

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Парусова Едуарда Володимировича «Розвиток наукових і технологічних основ керування структурою та властивостями сталей перлітного класу для елементів будівельних конструкцій високої міцності», яка подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук у спеціалізованій вченій раді Д 08.085.02 за спеціальністю 05.02.01 – Матеріалознавство

Актуальність обраної теми.

Дисертаційна робота Парусова Е. В. присвячена розв'язанню низки питань, які спрямовані на розробку й впровадження заходів з керування процесами структуроутворення в сталях перлітного класу для забезпечення високого комплексу механічних властивостей металевих елементів будівельних конструкцій. Досягнення поставленої мети достатньо складно уявити без вирішення додаткових питань з підвищення якості бунтового прокату, визначення його оптимального структурного стану, обмежень за наслідками явищ ліквації хімічних елементів тощо.

Відсутність обмежень у нормативній документації для високоміцного прокату на присутність неметалевих включень, нормування надлишкових фаз, а в деяких випадках структури і механічних властивостей, сприяє виникненню структурної неоднорідності та нерівномірності розподілу механічних властивостей, особливо при виробництві прокату великих діаметрів. Обрана тема і необхідність вирішення завдань, що викладені у роботі, були обумовлені низкою державних документів: «Концепцією державної цільової науково-технічної програми розвитку та реформування гірничо-металургійного комплексу України до 2020 року» (від 27.04.2010 р.) та «Галузевою Програмою енергоефективності та енергозбереження» (від 25.02.2009 р.). На підставі цього розробка і впровадження інноваційних технічних рішень з контрольованого керування комплексом властивостей прокату зі сталей перлітного класу для високоміцних конструкцій є актуальною науково-прикладною проблемою.

Ступінь обґрунтованості, повнота і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій.

Наукові добутки, що отримані в дисертації, ґрунтуються на аналізі достатньо великої кількості літературних джерел, використанні сучасних методів і методик дослідження процесів структурних перетворень у вуглецевих сталях. Використання обчислювальної техніки, сучасного програмного забезпечення, акредитованого випробувального устаткування дозволили автору на основі узагальнення результатів досліджень розробити пропозиції по удосконаленню технології виготовлення високоміцного прокату зі сталей перлітного класу. Достовірність висновків, що сформульовані здобувачем, підтверджується збігом результатів теоретичних досліджень та промислового опрацювання. На підставі цього обґрунтованість результатів досліджень, висновків і рекомендацій, що відображені в дисертації, не викликає сумнівів.

Вх. № 45 - 05/49
9.04.2024

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконана у Інституті чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України на основі результатів досліджень, отриманих автором як керівником і відповідальним виконавцем по ряду робіт наукової тематики: «Розробка ресурсо - та енергозберігаючої технології виробництва катанки для високоміцних арматурних канатів», № ДР 0114U001191; «Наукові основи технології виробництва гарячекатаного бунтового прокату підвищеної міцності з вуглецевої сталі, легованої карбідоутворюючими елементами», № ДР 0118U000082; «Розробка науково-обґрунтованих режимів деформаційно-термічної обробки високоміцного арматурного прокату нового покоління для будівельних конструкцій», № ДР 0117U004152; «Розвиток наукових та технологічних основ виробництва мікролегованої високовуглецевої катанки для виготовлення прямим волочінням дроту для високоміцних арматурних пасм і пружин», № ДР 0111U001330; «Розробка наскрізної технології виробництва гаряче - і холоднодеформованого арматурного прокату, яка забезпечує підвищення пластичності при заданому рівні міцності», № ДР 0112U001360; «Вдосконалення наскрізної технології виробництва меблевих пружин в умовах ТОВ «Бусол», № ДР 0111U009450; «Розробка технології прямого (без термічної обробки) волочіння пружинного дроту в умовах ПАТ «Дніпрометиз», № ДР 0111U009451; «Порівняльна оцінка якісних показників та технологічної пластичності високовуглецевої катанки зі сталі марки 70 різних заводів-виробників», № ДР 0115U001182; «Розробка науково обґрунтованого енергозберігаючого режиму пом'якшуючої термічної обробки гаряче деформованого прокату з хромомолібденової та хромомолібденованадієвої сталі», № ДР 0115U001065.

Загальна характеристика змісту дисертації.

Дисертація складається зі вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних літературних джерел з 385 найменувань та 13 додатків. Загальний обсяг роботи становить 424 сторінки, у тому числі 308 сторінок основного тексту, 162 рисунки, 74 таблиці, 33 сторінки переліку використаних джерел, 46 сторінок додатків.

У вступі обґрунтована актуальність обраної теми, визначені мета, завдання, об'єкт, предмет та методи досліджень, сформульовані наукова новизна та практична цінність, відображений особистий внесок здобувача в публікаціях та посилання на апробацію матеріалів дисертації.

У першому розділі проведений аналіз сучасного стану питань стосовно технології виготовлення високоміцних холоднодеформованих металовиробів. Визначено, що за температур гарячого обтискування в середньо - та високо вуглецевих сталях особливості розвитку процесів рекристалізації аустеніту висвітлені в не достатній мірі. В результаті цього відсутнє однозначне тлумачення стосовно впливу хімічного складу сталі на перебіг фазових перетворень й особливості формування структури з різною морфологією та дисперсністю фазових складових. Вказана неоднозначність стає додатковим джерелом ускладнень при розробці технології виготовлення високоміцного прокату, який у подальшому піддається різним ступеням холодної

пластичної деформації. В результаті дуже складно визначити оптимальний структурний стан і відповідний комплекс властивостей високоміцного прокату. Достатню увагу приділено питанням впливу неметалевих включень різної природи походження на властивості прокату різного сортаменту. Представляють певний інтерес результати досліджень стосовно технології виготовлення бунтового прокату великих діаметрів. За результатами аналізу проблема полягає в забезпеченні рівномірності розподілу структурних складових за перерізом прокату, що накладає відповідний відбиток на цілий комплекс властивостей. За аналізом результатів досліджень та сучасних вимог європейської нормативно-технічної документації, в роботі зосереджена увага на використанні сталей з вмістом вуглецю 0,80...0,88 %, марганцю 0,50...0,80 %, кремнію 0,10...0,30 %, а при вичерпанні ресурсу підвищення міцності – легування хромом в межах до 0,30 %, ванадієм 0,05...0,10 % та бором до 0,0025 %. Результати аналізу стану проблеми за першим розділом склали основу актуальності, мети та завдань досліджень дисертаційної роботи.

У другому розділі наведений хімічний склад сталей, відомості стосовно використаних методів, методик та устаткування для проведення досліджень. Сталі марок С82D та С86D (ENISO 16120-2:2011) обрані як основні, інші використані для додаткових досліджень. Хімічний склад сталей визначено за умов використання спектрометрів «ARL-3460 та ін., газових аналізаторів «O-mat 2500» та ін. Ліквідація хімічних елементів оцінена з використанням спектрометрів INCA Energy-300 та INCA Wave-500. Структура досліджена з використанням різноманітних оптичних («Neophot-2», «Neophot-32» та ін.) і електронних («РЕМ-106И», «EF-2», «VEGA TS 5130 ММ» та ін.) мікроскопів. Розвиток процесів рекристалізації аустеніту досліджено в умовах реверсивного прокатного стану. Кінетика розпаду аустеніту в сталях досліджена за методом диференційно-термічного аналізу. Параметри тонкої кристалічної будови сталей, фазовий склад окалини визначено з використанням методик рентгенівського структурного аналізу за допомогою дифрактометрів «ДРОН-2» і «ДРОН-3». Механічні властивості визначено при випробуваннях на розривних машинах «EU-100», «EDZ-40» та ін. Для визначення мікротвердості застосовано прилад «ПМТ-3».

У третьому розділі наведено результати досліджень стосовно структуроутворення при виготовленні прокату зі сталей перлітного класу. Досліджений вплив параметрів гарячого обтискування та швидкості безперервного охолодження на формування суб-та мікроструктури аустеніту і особливості перлітного перетворення. За допомогою аналізу кінетики динамічної рекристалізації аустеніту досліджуваних сталей в інтервалі температур 900...1200 °С, підвищення вмісту вуглецю й температури деформації встановлено збільшення розміру зерен аустеніту в інтервалі обтискувань до 30...40 %. За високих ступенів деформації збільшення кількості проміжних обтискувань сприяє диспергуванню структури аустеніту. Збільшення температури початку охолодження прокату на 100...140 °С, у порівнянні з традиційною технологією, підвищує стійкість

аустеніту вуглецевих та низьколегованих (хромом та/або ванадієм) сталей. Набувають визначеного наукового значення результати з висвітлення впливу частинок карбонітридів (карбоборонітридів) ванадію на структурні перетворення у вуглецевих сталях. Узагальнення результатів досліджень з формування дислокаційної субструктури під час гарячої пластичної деформації та участі атомів впровадження у структуроутворенні сталі дозволили внести уточнення у процес формування перлітних колоній. За текстом дисертації визначено, що диспергування перлітної колонії під час перетворення аустеніту супроводжується виникненням визначеної кількості «спеціальних низько енергетичних» між фазних границь. За даними дисертації формування таких границь пояснює підвищення здатності сталей евтектоїдного складу до значних ступенів холодної пластичної деформації волочінням зі зростанням дисперсності перлітних колоній. Отримані результати аналізу процесів структурних перетворень, які ретельно розглянуті у третьому розділі, склали основу для розроблення технології виготовлення високоякісного бунтового прокату та енергоефективної схеми виробництва холоднодеформованих металовиробів для будівельних конструкцій високої міцності.

У четвертому розділі за результатами досліджень термодинамічних діаграм розпаду аустеніту визначено, що для сталей $C80D2^V$, $C82D^V$, $C82D^{Cr}$ і $C82D^{CrV}$ фазове перетворення супроводжується суттєвим зниженням нижньої критичної швидкості охолодження. За таких умов зростає вірогідність формування структур за проміжним і зсувним механізмами. Одним із важелів підвищення вказаної характеристики є додавання до вмісту сталі встановленої кількості хрому та/або ванадію. Більше цього, за аналізом структурних діаграм визначено, що звичайні сталі ($C80D^B$ і $C92D$) можуть піддаватися безперервному охолодженню зі швидкістю $35\text{ }^\circ\text{C/c}$ без перетворення аустеніту за проміжним механізмом. Заборона наявності в структурі сталі фаз, утворених за проміжним або зсувним механізмами перетворення, стала поштовхом до визначення критичних швидкостей охолодження (V_{min} і V_{max}), що забезпечує протікання перетворення аустеніту за дифузійним механізмом. Вказане значення швидкості охолодження визначається хімічним складом сталі. Для сталі $C86D^B$ таким значенням є $19\text{ }^\circ\text{C/c}$; $C82D^{Cr}$ – $1,8\text{ }^\circ\text{C/c}$; $C82D^V$ – $7\text{ }^\circ\text{C/c}$ і $C82D^{CrV}$ – $0,9\text{ }^\circ\text{C/c}$. За результатами досліджень сталі з високим вмістом вуглецю та додатковим вмістом хрому і/або ванадію рекомендується охолоджувати зі швидкостями в інтервалі між критичних значень: від t_{no} до $(t_{nn} - 20...25\text{ }^\circ\text{C})$ зі швидкостями $(0,7...0,8) \cdot V_{max}$. Більше цього, за температурою початку перлітного перетворення пропонується розділити швидкості охолодження на дві групи: $0,1...20\text{ }^\circ\text{C/c}$ – переважний вплив хімічного складу і стійкості аустеніту; $20...35\text{ }^\circ\text{C/c}$ – переважний вплив швидкості безперервного охолодження. За результатами досліджень кінетики перетворення аустеніту і структуроутворення під час безперервного охолодження розроблені та обґрунтовані пропозиції з визначення оптимальних технологічних параметрів обробки на завершальній стадії виготовлення бунтового прокату зі сталей $C82D^{Cr}$, $C82D^V$, $C82D^{CrV}$ і $C86D^B$.

В п'ятому розділі на основі узагальнення результатів експериментальних досліджень розроблені пропозиції з удосконалення технології виготовлення безперервно литої заготовки для бунтового прокату зі сталей перлітного класу. Збільшення інтенсивності охолодження у зоні вторинного охолодження дозволило підвищити питому швидкість виготовлення заготовки, а застосування електромагнітного перемішування сприяло зменшенню впливу легуючих елементів на розвиток ліквації в її осьовій зоні. За результатами досліджень поведінки неметалевих включень при гарячому обтискуванні заготовки сформульовані пропозиції, що дозволяють зменшити їх негативний вплив на якість готового прокату. Набувають визначеного практичного значення пропозиції із відмови від застосування стадії водяного охолодження перед початком повітряного охолодження, що знижує градієнт температури за перерізом прокату, зменшує концентрацію атомів водню, товщину поверхневого шару прокату з локально низьким вмістом вуглецю тощо.

У шостому розділі наведені результати промислового впровадження запропонованої технології виготовлення бунтового прокату зі сталей перлітного класу та застосування розроблених методів управління якістю гаряче - та холоднодеформованих сталей.

Найбільш важливими результатами роботи, які мають наукову новизну, слід вважати:

1. Вперше на основі результатів дослідження фазових і структурних перетворень у сталях $C82D^{Cr}$, $C82D^V$, $C82D^{CrV}$, $C86D^B$ побудовані термодинамічні діаграми, за якими визначені кількісні параметри розпаду аустеніту за дифузійним механізмом при безперервному охолодженні бунтового прокату.

2. Запропоновані вдосконалення щодо схеми утворення пластинчастого перліту при розпаді аустеніту з розвиненою субструктурою після гарячого обтискування прокату.

3. Вперше за допомогою комп'ютерного моделювання та аналізу подвійних стереографічних проєкцій, за визначених умов перлітного перетворення проаналізована вірогідність утворення спеціальних між фазних границь у перліті типу $\Sigma=13$.

4. Вперше за допомогою комплексних досліджень визначені відмінності в трансформації неметалевих включень і використані для обґрунтування локальних структурних змін в сталевій матриці на різних етапах виготовлення прокату з безперервно литої заготовки та їх впливу на характеристики міцності за різних умов навантаження.

5. Аналіз результатів досліджень з використанням положень фізичної мезомеханіки для структурно-неоднорідних середовищ дозволив удосконалити уявлення про механізми трансформації дрібно пластинчастого перліту в залежності від ступеню холодної пластичної деформації прокату зі сталі $C86D^B$ за способом прямого волочіння.

Практичні результати роботи, їх рівень і ступінь впровадження.

1. Технічні рішення, що захищені патентами України на винахід (№ 103113 і № 91760), затверджені технічні умови № ТС 001-1103-2015 та

№ ТС-001-2412-2015 дозволили виготовити об'єм прокату, достатній для визначення ефективності створених технічних рішень.

2. Розроблена технологія виготовлення бунтового прокату діаметром 8,0...16,0 мм зі сталей С82D^{Cr}, С82D^V, С82D^{CrV}, С86D^B впроваджена на ВАТ «Молдавський металургійний завод».

3. Впроваджено енергоефективні схеми виготовлення холоднодеформованих металовиробів для будівельних конструкцій високої міцності, а саме: дротяної арматури 5,0Вр1400-Р1, 6,0Вр1400-Р1 для попередньо-напружених залізобетонних конструкцій; арматурного прокату діаметром 9,6 мм для залізобетонних залізничних шпал; переробної заготовки 5,0В1500-Р1 для арматурних канатів захисних оболонок огороження атомних електростанцій; семи дротяних арматурних канатів діаметром 9,3 мм; 12,5 мм; 15,2 мм для попередньо-напружених залізобетонних конструкцій.

4. Розроблені комп'ютерні програми CalcRoutes (для визначення раціональних маршрутів волочіння і параметрів деформації) та CalcScale (для визначення товщини і складу окалини) були випробувані в умовах метало виробних підприємств й визнані необхідними для промислового використання.

5. Результати дисертаційної роботи відображені при написанні двох навчальних посібників та використані для вдосконалення навчального процесу студентів кафедри матеріалознавства ім. Ю. М. Тарана-Жовніра Національної металургійної академії України.

6. У відповідності до акту розрахунку від 15.07.2020 р. економічний ефект від виготовлення бунтового прокату зі сталі С86D^B (сталь без хрому та/або ванадію) і високоміцних холоднодеформованих металовиробів об'ємом 1 007,813т, склав 1 348 867,26 грн.

Повнота викладення результатів в опублікованих працях. Апробація результатів дисертації.

Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у 71 науково-технічній праці, в тому числі: 2 монографії, 2 учбових посібника, 12 статей у виданнях, що індексуються у міжнародних науко метричних базах даних (Scopus та Index Copernicus), 26 статей у наукових фахових виданнях, 7 – у додаткових виданнях, 2 – патенти на винахід. Основний зміст дисертації в достатній мірі висвітлює основні наукові та практичні здобутки. Результати досліджень обговорені науковою спільнотою за участю автора роботи на 20 науково-практичних конференціях.

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

Відповідність дисертації та автореферату встановленим вимогам.

Дисертація і автореферат написані грамотною технічною мовою, на високому науковому рівні, а стиль викладення в них результатів досліджень, наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечує належну доступність їх сприйняття. Дисертація і автореферат оформлені у

відповідності до діючих вимог і відповідають затвердженому МОН України паспорту спеціальності 05.02.01 – Матеріалознавство. Робота містить наукові положення, які раніше не подавалися до захисту, задовольняють вимогам п.п. 1, 2, 3, 8 паспорту спеціальності 05.02.01 – Матеріалознавство.

Автореферат за змістом відображає основні положення рукопису дисертаційної роботи.

Основні зауваження за матеріалами дисертації.

1. В розділі 1 присутні згадки прізвищ авторів досліджень, але при цьому посилання в списку літературних джерел наведено не на першотвір. Навіщо аналізувати вплив неметалевих включень екзогенної природи походження на якість прокату, якщо в роботі відсутні пропозиції з їх усунення?

2. Чим обумовлене дослідження сталей № 14, 21, 22, 27, 41 за даними табл. 2.1, коли їх хімічний склад практично однаковий? Чому марка сталі № 40 (табл. 2.1) позначена C82D^B, в той час, як середній вміст вуглецю складає 0,88 % C?

3. Чому на кривих охолодження (рис. 3.1, с. 99) відсутні ознаки розвитку процесів алотропічного перетворення?

4. На с. 105...106 відсутність однозначного висвітлення питань стосовно умов розвитку процесів динамічної полігонізації та рекристалізації ускладнює розуміння впливу подрібнення деформації на структуроутворення та обґрунтування деформації у інтервалі 15...20 % при обтискуванні прокату в останній кліті прокатного стану.

5. На с. 111...112 (табл. 3.5 і 3.6) відсутні пояснення за рахунок яких чинників в сталі з 0,4 % C після охолодження на повітрі від 1300 °C формується структура псевдо евтектоїду (91 % перліту), а від 900 °C при тій самій швидкості охолодження 49 % перліту?

6. На с. 111 (останній абзац) наведено дуже суперечливе твердження про залежність пластичності сталі зі структурою перліту лише від феритних прошарків, без урахування участі пластин цементиту.

7. В кінці с. 126 вказано про «динамічне закріплення дислокацій» атмосферами Коттрелла з боро-азотних та вуглецево-боро-азотних комплексних сполук. Якщо комплексні сполуки це частинки хімічних з'єднань – зрозуміло, а якщо це угруповання з окремих атомів (атмосфери за Коттреллом), то до чого тут термін «комплексні»?

8. За схемою (рис. 3.17) відсутнє пояснення еквідистантного зростання пластин цементиту та фериту на відстані, що суттєво перебільшують розмір комірок в аустеніті після гарячого обтискування. За такою схемою дисперсність перлітної колонії повинна визначатися в першу чергу ступенем гарячого обтискування аустеніту і не залежати від температури ізотермічного перетворення в перлітній області або швидкості охолодження.

9. В тексті (с. 129...139) разом зі встановленням існування «спеціальних» між фазних границь відсутні відомості стосовно відмінності їх впливу на властивості сталей у порівнянні зі «звичайними границями».

10. За висновком № 8 (с. 142) дисперсність перліту не залежить від розміру зерна (аустеніту), що знаходиться в протиріччі з першим абзацом с. 137.

11. За даними аналізу умов формування структури за проміжним або зсувним механізмами в осьовій зоні заготовки відсутні відомості про структурний стан металу. Більше цього, який негативний вплив слід очікувати від присутності в структурі заготовки мартенситних або бейнітних осередків, коли передбачаються подальші структурні зміни в металі заготовки при тривалому нагріві до температур гарячої деформації та підчас самого обтискування?

У тексті дисертаційної роботи присутні деякі незручні речення. У відповідності до висновку № 3 (с. 140) за оцінкою умов розвитку динамічної рекристалізації відсутній вплив швидкості деформації. За висновком № 5 та № 6 (с. 176...177) виникають питання стосовно наведених інтервалів зі швидкості охолодження, які мають перекриття один з одним. Відсутнє пояснення стосовно типу неметалевих включень та незмінного їх розміру, хоча вони деформуються (рис. 5.13, с. 203).

Зазначені зауваження не є принциповими та не знижують позитивного висновку щодо дисертаційної роботи.

Загальний висновок щодо відповідності дисертації встановленим вимогам.

Дисертаційна робота та автореферат викладені в логічній послідовності технічно та стилістично грамотною мовою, з використанням термінології, що прийнята науковою спільнотою. Викладений матеріал роботи в необхідній мірі ілюстрований структурними дослідженнями. Аналіз результатів здійснений за побудованими залежностями. В необхідній мірі наведено данні у вигляді таблиць. Висновки роботи відповідають поставленим завданням досліджень і меті роботи. Зміст автореферату відповідає тексту та положенням дисертаційної роботи.

Наукова новизна і результати, які виносяться на захист, повністю відповідають темі, меті та існуючій науково-прикладній проблемі. За темою, змістом та рівнем проведення теоретичних й експериментальних досліджень дисертація відповідає паспорту спеціальності 05.02.01 – Матеріалознавство.

Дисертаційна робота **Парусова Едуарда Володимировича «Розвиток наукових і технологічних основ керування структурою та властивостями сталей перлітного класу для елементів будівельних конструкцій високої міцності»** є завершеною кваліфікаційною науковою працею, в якій вирішено важливу науково-прикладну проблему для металургійної та метало виробної промисловості. Одержані наукові результати надають вагомий внесок, щодо до подальшого розвитку уявлень про фундаментальні положення сучасного матеріалознавства.

Аналіз матеріалів дисертації, її новизна, висновки і рекомендації відповідають вимогам пунктів 9, 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету міністрів України за № 567 від 24 липня 2013 р., зі змінами, що затверджені постановами Кабінету

України від 19.08.2015 р. за № 656 та від 30.12.2015 р. за № 1159, а її автор Парусов Едуард Володимирович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.02.01 – Матеріалознавство.

Офіційний опонент
професор кафедри «Прикладна
механіка та матеріалознавство»
Дніпровського національного
університету залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна,
д.т.н., професор

Підпис професора І.О. Вакуленка засвідчую:



Особистий підпис І.О. Вакуленко
засвідчую нач. загального відділу Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна
<i>І.О. Вакуленко</i> 09. / 04 2021 р.