

## АНОТАЦІЯ

*Гезенцевей Ю. І.* Технологічність застосування дрібнозерністих термозміцнених сталей в конструкціях кожухів доменних печей. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 05.02.01 «Матеріалознавство» (13 – Механічна інженерія). Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» Міністерства освіти і науки України, Дніпро, 2021.

Дисертація присвячена вирішенню прикладної задачі подовження циклу безаварійної роботи кожухів доменних печей за рахунок застосування високоміцного товстолистого прокату вітчизняного виробництва. Задачу вирішено шляхом створення температурно-деформаційних режимів прокатки товстого листа із сталі 10Г2ФБЮ, для формування в полігональної структури аустеніту гетерогенного зародження фериту, що забезпечує формування високодисперсної феррито-перлітної структури, яка при експлуатації в умовах підвищених температур зберігає високий рівень міцності, пластичності та жароміцності товстого листа.

Актуальність роботи обумовлена аналізом доцільності застосування сталей високої міцності в конструктивних елементах кожуха доменної печі. У загальній вартості виготовленої та змонтованої будівельної сталевій конструкції вартість металопрокату становить 60...70%, тому застосування технологічних і високоміцних видів прокату та марок сталей зумовлює зниження собівартості конструкцій. Розширення діапазону сталей, що дозволяють підвищувати технологічність сталевих конструкцій стосовно не лише мінімізації ваги, а й оптимізації критеріїв корозійної стійкості та вогнестійкості з ефективним використанням їх у несучих металевих конструкціях різних будівель та споруд є одним із пріоритетних завдань матеріалознавства.

Необхідно відмітити, що сталі, використовувані нині в якості

матеріалів для конструкцій комплексів доменних печей, не повною мірою відповідають вимогам, що пред'являються споруд такого призначення. Товстолистовий металопрокат, вироблюваний вітчизняними металургійними комбінатами, має великий розкид міцностних і пластичних властивостей упродовж, уперек і по товщині листа. Значення міцностних характеристик уздовж напрямку прокатки в порівнянні з Z -напрямком можуть відрізнятися в 1,5...2 рази. Анізотропія міцностних і пластичних характеристик є наслідком наявності в структурі металопрокату ферито-перлітної смугастості. Зазначена структурна неоднорідність, в комплексі з формуванням зони осьової ліквіації, підвищує загрозу руйнування конструкції, яка працює під значним температурним впливом, що відбуваються в кожухах доменних печей.

Саме тому, дослідження, спрямовані на удосконалення структурного стану високоміцних мікролегованих сталей шляхом створення температурно-деформаційних режимів прокатки товстого листа для подальшої експлуатації при локальному впливі підвищених є актуальною задачею як з науковою так і з економічної точок зору.

Метою роботи є удосконалення структурного стану високоміцних мікролегованих сталей підвищеної міцності для подовження циклу безаварійної роботи кожухів доменних печей.

Об'єктом досліджень є процеси формування структурного стану та комплексу властивостей низьковуглецевих низьколегованих сталей при експлуатації за умови підвищених температур.

Предметом досліджень є взаємозв'язок між морфологією структурного стану, який формується за умови дії підвищених температур експлуатації, і відповідного комплексу властивостей.

У роботі використано сучасні методи дослідження структури, тонкої структури та комплексу властивостей низьковуглецевих низьколегованих сталей, а саме: світлову мікроскопію (оптичний мікроскоп Neophot 20); растрову електронну мікроскопію (скануючий електронний мікроскоп РЕМ-

106И); дифракційну електронну мікроскопію (трансмісійний електронний мікроскоп ПЕМ-125К); загальні методи кількісного та напівкількісного металографічного аналізу. Для визначення комплексу механічних властивостей застосовувались традиційні методи статичних та динамічних випробувань та методи випробувань механічних характеристик при підвищених температурах. Під час виконання досліджень проведено всебічну оцінку впливу температурно-деформаційних умов формування структурного стану після полігонізаційної контрольованої прокатки на можливість забезпечення подовження безаварійної роботи кожухів доменних печей.

Проведений інформаційно-аналітичний огляд показав, що у загальній вартості виготовленої та змонтованої будівельної сталеві конструкції вартість металопрокату становить 60...70%, тому застосування технологічних і високоміцних видів прокату та марок сталей зумовлює зниження собівартості конструкцій. Розширення діапазону сталей, що дозволяють підвищувати технологічність сталевих конструкцій стосовно не лише мінімізації ваги, а й оптимізації критеріїв корозійної стійкості та вогнестійкості з ефективним використанням їх у несучих металевих конструкціях різних будівель та споруд є одним із пріоритетних завдань матеріалознавства.

У роботі виконано обґрунтування вибору матеріалу для конструктивних елементів кожуха доменної печі. За результатами порівняльного аналізу використання в несучих конструкціях каркаса двох різних сталей за класом міцності С245 і С460 показано, що ефективність застосування сталі марки С460 в конструкціях складає майже 34%. Таким чином, при проектуванні конструктивних елементів кожуха доменної печі може стати доцільним використання марок сталей із підвищеним рівнем властивостей.

Виходячи з цього в роботі досліджено структурний стан сталей, які найчастіше використовуються в якості матеріалу для конструктивних

елементів кожухів доменних печей. Виконано порівняльний аналіз структурного стану по перетину листа з низьковуглецевих низьколегованих сталей після традиційної та полігонізаційної контрольованих прокаток.

Аналіз тонкої структури сталей після гарячої прокатки дозволив встановити, що для Ст3 основними структурними складовими є поліедричний ферит і перліт. Спостерігаються феритні зерна з помірною щільністю дислокацій. Перлітні області складаються з декількох колоній (розміром 3- 10 мкм) з різною орієнтацією цементитних пластин. Для сталі 09Г2С зерна фериту мають правильну поліедричну форму. Перліт дисперсний ( $S_0=0,2$  мкм) завтовшки до 0,02 мкм; цементит має форму тонких пластин, крупні перлітні колонії разорієнтовані одна відносно іншої.

Особливістю структури сталі 10Г2ФБ (технологія виробництва – контрольована прокатка) є наявність перлітної смугастості. Для визначення розподілу перлітної смугастості було виконано комплекс. Аналіз результатів металографічних досліджень по перетину листа підтвердив наявність перлітної смугастості по усьому перетину товщини зразків. Товщина та щільність перлітної смугастості збільшується. Це можливо пояснити наявністю ближче до центру зразку зони осьової ліквідації. При цьому, розміри перлітних колоній майже не змінюються від поверхні зразку до його центру.

Сталь 10Г2ФБЮ після полігонізаційної контрольованої прокатки має ферито-перлітну структуру. При цьому, перлітна смугастість розбилася на окремі колонії. Феритна складова містить зерна поліедричного фериту, внутрішні об'єми також розбиті малокутовими границями на окремі субзерна не тільки в приповерхневих шарах а й в центральній частині листа. При цьому, розміри перлітних колоній збільшуються від поверхні зразка до його центру. Необхідно зауважити, що проміжок між роздробленими перлітними колоніями заповнюється більш м'якою фазою – феритом. Подрібнення перлітної смугасті відбувається шляхом збільшення кількості місць зародження феритної складової на стадії деформації аустеніту.

Результати дослідження розподілу легуючих елементів по перетину

товстих листів, які вироблено за технологічною схемою контрольованої прокатки (сталь 10Г2ФБ) та полігонізаційної контрольованої прокатки (сталь 10Г2ФБЮ) показав що для сталі 10Г2ФБЮ спостерігається більш рівномірний розподіл легуючих елементів по перетину листа, порівняно з сталлю 10Г2ФБ.

Для оцінки взаємозв'язку між морфологією структурного стану та комплексом властивостей, які формується під час дії підвищених температур в роботі досліджено вплив температури на структурний стан та комплекс властивостей низьковуглецевих низьколегованих сталей.

Проведений комплекс досліджень показав, що механічні характеристики розглянутих марок сталей при підвищенні температури до +800°C різко знижуються. Наприклад, границя плинності для сталі марки 10Г2ФБЮ знизилася в 6,3 раз, а тимчасовий опір розриву – в сім разів. При цьому більш високе значення границі плинності було зафіксовано у сталі марки 10Г2ФБЮ (73 МПа); менше ніж це значення в 1,6 разу було у сталі марки 09Г2С (63 МПа). Мінімальна границя плинності була зафіксована у сталі марки Ст3сп (37 МПа). Таким чином, випробування зразків із низьковуглецевої високоміцної сталі 10Г2ФБЮ за температури +800°C підтвердили, що матеріал кожуха доменної печі, виготовлений із зазначеної марки сталі, буде більш вогнестійкий, аніж у разі його виготовлення з інших марок сталей (Ст3сп та 09Г2С).

Сумісний аналіз результатів металографічних досліджень впливу підвищення температури на морфологію структурного стану низьковуглецевих низьколегованих сталей показав, що для сталей Ст3сп і 09Г2С при збільшенні температури від 20°C до 600°C відсоткове співвідношення структурних складових не змінюється як і їх геометричний розмір. При збільшенні температури до 800°C геометричний розмір перлітних колоній зменшується, що свідчить про протікання процесів розподу перліту. Для сталі 10Г2ФБЮ спостерігається аналогічний взаємозв'язок між температурою випробувань та параметрами структурного стану.

Проведений комплекс досліджень впливу температури випробувань на параметри структурного стану та комплекс властивостей низьковуглецевих низьколегованих сталей показав, що умовно температури за яких можуть експлуатуватися низьковуглецеві низьколеговані сталі розподіляються на два рівня: температура, нижче якої не спостерігаються значні зміни у структурному стані; температура, за якої в структурному стані відбуваються значні зміни, які призводять до зниження несучої здатності конструкцій. Наявність двох температур пов'язано як с розвитком дифузійних процесів так і з спроможністю структури чинити опір впливу температурних напружень (так звана структурна стійкість).

Структурна стійкість сталі при підвищені температури обумовлена процесами, які наближують систему до положення термодинамічної рівноваги порівняно зі станом системи при низьких температурах (структурний стан при кімнатній температурі), а саме: процеси рекристалізації, коагуляції карбо-нитридної фази. Як наслідок, саме зазначені процеси відіграють найважливішу роль при визначені спроможності застосування матеріалів при підвищених температурах.

Показано доцільність використання низьковуглецевої низьколегованої сталі 10Г2ФБЮ, виробленою за технологічною схемою полігонізаційної контрольованої прокатки при реконструкції кожуха доменної печі та аспіраційної устатковини ливарного двору.

Аналіз перевірки можливості використання сталі 10Г2ФБЮ після полігонізаційної контрольованої прокатки у конструкціях кожуха доменної печі шляхом імітаційного моделювання температурного впливу показав, що термічна обробка призвела до формування структурного стану який характеризується появою окремих дисперсних колоній перліту. Феритна фаза як в приповерхневих шарах так і всередині поперечного перерізу характеризується певною різнозерністістю, яка є наслідком процесів рекристалізації. Окрім фериту та перліту в структурі металопрокату після імітаційної термічної обробки з'являються окремі області з бейнітною

структурою. Таким чином зазначену марку сталі було використано під час реконструкції кожуха доменної печі (підтверджено актом впровадження).

Аналіз можливості використання високоміцних сталей типу 10Г2ФБЮ в конструкціях сталевих бункерів для металургійної промисловості в умовах дії високих технологічних навантажень та низьких температур показали, що при порівнянні варіанта бункера зі сталі класу С255 і сталі 10Г2ФБЮ економія у вазі матеріалу конструкції становила: обшивка – 38,9 %; ребра жорсткості – 36 %; бункерні балки – 37,8 %. Загальна економія металопрокату на одній бункерній ємності становила понад 4 т. Для бункерного відділення сумарна теоретична економія металопрокату перевищує 16 т, що в цінах 2019 р. становить близько 0,5 млн грн.

**Ключові слова:** полігонізаційна контрольована прокатка; кожух доменної печі; структурний стан низьковуглецевих низьколегованих сталей; механічні характеристики при підвищених температурах.