологію, але зберігається спадковість в частині відносної глибини розповсюдження поверхневих структур. Так, в нормалізованій катанці, попередньо підданій ТМО до температур  $T_{\text{во}}$  700°C, розподіл структурно вільного фериту по периметру катанки замкнутий з глибиною до 2,5% (рис. 10, г). Збільшення температури  $T_{\text{во}}$  від 850°C до 950°C в нормалізованій катанці призводить до зменшення глибини

розповсюдження структурно вільного фериту від 1,5% (рис. 10, д) до 0,5% (рис. 10, є) відповідно.



а, г – температура  $T_{\text{во}}$  700°C; б, д – температура  $T_{\text{во}}$  850°C; в, є – температура  $T_{\text{во}}$  950°C;

Рисунок 10 – Мікроструктура поверхневих ділянок катанки 70 (див. табл. 1) після ТМО (а-в) з різною температурою  $T_{\text{во}}$  і наступною нормалізацією (г-є).

Використання в прокатній лінії дротового стану процесу ТМО з підвищеною дрібністю деформації (за схемою КП) сприяє формуванню в поверхні високовуглецевої катанки знеуглецьованого шару глибиною менше 1,8% з рівномірним розподілом по периметру (рис. 11, а), що є однією з переваг такої катанки в порівнянні з раніше виробленою за схемою КО (рис. 11, б).

Окалина на поверхні металу, в тому числі її здатність до видалення, є одним із важливих показників якості металопрокату. Тому особлива увага приділяється не тільки кількості окалини, але й фазовому складу її.

Варіюванням режимами охолодження в процесі ТМО встановлено, що кількість окалини на поверхні високовуглецевої катанки після ТМО зменшується при зниженні температури виткоутворювання та підвищенні швидкості подальшого повітряного охолодження (рис. 12).

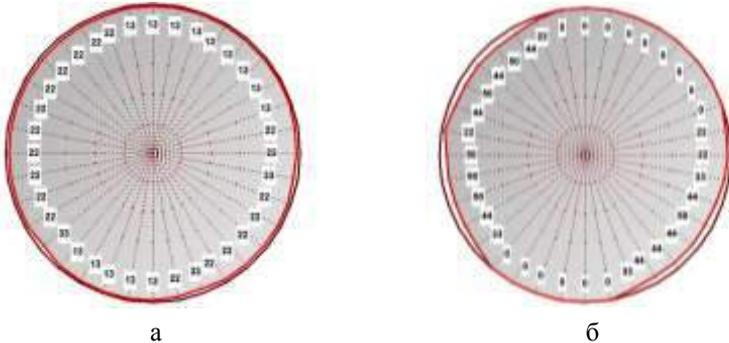
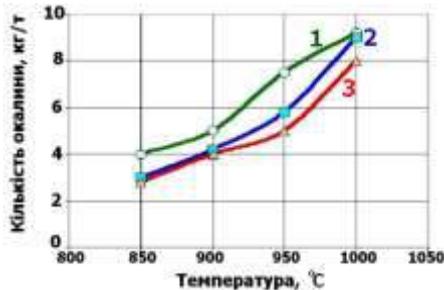


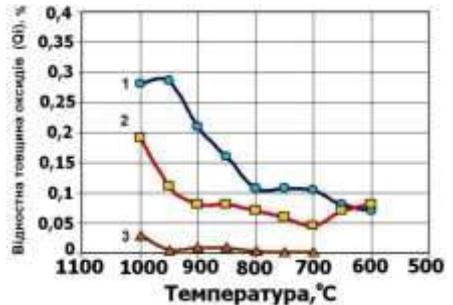
Рисунок 11 – Розподіл глибини знеуглецьованого шару (цифри у відповідних експериментальних точках показують глибину знеуглецьовання,  $\text{мм} \times 10^3$ ) по периметру катанки 90К після ТМО з температурою  $T_{\text{во}}$  930°C (а) і 850°C (б).

На рис. 13 наведено зміни відносної товщини кожної фазової складової окалини від температури виткоутворювання та при охолодженні повітрям із середньою швидкістю  $\sim 15^\circ\text{C}/\text{c}$ . На поверхні високовуглецевої катанки зі зниженням температури виткоутворювання товщина шару окалини зменшується, при цьому кожен оксид в окаліні має різну відносну величину.



1 – 6°C/c; 2 – 10°C/c; 3 – 15°C/c;

Рисунок 12 – Зміна кількості окалини на поверхні високовуглецевої катанки від температури виткоутворювання й швидкості повітряного охолодження.



1 – FeO; 2 – Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>; 3 – Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;

Рисунок 13 – Залежність відносної товщини оксидів заліза (Qi) на поверхні катанки сталі 90К від температури виткоутворювання.

При ТМО високовуглецевої катанки з температурою  $T_{\text{во}} 930 \pm 15^\circ\text{C}$  формується окалина з вмістом вюститу (FeO) в 3 рази більшим, ніж інших оксидів заліза, що забезпечує подальше високе технологічне очищення

поверхні. Для вуглецевих сталей, підданих ТМО зі зменшенням температури контрольованого охолодження, кількість окалини зменшується, а глибина знеуглецьованого шару збільшується, залежність цих показників (рис. 14) має нелінійний характер і залежить від вмісту вуглецю.

Найважливішим параметром мікроструктури високовуглецевої катанки, що визначає опір пластичній деформації та руйнуванню, є міжпластинчата відстань (дисперсність) у перліті. У високовуглецевій катанці, підданій ТМО, охолодження водою нижче точки  $A_1$  недоцільне, оскільки в поверхні починає утворюватися сорбіт відпуску, що є неприпустимою структурою.

У процесі ТМО при контрольованому охолодженні високовуглецевої катанки для кожного конкретного температурно-швидкісного режиму (температура виткоутворювання, швидкість охолодження на транспортері) відповідають певні значення міжпластинчатої відстані в перліті, глибина знеуглецьованого шару та товщина сформованої окалини, що дозволяє встановити взаємозв'язок між цими якісними показниками.

Встановлено, що для високовуглецевої катанки, підданій ТМО з контрольованим охолодженням до температур  $T_{во}$  вище точки  $A_1$ , залежність (рис. 15) міжпластинчатої відстані у перліті від глибини знеуглецьованого шару має лінійний характер, а від відносної товщини окалини – нелінійний.

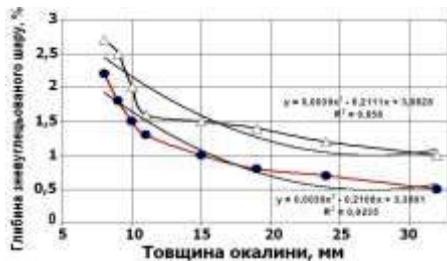


Рисунок 14 – Залежність глибини знеуглецьованого шару від товщини окалини в катанці сталі 80 (-●-) і 45 (-Δ-), підданій ТМО.



Рисунок 15 – Взаємозв'язок міжпластинчатої відстані у перліті від глибини знеуглецьованого шару (-○-) та відносної товщини шару окалини (-■-) високовуглецевої катанки, підданій ТМО.

На масиві плавок отримані регресійні рівняння, які дозволяють для високовуглецевої катанки, підданій контрольованому охолодженню в процесі ТМО, прогнозувати величину міжпластинчатої відстані у перліті ( $S$ , мкм) залежно від глибини ( $h_{знев}$ , мкм) знеуглецьованого шару (1) або товщини шару ( $h_{ок}$ , мкм) окалини (2).

$$S = 0,0015 \times h_{\text{зпв}} + 0,0676 \quad (1)$$

$$S = 0,267 - 0,61 \times h_{\text{ок}} + 0,68 \times h_{\text{ок}}^2 \quad (2)$$

У шостому розділі наведені особливості впливу контрольованого охолодження в процесі ТМО на структурний стан і механічні властивості катанки зі сталі, низьковуглецевої звичайної якості та легованої зварювального призначення.

Варіюванням режимами ТМО в потоці високошвидкісного дротового стану, що включають контрольоване охолодження на лінії Стелмор, встановлено, що найбільш сприятливий ефект у плані підвищення технологічної пластичності при волочінні катанки діаметром 5,5 мм зі сталі, низьковуглецевої звичайної якості й легової для зварювального дроту, досягається при використанні знеміцнюючої ТМО, що забезпечує знижену міцність.

Для переробки низьковуглецевої катанки без пом'якшувальної термічної обробки на дріт малого діаметру (до 1,0 мм) необхідно забезпечити міцність  $\leq 410 \text{ Н/мм}^2$  (базові вимоги: тимчасовий опір  $\leq 460 \text{ Н/мм}^2$ ).

ТМО низьковуглецевої катанки (див. табл. 1) при температурі  $T_{\text{во}}$  в інтервалі  $A_1 + 200 \dots 250^\circ\text{C}$  з наступним уповільненим охолодженням на рольгангу при закритих кришках і відключених вентиляторах (див. рис. 8) забезпечує формування рівномірної структури фериту з ділянками пластинчатого перліту (рис. 16).



а  $\times 500$



б  $\times 500$

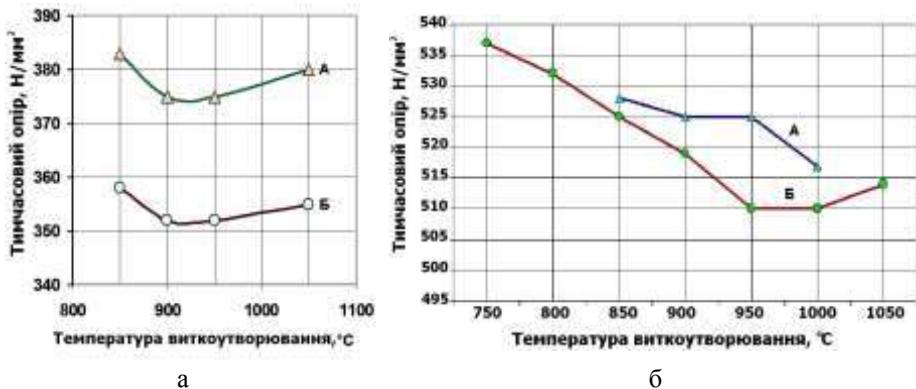
а – швидкість  $3,0^\circ\text{C/s}$ ; б – швидкість  $1,0^\circ\text{C/s}$ ;

Рисунок 16 – Характерна структура низьковуглецевої катанки після ТМО з температурою  $T_{\text{во}}$   $920^\circ\text{C}$  й наступним охолодженням із різними швидкостями.

Уповільнене охолодження катанки на транспортері під кришками призводить до зменшення тимчасового опору (рис. 17, а) через збільшення співвідношення фериту до перліту (табл. 4).

На рис. 17, б наведені середні значення межі міцності катанки діаметром 5,5 мм із нікельмолібденової сталі (див. табл. 1) для зварювального дроту після різних режимів ТМО.

При ТМО з використанням підвищеної дрібності деформації (ЧБ і РКБ) для катанки легованої зварювального призначення пластичні властивості забезпечуються контрольованим охолодженням перед редуційно-калібруючим блоком і на виткоутворювачі до температур вище  $A_3$  з наступним уповільненим квазіізотермічним охолодженням.



А – швидкість більше  $3,0^{\circ}\text{C}/\text{c}$ ; Б – швидкість менше  $1,0^{\circ}\text{C}/\text{c}$ ;

Рисунок 17 – Середні значення тимчасового опору катанки зі сталі SAE 1005 (а) і Sv-10HMA (б) після ТМО з різною температурою виткоутворювання й наступним охолодженням із різними швидкостями.

Таблиця 4 – Структурні характеристики катанки Ст1сп, підданій ТМО при температурі  $T_{\text{во}} 920^{\circ}\text{C}$  з різною швидкістю охолодження

Швидкість охолодження, $^{\circ}\text{C}/\text{c}$	більше 3,0	2,0	1,0	менше 1,0
Розмір зерна, номер	10 – 10,5	10	9 – 10	8 – 9
Співвідношення ферит / перліт	93,5 / 6,5	94 / 6	95 / 5	95,5 / 4,5

Мікроструктурні дослідження проводили на зразках катанки діаметром 5,5 мм зі сталі Sv-10HMA, підданій знеміцнюючій ТМО з температурою виткоутворювання  $920^{\circ}\text{C}$  (вище  $A_3$ ) та наступним квазіізотермічним повітряним охолодженням на транспортері лінії Стелмор зі швидкістю  $\sim 1,0^{\circ}\text{C}/\text{c}$ . Середні значення механічних властивостей дослідних зразків:

межа міцності –  $510 \text{ Н/мм}^2$ , відносне звуження –  $75\%$  (вимоги ТУ У 27.1-4-548-2003:  $\sigma_b \leq 735 \text{ Н/мм}^2$ ;  $\psi \geq 48\%$ ).

Структура зразків являє собою конгломерат змішаних структурних складових із достатньо рівномірно розподілених ділянок перліту та бейніто-мартенситних (до  $10\%$ ) в феритній матриці з полігональним зерном фериту (рис. 18).

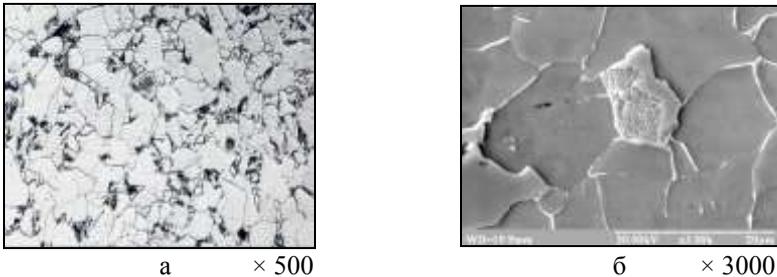


Рисунок 18 – Мікроструктура катанки діаметром 5,5 мм зі сталі Св-10НМА після знеміцнюючої ТМО.

Проведені структурні дослідження катанки свідчать, що ферит має низькодислокаційну будову, в зернах проглядаються одиничні й локальні скопчення дислокацій (рис. 19, а).

В аустеніті, бідному на вуглець та легуючі елементи, насамперед нікель і молібден, у процесі квазіізотермічного охолодження здійснюється дифузійний механізм розпаду аустеніту з утворенням перліту (рис. 19, б). Ділянки з бейнітною структурою (рис. 19, в) мають досить широкі пластини  $\alpha$ -фази з виділенням цементиту в приграничних ділянках і у вигляді більш дисперсних мікрочастинок всередині пластин.

Мартенсит у острівкових ділянках має пластинково-рейкову будову. Слід зазначити, що при аналізі травлених ніталем шліфів властивий для полірованої поверхні мартенситу вигляд на відповідних ділянках не виявляється – вони мають гладку фактуру (див. рис. 18, б).

Наявність у структурі сталеві катанки легової зварювального призначення досить рівномірно розподілених бейніто-мартенситних ділянок до  $10\%$ , що не створює істотних перешкод руху дислокацій при холодній деформації, дозволяє забезпечити високу технологічну пластичність при переробці на дріт малих діаметрів.

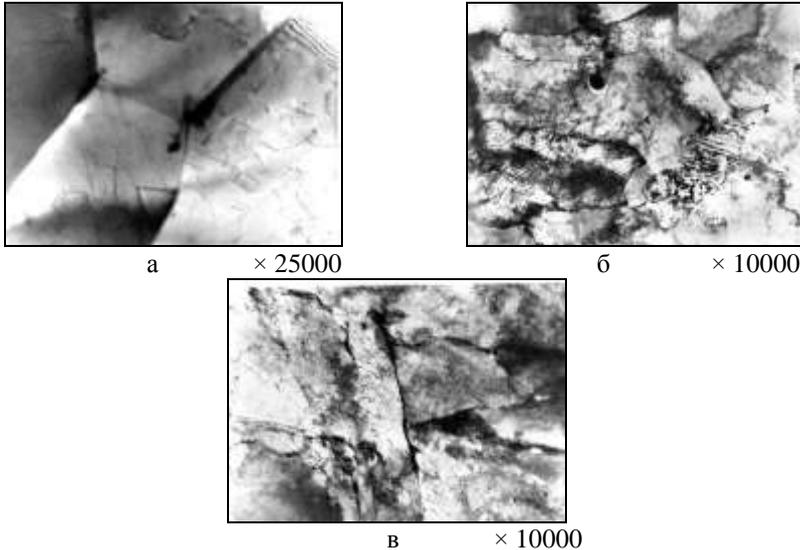


Рисунок 19 – Структура фериту, перліту та бейніту катанки зі сталі Св-10НМА після знеміцнюючої ТМО.

**У сьомому розділі** наведені вдосконалені технології процесу ТМО сталеві катанки та дроту різного призначення, розроблені в дисертації.

На підставі проведених досліджень у потоці високошвидкісного дротового стану отримала подальший розвиток ТМО як спосіб підвищення пластичних властивостей сталеві катанки.

Для катанки з низьковуглецевих спокійних сталей обробка включає високошвидкісну прокатку з температурою перед чистовим блоком і редуційно-калібруючим блоком  $980 \pm 20^\circ\text{C}$ , з температурою виткоутворювання катанки  $920 \pm 20^\circ\text{C}$ , з подальшим уповільненим охолодженням на рольгангу під закритими кришками й відключених вентиляторів. У результаті такої обробки утворюється рівномірна структура фериту з мінімальною кількістю ділянок (до 5%) пластинчатого перліту. Така низьковуглецева катанка має на поверхні окалину, що легко видаляється, з питомою масою до 10 кг/т і може перероблятися на дріт діаметром менше 1,0 мм.

Результати використані при виробництві низьковуглецевої катанки марок сталі SAE 1006...1010 (ASTM A 510M) і отримали відображення у зміні №3 до режимів охолодження прокату в потоці дротового стану 150 - 1 СПЦ - 1 (ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг») та змін до ТК 840-ПЗ-01-2007 (ВАТ «БМЗ»).

Сприятливий ефект у плані підвищеної пластичності під час волочіння катанки з легованої сталі для зварювального дроту (Св-10НМА, Св-08Г1НМА, Св-08Г2С) також досягається при знеміцнюючій ТМО, що передбачає після гарячої прокатки прискорене охолодження водою до температур вище  $A_3$  та подальше уповільнене охолодження зі швидкістю  $\sim 1,0^\circ\text{C}/\text{с}$ . Традиційна технологія виробництва обмідненого зварювального дроту здійснюється за схемою:  $5,5 \rightarrow (4,0) \rightarrow (3,0\dots 2,5) \rightarrow /1,6\dots 0,8/$ , де:  $\rightarrow$  – процес волочіння; (...) – відпал; /.../ – обміднення. Переробка катанки, що має в структурі кількість бейніто-мартенситних ділянок до 10%, дозволяє при виробництві зварювального дроту виключити з технологічного циклу операції проміжного відпалу. Результати враховані при розробці на ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» СТІ 228-112-2008 «Виробництво катанки з легованих сталей для зварювального дроту відповідального призначення».

Встановлені особливості розпаду високовуглецевого аустеніту в ізотермічних умовах дозволили розробити спосіб обробки сталевго дроту. Після аустенітизації дроту охолодження проводять в різних середовищах зі швидкістю  $30\dots 80^\circ\text{C}/\text{с}$  до температури  $600\dots 630^\circ\text{C}$  з витримкою не менше 10 с (патент на винахід №86324, Україна). В результаті створені й випробувані дослідні екологічно чисті установки (одно- й багатониткові), що використовують у технологічній лінії термообробки в якості охолоджуючого середовища, замість свинцю /селітри, гарячий водний розчин з поверхнево активними речовинами або струминне повітряне охолодження. Технологія сприяє утворенню дисперсного перліту й відсутність бейніту, що забезпечує технологічну пластичність при подальшій переробці. Випробувано в умовах техніко-експериментальної бази ІЧМ НАНУ. Властивості дроту відповідали ТУ У 276.3-23365425-638.2008 «Дріт сталевий термічно оброблений».

Встановлений взаємозв'язок між якісними характеристиками високовуглецевої катанки, підданої ТМО до температур виткоутворювання вище  $A_1$ , отримав свій практичний розвиток в розробці способу оцінки якості сталевих виробів. Визначення дисперсності пластинчатого перліту, що характеризується міжпластинчатою відстанню в перліті, визначають на підставі результатів вимірювання глибини знеуглецьованого шару за формулою (1). Це спрощує й підвищує оперативність визначення дисперсності перліту високовуглецевої катанки (патент на винахід №88799, Україна). Результати використані на ВАТ «БМЗ».

На підставі встановленого впливу термомеханічної обробки на структуроутворення в високовуглецевій сталі розроблений і впроваджений режим, що включає гарячу прокатку з охолодженням водою після чистового блоку катанки до температур  $A_1+100\dots 250^\circ\text{C}$ , подальше охолодження здійснюють після витримки протягом  $\tau = (10\dots 15) \times d^2$ , де:  $d$  – діаметр

прокату, см;  $\tau$  – час, с (патент на винахід №828, Республіка Білорусь). Це дозволило при виробництві (за схемою КО) високовуглецевої сталеві катанки різного розмірного сортаменту марок 70...80 забезпечити формування структури сорбітоподібного перліту (більше 50%) й стабільність механічних властивостей. При цьому температура виткоутворювання була визначена  $855 \pm 15^\circ\text{C}$ , при якій на поверхні формується окалина кількістю 2...3 кг/т, замість 5...6 кг/т – при  $930^\circ\text{C}$  (зміни до ТК 840-ПЗ-01-2002).

На підставі отриманих в роботі результатів були посилені вимоги до механічних властивостей і мікроструктури (табл. 5) високовуглецевої сталеві катанки для дроту малого діаметру.

Таблиця 5 – Вимоги до якісних показників високовуглецевої катанки

Показники якості	Марка сталі	Базовий рівень*	Досягнутий рівень (зм.11, ЗТУ 840-03-2006)
Відносне звуження, %	70	$\geq 25^1; \geq 28^2; \geq 30^{3,4}$	$\geq 35$
	80	$\geq 24^2$	$\geq 30$
	85	$\geq 20^2$	$\geq 28$
	90	Відсутня	$\geq 28$
Відносне подовження, %	70	$\geq 8^{1,4}; \geq 9^{2,3}$	$\geq 11$
	80	$\geq 8^2$	$\geq 10$
	85	$\geq 7^2$	$\geq 9$
	90	Відсутня	$\geq 9$
Перліт 1-го бала, % вмісту	70	$\geq 20^1; \geq 40^4; \geq 50^3$	$\geq 70$
	70-85	$\geq 50^2$	
	90	Відсутня	
Цементитна сітка	Для всіх	Відсутня	Не допускається замкнута цементитна сітка
Глибина знеуглецьованого шару, середній / max, %	Для всіх	$\leq 2,5 / 3,0^1;$ $\leq 2,0 / 2,5^2;$ $\leq 1,5 / 2,0^{3,4}$	max $\leq 0,10$ мм ( $\leq 1,8\%$ )
	90	Відсутня	
Окалина, кг/т	Для всіх	$\leq 9,0^1; \leq 8,0^4; \leq 6,0^2;$ Не норм. <sup>3</sup>	$\leq 6,0$
	90	Відсутня	

\* Нормативний документ – <sup>1)</sup> ТУ 14-15-334-94; <sup>2)</sup> ДСТУ 3683-98;  
<sup>3)</sup> ТУ У 14-4-470-2000; <sup>4)</sup> ТУ У 27.1-4-521-2002.

Встановлені вимоги використані при розробці змін №11 до заводських технічних умов ВАТ «БМЗ» ЗТУ 840-03-2006 «Катанка сталевая сорбітизована для металокорду, бортового дроту та дроту для рукавів високого тиску». Нові режими обробки відображені у зміні до ТК 840-ПЗ-01-2007.

Для дротових станів з підвищеною дрібністю деформації зі швидкістю прокатки більше 100 м/с удосконалений спосіб ТМО високовуглецевої сталеві катанки (патент на винахід №11664, Республіка Білорусь). Новий режим включає охолодження водою після чистового й редуційно-калібруючого блоків до температур  $A_1 + 200...250^{\circ}\text{C}$ , і після витримки подальше охолодження здійснюють зі швидкістю ( $V, ^{\circ}\text{C}/\text{с}$ ), яка визначається з виразу:  $V = (50...100) \times d^2$  протягом  $\tau = (100...60) \times d^2$ . Відмітна якісна особливість металу після такої обробки (режим №5, див. табл. 2 і 3) – підвищені пластичні властивості (рис. 20), відсутність замкнутої цементитної сітки, окалина, що легко видаляється, мінімальний знеуглецьований шар із рівномірним розподілом по периметру катанки (див. рис. 11, а), що за інших рівних умов забезпечує підвищену технологічну пластичність при виготовленні дроту й металокорду.

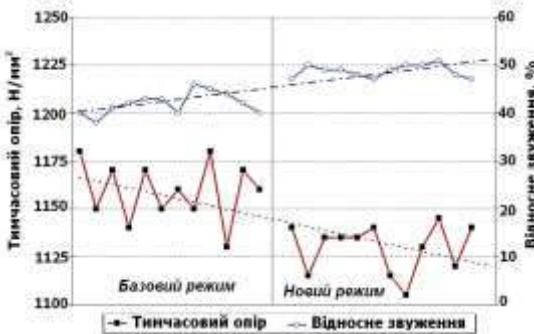


Рисунок 20 – Розподіл міцності й пластичних властивостей по довжині витка катанки діаметром 5,5 мм марки 80К, підданій різним режимам ТМО.

Вдосконалення термомеханічної обробки сталеві катанки при скороченні енерговитрат у порівнянні з базовою технологією підвищила її пластичність і технологічність при переробці на дріт та металокорд. Так, високоміцний бортовий дріт діаметром 1,83 мм виготовляти прямим волочінням (без проміжної термообробки), а при виробництві високоміцного металокорду обривність знизилася на 34%, а надвисокоміцного – на 23%.

Нові вдосконалені режими ТМО дозволили знизити видатковий коефіцієнт металу на середньому на 10%. Фактичний економічний ефект від упроваджених технологічних рішень становить 31,7 мільйона гривень, частка автора – 4,44 мільйона гривень.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена в галузі металознавства й термічної обробки металів важлива науково-прикладна проблема: підвищення після високотемпературної прокатки пластичних властивостей металу шляхом розвитку наукових основ про вплив процесів ТМО на структуроутворення та якісні характеристики сталеві катанки. Встановлені закономірності дозволили вдосконалити технологію ТМО катанки та при економії матеріальних ресурсів забезпечити виробництво сталевих дротів малого діаметру для металокорду (в тому числі надвисокоміцного), високоміцного бортового, канатного, легованого зварювального та низьковуглецевого.

1. Аналіз науково-технічної літератури, сучасного стану виробництва та нормативних вимог до сталеві катанки показав, що для підвищення пластичності металу перспективними й актуальними є дослідження закономірностей структуроутворення та якісних характеристик при ТМО в потоці високошвидкісних дротових станів. Підвищення пластичності після високотемпературної прокатки забезпечить виготовлення сталевих дротів малого діаметру різного призначення без проміжної термічної обробки зі збереженням необхідних кінцевих характеристик.

2. Встановлені нові закономірності у формуванні структури й властивостей катанки для сталевих дротів малого діаметру внаслідок ТМО. Це дозволило на завершальній стадії в потоці високошвидкісного дротового стану в процесі ТМО розробити температурно-швидкісні режими контрольованого охолодження сталеві катанки, впливати на структуру, поліпшити механічні та якісні властивості.

Отримана катанка для сталевих дротів, на відміну від традиційної, має підвищені пластичні властивості й окалину, яка легко видаляється. Основу структури високовуглецевої катанки складає сорбітоподібний перліт (більше 70%) із відсутністю надлишкових структур (замкнутої цементитної сітки), мінімальний зневуглецьований шар, який рівномірно розподілений по периметру. Низьковуглецевої – ферит з мінімальною кількістю пластинчатого перліту. Легованої – наявність у змішаній структурі рівномірно розподілених у феритній матриці бейніто-мартенситних ділянок до 10%.

3. Виявлені особливості впливу процесів температурно-часових умов обробки та охолодження на формування аустенітного зерна сталі 80 після гарячої деформації. При температурі прокатки та контрольованого охолодження 850°C найбільш повно проходять процеси метадинамічної, а вище 900°C – повторної рекристалізації, розвиток якої зі збільшенням температури інтенсифікується. При контрольованій температурі прокатки утворюється аустенітне зерно меншого розміру, ніж при контрольованому

охлажденні, що обумовлено проходженням метадинамічної рекристалізації, яка подрібнює аустенітне зерно.

4. Кінетика розпаду аустеніту безперервнолітої сталі 90 при безперервному охолодженні представлена у вигляді термокінетичної та структурної діаграм.

З підвищенням швидкості охолодження кількість виділень вільного цементиту по межах окремих аустенітних зерен зменшується, а при швидкостях вище  $10^{\circ}\text{C}/\text{c}$  – пригнічується. При швидкостях охолодження менше  $25^{\circ}\text{C}/\text{c}$  переохолоджений аустеніт розпадається за дифузійним механізмом, вище  $80^{\circ}\text{C}/\text{c}$  – за бездифузійним, а в інтервалі  $25\text{...}80^{\circ}\text{C}/\text{c}$  – за змішаною кінетикою. Структура бейніту у всьому діапазоні досліджених швидкостей охолодження не виявлена.

Під час розпаду аустеніту на перліт в інтервалі  $1,5\text{...}10^{\circ}\text{C}/\text{c}$  температура кінця розпаду вища температури початку на  $10\text{...}30^{\circ}\text{C}$  відповідно, що пояснюється виділенням тепла при фазовому перетворенні (рекалесценцією) за короткий проміжок часу.

5. Особливості розпаду аустеніту безперервнолітої сталі 90 з окремого нагріву в ізотермічних умовах представлені у вигляді ізотермічної та структурної діаграм.

У всьому температурному інтервалі виділень вільного цементиту по межах колишніх аустенітних зерен не виявлено. При розпаді аустеніту в інтервалі ( $\text{Ac}_1\text{...M}_n$ ) формуються дві структурні області, перлітна та бейнітна, розпад аустеніту за змішаною кінетикою відбувається при ізотермічних витримках в інтервалі температур  $350\text{...}550^{\circ}\text{C}$ . У процесі розпаду рекалесценція проявляється при температурах ізотермічних витримок  $450\text{...}600^{\circ}\text{C}$ , істотно ефект якої інтенсифікується при зменшенні часу на перетворення.

6. Розроблений спосіб обробки, що включає в процесі ТМО після аустенітизації холоднодеформованого високовуглецевого сталевго дроту охолодження зі швидкістю  $30\text{...}80^{\circ}\text{C}/\text{c}$  до температури  $600\text{...}630^{\circ}\text{C}$  з витримкою не менше 10 с (патент на винахід України №86324). Створені та випробувані дослідні установки, що використовують у якості охолоджуючого середовища, замість свинцю, гарячий водний розчин із поверхнево активними речовинами або струминне повітряне охолодження. Технологія сприяє утворенню дисперсного перліту, відсутності бейніту, що забезпечує технологічну пластичність при подальшій холодній деформації. Випробувано в умовах техніко-експериментальної бази ІЧМ НАНУ. Властивості відповідали розробленим ТУ У 276.3-23365425-638.2008 «Дріт сталевий термічно оброблений».

7. Кількість окалини та її товщина на поверхні вуглецевої катанки в процесі ТМО зменшується при зниженні температури виткоутворювання та збільшенні швидкості подальшого охолодження витків, при цьому кожен складовий оксид заліза в окалині має різну відносну величину. Після гарячої деформації при охолодженні водою до температур  $A_1 + 200...250^\circ\text{C}$  і подальшому повітрям зі швидкістю  $\sim 15^\circ\text{C}/\text{с}$  на поверхні сталеві катанки формується окалина, основу якої складає вюстит із кількістю в 3 рази більшою, ніж інших оксидів заліза.

8. Встановлений взаємозв'язок між якісними характеристиками високовуглецевої катанки, підданої ТМО до температур виткоутворювання вище  $A_1$ . Залежність міжпластинчатої відстані у перліті ( $S$ , мкм) від глибини зневуглецьованого шару ( $h_{\text{зв}}$ , мкм) має лінійний характер  $S = 0,0015 \times h_{\text{зв}} + 0,0676$ , а від товщини шару окалини ( $h_{\text{ок}}$ , мкм) – нелінійний  $S = 0,267 - 0,61 \times h_{\text{ок}} + 0,68 \times h_{\text{ок}}^2$ . Дисперсність пластинчатого перліту, що характеризується міжпластинчатою відстанню в перліті, визначається на підставі результатів вимірювання глибини зневуглецьованого шару (патент на винахід України №88799).

9. Розвинуті уявлення про ТМО як спосіб підвищення пластичних властивостей катанки для сталевого дроту малого діаметру різного призначення.

У процесі ТМО високовуглецевої катанки при підвищенні дрібності деформації (використання додатково редуційно-калібруючого блока) в результаті зниження температури гарячої деформації з  $1050...1100^\circ\text{C}$  до  $900...950^\circ\text{C}$  пластичні властивості збільшилися (відносно звуження на  $\sim 5\%$ , відносно подовження  $\sim 2\%$ ), а тимчасовий опір зменшився для сталі 90 і 80 на  $20...25 \text{ Н}/\text{мм}^2$ , а для сталі 70 – на  $40 \text{ Н}/\text{мм}^2$ .

Для катанки зі сталей легованих зварювальних та низьковуглецевої звичайної якості для знеміцнюючої ТМО необхідно мати температуру виткоутворювання вище  $A_3$  з наступним квазіізотермічним охолодженням зі швидкістю  $\sim 1,0^\circ\text{C}/\text{с}$ . При цьому в легованій катанці формується змішана структура з рівномірним розподілом у феритній матриці перліту та бейніто-мартенситних ділянок незначної кількості (до 10%), що не створює істотних перешкод руху дислокацій при холодній деформації. А в низьковуглецевій катанці – рівномірна структура фериту з мінімальною кількістю ділянок пластинчатого перліту.

Пластичні властивості такої катанки та її здатність до деформаційної формозміни високі, що дозволяє в технологічній схемі виробляти дріт малого діаметру, виключивши проміжну пом'якшуючу термічну обробку.

10. На підставі встановленого впливу ТМО на структуроутворення у високовуглецевій сталі вдосконалено режими (патенти на винахід №828 і

№11664, Республіка Білорусь), що включають в потоці високошвидкісного дротового стану охолодження катанки водою до температур  $A_1 + 200...250^\circ\text{C}$ , витримку протягом  $\tau = (10...15) \times d^2$  та подальше охолодження зі швидкістю  $V = (50...100) \times d^2$  протягом  $\tau = (100...60) \times d^2$  (де:  $V$  – швидкість охолодження,  $\text{C}/\text{c}$ ;  $d$  – діаметр прокату,  $\text{cm}$ ;  $\tau$  – час,  $\text{c}$ ).

Катанка, виготовлена за новим режимом ТМО, перероблена на металокорд та прямим волочінням (без проміжної термообробки) на бортовий дріт, в порівнянні з базовою, показала себе більш технологічною, з меншою кількістю обривів на тонну продукції. Так, при виробництві високоміцного металокорду обривність знизилася на 34%, а надвисокоміцного – на 23%.

11. Наукові результати роботи були використані в наступних нормативних технічних документах. На ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» – СТІ 228-112-2008 та зміні №3 до режимів охолодження прокату в потоці дротового стану 150-1 СПЦ-1. Посилені вимоги до мікроструктури й механічних властивостей високовуглецевої катанки, які відображені в зміні №11 до заводських технічних умов ВАТ «БМЗ» ЗТУ 840-03-2006 «Катанка сталева сорбітизована для металокорду, бортового дроту та дроту для рукавів високого тиску». Розроблені та впроваджені на ВАТ «БМЗ» режими ТМО високовуглецевої катанки (зміни до ТК 840-ПЗ-01-2002 і ТК 840-ПЗ-01-2007), у тому числі з сталі 90 для високоміцного й надвисокоміцного дроту та металокорду.

Освоєння нових удосконалених режимів ТМО дозволило знизити видатковий коефіцієнт металу в середньому на 10%. Загальний фактичний економічний ефект від упроваджених нових технологічних рішень становить 31,7 мільйона гривень, частка автора – 4,44 мільйона гривень.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Публікації у фахових виданнях іноземних держав*

1. Луценко В. А. Особенности формирования структуры и свойств катанки из никель-молибденовой стали сварочного назначения после разупрочняющей термомеханической обработки / В. А. Луценко // Черные металлы. – 2013. – № 4. – С. 15-19.

2. Луценко В. А. Влияние параметров высокоскоростной термомеханической обработки на процессы окалинообразования углеродистой стали / В. А. Луценко // Литье и металлургия. – 2005. – № 2. – Часть 2. – С. 96-98.

3. Луценко В. А. Анализ структуры и свойств катанки из никельмолибденовой стали сварочного назначения после термомеханической обработки / В. А. Луценко // Сталь. – 2012. – № 9. – С. 88-90.

4. Луценко В. А. Окалинообразование при термомеханической обработке катанки в потоке высокоскоростного стана / В. А. Луценко // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». – 2006. – № 12. – С. 54-57.

5. Луценко В. А. Рекристаллизация аустенита в стали 80 при температурно-деформационной обработке / В. А. Луценко, В. В. Парусов // Металлургия. – Минск.: Высшая школа. – 2003. – № 27. – С. 94-96.

6. Оптимизация структуры углеродистой катанки при двухстадийном охлаждении / В. В. Парусов, В. А. Луценко, В. А. Тищенко, А. Б. Стеблов // Сталь. – 2003. – №4. – С. 62-64.

7. Особенности термомеханической обработки катанки в потоке стана 150 / В. А. Луценко, В. В. Парусов, Н. В. Андрианов, В. А. Тищенко // Сталь. – 2004. – №10. – С. 68-70.

8. Формирование обезуглероженного слоя в углеродистой катанке в потоке проволочного стана после регулируемого охлаждения / В. А. Луценко, Н. В. Андрианов, В. А. Тищенко, А. И. Сивак // Металлургия. – Минск.: Высшая школа. – 2004. – № 28 – С. 160-166.

9. Оптимальные характеристики качества катанки из высокоуглеродистой стали / Э. В. Парусов, В. В. Парусов, В. А. Луценко, О. В. Парусов, И. Н. Чуйко, А. Б. Сычков // Специализированный журнал «Метизы», ассоциации «Росметиз». – 2006. – № 3 (13). – С. 34-36.

10. Луценко В. А. Влияние термомеханической обработки на формирование обезуглероженного слоя в высокоуглеродистой катанке / В. А. Луценко, В. А. Маточкин // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». – 2006. – № 11. – С. 61-64.

11. Влияние масштабного фактора на кинетику превращения аустенита при патентировании проволоки из высокоуглеродистой стали / В. А. Луценко, В. А. Маточкин, М. Ф. Евсюков, А. И. Сивак, Г. Н. Катыльков // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». – 2007. – № 3. – С. 45-47.

12. Луценко В. А. Влияние микролегирования и термомеханической обработки на технологические свойства катанки для сварочной проволоки ответственного назначения / В. А. Луценко, В. А. Поляков, В. А. Кондрашкин // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». – 2008 – № 11. – С. 85-87.

13. Влияние термомеханической обработки и легирования на формирование свойств в высокоуглеродистой катанке-проволоке / В. А. Луценко, В. А. Маточкин, Ю. Л. Худoley, В. Г. Черниченко, О. В. Луценко // Сталь. – 2010. – № 9. – С. 76-78.

14. Экологически чистая бескислотная очистка поверхности углеродистой катанки и проволоки / В. А. Луценко, В. Г. Черниченко, В. Г. Раздобрев, Т. Н. Голубенко, О. В. Луценко // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». – 2010 – № 5. – С. 65-68.

15. Особенности влияния термомеханической обработки в потоке стана 150 ОАО «БМЗ» на качественные характеристики высокоуглеродистой катанки / В. А. Луценко, М. А. Муриков, П. А. Бобков, О. В. Луценко, В. И. Грицаенко // Черные металлы. – 2012. – № 10. – С. 20-24.

16. Особенности термомеханической обработки высокоуглеродистой катанки в потоке высокоскоростного проволочного стана 150 РУП «БМЗ» / В. А. Луценко, П. А. Бобков, О. М. Кириленко, В. И. Грицаенко, О. В. Луценко // Сталь. – 2012. – № 1. – С. 59-61.

17. Перспективы производства стали и катанки сварочного назначения с повышенной технологической пластичностью / В. А. Луценко, М. А. Муриков, В. А. Поляков, В. А. Кондрашкин, В. И. Грицаенко // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». – 2012. – № 9. – С. 51-53.

18. Структура и свойства патентованной высокоуглеродистой проволоки / А. Ю. Борисенко, В. А. Луценко, О. В. Луценко, Т. П. Куренкова, Е. С. Серегина, А. В. Демидов // Черные металлы. – 2012. – № 10. – С. 31-36.

19. Термомеханически обработанная высокоуглеродистая катанка для высокопрочной бортовой проволоки / В. А. Луценко, П. А. Бобков, И. Н. Радькова, О. В. Луценко, В. Г. Черниченко // Сталь. – 2012. – № 11. – С. 75-77.

20. Morphology modification of carbon chromium-molybdenum steel structure influenced by heat treatment / V. A. Lutsenko, N. I. Anelkin, T. N. Golubenko, V. I. Shcherbakov, O. V. Lutsenko // CIS Iron and Steel Review. – 2012. – № 1. – P. 38-40.

21. Особенности термомеханической обработки высокоуглеродистой катанки в потоке высокоскоростного проволочного стана 150 РУП «БМЗ» / В. А. Луценко, О. М. Кириленко, О. В. Луценко, П. А. Бобков // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». – 2013. – № 5. – С. 70-73.

22. Энергосберегающая технология сорбитизации высокоуглеродистой катанки в потоке стана 150 / Е. А. Перетягина, В. А. Луценко, А. В. Венгура, П. А. Бобков, В. В. Савинков // Сталь. – 2013. – № 5. – С. 65-67.

23. Влияние структуры катанки, подвергнутой термомеханической обработке, на качественные характеристики высокопрочной бортовой

проволоки / В. А. Луценко, Г. В. Левченко, О. В. Луценко, П. А. Бобков, Е. П. Барадынцева, Е. С. Серегина // Черные металлы. – 2013. – № 10. – С. 52-56.

24. Особенности сорбитизации высокоуглеродистой катанки на стане 150 ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» / В. А. Луценко, А. В. Венгура, П. А. Бобков, В. В. Савинков, О. В. Луценко, И. А. Ковалева // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». – 2014. – № 7. – С. 72-75.

25. Влияние деформации в линии проволочного стана 150 на дисперсность перлита стали 80К / В. А. Луценко, П. А. Бобков, О. В. Луценко, Т. Н. Голубенко, В. В. Гордиенко // Литье и металлургия. – 2014. – № 3. – С. 58-61.

26. Особенности формирования перлитной структуры высокоуглеродистой стали в линии проволочного стана 150 / В. А. Луценко, П. А. Бобков, О. В. Луценко, Т. Н. Голубенко, В. В. Гордиенко // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». – 2014. – № 9. – С. 54-58.

*Публікації у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз*

27. Луценко В. А. Особенности структурообразования в катанке из низкоуглеродистой стали, легированной никелем и молибденом в процессе её термомеханической обработки / В. А. Луценко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2009. – № 5. – С. 80-84.

28. Разработка экологически чистого процесса псевдопатентирования углеродистой проволоки / В. В. Парусов, В. А. Луценко, А. И. Сивак, В. О. Сивак // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1998. – № 3. – С. 69-71.

29. Глубина обезуглероженного слоя на углеродистой катанке различных заводов-изготовителей / В. В. Парусов, В. А. Луценко, А. Б. Сычков, В. А. Тищенко, А. И. Сивак // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2003. – № 5. – С. 61-64.

30. Разупрочняющая термомеханическая обработка проката из углеродистой стали / В. В. Парусов, А. Б. Сычков, В. А. Луценко, Э. В. Парусов // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2003. – № 6. – С. 54-56.

31. Освоение на комбинате «Криворожсталь» производства термически обработанной катанки из низкосернистой легированной стали для сварочной проволоки / В. А. Луценко, В. В. Парусов, В. А. Поляков, В. А. Кондрашкин, А. В. Кекух, И. И. Журавлев // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2004. – № 3. – С. 68-71.

32. Современные научные и технологические аспекты производства высокоэффективных видов катанки различного назначения / В. А. Луценко,

Э. В. Парусов, В. А. Тищенко, В. А. Кекух, А. Б. Сычков, Ю. Д. Костенко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2005. – № 1. – С. 58-63.

33. Формирование структуры и свойств катанки для сверхвысокопрочного металлокорда / В. А. Луценко, В. А. Маточкин, Н. И. Анелькин, М. Ф. Евсюков, А. И. Сивак // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2006. – № 6. – С. 54-57.

34. Катанка для металлокорда различной прочности, особенности и перспективы производства / В. А. Луценко, С. М. Жучков, В. А. Маточкин, Н. И. Анелькин, Е. П. Барадынцева // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2008. – № 2. – С. 66-70.

35. Луценко О. В. Исследование кинетики фазовых превращений в высокоуглеродистой стали, легированной хромом / О. В. Луценко, М. Ф. Евсюков, В. А. Луценко // *Металлофизика и новейшие технологии*. – 2008. – Том 30. – С. 721-726.

36. Влияние термомеханической обработки в потоке высокоскоростного проволочного стана на качественные характеристики высокоуглеродистой катанки / В. А. Луценко, П. А. Бобков, О. М. Кириленко, В. И. Грицаенко, О. В. Луценко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2012. – № 2. – С. 60-63.

#### ***Публікації у фахових виданнях України***

37. Луценко В. А. Особенности распада аустенита стали 90 в изотермических и термокинетических условиях / В. А. Луценко // *Металознавство та термічна обробка металів*. – 2008. – № 1. – С. 76-82.

38. Луценко В. А. Влияние термомеханической обработки в потоке высокоскоростного проволочного стана на технологические характеристики высокоуглеродистой катанки / В. А. Луценко // *Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. научн. трудов*. – 2008. – Вып. 45. – Часть 1. – С. 185-190.

39. Луценко В. А. Исследование тонкой структуры катанки из стали Св-10НМА после разупрочняющей термомеханической обработки / В. А. Луценко // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. трудов*. – Дн-ск: “Візіон”. – 2009. – Вып. 20. – С. 238-245.

40. Луценко В. А. Особенности формирования окалины на поверхности высокоуглеродистой проволоки при охлаждении с отдельного нагрева и экологически чистый способ очистки / В. А. Луценко // *Металознавство та термічна обробка металів*. – 2010. – № 3. – С. 12-15.

41. Влияние химического состава и структурного состояния на свариваемость низкоуглеродистой катанки / В. В. Парусов, В. А. Луценко, О. П. Липская, Ю. Н. Шмелев, З. А. Дегтяренко // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. – К.: Наукова думка. – 1995. – С. 229-232.

42. Совершенствование технологии производства катанки на проволочном стане 150-1 меткомбината «Криворожсталь» / В. В. Парусов, В. А. Луценко, В. И. Биба, Н. М. Омесь // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. – К.: Наукова думка. – 2001. – Вып. 4. – С. 157-161.

43. Освоение производства катанки стандарта SAE на комбинате «Криворожсталь» / В. В. Парусов, В. А. Луценко, В. Г. Черниченко, В. А. Поляков, В. А. Кондрашкин // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. – К.: Наукова думка. – 2002. – Вып. 5. – С. 179-182.

44. Парусов В. В. Повышение прочностных характеристик проволоки из низколегированной стали / В. В. Парусов, В. А. Луценко // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. – Дн-ск.: “Візіон”. – 2003. – Вып. 6. – С. 337-339.

45. Луценко В. А. Термомеханическая обработка катанки широкого марочного сортамента / В. А. Луценко, В. В. Парусов // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. – Дн-ск.: “Візіон”. – 2004. – Вып. 7. – С. 96-101.

46. Влияние регулируемого охлаждения на качественные показатели катанки различного назначения / В. А. Луценко, В. В. Парусов, Э. В. Парусов, А. И. Сивак, И. Н. Чуйко // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. – Дн-ск.: “Візіон”. – 2004. – Вып. 9. – С. 142-147.

47. Луценко В. А. Термомеханическая обработка в потоке проволочного стана 150-1 КГМК "Криворожсталь" катанки из легированной стали для сварочной проволоки / В. А. Луценко, А. И. Сивак, И. И. Журавлев // *Металознавство та термічна обробка металів*. – 2005. – № 3. – С. 27-29.

48. Влияние ускоренного охлаждения на качественные показатели катанки из стали Св-08ГСМТ / В. А. Луценко, В. В. Парусов, И. И. Журавлев, И. А. Гунькин, А. И. Сивак // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. – Дн-ск.: “Візіон”. – 2005. – Вып. 10. – С. 187-190.

49. Фазовые и структурные превращения аустенита в стали 90 при непрерывном охлаждении / В. А. Луценко, М. Ф. Евсюков, А. И. Сивак, В. А. Маточкин, О. М. Кириленко, Д. Н. Андрианов // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. – Дн-ск.: “Візіон”. – 2006. – Вып. 13. – С. 155-161.

50. Кинетика распада аустенита и формирование микроструктуры высокоуглеродистой стали при патентировании / В. А. Луценко, А. И. Сивак, М. Ф. Евсюков, О. В. Луценко // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. – Дн-ск.: “Візіон”. – 2007. – Вып. 14. – С. 248-253.

51. Жучков С. М. Повышение эффективности производства и качества сортового проката и катанки за счет реализации новых технических решений

/ С. М. Жучков, В. А. Луценко // Наука и инновация. НАНУ. – 2007. – № 5. – Т. 3. – С. 4-10.

52. Создание энергосберегающего и экологически чистого участка подготовки металла для холодной деформации в профили простых и сложных сечений / С. М. Жучков, Е. Б. Барышев, А. П. Лохматов, В. А. Луценко, К. Ю. Ключников // Наука и инновация. НАНУ. – 2009. – № 5. – Т. 6. – С. 36-47.

53. Современные технологические подходы к направленному формированию структуры и свойств в высокоуглеродистой катанке / В. А. Луценко, В. А. Маточкин, О. В. Луценко, М. Ф. Евсюков, В. Г. Черниченко, А. С. Козачек, В. И. Щербаков // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Дн-ск: “Візіон”. – 2009. – Вып. 19. – С. 234-240.

54. Комбинированное бескислотное удаление окалины с поверхности проволоки / В. А. Луценко, В. Г. Черниченко, И. В. Сикачина, Т. Н. Голубенко, О. В. Луценко, К. Ю. Ключников // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Дн-ск: “Візіон”. – 2010. – Вып. 22. – С. 144-151.

55. Влияние степени легирования на прочностные свойства конструкционных сталей / А. С. Козачёк, Э. В. Приходько, В. А. Луценко, Л. А. Головки // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Дн-ск: “Візіон”. – 2014. – Вып. 29. – С. 196-201.

***Публікації у матеріалах, збірниках, тезах доповідей міжнародних наукових конференцій та додаткових виданнях***

56. Луценко В. А. Обезуглероживание и окиснообразование в углеродистой катанке, подвергнутой регулируемому ускоренному охлаждению с прокатного нагрева / В. А. Луценко // Международная конференция «Современное материаловедение: достижения и проблемы», Киев, 26-30 сентября 2005г: Тезисы докл. – Киев, Украина. – 2005. – С. 51-52.

57. Луценко В. А. Влияние регулируемого охлаждения в потоке проволочного стана на формирование обезуглероженного слоя в углеродистой катанке / В. А. Луценко // Международная научно-техническая конференция "Металлургия XXI века" 10-11 июня 2004г. Республика Беларусь. г.Жлобин. // Материалы конференции. – 2004. – С. 27-29.

58. Луценко В. А. Свойства и структура катанки из низкоуглеродистой никельмолибденовой стали после разупрочняющей термомеханической обработки / В. А. Луценко // Международная научно-техническая конференция «Новые наукоемкие технологии, оборудование и оснастка для обработки материалов давлением» Краматорск, 26-28 апреля 2010. / Обработка материалов давлением. Сб. науч. трудов / Донбасская государственная машиностроительная академия. – 2010. – № 2 (23). – С. 180-184.

59. Влияние химического состава высокоуглеродистой катанки на деформационное упрочнение при волочении / Э. В. Парусов, В. В. Парусов, В. А. Луценко, И. И. Чуйко, Д. Н. Тогобицкая, А. Б. Сычков, В. А. Маточкин, Г. Н. Катыльков, В. В. Артемов // Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Стародубовские чтения. Сборник науч. трудов. Дн-ск. – 2006. – Вып. 36. – Часть 1. – С. 114-119.

60. Технологичность высокоуглеродистой катанки на метизном переделе / Э. В. Парусов, В. В. Парусов, В. А. Луценко, А. Б. Сычков, В. В. Артёмов, Л. И. Демьянова // Международная конференция ассоциации исследователей стальных канатов. 24-27 мая 2005г. / Стальные канаты: Науч.тр. Одесса: Астропринт. – 2005. – С. 110-115.

61. Оптимизация качественных характеристик высокоуглеродистой катанки / В. А. Луценко, В. В. Парусов, В. А. Маточкин, О. М. Кириленко, Э. В. Парусов, Д. Н. Андрианов // Международная НТ конференция "Литейное производство и металлургия 2006. Беларусь". г.Барановичи, 17-18 мая 2006г. / Литье и металлургия. – 2006. – № 2. – С. 74-76.

62. Взаимосвязь структурных, механических и технологических характеристик катанки из стали 80КРД / Э. В. Парусов, В. В. Парусов, В. А. Луценко, А. Б. Сычков, О. В. Парусов, И. Н. Чуйко // Международная конференция ассоциации исследователей стальных канатов. 2007г. / Сб. науч.тр.: Стальные канаты. – Одесса: Астропринт. – 2007. – № 5. – С. 155-161.

63. Влияние температуры изотермического распада аустенита на структуру и микротвердость стали 90 / В. А. Луценко, А. И. Сивак, М. Ф. Евсюков, О. В. Луценко // Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Стародубовские чтения. Сборник науч. трудов. Дн-ск. – 2007. – Вып. 41. – Часть 2. – С. 119-123.

64. Луценко В. А. Взаимосвязь и прогнозирование качественных характеристик высокоуглеродистой катанки, подвергнутой ТМО / В. А. Луценко, Е. Ю. Повод // Международная НТ конференция "Металлургия и литейное производство 2007. Беларусь" 6-7 сентября 2007г. / Труды конференции. ПО "БМЗ", г.Жлобин. – 2007. – С. 91-93.

65. Некоторые особенности влияния термомеханической обработки и легирования на структурообразование в сортовом прокате и катанке / В. А. Луценко, В. А. Маточкин, Т. Н. Панфилова, О. В. Луценко, М. Ф. Евсюков, В. Г. Черниченко, В. И. Щербаков, И. Н. Радькова // Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Стародубовские чтения. Сборник науч. трудов. Дн-ск. – 2009. – Вып. 48. – Часть 3. – С. 44-48.

66. Современные технологические подходы к направленному формированию структуры и свойств в высокоуглеродистой катанке-проволоке / В. А. Луценко, В. А. Маточкин, Ю. Л. Худoley, О. В. Луценко,

В. И. Щербаков // Международная НТ конференция "Металлургия и литейное производство 2009. Беларусь" (Минск, ФТИ) / Литье и металлургия. – 2009. – № 3. – С. 275-278.

67. Влияние компоновки оборудования высокоскоростного проволочного стана на качественные характеристики высокоуглеродистой катанки / В. А. Луценко, П. В. Токмаков, В. Г. Раздобреев, П. А. Киселев // 9-я Междунар. конф. "Пластична деформація металів". – Днепропетровск. – 2011. / Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2011. – № 7 (272) спецвыпуск. – С. 166-169.

68. Особенности термомеханической обработки высокоуглеродистой катанки в потоке высокоскоростного проволочного стана 150 РУП «БМЗ» / В. А. Луценко, П. А. Бобков, О. М. Кириленко, О. В. Луценко // 20-я Международная НТ конференция "Литейное производство и металлургия. 2012. Беларусь" выставка-ярмарка TEMPUS. 23-26 октября 2012. г. Минск. / Литье и металлургия. – 2012. – № 3 (67) спецвыпуск. – С. 172-175.

69. Lutsenko V. A. Structure and properties of nickel-molybdenum steel wire rod after thermomechanical treatment / V. A. Lutsenko // Steel in Translation. – 2012. – Vol. 42. – Issue 10. – P. 730-732.

70. Influence of thermomechanical treatment and alloying on the properties of high-carbon wire rod / V. A. Lutsenko, V. G. Chernichenko, O. V. Lutsenko, V. A. Matochkin, Y. L. Khudolei // Steel in Translation. – 2010. – Vol. 40. – Issue 9. – P. 853-856.

71. Gefüge und eigenschaften von patentierten hochgekohlten draht / A. Ju. Borisenko, V. A. Luzenko, O. V. Luzenko, T. P. Kurenkova, E. S. Seregina, A. V. Demidov // Foundry Production And Metallurgy. Belorussian national technical university. – 2011. – № 2 (60). – P. 101-105.

72. Thermomechanical treatment of high-carbon wire rod in the 150 high-speed wire mill at Belorussian Metallurgical Plant / V. A. Lutsenko, P. A. Bobkov, O. M. Kirilenko, V. I. Gritsaenko, O. V. Lutsenko // Steel in Translation. – 2012. – Vol. 42. – Issue 1. – P. 78-80.

73. Thermomechanically treated high-carbon wire rod for high-tension wire / V. A. Lutsenko, P. A. Bobkov, I. N. Rad'kova, O. V. Lutsenko, V. G. Chernichenko // Steel in Translation. – 2012. – Vol. 42. – Issue 11. – P. 794-796.

74 Energy-saving sorbitization of high-carbon wire rod in the 150 mill / E. A. Peretyagina, V. A. Lutsenko, A. V. Vengura, P. A. Bobkov, V. V. Savinkov // Steel in Translation. – 2013. – Vol. 43. – Issue 5. – P. 321-324.

### **Патенти**

75. Пат. 828, Республика Беларусь, С21D 1/02, С21D 8/06. Способ изготовления проката / Парусов В. В., Луценко В. А., Фетисов В. П., Сивак А. И., Стеблов А. Б., Бондаренко А. Н., Дышлевич В. Ф.,

Пичугин В. В.; заявитель Белорусский металлургический завод; Ин-т черной металлургии; патентообладатель Белорусский металлургический завод. – № 184-4804708; заяв. 20.03.1990; опубл. 15.08.1995. Бюл. № 3 (6). – 6 с.

76. Пат. 11664, Республика Беларусь, МПК С21D 8/06. Способ изготовления проката / Анелькин Н. И., Жучков С. М., Кириленко О. М., Маточкин В. А., Муриков М. А., Луценко В. А.; заявитель и патентообладатель РУП «Белорусский металлургический завод»; Ин-т черной металлургии НАНУ. – № а20070940; заяв. 23.07.2007; опубл. 28.02.2009. – 4 с.

77. Пат. 88799, Україна, МПК В21С 51/00, G01N 33/20. Спосіб оцінки якості сталевих виробів / Луценко В. А., Жучков С. М., Іванько П. В., Сивак Г. І., Луценко О. В.; заявник і патентовласник Ін-т чорної металургії НАНУ. – № а200710363; заявл. 18.09.2007; опубл. 25.11.2009, Бюл. № 22. – 4 с.

78. Пат. № 86324, Україна, МПК С21D 9/52. Спосіб обробки сталевого дроту / Борисенко А. Ю., Луценко В. А., Жучков С. М.; заявник і патентовласник Ін-т чорної металургії НАНУ. – № а200800016; заявл. 02.01.2008; опубл. 10.04.2009, Бюл. № 7. – 4 с.

## АНОТАЦІЯ

**Луценко В. А.** Наукові основи вдосконалення термомеханічної обробки катанки для сталевго дроту малого діаметру. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.16.01 – Металознавство та термічна обробка металів. – Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя, 2015.

Дисертаційна робота присвячена підвищенню в процесі ТМО пластичних властивостей сталевго катанки. Отримана сталева катанка має структуру: високовуглецева – дисперсний перліт із відсутністю замкнутої цементитної сітки, мінімальний зневуглецьований шар, який рівномірно розподілений по периметру; низьковуглецева – рівномірну структуру фериту з мінімальною кількістю перліту; легована – наявність бейніто-мартенситних ділянок до 10% в змішаній структурі. Результати використані на дрових станах ВАТ «БМЗ» та ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Підвищення пластичності катанки забезпечило виготовлення сталевго дроту малого діаметру без проміжної термічної обробки, що дозволило знизити видатковий коефіцієнт металу в середньому на 10%.

Ключові слова: сталева катанка, термомеханічна обробка, дрібність деформації, мікроструктура, зневуглецьований шар, окалина, пластичність, дріт малого діаметру.

## АННОТАЦИЯ

**Луценко В. А.** Научные основы совершенствования термомеханической обработки катанки для стальной проволоки малого диаметра. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов. – Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье, 2015.

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая проблема – повышение после высокотемпературной прокатки пластических свойств металла путем развития научных основ о влиянии процессов ТМО на структурообразование и качественные характеристики стальной катанки. Установленные закономерности позволили совершенствовать технологию ТМО катанки и при экономии материальных ресурсов обеспечить производство стальной проволоки малого диаметра для металлокорда (в том числе сверхвысокопрочного), высокопрочной бортовой, канатной, легированной сварочной и низкоуглеродистой.

Изучена кинетика превращения аустенита непрерывнолитой стали 90 при непрерывном охлаждении и в изотермических условиях. Установлено, что выделения цементита по границам зерен подавляются и полностью отсутствуют при скоростях более  $10^{\circ}\text{C}/\text{с}$  и при изотермическом распаде. Определено, что величина эффекта рекалесценции в стали 90 зависит от времени превращения.

Установлено, что при ТМО снижение температуры после горячей деформации с  $1050\dots 1100^{\circ}\text{C}$  до  $900\dots 950^{\circ}\text{C}$  в результате принудительного охлаждения при повышении дробности деформации (на 20%) приводит к увеличению пластических свойств высокоуглеродистой стали.

Полученная катанка для стальной проволоки, в отличие от традиционной, имеет повышенные пластические свойства. Основу структуры катанки составляет: высокоуглеродистой – сорбитообразный перлит (более 70%) с отсутствием избыточных структур (замкнутой цементитной сетки), минимальный обезуглероженный слой равномерно распределен по периметру; низкоуглеродистой – равномерная структура феррита с минимальным количеством пластинчатого перлита; легированной – наличие бейнито-мартенситных участков до 10% в смешанной структуре.

Повышены требования к микроструктуре и свойствам высокоуглеродистой катанки и проволоки, которые отражены в изменении №11 к ЗТУ 840-03-2006 «Катанка стальная сорбитизированная для металлокорда, бортовой проволоки и проволоки для рукавов высокого

давления» и ТУ У 276.3-23365425-638.2008 «Проволока стальная термически обработанная».

Результаты использованы на ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» при разработке СТИ 228-112-2008 «Производство катанки из легированных сталей для сварочной проволоки ответственного назначения», изменения №3 к режимам охлаждения проката в потоке проволочного стана 150-1 СПЦ-1. Разработаны и внедрены на ОАО «БМЗ» режимы ТМО стальной катанки, в том числе для сверхвысокопрочной проволоки и металлокорда по ЗТУ 840-03-2006 (Изменения к ТК 840-П13-01-2002 и ТК 840-П3-01-2007 на режимы двухстадийного охлаждения катанки различного марочного сортамента в потоке стана 150).

Повышение пластичности после высокотемпературной прокатки обеспечило изготовление стальной проволоки малого диаметра различного назначения без промежуточной термической обработки с сохранением требуемых конечных характеристик.

Катанка, изготовленная по новому режиму ТМО, переработанная на проволоку малого диаметра, имеет лучшую технологичность в сравнении с базовой. Так, при производстве высокопрочного металлокорда обрывность снизилась на 34%, а сверхвысокопрочного – на 23%.

Освоение усовершенствованных режимов ТМО позволило снизить расходный коэффициент металла в среднем на 10%. Общий фактический экономический эффект от внедренных новых технологических решений составляет 31,7 миллиона гривен, доля автора – 4,44 миллиона гривен.

Ключевые слова: стальная катанка, термомеханическая обработка, дробность деформации, микроструктура, обезуглероженный слой, окалина, пластичность, проволока малого диаметра.

## SUMMARY

**Vladislav Lutsenko.** The scientific foundation for improvement of steel rod's thermo-mechanical processing for the wire of small diameter. – Manuscript.

The dissertation for a Doctor of Technical Sciences degree with specialization 05.16.01 – metal science and heat treatment. – Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, 2015.

The dissertation is devoted of increasing in thermo-mechanical processing the plastic properties of steel wire rod. The obtained steel wire rod has the structure: high carbon – the dispersion of perlite without closed cementite net, the minimum depth of equable decarburized layer; low carbon – uniform structure of ferrite with

a minimum of perlite; alloy – the occurrence of bainite-martensite areas up to 10% in the mixed structure. The results were used on the rod mills OJSC “Byelorussian steel works” and PJSC “ArcelorMittal Kryvyi Rih“. The increasing of plasticity provided the production of steel wire of small diameter without intermediate heat treatment, thus reducing the expenditure coefficient of metal by 10% in average.

Keywords: steel wire rod, thermo mechanical processing, granularity deformation, microstructure, decarbonizes layer, scale, ductility, wire of small diameter.

Підписано до друку 31.08.2015. Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Папір друкарський.  
Друк цифровий. Гарнітура Times Roman. Умовн. друк. арк. 1,85. Обл.-видавн.арк. 1,9.  
Замовлення № \_\_\_\_\_. Наклад 100 примірників.

49050, м. Дніпропетровськ, пл. Академіка Стародубова, 1. Друкарня „Візіон”  
Свідоцтво про держреєстрацію № 04052442 Ю 0021076  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи серія ДП № 60-р від 20.03.2001 р.