

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу **Парусова Едуарда Володимировича** на тему:
«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.

Актуальність дисертаційної роботи Парусова Е. В. обумовлена загальною сукупністю пов'язаних між собою багатofакторних процесів.

Тема дисертаційної роботи присвячена розробці та впровадженню комплексу технологічних заходів керування процесами структуроутворення в сталях перлітного класу з метою забезпечення високого рівня механічних властивостей металевих елементів будівельних конструкцій (дротяна й холоднодеформована арматура, сталеві арматурні канати) за зменшених матеріальних та енергетичних витрат.

На сучасному етапі виробництва зазначених товарних позицій існує необхідність у використанні високоякісної вихідної сировини (бунтового прокату) зі сталей перлітного класу.

Накопичений дотепер значний науковий досвід належить до виробництва прокату зі сталей перлітного класу малих діаметрів (5,5...6,5 мм), але при виготовленні прокату діаметром 8,0...16,0 мм існуючі технологічні рішення призводять до формування суттєвої структурної неоднорідності та нерівномірності розподілу механічних властивостей.

Формування структури і властивостей металовиробів із сталей перлітного класу залежить від багатьох факторів: хімічного складу, параметрів технології розкислення, розливання й позапічного оброблення, а також від температурно-часових умов деформаційно-термічного оброблення (ДТО).

Актуальність обраної теми і поставлених у роботі завдань має безпосередній зв'язок з «Концепцією державної цільової науково-технічної програми розвитку та реформування гірничо-металургійного комплексу України до 2020 року» (від 27.04.2010 р.) та з «Галузевою Програмою енергоефективності та енергозбереження» (Наказ Міністерства промислової політики України за № 152 від 25.02.2009 р.).

Спираючись на викладене, вважаю, що дисертаційна робота, яка спрямована на подальший розвиток наукових основ формування мікроструктури та субструктури сталей перлітного класу за результатами комплексних теоретичних та експериментальних досліджень особливостей фазових і структурних перетворень, а також на створення і промислову реалізацію нових інноваційних технічних рішень контрольованого керування властивостями прокату зі сталей перлітного класу, призначеного для виготовлення високоміцних елементів будівельних конструкцій є актуальною і сприяє вирішенню важливої науково-прикладної проблеми.

В.С., №37-05-42

8.04.2021

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

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, які сформульовані у дисертації, забезпечені використанням сучасних методів досліджень, обчислювальної техніки й програмного забезпечення, акредитованого випробувального устаткування, статистично значимою кількістю лабораторних та промислових зразків, впровадженням промислових технологій виробництва, обґрунтуванням результатів, які не суперечать загальноприйнятим фундаментальним положенням сучасного матеріалознавства.

Достовірність висновків, отриманих здобувачем, підтверджена достатнім об'ємом, відтворенням та збіжністю теоретичних та експериментальних даних, тому обґрунтованість результатів, положень, висновків і рекомендацій відображених у дисертаційній роботі не викликає ніяких сумнівів.

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

Дисертаційна робота виконана у Інституті чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України у відповідності з напрямком «Розвиток наукових основ формування залізобуглецевих сплавів та управління їх структурою і властивостями». Дослідження, які є невід'ємною складовою частиною дисертаційної роботи, виконані у рамках відомчих, договірних та конкурсних робіт, у яких автор брав участь як керівник, відповідальний виконавець і співвиконавець: «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 карбидоутворюючими 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 гарячедеформованого 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 і 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 обґрунтовано актуальність обраної теми, визначені мета, завдання, об'єкт, предмет та методи досліджень, сформульовані наукова новизна й практична значимість, відображено особистий внесок здобувача, наведено список публікацій та апробацій матеріалів, які увійшли до дисертаційної роботи.

У першому розділі розглянуто сучасні вимоги до сталей, які використовують для високоміцних холоднодеформованих металовиробів, проаналізовано особливості впливу хімічних елементів на перебіг фазових і структурних перетворень, а також механічні властивості гаряче- та холоднодеформованих сталей. Розглянуто наявні положення про існуючі моделі утворення пластинчастого перліту та основні механізми зміцнення вуглецевих сталей. Встановлено відсутність комплексних досліджень про вплив неметалевих включень у наскрізному технологічному ланцюжку виготовлення та перероблення високовуглецевих сталей. Розглянуто існуючі способи і устаткування для ДТО бунтового прокату у потоці дровових станів, а також зроблений вагомий внесок учнів і послідовників К. Ф. Стародубова – І. Г. Узлова, В. К. Бабіча, Ю. З. Борковського, В. В. Парусова та інших вчених у розробку режимів двостадійного охолодження прокату. За результатами аналітичних досліджень встановлено, що під час ДТО бунтового прокату діаметром 8,0...16,0 мм не забезпечуються необхідні структурні параметри і механічні властивості. Розглянуто заходи, спрямовані на зменшення прояву ліквіації під час виготовлення безперервнолитої заготовки (БЛЗ). Надана оцінка сучасним напрямкам розвитку технологій виробництва та основним різновидам холоднодеформованих металовиробів, які застосовують для виготовлення будівельних конструкцій високої міцності.

На підставі огляду науково-технічних джерел, а також вимог національних і закордонних стандартів до якості прокату та холоднодеформованих металовиробів обґрунтовано перспективні композиції хімічного складу сталей для проведення основних досліджень. З урахуванням сучасних тенденцій розвитку гірничо-металургійного комплексу України обґрунтована сутність науково-прикладної проблеми, актуальність, мета та завдання досліджень дисертаційної роботи.

У другому розділі наведено фактичний хімічний склад досліджуваних сталей, використаних для виготовлення промислових партій бунтового прокату. У якості основних було обрано сталі типу С82D та С86D (EN ISO 16120-2:2011). Загальна кількість промислових партій склала ~ 500 плавов. Вміст вуглецю у сталях змінювався в діапазоні 0,063...0,92 %, а прокат виготовлявся за національними та міжнародними (ENISO 16120, ASTM A510M) стандартами.

При виконанні досліджень застосовані сучасні спектрометри (ARL-3460», «Spectroflame», «Spectrolab-M»), газовий аналізатор («LECO»),

енергодисперсійний та хвильовий рентгенівський спектрометр («Oxford Instruments»); оптичні («Neophot-32», «Axiovert 200M MAT», «Olympus IX-70», «МБС-9»), електронні растрові («PEM-106И», «EF-2», «VEGA TS 5130 MM», «JSM-35», «SUPRA 40 WDS») та трансмісійні («УЕМВ-100К», «JEOLJEM-100 CX») мікроскопи; реверсивний прокатний стан («ДУО-280»); прилад диференційно-термічного аналізу і дилатометр «АД-80»; плавильний агрегат («ВТГ-20-22-ДК-В УХЛ-4»); рентгенівські дифрактометри («ДРОН-2», «ДРОН-3»); розривні машини («EU-100», «EDZ-40», «UP-500», «TTDM Instron», «РГМ-1000»); прилад «ПМТ-3». Промислові партії прокату виготовлені з безперервнолитої заготовки (БЛЗ) перерізом 125 мм × 125 мм, отриманої на сучасному сталеплавильному комплексі. Гаряче деформування БЛЗ здійснено у потоці безперервного дрібносоротно-дротового прокатного стана 320/150.

У третьому розділі наведено результати досліджень, щодо особливостей структуроутворення при виробництві бунтового прокату зі сталей перлітного класу.

Встановлено вплив параметрів гарячого деформування та швидкості безперервного охолодження на особливості формування структури та субструктури аустеніту й перліту в дослідних сталях.

Показано, що з підвищенням вмісту вуглецю й температури деформації збільшується середній розмір аустенітного зерна, але така залежність практично повністю зникає при $\varepsilon = 30 \dots 40$ %. При цьому збільшення кількості одиничних обтиснень при постійній сумарній деформації ($\varepsilon = 85,3$ %) та температури 1100 °С сприяє подрібненню аустенітних зерен.

Показано, що зі збільшенням діаметру прокату час, необхідний для досягнення максимальної швидкості охолодження центральних зон, буде зростати. Підвищення температури початку охолодження обумовлює настання регулярного режиму охолодження при більш високих температурах, що приводить до збільшення фактичної швидкості охолодження прокату.

Зі збільшенням діаметру прокату і підвищенням температури початку охолодження до 1030...1040 °С спостерігається зростання розміру дійсних зерен. Збільшення температури початку охолодження прокату на 100...140 °С у порівнянні з традиційними температурними інтервалами забезпечило підвищення стійкості аустеніту як для звичайних сталей перлітного класу, так і сталей, які містили хром та/або ванадій.

У відповідності до статистичного опрацювання даних, одержаних впродовж спостереження за технологічністю перероблення прокату під час волочіння, автором розроблено обґрунтований спосіб регламентованого мікролегування вуглецевих сталей (0,05...0,84 %С) бором, кількість введення якого визначається вмістом вуглецю і азоту за ковшевою пробою (патент № 103113).

На підставі проведених електронномікроскопічних досліджень формування дислокаційної субструктури гарячої деформації та впливу атомів впровадження, запропоновано вдосконалену модель утворення пластинчастого перліту.

З метою встановлення характеристик міжатомних зв'язків у площині міжфазних границь, що утворюються між решітками фериту і цементиту,

автором використано комп'ютерне моделювання, за результатами якого встановлено наявність у сталях евтектоїдного складу спеціальних низькоенергетичних границь у перліті типу $\Sigma=13$. Розрахунковим методом доведено, що площа міжфазної поверхні розділу ферит/цементит в перліті не залежить від розміру дійсного зерна аустеніту, а визначається виключно дисперсністю продуктів його розпаду.

У четвертому розділі визначено кінетику перетворень аустеніту і особливості формування структури сталей $C86D^B$, $C82D^{Cr}$, $C82D^V$, $C82D^{CrV}$ під час безперервного охолодження. Побудовані термокінетичні й структурні діаграми розпаду аустеніту досліджуваних сталей від температур на $100...140\text{ }^\circ\text{C}$ вищих, ніж звичайно використовують при побудові термокінетичних діаграм.

Показано, що для сталей $C80D2^V$, $C82D^V$, $C82D^{Cr}$ і $C82D^{CrV}$ при протіканні фазових перетворень просліджується особлива закономірність – істотне зниження нижньої критичної швидкості охолодження, що при певних ступенях переохолодження може призводити до формування структур, які утворюються за проміжним і зсувним механізмами.

Встановлено вплив швидкостей безперервного охолодження на абсолютну зміну температури початку й завершення дифузійного розпаду аустеніту сталей $C80D2^V$, $C80D^B$, $C82D^V$, $C82D^{Cr}$, $C82D^{CrV}$, $C86D^B$ і $C92D$. Отримано регресійні рівняння, які встановлюють взаємозв'язок швидкості охолодження з температурою початку перлітного перетворення.

Автором обґрунтовано визначено, що охолодження високовуглецевих сталей, які містять хром і/або ванадій або характеризуються підвищеною стійкістю аустеніту, слід проводити у міжкритичному інтервалі швидкостей охолодження від t_{no} до $(t_m - 20...25\text{ }^\circ\text{C})$ зі швидкостями $(0,7...0,8) \cdot V_{max}$.

За впливом на температуру початку перлітного перетворення запропоновано розділити швидкісні інтервали охолодження на дві групи: $0,1...20\text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ – переважний вплив хімічного складу і стійкості аустеніту; $20...35\text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ – переважний вплив швидкості безперервного охолодження.

П'ятий розділ присвячено удосконаленню технологічних параметрів виготовлення БЛЗ та бунтового прокату. Експериментально доведено, що під час виробництва БЛЗ перерізом $125\text{ мм} \times 125\text{ мм}$ зі сталей типу $C80D$ і $C86D$ з підвищеною швидкістю витягування й інтенсифікацією водяного охолодження в секціях зони вторинного охолодження можливо збільшити швидкість витягування БЛЗ на 32 % без істотного погіршення її макроструктури.

Досліджено вплив електромагнітного перемішування (ЕМП) на формування дендритної структури БЛЗ перерізом $125\text{ мм} \times 125\text{ мм}$ зі сталей $C82D^B$, $C82D^{Cr}$, $C82D^V$, $C82D^{CrV}$, $C86D^B$. Встановлено особливості спадкового впливу дендритної будови БЛЗ на процеси структуроутворення у прокаті з високовуглецевих сталей. При застосуванні ЕМП в осьовій зоні прокату зменшується ширина мартенситних ділянок при одночасному збільшенні протяжності смугастості. За даними мікрорентгеноспектрального аналізу мартенситні ділянки можуть бути збагачені марганцем, кремнієм, хромом і

ванадієм. Коефіцієнти ліквідації становлять: для ванадію 4,98...5,28; хрому 3,03...3,47; марганцю 1,82...2,03; кремнію 1,31...1,46.

Автором встановлено особливості зміни хімічного складу, розміру та морфології неметалевих включень (НВ), починаючи від виплавлення до виробництва прокату зі сталей типу С82D та С86D.

Проведені комплексні дослідження зміни основних характеристик НВ показали, що жоден із технологічних чинників (матеріал футеровки ковшів, захист струменя металу від вторинного окислення, склад теплоізолюючих засипок, позапічне оброблення порошковим дротом FeCa40, режим продування аргоном і технологія вакуумування сталі) не переважає за своїм сприятливим впливом на морфологію та розміри включень. При раціональному поєднанні технологічних чинників досягнуто мінімального вмісту НВ в сталях перлітного класу – середнє значення не перевищувало 1,0 бала.

За результатами промислових експериментів двостадійного охолодження прокату в потоці дрібносоротно-дротового стана 320/150 встановлено, що швидкість охолодження на першій стадії (до 560...540°C) впливає на формування структури і фазового складу окалини, при цьому швидкість охолодження на другій стадії (від 560...540°C) запобігає небажаному розпаду вюститної складової окалини.

За допомогою розрахункової моделі показано, що при застосуванні водяного охолодження градієнт температур між поверхнею і центром прокату в залежності від профілерозміру складає 272...199°C. За результатами розрахунків надано рекомендації щодо повного виключення водяного охолодження під час виготовлення прокату.

Для сталей С80D, С80D^B, С86D^B встановлено взаємозв'язок між розміром аустенітного зерна і глибиною знеуглецьованого шару. Для зменшення розвитку процесів знеуглецьовання поверхні прокату доцільно збільшувати величину аустенітного зерна перед початком повітряного охолодження.

Показано, що на зменшення відносного видовження та відносного звуження впливає водень, який окрихчує прокат. При первинних випробуваннях зменшення значень характеристик пластичності зі збільшенням профілерозміру прокату обумовлене ступенем деформаційного опрацювання БЛЗ і, відповідно, впливом ділянок залишків дендритної структури, які є потенційними місцями блокування водню.

Доведено, що відсортована БЛЗ зі сталей типу С56D, С70D, С80D і С82D може бути використана для виробництва стрижневого арматурного прокату класів міцності А800 і А1000 (ДСТУ 3760:2006).

У шостому розділі автором розроблено і впроваджено у промисловість інноваційні режими високотемпературної ДТО бунтового прокату зі сталей С82D^{Cr}, С82D^V, С82D^{CrV}, С86D^B в потоці безперервного дрібносоротно-дротового стана 320/150. Розроблена технологія ДТО прокату забезпечила збільшення рівномірності розподілу структури у поперечному перерізі, зменшення глибини знеуглецьовання поверхні й підвищення вихідної міцності і показників пластичності.

З урахуванням отриманих результатів, встановлено найбільш ефективний хімічний склад сталей (С82D^{CrV} і С86D^B) для виробництва бунтового прокату.

За досягнутими показниками якості прокат зі сталей C82D^{Cr}, C82D^V, C82D^{CrV}, C86D^B відповідає аналогічній металопродукції кращих металургійних підприємств країн Європейського союзу («Arcelor Mittal Hamburg» і «FNSteel»), а також вимогам EN ISO 16120:2011, частина № 4 «Особливі вимоги до прокату спеціального призначення».

Досліджено особливості деформаційної еволюції субструктури тонкопластинчастого перліту у разі застосування схеми прямого волочіння гарячекатаної сталі C86D^B з сумарним відносним обтисненням до 83,2 %.

Встановлено відмінні ознаки механізмів трансформації НВ в сталях перлітного класу при гарячому прокатуванні та холодному волочінні. Розглянуто особливості зносу і закономірності утворення втомно-корозійних ушкоджень дротів сталевого канату відкритого типу після експлуатації за циклічних навантажень.

Досягнутий рівень якості бунтового прокату діаметром 8,0...16,0 мм дозволив забезпечити впровадження енергоефективних технологічних схем виготовлення холоднодеформованих металовиробів для будівельних конструкцій високої міцності.

У роботі запропоновано новий методологічний підхід, заснований на моделюванні технологічного процесу та оцінці комплексу його параметрів (гальмівна і тягнуча сили, навантаження на ролики) при виготовленні холоднодеформованої арматури, який дозволяє проектувати обладнання для профілювання переробної заготовки, інтегрованого в загальну лінію ділянки стабілізації.

Створено низку методів (методик) прогнозування властивостей і управління якістю гаряче- та холоднодеформованих сталей перлітного класу. Розроблено додаткові методи контролю якості переробної заготовки зі сталей перлітного класу в залежності від ступеня холодного пластичного деформування з метою прогнозування передчасного руйнування або невідповідності механічних властивостей нормативним вимогам.

Систематизовано та узагальнено вплив різних факторів (структурних, технологічних, додаткових) на особливості перероблення прокату на металовиробних підприємствах.

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

- Вперше для сталей C82D^{Cr}, C82D^V, C82D^{CrV}, C86D^B побудовані термокінетичні діаграми та на їхній основі встановлено кінетику і кількісні параметри розпаду аустеніту за дифузійним механізмом під час безперервного охолодження.

- Вперше на основі результатів дослідження фазових і структурних перетворень, які відбуваються під час гарячого деформування і безперервного охолодження, визначено закономірності впливу режимів високотемпературного ДТО на особливості формування структури і механічних властивостей бунтового прокату зі сталей C82D^{Cr}, C82D^V, C82D^{CrV}, C86D^B.

- Отримала подальший розвиток дислокаційно-дифузійна модель утворення пластинчастого перліту у високовуглецевих сталях, яка враховує вплив

субструктури гарячого деформування, а також взаємодію дислокацій з атомами впровадження та їхніми комплексними сполуками.

- Вперше з використанням подвійних стереографічних проєкцій, а також комп'ютерного моделювання встановлено наявність у евтектоїдних сталях спеціальних низькоенергетичних міжфазних границь типу $\Sigma=13$ у перліті.

- Вперше встановлено, що збільшення величини аустенітного зерна в сталі C86D^B перед початком розпаду аустеніту в міжкритичному інтервалі швидкостей безперервного охолодження не призводить до зменшення ударної в'язкості.

- Вперше за результатами комплексних досліджень установлені відмінні ознаки механізмів трансформації НВ та їхній вплив на локальну структуру сталеві матриці на різних етапах оброблення сталей перлітного класу (отримання безперервнолитої заготовки, бунтового прокату, холоднодеформованої переробної заготовки).

- На основі теоретичних положень фізичної мезомеханіки структурно-неоднорідних середовищ і експериментальних досліджень отримали подальший розвиток уявлення про трансформацію структури тонкопластинчастого перліту під час холодного пластичного деформування з сумарним відносним обтисненням до 83,2 % бунтового прокату зі сталі C86D^B.

- Вперше методом електронної мікроскопії та мікродифракції встановлено зв'язок малих ($\varepsilon = 22,7\%$), середніх ($\varepsilon = 51,7\%$) і великих ($\varepsilon = 83,2\%$) ступенів деформації з величиною кутів азимутального розмиття субрефлексів на мікроелектронограмах і кривою пластин у перлітних колоніях у разі волочіння бунтового прокату зі сталі C86D^B.

- Отримали подальший розвиток уявлення про вплив НВ на експлуатаційну стійкість сталей перлітного класу за циклічних навантажень у агресивних середовищах.

Практичні результати роботи, їх рівень і ступінь впровадження.

- Розроблено інноваційну технологію високотемпературної ДТО прокату діаметром 8,0...16,0 мм зі сталей C82D^{Cr}, C82D^V, C82D^{CrV}, C86D^B, яка впроваджена в умовах промислового виробництва на ВАТ «Молдавський металургійний завод» (Акт від 20.03.2015 р.).

- В умовах ПрАТ «ВО «Стальканат-Силур» (Висновок від 03.04.2014 р.) та ТОВ «Харцизький метизний завод» (Акт від 06.12.2013 р.) впроваджено енергоефективні технології виготовлення холоднодеформованих металовиробів для будівельних конструкцій високої міцності: стабілізована дротяна арматура 5,0Вр1400-Р1, 6,0Вр1400-Р1 (клас міцності 1400 МПа); холоднодеформована арматура діаметром 9,54...9,51 мм (клас міцності 1400 МПа); стабілізована переробна заготовка 5В1500-Р1 (клас міцності 1500 МПа); стабілізовані семидротяні арматурні канати (клас міцності 1770 МПа, 1860 МПа) діаметром 9,3 мм; 12,5 мм; 15,2 мм.

- Розроблено та затверджено технічні угоди: №ТС 001-1103-2015 «Бунтовий прокат для високоміцних арматурних канатів і холоднодеформованої арматури», № ТС-001-2412-2015 «Прокат арматурний високоміцний для залізобетонних конструкцій».

- Запропоновані нові технічні рішення при виготовленні й контролі якості бунтового прокату захищені патентами України на винахід (№ 103113 і № 91760).

- Розроблено комп'ютерну програму CalcRoutes, яка дозволяє розраховувати раціональні маршрути волочіння і енергосилові параметри деформації, а також визначати клас міцності холоднодеформованого дроту. Достовірність результатів підтверджена у промислових умовах ПРАТ «Дніпрометиз» (Акт від 22.01.2020 р.).

- Розроблено програму CalcScale, яка дозволяє оперативно визначати загальну масу або середню товщину шару окалини на поверхні прокату будь-якого діаметру з урахуванням її фактичного фазового складу. Достовірність результатів підтверджена у промислових умовах ПРАТ «ГАРАНТ МЕТИЗ ІНВЕСТ» (Акт від 10.09.2020 р.).

- Результати досліджень дисертаційної роботи впроваджено у навчальний процес підготовки студентів кафедри матеріалознавства ім. Ю. М. Тарана-Жовніра Національної металургійної академії України і використано при написанні навчальних посібників.

- Фактичний економічний ефект, який отримано при виробництві і переробленні бунтового прокату зі С86D^B, яка не містить хрому та/або ванадію, у високоміцні холоднодеформовані металовироби у кількості 1 007,813 т, склав 1 348 867,26 грн. (Акт розрахунку економічного ефекту від 15.07.2020 р.).

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 наукометричних базах даних (Scopus та Index Copernicus), 26 статей у наукових фахових виданнях, 7 – у додаткових виданнях, 2 – патенти на винахід. Основний зміст дисертації є достатньо висвітленим, апробований 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. Дисертаційна робота і автореферат оформлені у відповідності до діючих вимог і відповідають затвердженому МОН України паспорту спеціальності 05.02.01 – Матеріалознавство. Дисертаційна робота містить наукові положення, які раніше не були захищені, і нові науково-обґрунтовані результати досліджень та задовольняє вимогам пп. 1, 2, 3, 8 паспорту спеціальності 05.02.01 – Матеріалознавство.

Автореферат за змістом є ідентичним основним положенням дисертаційної роботи.

Основні зауваження щодо змісту дисертації.

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

1. У першому розділі багато уваги приділено технології виробництва бунтового прокату та холоднодеформованих металовиробів. Вважаю, що більш доцільно було би проаналізувати кінетику перетворення вихідних сталей C82D та C86D, привести їх термокінетичні та ізотермічні діаграми, проаналізувати існуючі механізми формування структури в залежності від технологічних параметрів виробництва, привести особливості розташування та склад НВ.

2. У другому розділі сказано, що «у якості сталей для основних досліджень обрано марки C82D та C86D» які додатково містили хром та/або ванадій і бор. Разом з тим не зовсім зрозуміло на підставі яких міркувань було обрано зазначений хімічний склад сталей, лише на підставі аналізу складу аналогічних сталей закордонних виробників? Чи є обраний вміст хімічних елементів саме оптимальним? Далі за текстом «для додаткових досліджень використано сталі типу C7D, C38D, C52D, C56D, C66D, C70D, C72D, C80D, C82D, C92D; SAE1006, SAE1008, SAE1065, SAE1070». У чому була необхідність використання додаткових сталей, хоча й в більшості того ж самого перлітного класу?

3. У третьому розділі приведена залежність розподілу температур за перерізом прокату зі сталі C38D при охолодженні у воді. Зрозуміло, що швидкість охолодження у центрі та на поверхні (автор визначає на відстані 9,0 мм від поверхні) буде різною, що й призведе до неоднорідності формування структури за перерізом прокату та формування зон хімічної неоднорідності. Автор визначає деяку точку «а». Не зрозуміло, що це за така «особлива» точка? Як вона розташовується відносно товщини прокату?

4. У третьому розділі наведено вплив хрому, ванадію та їхньої спільної дії на формування величини дійсного зерна у сталях перлітного класу в залежності від діаметру бунтового прокату. Як вважає автор, що більше впливає на формування структури та властивостей прокату – розмір дійсного зерна чи розмір зерна аустеніту?

5. За результатами комп'ютерного моделювання у третьому розділі наведені дуже цікаві результати, які свідчать про утворення решітки близької до співпадаючих вузлів (типу $\Sigma=13$) у перліті під час дифузійного розпаду аустеніту. Разом з тим експериментальні данні (рис. 3.18) свідчать про те, що спеціальні границі формуються між зернами структури сталі? Як це розуміти?

6. У четвертому розділі наведені термокінетичні діаграми сталей C82D^{Cr}, C82D^V, C82D^{CrV}, C86D^B. Можливо доцільно було б провести співставлення цих діаграм з термокінетичними діаграмами вихідних сталей C82D та C86D з метою визначення сумісного і окремого впливу хрому і ванадію на зміну температурних інтервалів фазових перетворень й структурних складових?

7. У четвертому розділі узагальнено вплив швидкості охолодження з температурою початку перлітного перетворення у вигляді регресійного рівняння другого ступеня. Температура початку перлітного перетворення визначається хімічним складом сталі, швидкістю охолодження та стійкістю аустеніту. У відповідності до наведеної автором формули (4.1) при нульовій

швидкості охолодження температура початку перлітного перетворення становить «мінус» (636...678) °С, однак цього бути не може.

8. За даними мікрорентгеноспектрального аналізу у п'ятому розділі наведено дані, що мартенситні ділянки, які формуються у осьовій зоні прокату, мають ліквацийне походження і характеризуються наступними коефіцієнтами ліквачії: ванадій ~ 4,98...5,28; хром ~ 3,03...3,47; марганець ~ 1,82...2,03; кремній ~ 1,31...1,46. Тобто найбільша ліквация спостерігається у ванадію (хоча він головним чином входить до складу карбідів/карбонітридів), а найменша – у кремнію. Як це можна пояснити?

9. Розділ шостий присвячено результатам промислового впровадження прогресивної технології виробництва бунтового прокату зі сталей перлітного класу, а також розробці енергоефективних технологічних схем перероблення прокату. Розділ є дуже цікавим, але до чого тут використані результати електронномікроскопічних досліджень, результати моделювання нанесення періодичного профілю на поверхню холоднодеформованої заготовки, мікроструктура переробної заготовки за умовними зонами поперечного перерізу, вплив навколишнього середовища на корозійну тривкість, визначення кутів азимутної разорієнтації субрефлексів на мікроелектронограмах після волочіння? На мою думку, в цьому розділі наведено досить чудовий науковий матеріал, відносно «Розробки методів оцінки якості вуглецевих сталей», який містить 5 або навіть 6 нових методів. Вважаю, що ці розробки необхідно було викласти у окремому розділі або відобразити у розділі «Матеріал і методики проведення дослідження», з відокремленням, що вони складають доробок автора.

10. У третьому розділі автор, використовуючи математичний апарат теорії обробки масивів експериментальних даних, показав, що одержані залежності (міцності, пластичності, ударної в'язкості від кінцевої температури чистової кліті) мають лінійний характер. Це не досить зрозуміло. Механічні властивості залежать від структури, а на структуру впливають багато чинників (швидкість охолодження, хімічний склад, величина аустенітного зерна). Отже, лінійна залежність в даному випадку виглядає маловірогідною.

11. У четвертому розділі сказано, що внаслідок запропонованого автором режиму ДТО прокату можливим є прояв субструктурної спадковості. Вважаю, що бажано було б це підтвердити додатковими методами – мікродифракційним або EBSD аналізом.

Присутні також і менш важливі зауваження: 1) при викладенні результатів досліджень у деяких випадках автор не приводить конкретні значення досягнутих показників якості, а обмежується лише висловами «збільшується», «зменшується», «покращується» тощо; 2) не проведено оцінки впливу раціонального режиму гарячої прокатки на експлуатаційні властивості будівельних конструкцій. У зв'язку з цим було б доцільним провести корозійні випробування високоміцних металовиробів, зокрема, на атмосферну корозію, що виготовленні з бунтового прокату за стандартною та розробленою технологіям ДТО.

Наведені зауваження зумовлюють напрямок подальших досліджень і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Загальний висновок щодо відповідності дисертації встановленим вимогам.

Загалом дисертаційна робота та автореферат оформлені акуратно, викладені в логічній послідовності, написані технічно та стилістично грамотною мовою із залучанням сучасної науково-технічної термінології. Основні розділи дисертаційній роботі достатньо повно проілюстровані рисунками та таблицями, відображають усі отримані наукові та експериментальні положення. Загальні висновки роботи відповідають завданням дослідження і меті роботи. Зміст автореферату цілком 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 і 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 у якій вирішено важливу науково-прикладну проблему для умов металургійної та металовиробної промисловості.

Аналіз матеріалів дисертації, її новизна, висновки і рекомендації дозволяють стверджувати про відповідність вимогам пунктів 9, 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету міністрів України за № 567 від 24 липня 2013 р., зі змінами, затвердженими постановами Кабінету Міністрів України від 19.08.2015 р. за № 656 та від 30.12.2015 р. за № 1159, а її автор Парусов Едуард Володимирович заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.02.01 – Матеріалознавство.

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

В. А. Костін

Підпис д.т.н. Костіна В. А. засвідчую:
Вчений секретар ІЕЗ ім. Є. О. Патона



І. М. Клочков