

Спеціалізованій вченій раді ДФ 08.051.020  
при Державному вищому навчальному  
закладі «Придніпровська державна  
академія будівництва та архітектури»

### **ВІДГУК**

офіційного опонента, доктора технічних наук, провідного наукового співробітника відділу Фізико-хімічних досліджень матеріалів Інституту електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України Костіна Валерія Анатолійовича на дисертаційну роботу Гезенцевя Юхима Ісааковича на тему: «**Технологічність застосування дрібнозернистих термозміцнених сталей в конструкціях кожухів доменних печей**», яка подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії у спеціалізованій вченій раді ДФ 08.051.020 за спеціальністю 132 – матеріалознавство

#### **Актуальність обраної теми**

Дисертаційна робота Гезенцевя Ю.І. присвячена вирішенню важливої прикладної задачі подовження ресурсу безаварійної роботи кожухів доменних печей за рахунок застосування високоміцного товстолистового прокату вітчизняного виробництва.

Кожух доменної печі є зварною конструкцією, що складається з циліндричних і конічних поясів, виготовлених зі сталевих листів. Товщина кожуха у верхній частині становить 20...40 мм, в нижній 40...60 мм. Виробляють кожух із сталей з високим рівнем ударної в'язкості, міцності, пластичності, термостійкості (16Г2АФ, 10Г2С1, 14Г2 та ін.).

Вага кожухів доменних печей складає понад 2,0...2,5 тис. тон. Відомо, що одним із шляхів зменшення собівартості крупної будівельної сталевих конструкцій є застосування більш міцних видів прокату та сталей високої міцності за рахунок зменшення товщини листа при збереженні необхідного рівня міцності та пластичності.

Разом з тим, необхідно сказати, що традиційні сталі 16Г2АФ, 10Г2С1, 14Г2 для конструкцій доменних печей не повною мірою відповідають сучасним вимогам у плані їх ресурсу роботи, відновлення (ремонт) та зварювання. Анізотропія міцністних і пластичних характеристик цих сталей є наслідком наявності в структурі металопродукату ферито-перлітної смугастості. Ця структурна неоднорідність у поєднанні з формуванням зони осьової ліквідації підвищує ризик руйнування конструкції, яка працює у складних термомодеформаційних умовах кожухів доменних печей.

Тому одним із пріоритетних завдань сучасного матеріалознавства є розширення номенклатури сталей для виготовлення конструкцій (кожухів) доменних печей, з метою зниження їх ваги, підвищення міцнісних та пластичних властивостей, корозійної стійкості, вогнестійкості та зварюваності.

Аналіз «сталевого» ринку України показав, що найбільш доцільним згідно цілям та завданням дисертаційної роботи є застосування високоміцних мікролегованих типу сталей 10Г2ФБ та 10Г2ФБЮ, вартість яких більша лише на 10...15% ніж традиційних сталей, які використовуються для кожухів доменних печей, але їх міцність вище у 1,5...2,0 рази при покращеній зварюваності, корозійної стійкості, втомної витривалості.

Одним із шляхів, що дозволить забезпечити покращені властивості сталям для кожухів доменних печей є розробка та застосування нових термомодеформаційних режимів прокату товстолистого матеріалу.

Саме тому, дисертаційна робота, яка спрямована на удосконалення структурного стану високоміцних мікролегованих сталей шляхом створення температурно-деформаційних режимів прокатки товстого листа для подальшої експлуатації при локальному високотемпературному впливі безумовно є актуальною та своєчасною, як з науковою так і з практичною та економічною точок зору.

### **Ступінь обґрунтованості, повнота і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій**

Основні результати наукового дослідження є достовірними та обґрунтованими, що підтверджується великим обсягом проведених досліджень по визначенню властивостей високоміцних мікролегованих типу сталей 10Г2ФБ та 10Г2ФБЮ після різних режимів нагріву та деформації. Обґрунтованість наукових положень, висновків і результатів забезпечено використанням у роботі праць визнаних учених і фахівців у галузі прикладного матеріалознавства; застосуванню добре апробованих методів дослідження, зокрема методів дослідження тонкої структури матеріалів, методів математичної статистики, регресійного аналізу для відбору, обробки та аналізу результатів.

Достовірність наукових положень, висновків і результатів доведено збіжністю результатів аналітичних і експериментальних досліджень, використанням в експериментальних дослідженнях сучасних методів і методик фізичного матеріалознавства, трактуванням одержаних результатів, які не суперечать загальноприйнятим науковим положенням, а також досвідом їх практичного використання.

Також достовірність та обґрунтованість наукових результатів та висновків підтверджується їх апробацією на міжнародних науково-практичних конференціях та публікацією у фахових українських та рейтингових іноземних журналах, які включені до наукометричних баз даних, зокрема Scopus.

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

Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі матеріалознавства і обробки матеріалів ДВНЗ ПДАБА за планами науково-дослідних робіт та фундаментальних досліджень у рамках тем (де здобувач був виконавцем і відповідальним виконавцем): «Дослідження правил об'єднування показників надійності елементів силових систем стосовно стратегії обслуговування промислового обладнання за фактичним технічним станом» (державна реєстрація № 0119U100885).

### **Наукова новизна одержаних результатів**

Наукова новизна результатів, отриманих в дисертації полягає у тому, що вперше встановлено основні закономірності впливу температури експлуатації на комплекс властивостей листового прокату товщиною 40...50 мм з низьковуглецевої низьколегованої сталі 10Г2ФБЮ, виробленого за технологічною схемою полігонізаційної контрольованої прокатки.

Вперше теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено доцільність використання низьковуглецевої високоміцної сталі 10Г2ФБЮ як матеріалу для конструкцій кожухів доменних печей. Розроблена концепція відрізняється урахуванням змін морфології структурного стану при експлуатації конструкцій за температур 600...800°C.

Набуло подальшого розвитку теорія термічної обробки сталей та сплавів шляхом експериментального визначення процесів формування структурного стану в металопрокаті товщиною 40...50мм з низьковуглецевої низьколегованої сталі 10Г2ФБЮ при яких мікроструктура металопрокату відрізняється відсутністю перлітної смугастості та більш рівномірним розподілом легуючих елементів по перетину листа. Це дозволило ефективно застосувати даний металопрокат у якості матеріалу для кожухів доменних печей та збільшити ресурс їх безаварійної експлуатації у 3 рази.

### **Практичне значення одержаних результатів**

Практична цінність дисертаційної роботи полягає у проведенні експериментальних випробувань сталей широкого використання на вогнестійкість конструкцій металургійного устаткування при значних 600...800°C температурних навантаженнях.

Вперше в Україні при проектуванні, виготовленні і монтажі металоконструкцій кожуха доменної печі №3 на металургійному комбінаті «Запоріжсталь» рекомендовано і застосовано для використання низьковуглецеву мікрولةговану сталь 10Г2ФБЮ, яку вироблено за технологічною схемою безперервної контрольованої прокатки.

Доведено економічну доцільність застосування сталей підвищеної вогнестійкості в якості матеріалу для конструкцій сталевих бункерів металургійної промисловості в умовах дії високих технологічних навантажень та низьких температур.

Показано, що застосування сталі 10Г2ФБЮ, що виготовлена по технології полігонізаційної контрольованої прокатки призведе до економії у вазі та зниженні собівартості конструкції до 38,9 % (обшивка ребра), до 36 % (жорсткості), до 37,8 % (бункерні балки).

Закладено у проект реконструкції об'єктів доменних печей і застосовано в конструкціях з підвищеними вимогами до їх вогнестійкості високоміцні низьковуглецеві низьколеговані сталі марок 10Г2ФБ та 10Г2ФБЮ.

Впроваджено в навчальний процес кафедри матеріалознавства та обробки матеріалів ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» результати що отримано у роботі.

### **Повнота викладення основних результатів та наукових положень дисертації в опублікованих працях**

Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 20 наукових працях, з яких: одна стаття у виданнях, що індексуються в міжнародних наукометричних базах даних; 2 монографії; 11 статей у фахових виданнях України, 4 роботи апробаційного характеру.

Основний зміст дисертації є достатньо висвітленим та апробований на 9 науково-практичних конференціях та семінарах.

Опубліковані праці за темою дисертації містять результати особистої роботи автора на окремих етапах дослідження і відображають основні положення і висновки дисертаційної роботи.

### **Структура, оцінка мови, стилю та оформлення**

Дисертаційна робота Гезенцвея Ю.І. має традиційну структуру і складається з анотації, вступу, п'яти розділів, загальних висновків, переліку використаних літературних джерел та двох додатків.

Дисертаційна робота містить наукові положення, які раніше не були захищені, і нові науково-обґрунтовані результати досліджень та задовольняє вимогам п.п. 1, 2, 3, 7 паспорту спеціальності 05.02.01 – Матеріалознавство.

Текст дисертації написаний українською мовою з використанням загальноприйнятої термінології. Анотація та текст дисертації оформлено згідно вимог діючого «Тимчасового порядку присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 6 березня 2019 р. №167.

Здобувач дотримується вимог академічної доброчесності, дисертація не містить елементів плагіату та запозичень, має посилання на відповідні джерела інформації у випадку використання ідей, результатів та текстів інших авторів. Автор дотримується норм законодавства про авторське право, надає повну та достовірну інформацію про результати наукової діяльності, а також використання методики досліджень.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначено мету і основні задачі дослідження, вказано на зв'язок роботи з науковими програмами, показано наукову новизну отриманих результатів і їх практичне значення. Наведено інформацію про кількість публікацій та апробації результатів, особистий внесок здобувача та описано структуру дисертації.

У першому розділі автором проведено критичний аналіз умов експлуатації матеріалів для конструкцій кожуха доменної печі, показано доцільність застосування сталей високої міцності, проведено аналіз причин утворення дефектів у конструктивних елементах кожуха доменної печі та на підставі цього сформульовано вимоги, що висуваються до марок сталей які можуть застосовуватися для реконструкції кожуха доменної печі. У розділі також проаналізована технологія виробництва товстолистового прокату та додаткової термічної обробці по різноманітним технологічним схемам. У розділі наведена морфологія структурного стану та проаналізовані існуючі механізми керування структурним станом для підвищення комплексу механічних властивостей низьковуглецевих низьколегованих сталей. На підставі критичного аналізу літературних джерел автором була сформульована мета та задачі дослідження.

**У другому розділі** наведено матеріал, методи і методики, застосовані в роботі для проведення досліджень

Для обґрунтування вибору матеріалу для конструктивних елементів кожуха доменної печі було здійснено порівняльний аналіз основних характеристик несучих конструкцій каркаса, виконаних із сталей С245 і С460. Аналіз отриманих результатів показав, що ефективність застосування сталі марки С460 в конструкціях складає майже 34%.

На підставі аналізу технологічних схем контрольованої прокатки, що використовуються на вітчизняних металургійних комбінатах стан 3600 ММК «Азовсталь» та стан 3000 «ММК ім. Ілліча» було обрано відповідні технологічні схеми для виробництва товстолистового прокату з високоміцних низьколегованих сталей.

У роботі використано сучасні методи дослідження структури, тонкої структури та комплексу властивостей низьковуглецевих низьколегованих сталей, а саме: загальні методи кількісного та напівкількісного металографічного аналізу з застосуванням оптичного мікроскопу НЕОРНОТ 2; растрову електронну мікроскопію з застосуванням скануючого електронного мікроскопу РЕМ-106И; дифракційну електронну мікроскопію з застосуванням трансмісійного електронного мікроскопу ЕМ-125К, методи визначення мікротвердості та твердості по Віккерсу.

Хімічний склад зразка визначався за допомогою приладу SPECTROMAX. Для визначення комплексу механічних властивостей застосовувались традиційні методи статичних та динамічних випробувань за допомогою універсальної випробувальної машини FP-I00/1. Визначення температури проводили за допомогою високотемпературного інфрачервоного пірометра Gulton Infratherm Meumf. IS3D.

З метою отримання кількісних залежностей між параметрами процесів, які досліджувались застосовувався математичний апарат теорії обробки масивів експериментальних даних.

**У третьому розділі** представлено результати дослідження структурного стану сталей після різних режимів термічної обробки: гарячої прокатки (сталь Ст3, 09Г2С), яка традиційно використовуються для конструктивних елементів кожухів доменних печей, контрольованої прокатки (сталь 10Г2ФБ) та полігонізаційної контрольованої прокатки (сталь 10Г2ФБЮ).

Результати металографічних досліджень структурного стану сталі 09Г2С показали, що аналогічно сталі Ст3 мікроструктура сталі є ферито-перлітна. При цьому, оцінка показали подрібнення феритної складової, порівняно

зі сталю Ст3. Вміст феритної складової складає 70% та перлітної – 30%, тоді як у Ст.3 – 60% фериту та 40% перліту.

Для визначення впливу режимів контрольованої прокатки на структуру була досліджена сталь 10Г2ФБ. Аналіз представлених даних показав, що після заводської контрольованої прокатки сталь 10Г2ФБ має ферито-перлітну структуру з явно вираженою перлітною смугастістю. Встановлено, що масова частка вуглецю збільшується по перетину зразка від поверхні до середини. На поверхні листа вона складає 0,099 %, по середині - 0,116 %.

Аналіз структурного стану сталей після полігонізаційної контрольованої прокатки проводили на сталі 10Г2ФБЮ. Металографічні дослідження показали, що сталь 10Г2ФБЮ після полігонізаційної контрольованої прокатки має ферито-перлітну структуру. При цьому, перлітна смугастість розбилася на окремі колонії, а феритна складова містить зерна поліедричного фериту, які розбиті малокутовими границями на окремі субзерна. Аналіз отриманих результатів показав, що подрібнення перлітної смугасті відбувається шляхом збільшення кількості місць зародження феритної складової на стадії деформації аустеніту.

Порівняльний аналіз структурного стану по перетину листа з низьковуглецевих низьколегованих сталей після традиційної та полігонізаційної контрольованої прокатки показав, що для сталі 10Г2ФБЮ (полігонізаційна прокатка) спостерігається більш рівномірний розподіл легуючих елементів по перетину листа, порівняно з сталю 10Г2ФБ (традиційна прокатка).

**У четвертому розділі** наведено результати досліджень впливу температури випробувань на структурний стан та комплекс властивостей низьковуглецевих низьколегованих сталей. Досліджено вплив хрому, молібдену, ванадію та ніобію (на прикладі сталей Ст3сп, 09Г2С, 10Г2ФБЮ) на опір нагріву при температурах  $+20^{\circ}\text{C}$ ,  $+600^{\circ}\text{C}$ ,  $+800^{\circ}\text{C}$ .

Аналіз отриманих даних показав, що при температурі  $+600^{\circ}\text{C}$  границя плинності сталі марки 10Г2ФБЮ знижується в 1,8 раз, сталі марки 09Г2С знижується в 2,05 раз, сталі марки Ст3пс – в 2,6 раз порівняно з температурною випробувань  $+20^{\circ}\text{C}$ .

Аналогічна залежність спостерігається і для тимчасового опору розриву: у 2 рази для сталі марки 10Г2ФБЮ зниження, у 2,2 раз для сталі 09Г2С; та зниження до 2,7 разу для сталі марки Ст3сп. Тобто традиційні сталі (наприклад Ст3сп) мають низьку вогнестійкість. Найбільшу вогнестійкість мають сталі з більшим вмістом легуючих елементів.

Встановлено, що механічні характеристики дослідних сталей при підвищенні температури до  $+800^{\circ}\text{C}$  різко знижуються. Границя плинності для сталі марки 10Г2ФБЮ знижується в 6,3 раз, а тимчасовий опір розриву – в 7 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). Тобто було доведено, що матеріал кожуха доменної печі, виготовлений із сталі марки 10Г2ФБЮ, буде більш вогнестійкий, ніж у разі його виготовлення з інших марок сталей (Ст3сп та 09Г2С).

Показано, що на сталях Ст3сп, 09Г2С та 10Г2ФБЮ при збільшенні температури нагріву від  $+20^{\circ}\text{C}$  до  $+600^{\circ}\text{C}$  відсоткове співвідношення структурних складових не змінюється. При підвищенні температури до  $+800^{\circ}\text{C}$  спостерігається подрібнення перлітної складової. Для сталей 09Г2С та 10Г2ФБЮ збільшення температури нагріву до  $+800^{\circ}\text{C}$  призводить до протікання процесів розпаду перлітної складової і, як наслідок, до подрібнення розміру перлітних колоній.

Структурна стійкість сталі 10Г2ФБЮ при підвищеній температурі (до  $+800^{\circ}\text{C}$ ) обумовлена швидкістю протікання дифузійних процесів та спроможністю структури чинити опір температурним напруженням внаслідок коагуляції карбонітридної фази (сталь 09Г2С) та її виділення по границях зерен (сталь 10Г2ФБЮ).

**П'ятий розділ** присвячено практичній реалізації встановлених закономірностей по підвищенню технологічності конструкцій доменних печей шляхом застосування високоміцних дрібнозернистих сталей типу 10Г2ФБЮ на доменній печі №3 на ПРАТ «Азовсталь».

Автором запропоновано методику «дерева відмов» для оцінки ризиків під час експлуатації кожуха доменної печі, яка дозволяє виявити ненадійні місця; здійснити якісний та кількісний аналіз надійності системи; виявити ті елементи системи які знаходяться на стадії відмови та визначити причини, які призвели до такого стану елементів конструкції.

В результаті проведених розрахунків було побудовано схему пошкоджених ділянок, напруження в матеріалі яких перевищують значення розрахункових опорів.

З метою практичної перевірки можливості використання сталей типу 10Г2ФБЮ у конструкціях кожуха було проведено імітаційне моделювання температурного впливу, що підтвердило попередні висновки.



Після додаткової механічної обробки (вигинання прокату за заданим у проекті радіусом) конструкцію підвергнули впливу підвищених температур. Моделювання умов експлуатації здійснювали за схемою пом'якшувальної термічної обробки: температура 750°C, термін витримки 8 годин, яке показало, що термічна обробка призвела до майже повного зникнення перлітної смугастості, але феритна фаза характеризується певною різнозернистістю, яка є наслідком процесів рекристалізації.

Внаслідок проведених досліджень кожуху доменної печі №3 на ПРАТ «Азовсталь» було прийнято рішення про необхідність демонтувати його та виготовити новий кожух з низьковуглецевої низьколегованої сталі 10Г2ФБЮ. Це дозволило ефективно та економічно застосувати даний металопрокат у якості матеріалу для кожухів доменних печей та збільшити ресурс його безаварійної експлуатації у 3 рази.

Сталь марки 10Г2ФБЮ була успішно застосована також у конструкції пірамідально-призматичного бункера. Відповідно до наявних державних норм України сталеві бункери всіх типів за наявними умовами роботи й характером напружено-деформованого стану належать до найвищої групи, що передбачає дуже високу ступінь складності та відповідальності під час проектування таких споруд.

Сталь марки 10Г2ФБЮ була застосована при реконструкції систем асціації ливарного двору ПРАТ «МК «Азовсталь» шляхом штучного регулювання зусиль в елементах наявного каркаса будівлі, що забезпечено їх пристосування до додаткових навантажень.

Загальна економія металопрокату на одній бункерній ємності становила понад 4 т. Для бункерного відділення сумарна теоретична економія металопрокату від використання сталі марки 10Г2ФБЮ перевищує 16 т, що в цінах 2019 р. становить близько 0,5 млн. грн.

### **Основні зауваження щодо змісту дисертації.**

Разом з високою науковою і практичною оцінкою представленої дисертаційної роботи, слід навести наступні зауваження:

1. В першому пункті наукової новизни зазначено *«Встановлено основні закономірності впливу температури експлуатації на комплекс властивостей листового прокату ...»*. Сталь 10Г2ФБЮ достатньо добре відома, вона вже довгий час використовується для виготовлення труб великого діаметру для газо- та нафтопроводів. У чому полягають ці основні закономірності?

2. В першому пункті наукової новизни зазначено «Дана концепція відрізняється сумісним аналізом морфологічної будови структурного стану та відповідним комплексом механічних властивостей». Що надав цій сумісний аналіз, чого раніше не було встановлено?
3. У третьому пункті наукової новизни зазначено «Експериментально обґрунтовані процеси формування структурного стану...». На мою думку експериментально можливо підтвердити або дослідити, але теоретично – обґрунтувати.
4. Розділ 1. На мою думку дуже багато місця присвячено технологічним особливостям виробництва та використання товстолистового прокату, слід більше надати інформації про особливості структуроутворення при цих процесах, де і при яких умовах традиційно використовується сталь марки 10Г2ФБЮ, особливості карбідного- та карбонітридного зміцнення.
5. Розділ 2. У цьому розділі слід було надати більше інформації про математичні методи обробки експериментальних даних.
6. Розділ 3. На протязі всієї дисертації мова йдеться про вогнестійкість — властивість матеріалів чинити опір дії вогню та високих температур, але нічого не сказано про межі вогнестійкості, тобто час, протягом якого конструкція може витримати дію вогню, а потім вже починається деформація. Яка межа вогнестійкості запропонованої сталі 10Г2ФБЮ?
7. Розділ 3. Доцільно було би використати методи мікрорентгено-спектрального аналізу розподілу елементів по лінії сканування для оцінювання однорідності розподілу елементів – вуглецю, марганцю, ніобію, молібдену та інших.
8. Розділ 4. Вибір температур  $+600^{\circ}\text{C}$  та  $+800^{\circ}\text{C}$  потрібно було би якось обґрунтувати, співставити з температурами  $A_{c1}$ ,  $A_{c3}$ , початку феритного та перлітного перетворень.
9. Розділ 5. Дуже гарний практичний розділ. Але незрозуміло навіщо автор привів результати про реконструкцію пірамідально-призматичного бункера та загороди виробничої будівлі які не працюють у високотемпературних умовах?

Наведені зауваження показують напрямок подальших досліджень автора та не впливають на загальну позитивну оцінку виконаної роботи. Мається можливість подальшого розвитку наукових досліджень в обраному автором напрямку та їх подальшого широкого застосування на практиці.

### **Загальний висновок та оцінка роботи**

Дисертаційна робота Гезенцвея Юхима Ісааковича на тему: «Технологічність застосування дрібнозернистих термозміцнених сталей в конструкціях кожухів доменних печей» є оригінальним, самостійним та завершеним науково-прикладним дослідженням, виконаним на високому науковому рівні та належним чином оформлена. Автор розширив уявлення теорії термічної обробки металів та сплавів та розв'язав декілька актуальних задач сучасного матеріалознавства по застосуванню дрібнозернистих термозміцнених мікролегованих сталей у багато вагових конструкціях металургійного виробництва.

Основні розділи дисертаційній роботі достатньо проілюстровані рисунками та таблицями, повною мірою відображають отримані наукові та практичні результати. Загальні висновки роботи відповідають завданням дослідження і меті роботи.

Вважаю, що дисертаційна робота **Гезенцвея Юхима Ісааковича на тему: «Технологічність застосування дрібнозернистих термозміцнених сталей в конструкціях кожухів доменних печей»** за актуальністю розглянутих задач, обсягом дослідження, науковим рівнем і практичною цінністю отриманих результатів повністю відповідає галузі знань 13 – Механічна інженерія та спеціальності 132 – Матеріалознавство, та всім вимогам п.п. 9-12 «Тимчасового порядку присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 6 березня 2019 р. №167, Наказу Міністерства освіти та науки України №40 від 12 січня 2017 року «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», а її автор - **Гезенцвей Юхим Ісаакович**, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 – Матеріалознавство.

Офіційний опонент  
провідний науковий співробітник  
відділу фізико-хімічних досліджень матеріалів  
ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України  
доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник



Валерій КОСТІН

Підпис д.т.н. Валерія КОСТІНА засвідчую:  
Вчений секретар ІЕЗ ім. Є. О. Патона

Ілля КЛОЧКОВ