

РЕЦЕНЗІЯ

професора, д.т.н. СЕЛІВЬОРСТОВА Вадима Юрійовича
на дисертаційну роботу Камкіна Володимира Юрійовича

“Розробка наскрізної технології виробництва низьковуглецевої сталі для виготовлення високоякісного тонколистового прокату”,
представлену на здобуття ступеня доктора філософії
за спеціальністю 136 – «Металургія».

Актуальність теми дисертаційної роботи.

Для України виробництво ультранизьковуглецевих сталей типу 01ЮТ, 01ЮТА та тонкого листа з них є на цей час актуальною проблемою. Вказані марки сталей мають підвищений комплекс механічних властивостей, використовуються для виготовлення методом холодної штамповки деталей конструкцій автомобілей, а також для виготовлення деталей у ракето- та машинобудуванні. Їх виробництво ґрунтується на вимогах технологічних режимів виплавки, позапічної обробки та деформаційних особливостях прокатки для одержання тонколистового прокату. На даний час актуальним для металургійних підприємств є завдання розробки технології виробництва чистих сталей з підвищеними механічними властивостями та мінімальним вмістом шкідливих домішок, що вимагає фізико-хімічного обґрунтування та розробленні технологічних режимів виплавки та позапічної обробки низьковуглецевої електросталі для тонколистового прокату. Тому тема дисертаційної роботи Камкіна В.Ю. є актуальною і важливою.

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

Дисертаційна робота виконувалася в рамках наукових напрямків науково-дослідницької діяльності ННІ ДМетІ Українського державного університету науки і технологій. Розглянуті в роботі актуальні проблеми і задачі в області виплавки та позапічної обробки металу відповідають пріоритетам науково-технічного розвитку України.

Основу дисертаційної роботи складають результати досліджень, що виконані автором та є частиною матеріалів, викладених у звіті з науково-дослідницької роботи «Новітня енергозберігаюча технологія виплавки та пластичної деформації ультра низьковуглецевих сталей для особливо тонкого листового прокату подвійного призначення з підвищеними властивостями», де автор був виконавцем окремих етапів роботи, № держреєстрації 0117U002340, що виконувалась в Українському державному університеті науки і технологій Міністерства освіти і науки України. Термін виконання: 2017-2019 р.р.

Оцінка структури і змісту дисертації

Дисертаційна робота Камкіна Володимира Юрійовича складається зі вступу та основної частини з чотирьох розділів з висновком до кожного з них, також загальних

Формі вимоги до
ради
11.09.65
Ломови
10.03.2026
Kamkin V.Yu.

висновків і переліку використаних джерел до кожного розділу, який налічує найменування публікацій закордонних і вітчизняних авторів. Загальний обсяг дисертаційної роботи викладено на 168 сторінках машинописного тексту, з яких 132 сторінок основного тексту, містить 30 рисунків, 32 таблиці. Структура роботи по складу та послідовності розділів логічна та відповідає вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

У **Вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, надано інформацію щодо зв'язку роботи з науковими програмами, сформульовано її мету і задачі досліджень, вказано об'єкт, предмет та методи досліджень, викладено основні наукові положення, які виносяться на захист, апробацію отриманих результатів, представлені дані щодо структури та обсягу дисертації.

У **Першому розділі** розглянуто технології сучасного виробництва низьковуглецевої сталі, стан інтенсифікації плавки сталі в електродугових печах та приділено увагу застосуванню позапічної обробки сталі для одержання нового класу IF-сталей з невеликою кількістю карбідо- та нітридоутворюючих елементів (титан, ніобій, бор). Розглянуто вплив домішкових елементів на властивості низьковуглецевих сталей. Відповідно до мети роботи наведено задачі дослідження. Приведено список літератури до першого розділу, який складається із 87 найменувань публікацій зарубіжних та вітчизняних науковців.

У **Другому розділі** наведено інформацію про обладнання, матеріали і методики дослідження. Розглянуто енергетичне обладнання 120-тонної печі ДСП. Приведена інформація щодо деформаційних режимів прокатки та обладнання для визначення механічних властивостей та мікроструктури зразків сталі.

Третій розділ присвячено встановлення залежності властивостей металу на випуску від технологічних параметрів процесу в умовах діючого виробництва. Приведено середні та граничні значення технологічних показників процесу виплавки низьковуглецевої сталі в ДСП. Приведені дані стосовно загального споживання кисню на різних струменних пристроях, що забезпечує досягнення необхідного вмісту вуглецю на випуску та підвищує температуру металу. Проведено регресійний аналіз ступеню впливу технологічних параметрів на характеристики металу на випуску. Визначено, що вміст вуглецю в напівпродукті залежить від окисленості і від температури металу. На підставі статистичного аналізу параметрів 200 плавок поточного виробництва встановлено, що факторами, які сприяють зниженню вмісту вуглецю в готовій сталі, є висока окисленість сталі, низький вміст вуглецю та висока температура металу на випуску плавки.

Розглянуто вплив характеристик напівпродукту на перебіг процесів при подальшій позапічній обробці для отримання сталі з заданим рівнем механічних властивостей. Аналіз показників плавки з низьким вмістом вуглецю (0,03...0,096%) на випуску з ДСП показав, що цей вміст вуглецю досягається при окисленості 1120-1800 ppm, температура 1650...1740°C.

Розрахунки розкислювальної здатності елементів показали, що розкислювальна здатність вуглецю при його вмісті 0,55-0,62% вище, ніж кремнію при вмісті 0,25-0,45%. Проведено математичне моделювання дегазації сталі при вакуумуванні в ковші та рекомендовано перемішувати розплав в ковші інертним газом для полегшення умов зародження продуктів реакції окислення вуглецю. Основне видалення водню (50-70%) відбувається через відкриту поверхню металу. Розглянуто умови створення спіненого шлаку та його вплив на вміст азоту в сталі. Запропоновано склад шлакоутворюючої суміші для спільної теплової обробки та використання вапняку з різним ступенем недопалу.

У четвертому розділі обґрунтовано вибір технологічної схеми одержання сталі, місце вакуумної обробки сталі в ковші з продувкою інертними газами. В ході позапічної обробки сталі випробували пряму схему: ЕДП - УКП - VD - МБЛЗ; зворотну схему: ЕДП - VD - УКП - МБЛЗ і без вакуумування. Оцінено характер використання вакуумування і продування металу в ковші аргоном, що збільшує тривалість обробки, проте сприяє створенню більш розвиненого контакту диспергованих металу і шлаку і збільшує ступінь завершеності масообмінних процесів. Встановлено необхідний рівень окисленості для зневуглецювання сталі до 0,005% при різному вмісті вуглецю у напівпродукті. Зниження тиску у вакуумній камері до 100 мбар достатньо для переважаючого окислення вуглецю в порівнянні з марганцем і кремнієм у всьому розглянутому діапазоні температур технологічного процесу.

Наведено дані щодо зменшення шкідливого впливу азоту на властивості низьковуглецевої сталі шляхом підбору раціональної кількості нітридоутворюючих елементів та виконана термодинамічна оцінка нітридоутворюючої здатності розкислювачів, що вводяться в сталь. Встановлені режими обробки сталі з особливо низьким вмістом вуглецю на установці ківш-піч. Застосовано фізико-хімічне моделювання для прогнозування та управління властивостями сталі, приведена методика проведення розрахунків та визначені концентраційні діапазони елементів.

Досліджені марки сталей опрацьовані на лабораторному стані «кварто» з діаметром робочих валків 150 мм. Мікроструктуру зразків вивчали за допомогою оптичного мікроскопу «Neophot-21». За результатами механічних випробувань встановлено, що дослідні сталі відповідають рівню, властивому високо пластичним ІF-сталям, як по отриманому складу, так і за властивостями. Після гарячої прокатки сталі 01ЮТА, 01ЮТ, 01ЮТ(Са) піддавали інтенсивній пластичній деформації (ПД) методом кручиння під гідростатичним тиском (КГТ). Запропоновано раціональні режими інтенсивної пластичної деформації для покращення властивостей сталей типу 01ЮТ, 01ЮТА і отримання високоякісного особливо тонколистового прокату, здатного до глибокої витяжки.

Найважливіші наукові результати дисертації та їх новизна:

Вперше на основі результатів термодинамічних розрахунків встановлена та підтверджена експериментальними дослідженнями величина активності кисню у

напівпродукті з ЕДП, яка має бути високою та складати для умов даного виробництва 1120...1600 ppm. Одержано аналітичний вираз для визначення вмісту вуглецю в металі на випуску з ЕДП.

Набули подальшого розвитку закономірності дегазації металу в ківшах з продувкою аргоном, в якій масообмін між розчиненими в металі газами ([H], [N], [O]) і бульбашками аргону визначався наближенням системи до рівноваги, а розподіл газів з металу відбувався за трьома статтями – у бульбашки CO, у бульбашки аргону та через відкриту поверхню металу при зовнішньому лімітуванні процесу та значному відхиленні реакції видалення кисню від рівноваги.

Встановлено закономірності впливу титану на зменшення дії азоту у сталях, пов'язаних з виділенням нітридів алюмінію по границях первинних зерен, що обумовлюється переважаючою термодинамічною спорідненістю титану до азоту у порівнянні з алюмінієм, одержано аналітичний вираз, який визначає ефективний вміст титану для попереднього зв'язування азоту у нітрид титану та попереджає формування шкідливих нітридів алюмінію

Вперше використано методику фізико-хімічного моделювання для визначення оптимального складу низьковуглецевої сталі та встановлені інтегральні параметри, які характеризують стан сплаву і обумовлюють зміну властивостей у встановленому концентраційному інтервалі модифікуючих елементів та показують, що при встановлених режимах деформаційної обробки дослідних зразків сталі досягаються показники механічних властивостей та структури прокатаних зразків, які відповідають характеристикам низьковуглецевої сталі.

Теоретичне та практичне значення результатів дослідження.

Комплексне застосування термодинамічного, фізико-хімічного аналізу для обґрунтування параметрів технологічного процесу, перевірка та підтвердження в експериментальних дослідженнях, на основі чого розроблені технологія виплавки та позапічної обробки низьковуглецевої електросталі для тонколистового прокату з підвищеними механічними властивостями та здійснена виплавка нової ультранизьковуглецевої (вміст 0,002–0,005% вуглецю) сталі, з мінімальним вмістом шкідливих домішок.

Новизна технічних рішень захищена патентом на винахід “Спосіб двоетапної позапічної обробки низьковуглецевої сталі” (№ 122000 від 25.08.2020р.). Результати дисертаційної роботи можуть бути використані в рамках виконання науково-дослідницьких робіт та впроваджені в навчальний процес Українського державного університету науки і технологій при підготовці магістрів за спеціальністю 136-Металургія (ОНП “Дослідження процесів та розробка технологій в металургії”).

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій.

Наукова новизна, представлена у дисертаційній роботі, є логічно обґрунтованою та в достатньому обсязі підтвердженою результатами теоретичних узагальнень і експериментальних досліджень. Достовірність сформульованих наукових положень і зроблених висновків підтверджується узгодженістю отриманих результатів як між собою, так і з відомими науковими даними. Обґрунтованість і надійність отриманих наукових результатів забезпечена використанням апробованих стандартизованих методик досліджень та сучасних інструментальних методів аналізу.

Достовірність одержаних результатів.

Достовірність і наукова обґрунтованість результатів, отриманих у дисертаційній роботі, забезпечуються коректною та логічно вибудованою постановкою дослідницьких завдань, якісним виконанням експериментальних досліджень із застосуванням стандартизованих методик випробувань і сертифікованого вимірювального обладнання, підтвердженням співпадіння властивостей дослідних зразків з характеристиками сталі 01ЮТ, а також обробкою експериментальних даних із використанням сучасних програмних засобів.

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях

Основні положення дисертації у достатньо повному обсязі викладені у 16 наукових працях, з яких шість статей – у фахових наукових виданнях України, віднесених до категорії Б, 2 розділа у колективних монографіях, 1 патент України на винахід та 7 тез доповідей на наукових міжнародних конференціях. Особистий внесок здобувача під час підготовки наукових праць, виконаних у співавторстві, чітко окреслено та належним чином відображено у тексті дисертаційної роботи.

Зауваження до змісту та оформлення дисертації.

1. Перспективним напрямком досліджень, результати яких використано в дисертаційній роботі та приведено в 3 розділі, вважаю використання шлакоутворюючих матеріалів. Їх застосування на кінцевих етапах виплавки сталі дозволяє забезпечити ефективне проведення позапічної обробки сталевого напівпродукту для підготовки металу до мікролегування та модифікування. Поряд з технологічним рішенням, обґрунтованим в дисертаційній роботі теоретично та перевірено експериментально, є дані про ефективність використання феросиліцію (ФС65) на кінцевих етапах плавки перед випуском металу для розкислення шлаку. Традиційно його розглядають як розкислювач металу в умовах ковша, що звужує спектр використання складових фізико-хімічного потенціалу корисних властивостей феросиліцію та вплив на властивості шлаку. Бажано було б поряд з алюмінієм та феромарганцем розглянути вплив феросиліцію на змінення вмісту кисню

2. При встановленні залежності властивостей металу на випуску від технологічних параметрів процесу в умовах діючого виробництва використано інформацію з паспортів

плавков виробництва низьковуглецевих сталей. Це дозволило розрахувати середні значення технологічних параметрів плавки, узагальнити результати ведення процесу, встановити максимальні та мінімальні значення показників: питомих витрат електроенергії, кисню, склад готової сталі, угар розкислювачів, ступінь десульфурзації та інші, важливі для оптимізації показники. Висновок про те, що зниження витрати кисню сприяло збільшенню виходу придатного, автор пов'язує зі зменшенням окислення заліза у розплаві та скороченням втрат металу у вигляді закису заліза (розділ 3, підрозділ 3.1, стор. 85) є не досить коректним. Кінцевий баланс кисню в системі «С - О - Fe», який досягається шляхом перерозподілу кисню в системі, визначається, вірогідно, після проведення розкислення сталі при позапічній обробці. А приведений в роботі висновок щодо «виходу придатного», характеризує, очевидно, поточний стан системи, який побічно впливає на цей важливий параметр.

3. Визначаючи витрату кисню дугтя автор вказує, що окисленість металу на випуску визначається вмістом вуглецю в металі і залежить від витрати кисню і температури. Використовуючи цей висновок, доцільно звернути увагу, що витрата кисню є джерелом не тільки активного кисню в металі, але й впливає на вміст в шлаковій фазі (FeO), визначаючи загальний окислювальний потенціал системи, що досліджується.

4. Автор стверджує, що особливе значення для забезпечення високих показників вакуумування має визначення величини його окисленості та відповідного вмісту вуглецю, не приводячи механізму їх впливу на реалізацію вакуумування. Слід звернути увагу, що визначення перед вакуумуванням вмісту активного, розчиненого в металі кисню та рівноважного з ним вмісту вуглецю є необхідним, тому що їх співвідношення визначає термодинамічну можливість і кінетику розвитку реакції зневуглицювання $[C]+[O]=CO$, яка і є основним механізмом видалення вуглецю при вакуумній обробці низьковуглецевих сталей, а також фундаментальним принципом процесів VD, RH, VOD. Тому передача металу з ДСП на УКП повинна забезпечити оптимальне співвідношення $[C] \leftrightarrow [O]$.

5. В дисертаційній роботі вперше використано методику фізико-хімічного моделювання для визначення оптимального складу низьковуглецевої сталі з визначенням інтегральних параметрів. На основі цих даних встановлено концентраційний інтервал вмісту модифікуючих елементів при досягаються показники механічних властивостей низьковуглецевої сталі. Це дуже цікавий та інформативний підхід до аналізу впливу елементів на властивості. Бажаним було б доповнити описом впливу кожного елементу на змінення властивостей, виходячи з можливостей теорії Приходько Е.В.

6. Деякі формули та графіки потребують уточнення одиниць вимірювання для кращого сприйняття.

Вказані недоліки не впливають на загальну позитивну оцінку виконаної дисертаційної роботи.

Відповідність дисертаційної роботи встановленим вимогам.

За актуальністю, об'ємом та рівнем досліджень, ступенем обґрунтованості наукових положень і висновків, науковою новизною та практичною значимістю, рівнем отриманих результатів, повнотою їх викладення в опублікованих працях дисертаційна робота Камкіна Володимира Юрійовича відповідає спеціальності 136 Металургія. На підставі викладеного вище вважаю, що дисертаційна робота «Розробка наскрізної технології виробництва низьковуглецевої сталі для виготовлення високоякісного тонколистового прокату» є завершеним науковим дослідженням, за рівнем виконання відповідає вимогам Міністерства освіти і науки України №40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», постанові Кабінету Міністрів України №44 від 12.01.2022 р. «Порядок присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», зі змінами, внесеними згідно Постанови КМ №341 від 21.03.2022 р., а її автор Камкін Володимир Юрійович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 136 Металургія в галузі знань 13 Механічна інженерія.

Офіційний рецензент

Доктор технічних наук, професор,
декан факультету електромеханіки
та електromеталургії ННІ ДМетІ

Українського державного університету науки і технологій


Вадим СЕЛІВЬОРСТОВ

Підпис Селівьорстова В.Ю. засвідчую

Провідний фахівець відділу кадрів


Володимир ШИФРІН