

ВИСНОВОК
ПРО НАУКОВУ НОВИЗНУ, ТЕОРЕТИЧНЕ ТА ПРАКТИЧНЕ
ЗНАЧЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Камкіна Володимира Юрійовича

за темою: “Розробка наскрізної технології виробництва низьковуглецевої сталі для виготовлення високоякісного тонколистового прокату”,
поданої на здобуття наукового ступеню доктора філософії
за спеціальністю 136 – Металургія

Дисертаційна робота Камкіна Володимира Юрійовича присвячена розробці енергозберігаючої технології виплавки та позапічної обробки низьковуглецевої електросталі для тонколистового прокату з підвищеними механічними властивостями (вміст 0,002–0,005% вуглецю), мікролегованої алюмінієм сталі, з мінімальним вмістом шкідливих домішок ($P < 0,010\%$; $S < 0,005\%$; $N < 50\text{ppm}$; $O < 30\text{ppm}$; $H < 2\text{ppm}$) та встановлення особливостей формування структури низьковуглецевої сталі при низьких температурах (нижче A_{r1}) закінчення прокатки та змотки. Дисертація виконана на кафедрі металургії чавуну і сталі факультету металургійних процесів та хімічних технологій Українського державного університету науки і технологій, яка подана на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальності 136 – металургія. Тема дисертації затверджена Вченою радою Національної металургійної академії України, (протокол № 2 від. 04.10.2023 р.).

Актуальність роботи

Підвищення рівня вимог щодо економії палива і безпеки експлуатації вимагає підвищення міцності автолиста для виготовлення різних складових деталей автомобіля. Однак, для забезпечення високого рівня технологічності виробництва металопродукції складної форми необхідно використовувати лист з високоштампуємих сталей. Більшість традиційних шляхів підвищення міцності автолиста призводить до зменшення характеристик штампуємості, зниження величини коефіцієнта нормальної пластичної анізотропії, а також збільшення зміцнюємості при деформації. Основною маркою високоштампуємих сталей, як і раніше, залишається низьковуглецева сталь типу 01ЮТ. Завдяки проведенню ряду наукових і технологічних робіт, вдалося істотно підвищити рівень показників штампуємості холоднокатаного прокату, освоїти виробництво прокату найбільш високих категорій витяжки з низькою межею плинності. У той же час, в окремі періоди стали виникати проблеми, пов'язані з різким зниженням показників штампуємості окремих партій прокату, зокрема, з отриманням більш високих значень границі плинності і більш низьких значень відносного подовження, ніж необхідні для сталей вищих категорій витяжки, що потребує проведення додаткових досліджень. Потребує уваги визначення особливостей позапічної обробки низьковуглецевої сталі при застосуванні різних схем обробки зокрема розташування агрегату вакуумної обробки. Встановлення показників видалення розчинених газів кисню, азоту, водню та впливу технологічних факторів на їх величину дозволить уточнити маршрут позапічної обробки. Склад напівпродукту, що випускається з ДСП, в першу чергу

окисленість металу, в свою чергу впливає на поведінку металу при вакуумуванні та забезпечує протікання реакції вакуум вуглецевого розкислення, що дозволить скоротити витрату розкислювачів, а також отримувати особливо низьковуглецеві сталі без введення додаткових окиснювачів. Уточнення величини окисленості металу на випуску забезпечить досягнення необхідних концентрацій розчинених газів.

Прогнозування властивостей дослідної сталі в залежності від хімічного складу та введення додаткових елементів для досягнення заданих механічних показників, характерних для низьковуглецевої сталі можливо здійснити з застосуванням фізико-хімічного моделювання.

Обґрунтування деформаційних режимів прокатки досліджених марок сталей потребує експериментального опрацювання та досягнення характерної мікроструктури, що забезпечить необхідний рівень механічних властивостей.

Таким чином, актуальність роботи полягає у фізико-хімічному обґрунтуванні та розробленні технологічних режимів виплавки та позапічної обробки низьковуглецевої електросталі для тонколистового прокату з підвищеними механічними властивостями, встановлення закономірностей впливу деформаційних режимів прокатки та інтенсивної пластичної деформації на формування властивостей, структуроутворення тонколистового прокату. Результати роботи можуть бути використані для удосконалення технології виплавки та позапічної обробки низьковуглецевих сталей на металургійних підприємствах України.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконувалася в рамках наукових напрямків науково-дослідницької діяльності кафедри металургії чавуну і сталі 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.

Основу роботи складають результати досліджень, що виконані автором та викладені 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, № держреєстрації 0117U002340, що виконувалась в Українському державному університеті науки і технологій Міністерства освіти і науки України. Термін виконання: (2018-2019 рр).

Наукова новизна отриманих результатів

Наукова новизна результатів, одержаних Володимиром Юрійовичем, полягає у наступному:

1. Вперше на основі результатів термодинамічних розрахунків з'ясовано та підтверджено експериментальними дослідженнями, що для зниження вмісту вуглецю до заданої величини, окислення вуглецю з феросплавів та вуглецю з електродів при нагріві металу на печі ковші активність кисню у напівпродукті з ДСП має бути достатньою для проведення даних реакцій та складатиме 1100 ppm, а вміст вуглецю на випуску має бути низьким (0.03-

0.048%), з температурою на рівні 1600°C

2. На основі результатів математичного моделювання на розробленій на кафедрі ТМП математичній моделі дегазації металу в ківшах з продувкою аргоном з урахуванням розподілу газів з металу за трьома статтями – у бульбашки CO, у бульбашки аргону та через відкриту поверхню металу, встановлено зовнішнє лімітування (V_{ID} менше 0.2), реакція видалення кисню далека від рівноваги. У всіх варіантах зміни технологічних параметрів спостерігається блокування значної частини поверхні розділу метал – газова фаза потоком кисню, що пов'язано з тим, що потоки кисню по масі приблизно на порядок вищі за потоки водню. При зміні технологічних параметрів відбувається процес саморегулювання перерозподілу потоків водню і кисню за рахунок значного відхилення реакції утворення CO від рівноваги.

3. Встановлено закономірності впливу титану на зменшення дії азоту у сталях на появу дефектів металу, пов'язаних з виділенням нітридів алюмінію по границях первинних зерен, що визначається різною термодинамічною спорідненістю титану і алюмінію до азоту. На основі аналізу експериментальних даних одержано аналітичний вираз, який встановлює необхідну кількість присадок титану для нейтралізації шкідливого впливу азоту і враховує концентрацію алюмінію в сталі для попередження формування шкідливих нітридів алюмінію. При вмісті в сталі титану вище запропонованого вказаною залежністю, спостерігається поява дефектів, пов'язаних вже з нітридами титану, а менша кількість є недостатньою для досягнення зазначеного технічного результату, тому що спостерігається утворення нітридів алюмінію.

4. Вперше використано методику фізико-хімічного моделювання, яка розроблена в ІЧМ НАНУ, 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: межа міцності 354...362 МПа, відносне звуження склало 84-85%, а відносне подовження, %: σ_3 в межах 42-44, σ_{10} становило 33-36. Механічні властивості за діаграмою «межа міцності – загальне подовження» для листових сталей показує, що вони відповідають рівню, властивому високо пластичним IF-сталям, як по отриманому складу, так і за властивостями..

Нові науково обґрунтовані теоретичні та/або експериментальні результати проведених здобувачем досліджень, що мають істотне значення для певної галузі знань, та підтверджуються документами, які засвідчують проведення таких досліджень.

Теоретичне та практичне значення результатів дослідження

На основі фізико-хімічного обґрунтування та розробленні технологічних режимів виплавки та позапічної обробки низьковуглецевої електросталі для тонколистового прокату з підвищеними механічними властивостями здійснена

виплавка нової ультра низьковуглецевої (вміст 0,002–0,005% вуглецю), мікролегованої алюмінієм сталі, з мінімальним вмістом шкідливих домішок ($P < 0,010\%$; $S < 0,005\%$; $N < 50\text{ppm}$; $O < 30\text{ppm}$; $H < 2\text{ppm}$). Виявлено особливості формування тонкої структури, текстури УНВС при низьких температурах (нижче A_1) закінчення прокатки та змотки. Встановлені закономірності впливу процесів рекристалізації, формування текстури на розмір зерна в структурі листової сталі та виявлені зв'язки між текстурою, мікроструктурою та механічними властивостями тонколистової сталі.

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”).

Практичне значення роботи

Проведені дослідження дозволили отримати відомості щодо величини активності кисню у напівпродукті з ДСП достатньої для проведення реакцій окислення вуглецю до заданої величини, окислення вуглецю з феросплавів та вуглецю з електродів при нагріві металу на печі ковші. Показано, що активність кисню у напівпродукті з ДСП має бути достатньою для проведення даних реакцій та складатиме 1100 ppm, а вміст вуглецю на випуску має бути низьким (0.03-0.048%), з температурою на рівні 1600°C

Встановлені закономірності дегазації металу в ківшах з продувкою аргоном з урахуванням розподілу газів з металу за трьома статтями – у бульбашки CO, у бульбашки аргону та через відкриту поверхню металу, та встановлено зовнішнє лімітування реакцій дегазації, що потребує застосування продувки металу нейтральним газом.

Отримані дані щодо впливу титану на зменшення дії азоту у сталях на появу дефектів металу, пов'язаних з виділенням нітридів алюмінію по границях первинних зерен, що визначається різною термодинамічною спорідненістю титану і алюмінію до азоту. Одержано аналітичний вираз, який встановлює необхідну кількість присадок титану для нейтралізації шкідливого впливу азоту і враховує концентрацію алюмінію в сталі. При вмісті в сталі титану вище запропонованого вказаною залежністю, спостерігається поява дефектів, пов'язаних вже з нітридами титану, а менша кількість є недостатньою для досягнення зазначеного технічного результату, тому що спостерігається утворення нітридів алюмінію.

Розрахункові дані на основі фізико-хімічного моделювання дозволяють здійснити вибір концентрації елементів для сталей типу 01ЮТА, 01ЮТ в діапазоні: C (0,002...0,003%), Mn (0,12-0,13%), Si (0,01-0,02%), P (0,006-0,008%), S (0,011-0,012%), Al (0,04-0,05%), Ti (0,05-0,06%), N (0,004-0,005%), Ca (0,0002-0,0003%). Концентраційний інтервал елементів, встановлений за розрахунковими даними, повинен забезпечувати оптимальний комплекс

властивостей сталей. Розрахункові концентраційні інтервали елементів підтверджені експериментально і будуть використані при встановленні оптимального складу ультранизьковуглецевих сталей.

Отримані дані дають змогу: підвищити техніко-економічні показники виплавки низьковуглецевої електросталі, зменшити витрату розкислювачів та підвищити якість електросталі за рахунок зменшення кількості розчинених газів та неметалевих включень.

Повнота викладу результатів роботи в наукових фахових виданнях

Основний зміст дисертації опубліковано в 17 наукових працях: з них 6 статей у фахових виданнях, що відповідають переліку ДАК МОН України; 1 стаття у науково-метричній базі Scopus, 1 патент України на винахід; 2 статті в закордонних наукових монографіях; 7 тез доповідей на Міжнародних та Всеукраїнських науково-практичних конференціях.

Перелік робіт, в яких опубліковано основні результати дисертації

Публікації у наукових фахових виданнях України

1. Низьковуглецева сталь для тонкого листового прокату з підвищеними властивостями. Теорія і практика металургії. - № 1-2 (112-113). – 2018. – С. 35-44. Камкіна Л.В., Проїдак Ю.С., **Камкін В.Ю.**, Ремез О.А., Безшкуренко О.Г.

https://nmetau.edu.ua/file/zh2018_1-2_w10.pdf

2. Распределение азота, титана и алюминия между нитридами и твердым раствором в сталях типа АТЮ. Теория и практика металлургии. - №5. - 2019. – С. 31-35. ISSN 1028-2335. Исаева Л.Е., Лев И.Е., Камкин В.Ю., Проїдак С.В.

<https://doi.org/10.34185/tpm.5.2019.03>

3. Технологія виплавки чистої сталі та особливості позапічної обробки. Теорія і практика металургії. - №3. – 2019. - С. 5-13. ISSN 1028-2335. Куцова В.З., **Камкін В.Ю.**, Кнапинський М.Г., Проїдак С.В., Варицев А.О.

<https://doi.org/10.34185/tpm.3.2019.01>.

4. Зменшення шкідливого впливу азоту на властивості низьковуглецевої сталі 08Ю шляхом підбору раціональної кількості нітридоутворюючих елементів. Камкіна Л.В., Мішалкін А.П., **Камкін В.Ю.**, Грищенко Ю.М., Ісаєва Л.Є. Теорія і практика металургії. - №6. – 2019. – С. 16-24. ISSN 1028-2335.

<https://doi.org/10.34185/tpm.6.2019.03>.

5. Фізико-хімічні основи і математичне моделювання процесів дегазації при позапічній обробці сталі. Камкіна Л.В., Величко О.Г., **Камкін В.Ю.** Теорія і практика металургії. - №3(128). – 2021. - С. 31-40.

<https://doi.org/10.34185/tpm.3.2021.05>.

6. Velychko O.G., **Kamkin V.Yu.**, Projdak Yu.S. Coordinated control of the composition of 01yut steel and deformation processing modes to achieve specified mechanical properties. Теорія і практика металургії. №2(143), 2024. С 36-44. ISSN 1028-2335. <https://doi.org/10.15802/tpm.2.2024.06>

https://nmetau.edu.ua/file/zh_02_2024_ok.pdf

7. Фізико-хімічні закономірності газокисневої конверсії метану. Сухий К.М., Гришин О.М., Величко О.Г., Надточій А.А., Камкін В.Ю. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 2025, No. 3, pp. 56-64. ISSN 0321-4095

<http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2025-160-3-56-64>

Публікації в закордонних фахових виданнях або виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних:

1. Внепечная обработка электростали опытными шлакообразующими смесями с целью получения низкоуглеродистой стали. “New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering”. Monografie. № 68. – Czestohowa, Poland, 2017. – С. 38-41. Пройдак Ю.С., Куцова В.З., Мешалкин А.П., **Камкин В.Ю.**, Констанчак А., Сеницин Я.С.

2. Interaction of low-carbon electrical steel with a refractory lining of the ladle during out-of-furnace processing. Series: Monografie Nr 78. «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering, production engineering and physics». - Czestochowa, Poland, 2018. - S. 225-230. Jurij Projdak, **Vladimir Kamkin**, Jana Mianovska, Anna Konstanciak

2. Публікації, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації

1. Вакуум-кислородное обезуглероживание электропечного полупродукта для получения особо низкоуглеродистой стали. Матеріали VIII Міжнародної конференції «Молоді вчені 2017 - від теорії до практики». 17 лютого 2017 р., м. Дніпро, Україна. – С. 48-52. **Камкин В.Ю.**, Куцова В.З.

2. Оптимізація складу низьковуглецевої сталі 01ЮТ методом фізико-хімічного моделювання. I Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених «Наука і металургія». 18-19 травня 2017 р. Україна, м. Дніпро, ІЧМ НАНУ. – С.48. Куцова В.З., **Камкін В.Ю.**, Стеценко Г.П.

3. Застосування інформаційних технологій в процесах одержання високоміцної сталі. Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні» ІТММ'2018. м. Дніпро, 27 – 29 березня 2018 р. – С. 147. **Камкін В.Ю.**, Куцова В.З.

4. Аналіз впливу шлаку на процеси при виплавці электростали. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні» (ІТММ-2019). 26 - 28 березня 2019 року. м. Дніпро. – С. 9. **Камкін В.Ю.**, Безшкуренко О.Г.

5. Особливості позапічної обробки при одержанні ІF сталі. Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів і молодих учених “МОЛОДА АКАДЕМІЯ 2020”. - Том 1. м. Дніпро. 21-22 травня 2020 року. НМетАУ. – С. 31. Ходак В.М., **Камкін В.Ю.**, Анкудінов Р.В.

6. Моделювання розчинення вапна в шлаку окислювального періоду виплавки сталі в ДСП. Міжнародна науково-практична конференція "Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні" ІТММ'2022. м.

Дніпро, 18 травня 2022 р.- С. 259-260. **Камкін В.Ю.**, Мішалкін А.П.

7. Modeling the process of carbon oxidation during evacuation in the production of low-carbon steel. 15th International Symposium of Croatian Metallurgical Society „Materials and Metallurgy“ (SHMD '2022). Zagreb, Croatia, March 22 – 23, 2022. METALURGIJA 61 (2022) 2, PROCESS METALLURGY – SECTION “B” - P. 563. Yu. Proydak, **V. Kamkin**

Патенти

1. Патент України на винахід. (51) МПК: C21C 7/06 (2006.01), C21C 7/064 (2006.01), C21C 7/076 (2006.01), C22B 9/10 (2006.01). Спосіб двоетапної позапічної обробки низьковуглецевої сталі. Камкіна Л.В., Проїдак Ю.С., Мішалкін А.П., Колбін М.О., **Камкін В. Ю.**, Надточій А.А., Синицін Я.С., Безшкурєнко О.Г., М'яновська Я.В., Ісаєва Л.Є. №122000. Заявл.: 16.07.2018. Опубл.: 25.08.2020, бюл. № 16/2020. - 4с.

Додаткові публікації

1. Проблемные вопросы использования техногенных отходов промышленного происхождения в процессах рафинирования стали. Теория и практика металлургии. - № 3-4 (110-111). – 2017. – С. 47-53. Мешалкин А.П., **Камкин В.Ю.**, Колбин Н.А., Турищев В.В., Бабенко А.В.

2. Наближення реакцій дегазації сталі до рівноваги при вакуумуванні в ковші. Теорія і практика металургії. - № 3-4 (110-111). – 2017. – С. 54-57. Проїдак Ю.С., **Камкін В.Ю.**, Камкіна Л.В., Безшкурєнко О.Г.

3. Спінювання шлаку в ДСП як ефект застосування шлакоутворюючих сумішей з регульованим співвідношенням компонентів при вдуванні у ванну в струменях газу. Теорія і практика металургії. – 2018. - № 6. - С. 50-56. ISSN 1028-2335. **Камкін В.Ю.**, Токарев С.І., Мішалкін А.П., Анкудінов Р.В., Безшкурєнко О.Г. <https://doi.org/10.34185/tpm.6.2018.06>

4. Патент України на винахід. (51) МПК: C21C 5/30 (2006.01), C21C 5/40 (2006.01), C21C 5/42 (2006.01). Спосіб виробництва легованої низьковуглецевої сталі в конвертерах з боковим підведенням дуття. Камкіна Л.В., Проїдак Ю.С., Мішалкін А.П., Колбін М.О., **Камкін В.Ю.**, Безшкурєнко О.Г., Анкудінов Р.В. №122507. Заявл.: 16.07.2018. Опубл.: 25.11.2020, бюл. № 22/2020. – 5с.

5. Теоретические и технологические особенности внепечной обработки металла ДСП для получения низкоуглеродистой стали. Inżynieria Produkcji. Strona społeczna i przemysłowa. Seria: Monografie nr 52. Częstochowa, 2015. – С. 130-136. Л. Камкіна, Я. М'яновська, А. Стовпченко, **В. Камкін**

6. Рациональные режимы выплавки стали с минимальным содержанием углерода в дуговой электропечи. Inżynieria Produkcji. Strona społeczna i przemysłowa. Seria: Monografie nr 52. Częstochowa, 2015. – С. 102-111. Людмила Камкіна, Юрий Проїдак, Яна М'яновська, **Владимир Камкін**

Виходячи з аналізу вищенаведених робіт, можна зробити висновок про успішне виконання встановлених вимог щодо необхідної кількості наукових публікацій перед представленням дисертаційної роботи Камкіна В.Ю. до

захисту, а також про достатню повноту висвітлення наукових та практичних результатів в опублікованих матеріалах.

Розглянута дисертація Камкіна Володимира Юрійовича за темою “Розробка наскрізної технології виробництва низьковуглецевої сталі для виготовлення високоякісного тонколистового прокату”, поданої на здобуття наукового ступеню доктора філософії за спеціальністю 136 –– Металургія є завершеним науковим дослідженням і відповідає вимогам, викладеним у постанові КМУ від 12 січня 2022 р. № 44 «Порядок присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії». Робота містить нові науково обґрунтовані результати проведених здобувачем досліджень, які мають певне науково-практичне значення в галузі інженерії, вона базується на достатній кількості наукових публікацій, не містить текстових запозичень без посилання на джерело (плагіату), і може бути прийнята до захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 136 – Металургія.

Головуючий на засіданні

наукового семінару завідувача кафедри
металургії чавуну і сталі д.т.н., професор



Костянтин НІЗЯЄВ

Вчений секретар семінару к.т.н., доцент



Валерій МАМЕШИН

