

**К.Г. Нізяєв**, д-р техн. наук, проф., зав. кафедри, e-mail: metsteel.dmeti@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9260-0964>

**В.І. Хотюн**, аспірант, e-mail: vadym.khotiun@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1678-6082>

**О.М. Стоянов**, канд. техн. наук, доц., доцент, e-mail: san.dmeti68@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7136-7403>

**Є.В. Синегін**, канд. техн. наук, доц., доцент, e-mail: sinegin.ev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9983-3971>

Український державний університет науки і технологій (Дніпро, Україна)

## Розробка раціональної технології мікролегування та модифікування спокійних марок сталі порошкоподібними матеріалами

У статті виконано аналіз ефективності мікролегування і модифікування сталі різними матеріалами. Наведено дані лабораторних випробувань, запропоновано раціональні варіанти і технології введення мікролегуючих і модифікуючих добавок з метою отримання якісного металу.

**Метою цієї роботи** є експериментальне дослідження різних варіантів впливу суміші на основі вапна на коефіцієнт засвоєння ніобію з можливістю подальшої оптимізації технологічного процесу і підвищення якості металопродукції.

**Методи дослідження.** Виконано високотемпературний експеримент із введення мікролегуючої добавки як осаджуючим методом у вигляді кускового матеріалу, так і вдуванням його в порошкоподібному стані. Вдування порошкоподібного фероніобію проводили як в чистому вигляді, так і з застосуванням сумішей на основі вапна. Виконано аналіз технологічних показників експериментальних плавок, який підтвердив перевагу інжекції порошкоподібних реагентів вглиб розплаву в порівнянні з осаджуючим методом у вигляді кускового.

**Отримані результати.** За результатами проведеного аналізу технологічних показників дослідних плавок визначено раціональні режими введення в сталерозливний ківш порошкоподібного фероніобію, який одночасно забезпечує як високий ступінь засвоєння частинок порошку рідким металевим розплавом, а спільно з вапном – високий ступінь видалення кисню.

**Наукова новизна.** За результатами дослідних плавок підтверджено та уточнено особливості взаємодії порошкоподібних частинок, які вдуваються в рідкий металевий розплав.

**Практична цінність.** Визначено технологічні параметри процесу інжекції порошкоподібних матеріалів (фероніобій, вапно, плавиківий шпат), які з одного боку забезпечують високий ступінь засвоєння мікролегуючого елемента, а з іншого – значно зменшують забрудненість сталі оксидними неметалевими включеннями, знижуючи тим самим загальний вміст кисню в сталі.

**Ключові слова:** мікролегування, феросплави, сталь, неметалеві включення, порошкоподібні матеріали.

**Актуальність.** Різні галузі промисловості висувають зростаючі вимоги до якості сталі, які значною мірою полягають у вмісті в ній шкідливих домішок та неметалевих включень.

Поява в останні роки нового класу сталей комплекснолегованих і мікролегованих, не лише спеціальних, але і низьколегованих сталей групи HSLA (від англійської аббревіатури High Strength Low Alloy Steel – високоміцні низьколеговані сталі), де поряд з традиційними елементами – Mn, Si і Cr – включені так само до 0,5 % Ni, 0,5 % Mo, 0,3 % Nb, 0,3 % V і 0,05 % B, при-

звела до виникнення певних вимог до якості металу за вмістом шкідливих домішок і неметалевих включень.

У найближчі кілька років очікується зростання споживання ніобію для виплавки високоміцних сталей будівельного сортаменту, автомобілебудування, нержавіючих сталей (спільне легування з титаном і хромом), високоміцних труб і сталей для спеціального обладнання. В даний час ринок фероніобію монополізований Бразильськими компаніями (більше 90 % світового виробництва), що безсумнівно позначається на високий його вартості [1, 2].

Тому актуальним завданням для металургів сталеплавильників є розробка раціональної технології введення фероніюбію в розплав заліза, яка з одного боку забезпечує високий ступінь засвоєння ніобію з феросплаву, а з іншого – чистоту сталі за неметалевиими включеннями і шкідливими домішками.

Одним з найбільш поширених способів, що застосовується на практиці для вирішення вище поставлених завдань, є введення порошкоподібних матеріалів в глиб металу. Питання про те, яким чином вводити порошкоподібний реагент в метал (вдуванням або у вигляді дроту), залишається до кінця нез'ясованим. Продувка металу порошками забезпечує максимальну поверхню контакту і швидкість взаємодії твердих реагентів, що вдуваються, з рідким розплавом та високий ступінь їх використання. Перевагою цього методу є також те, що реагент вдувається в рідкий метал струменем газу-носія, який теж має деякий рафінуючий вплив на метал.

Залежно від поставлених завдань для продувки металу порошками застосовують різні їх суміші. Всі живані суміші можна розділити на три групи:

1) шлакоутворюючі суміші на основі вапна:  $\text{CaO}$ ,  $\text{CaO-CaF}_2$ ,  $\text{CaO-CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  та ін., з різним співвідношенням зазначених компонентів;

2) металеві порошки:  $\text{Mg}$ ,  $\text{CaSi}$ ,  $\text{CaC}_2$  та ін.;

3) суміші шлакоутворюючих і металевих порошоків:  $\text{CaO} + \text{Mg}$ ,  $\text{CaO} + \text{Al}$ ,  $\text{CaO} + \text{CaF}_2 + \text{Al}$ ,  $\text{CaO} + \text{CaSi}$  та ін.

В результаті продувки сталі порошком  $\text{CaSi}$  досягається більш високий ступінь очищення металу від неметалевих включень, а включення, що залишаються у розплаві, змінюються за рахунок обробки кальцієм таким чином, що силікати марганцю і глинозем перетворюються в кальцій-алюмінієві силікати, а сульфід марганцю – в сульфід, що містять кальцій або окисульфід. Такі включення більш сприятливі з погляду якості поверхні заготовок та кінцевої продукції, а також механічних властивостей та оброблюваності сталі [3, 4].

За даними [5, 6], повна зміна морфології оксидних і сульфідних включень відповідає вдуванню  $\text{CaSi}$  із витратою понад 1,5 кг/т сталі і вмісті сірки в металі до 0,01 %, при цьому спостерігали повне зникнення скупчень глинозему та деформування сульфідів.

Обробка сталі магнієм також дозволяє модифікувати включення [7]. Введення вапна в порошки, що містять  $\text{Mg}$ , сприяє утворенню великих легкоплавких включень. У роботах [8, 9] показано можливість істотно поліпшити чистоту сталі продуванням металу сумішами на основі вапна та плавикового шпату. Результати досліджень [10] показали, що сульфід не змінюється під час продування сталі сумішшю вапна і плавикового шпату. Однак, під час продування порошком  $\text{CaSi}$  сульфід марганцю практично повністю переходять в сульфід, що містять кальцій, та подвійні оксиди. Така зміна морфології включень дуже важлива для виробництва товстого листа, що вимагає ізотропії властивостей. Для виробництва іншого сортаменту, наприклад, тонкого листа, кола, дроту тощо, де не потрібно зазначення морфологічних включень та більш того, не допускається наявність

великих алюмінатів кальцію, які утворюються під час продування  $\text{CaSi}$ , використовують суміші вапна і плавикового шпату. При цьому отримують кращу чистоту сталі за оксидними включеннями, але без зміни морфології сульфідів марганцю. Додавка 20 %  $\text{CaSi}$  до суміші вапна і плавикового шпату призводить до зміни морфології включень до такої ж міри, як і при обробці  $\text{CaSi}$ .

Під час продування в ковші сталі масою 180 т порошком суміші з 85 %  $\text{CaO}$  і 15 %  $\text{CaF}_2$  в кількості 3 кг/т сталі показано можливість зміни морфології неметалевих включень та отримання комплексних оксисульфідних включень, що містять кальцій, які незначно відрізняються від включень, що утворюються під час продувки сталі порошком  $\text{CaSi}$  [11]. Заміна силікокальцію хоча б частково шлаковими сумішами на основі  $\text{CaO}$  дає значний економічний ефект і підвищує ефективність процесу.

Технологічно мікролегуючі добавки вводять в добре розкислену сталь, тобто після присадок алюмінію, продуктами розкислення якого є глинозем. Даний продукт не повністю виводиться зі сталі. Скупчення глинозему після розкислення сталі алюмінієм спостерігали багато дослідників [12, 13]. Для зниження вмісту глинозему до більш низьких значень пропонується вводити в рідкий розплав за допомогою інжекції флюси наступного хімічного складу, %:

1) Флюс А-100 %  $\text{CaO}$  (розмір часток 100 мкм);

2) Флюс Б-70 %  $\text{CaO}$  і 30 %  $\text{CaF}_2$  (розмір часток 100 мкм).

**Метою цієї роботи** є експериментальне дослідження різних варіантів впливу суміші на основі вапна на коефіцієнт засвоєння ніобію з можливістю подальшої оптимізації технологічного процесу і підвищення якості металопродукції.

Для оцінки впливу варіантів мікролегування і модифікування сталі марки СтЗсп на залишковий вміст кисню в металі провели серію випробувальних лабораторних плавів в високотемпературній печі Таммана.

**Методика проведення досліджень.** Експериментальна установка була зібрана на базі печі Таммана 1 (рис. 1), у якій на керамічній підставці 2 було розміщено алундовий тигель 3 з рідким металом 4, на поверхні якого знаходився тонкий шар шлаку 5. Робочий простір печі зверху було ізольовано від атмосферного кисню кришкою 6, у якій було передбачено 3 отвори: для інжекційної трубки 7, для введення аргону у робочий простір печі 8 та для відбору проб металу 9. Реагенти вводили у глиб металу за допомогою кварцової трубки 7.

В якості вихідного матеріалу використовували металевий лом кутового профілю СтЗсп з хімічним складом, %мас.: вуглецю 0,17–0,19; марганцю 0,61–0,64; кремнію 0,21–0,23; сірки 0,023–0,027; фосфору 0,012–0,015. Наважку металу, подрібненого до фракції 10–15 мм, завантажували у кількості 0,9–1,1 кг в алундовий тигель. Тигель з металевою шихтою встановлювали у робочому просторі печі Таммана та нагрівали до температури плавлення. Плавлення здійснювали в атмосфері аргону (99,8 %  $\text{Ar}$ ), який подавали в робочий простір печі через отвір у кришці з

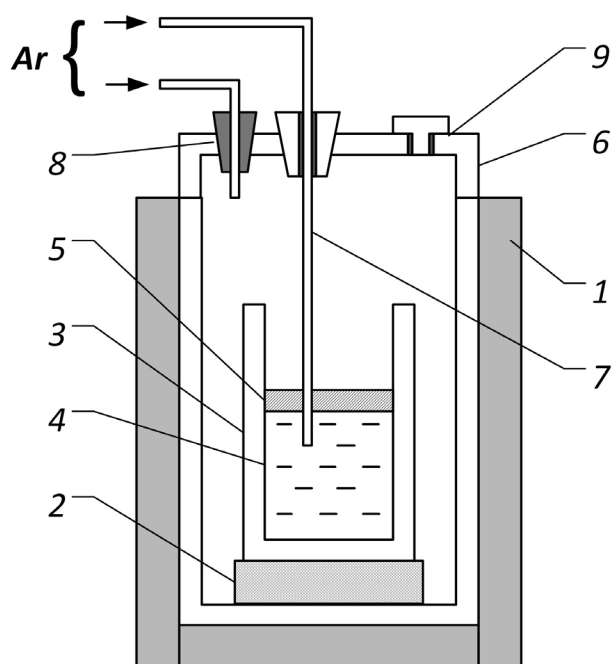


Рис. 1. Схема експериментальної установки: 1 – піч Таммана; 2 – керамічна підставка; 3 – алундовий тигель; 4 – метал; 5 – шлак; 6 – кришка; 7 – трубка для інжекції реагентів; 8 – отвір для введення аргону; 9 – отвір для відбору проб

витратою 0,05 м<sup>3</sup>/хв. Після розплавлення металевої шихти і отримання температури рідкого металу 1590–1610 °С здійснювали присадку алюмінію, фероніобію, вапна і плавикового шпату. Введення в рідкий метал необхідних матеріалів та їх кількість проводили за одним з чотирьох наступних технологічних варіантів:

- 1) введення кускового фероніобію. Наважку фероніобію подавали на поверхню металевої ванни в шматочках розміром 3–5 мм. Після присадки феросплаву розплав перемішували кварцовою трубкою;
- 2) вдування порошкоподібного фероніобію у струмені аргону;
- 3) вдування порошкоподібного фероніобію спільно з флюсом А;

4) вдування порошкоподібного фероніобію спільно з флюсом Б.

Наважку порошкоподібних матеріалів, масу якої обирали з розрахунку отримання 0,025 % ніобію в готовій сталі та до 3 % від маси сталі суміші А чи Б, розміщували в кварцову трубку діаметром 4,0 мм. Порошкоподібні матеріали вводили в струмені аргону протягом 2–3 с. Після присадки необхідних матеріалів (за кожним з варіантів) метал перемішували аргоном протягом 7–9 с. Проби металу відбирали через кожну хвилину.

Першу пробу відбирали після досягнення заданої температури безпосередньо перед мікролегуванням. При відборі першої проби в кварцову трубку попередньо поміщали алюмінієву стружку в кількості 1 % маси проби (0,2–0,3 г). Відбір проб металу здійснювали шляхом засмокування в кварцову трубку діаметром 8 мм. З кожної проби металу виготовляли по три стандартних зразка циліндричної форми (діаметром та висотою 6 мм) для визначення в них вмісту кисню методом вакуум-плавлення на ексхалографі «Бальцерс» ЕА-1 та апараті ТС-136 фірми «Леко». Температуру металу контролювали термпарою ПР 30/6, що працює в комплексі з переносним потенціометром Р307.

Основні параметри експериментальних плавок наведено в таблиці.

**Мікролегування сталі осаджуючим методом.**

Коефіцієнт засвоєння ніобію склав 88,21 %. Це найнижчий коефіцієнт з наведених технологічних варіантів. Мінімальний ступінь видалення кисню (81,67 %) так само відзначений за цим варіантом.

**Мікролегування порошкоподібними матеріалами.** Характерною особливістю процесу мікролегування порошкоподібними матеріалами в порівнянні з осаджуючим методом, є вищий ступінь засвоєння ніобію, який на:

- 7,15 % більше в порівнянні з варіантом II;
- 9,32 % більше в порівнянні з варіантом III;
- 8,27 % більше в порівнянні з варіантом IV.

Слід також відзначити високий ступінь видалення кисню на плавках із застосуванням порошкоподібних

**Параметри та результати лабораторних плавок**

Варіант	I	II	III	IV
Кількість плавок	3	4	3	5
[Al], %	<u>0.031–0.034</u> 0,033	<u>0.0345–0.036</u> 0,035	<u>0.031–0.033</u> 0,032	<u>0.0325–0.036</u> 0,034
[Nb], %	<u>0.021–0.023</u> 0,022	<u>0.022–0.025</u> 0,024	<u>0.022–0.024</u> 0,023	<u>0.021–0.023</u> 0,022
$\eta_{Nb}$ , %	<u>87.1–88.5</u> 88,21	<u>94.73–97.12</u> 95,36	<u>96.25–98.09</u> 97,53	<u>95.29–97.23</u> 96,48
[O] <sub>поч</sub> , %	<u>0.011–0.013</u> 0,012	<u>0.010–0.0135</u> 0,0125	<u>0.012–0.014</u> 0,013	<u>0.0105–0.013</u> 0,012
[O] <sub>к</sub> , %	<u>0.0021–0.023</u> 0,0022	<u>0.0018–0.0020</u> 0,0019	<u>0.0011–0.0013</u> 0,0012	<u>0.0012–0.0015</u> 0,0014
$(\Delta[O] / [O]_{поч}) \cdot 10^2$ , %	<u>81.04–82.94</u> 81,67	<u>83.71–86.02</u> 84,48	<u>89.1–92.44</u> 90,77	<u>87.69–89.73</u> 88,31

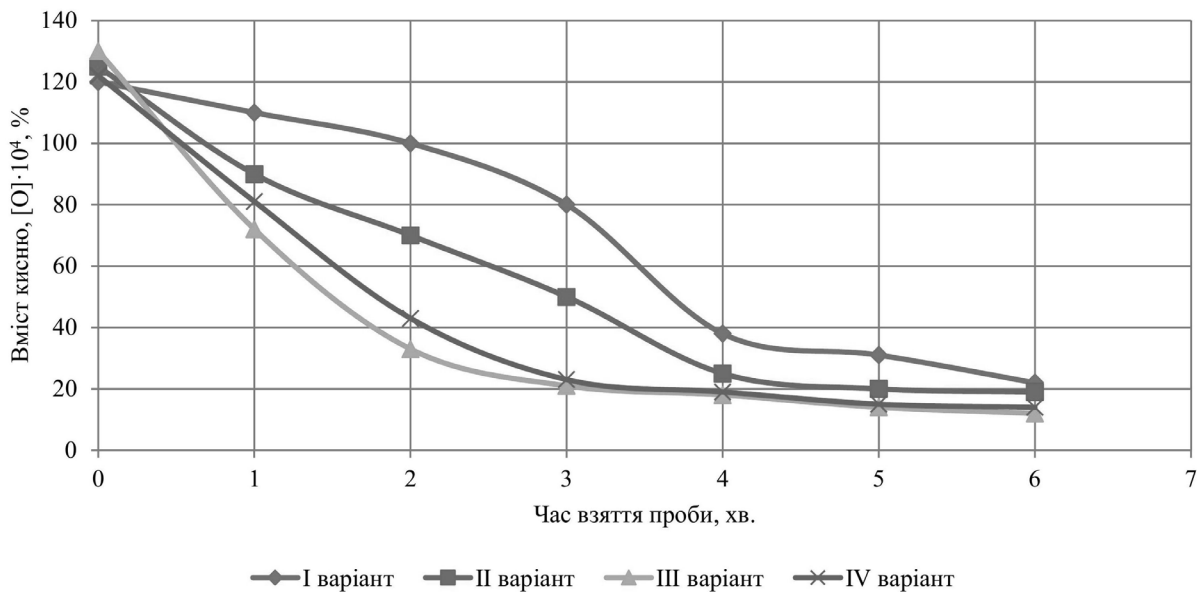


Рис. 2. Зміна вмісту кисню у середньовуглецевій сталі

матеріалів, який склав 84,48 %, 90,77 % і 88,31 %, що на 2,81 % (2 варіант), 9,1 % (3 варіант) і 6,64 % (4 варіант) вище, ніж на плавках, де застосовували кусковий фероніобій.

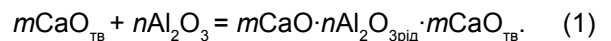
Вплив способу введення мікролегуючих і модифікуючих добавок в середньовуглецеву сталь на зміну вмісту кисню ілюструє рис. 2.

Аналіз кінетичних кривих видалення кисню показує, що кількість кисню, віддаленого з металу при вдуванні порошкоподібних реагентів (варіанти II, III, IV), вище, ніж у разі присадки кускового фероніобію на поверхню металу. Швидкість видалення кисню з розплаву також більш висока при вдуванні порошкоподібних матеріалів. Особливо це видно по зміні кисню на кривих, де в якості порошкоподібних сумішей використовували Nb-CaO і Nb-CaO-CaF<sub>2</sub>. За цими варіантами вже на третій хвилині відзначається максимальний ступінь видалення кисню 83,07 % (варіант III зниження кисню з 0,13 % до 0,021 %) і 80,83 % (варіант IV з 0,12 % до 0,023 %). При цьому слід зазначити, що зниження кисню за варіантом I становило з 0,12 до 0,022 % тільки на шостій хвилині, а зниження кисню за варіантом II до таких меж – на четвертій хвилині.

Визначено, що вдування частинок вапна в метал покращує умови виділення продуктів розкислення сталі, оскільки частинки вапна можуть слугувати центрами зародження включень. До того ж, беручи участь в процесах коагуляції і взаємної адгезії, частинки вапна сприяють укрупненню неметалевих включень і внаслідок цього – швидшому видаленню їх з розплаву. На підтвердження сказаного, дані роботи [14] свідчать про можливість відігрівання частинками вапна функції центрів зародження включень та сприяння коагуляції утворених включень.

Існує думка, що надлишок кисню в сталях, розкислених алюмінієм, пояснюється не присутністю включень Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, а пересиченням металу [Al]-[O]. Як показано в роботі [15], при введенні в рідкий метал алюмінію внаслідок значного перенасичення розчину киснем і алюмінієм, викликаного їх великою хімічною

спорідненістю і високим міжфазним натягом на межі глинозему з металом, створюються умови для утворення великої кількості зародків глинозему і швидкого перебігу кристалохімічної стадії процесу. При цьому виникає дуже багато дрібних кристалів Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, швидкість росту яких визначається швидкістю підведення нових порцій взаємодіючих речовин. В цьому випадку порошок вапна, що вдувається, є готовою поверхнею для осадження частинок Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, які потім спливають, і тим самим відбувається зменшення вмісту кисню в металі. Частинки вапна взаємодіють з Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> і утворюють алюмінати за реакціями типу:



Експериментально показано [13], що частки порошку, які вдуваються в метал, беруть участь у формуванні неметалевих включень в сталі. В осаді включень, які виділені електролітичним методом зі сталі KBK-26, після продувки шлаковими порошками вміст CaO був вдвічі вище ніж в металі, що отриманий за звичайною технологією (відповідно 9,5 і 4,6 % CaO). Рентгеноструктурним аналізом неметалічних включень, виділених з металу, обробленого порошками в ковші, встановлено наявність включень, що містять компоненти суміші CaO·6Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaF<sub>2</sub>·5Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

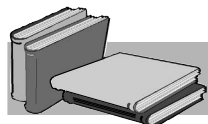
Таким чином, продувка сталі в ковші порошками на основі вапна забезпечує утворення комплексних оксидних включень, що в свою чергу забезпечує кращі умови для їх видалення і зменшує активність продуктів розкислення. Це і забезпечує зменшення забрудненості сталі неметалевими включеннями, тим самим знижує загальний вміст кисню в сталі.

Добавка до суміші плавикового шпату призводить до зниження сумарної поверхні контакту частинок з металом внаслідок зменшення їх кількості та викликаного процесу конгломерації частинок вапна в присутності CaF<sub>2</sub>. Зменшення сумарної поверхні контакту металу з частками вапна супроводжується зниженням ступеня видалення кисню з розплаву.

**Висновок**

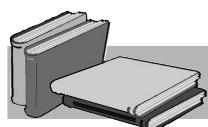
Таким чином, введення у глиб залізного розплаву, за допомогою інжекції, порошкоподібного фероніюбію, сприяє кращому його засвоєнню порівняно з кусковим, а введення його з порошкоподібним

вапном зменшує забрудненість сталі оксидними неметалевими включеннями, тим самим знижуючи загальний вміст кисню в сталі, що також створює умови для кращого засвоєння мікролегуючого елемента з феросплаву.

**ЛІТЕРАТУРА**

1. Куцин В.С., Грищенко С.А., Гасик М.И. Ферросплавы и сталь: Основные направления развития мировой ферросплавной индустрии. *Збірник доповіді всеукраїнської науково-технічної конференції «Актуальні проблеми розвитку металургійної науки та освіти», присвяченої 100-річчю з дня народження Георгія Григоровича Єфіменка (4–5 квітня 2017 року, м. Дніпро, Україна)*. Дніпро: НМетАУ, 2017. С. 62–72.
2. Medovar L.B., Grischenko S.G., Stovpchenko G.P. On Probable Ways of Steelmaking and Ferroalloy Industry Development. *Proceedings of INFACON XIV. The fourteenth international ferrolloys congress. May 31–June 4, 2015*. Kyiv, Ukraine. Vol. 2. P. 779–786.
3. Дэвид М., Джанне М., Поупон М., Сенанюч Д. Промышленный опыт вдувания силикокальция в ковш. *Инжекционная металлургия '80*. Лulea, Швеция, 1980. Пер. с англ. Москва: Металлургия, 1982. С. 248–256.
4. Фолмо Г., Касперсен И., Эйде А.Е., Йохансен К. Десульфурация стали в кислоте ковше с использованием силикокальция и смесей извести и плавикового шпата. *Инжекционная металлургия '80*. Лulea, Швеция, 1980. Пер. с англ. Москва: Металлургия, 1982. С. 148–156.
5. Смирнов Н.А., Сидоренко М.Ф., Кунцевич И.А., Сивков С.С., Тюрин Е.И. Повышение качества сложнолегированных конструкционных сталей продувкой порошкообразными материалами в ковше. *Сталь*. 1981. № 5. С. 31–35.
6. Мередит Дж.Г., Мур В. Разработка и исследование смесей порошков на основе извести для вдувания в металл. *Инжекционная металлургия '80*. Лulea, Швеция, 1980. Пер. с англ. Москва: Металлургия, 1982. С. 301–309.
7. Motte J.P., Cordier J. Insufflation profonde de poudres la fonte ou L'acier liquid. «*Circ, informs. techn. Centr. doc. sider.*». 1978. 35. № 4. 775–788.
8. Корос П.Дж., Моска К.У., Петрушка Р.Г. Десульфурация стали путем вдувания извести и магнезия. *Инжекционная металлургия '80*. Лulea, Швеция, 1980. Пер. с англ. Москва: Металлургия, 1982. С. 157–166.
9. Saxena S.K. The potential of magnesium as a refining agent in steelmaking. «*Proc. 40th World Magnesium Conf., Toronto, 12–15 June, 1983*». Dayton, Ohio, s. a. P. 70–76.
10. Repasi G., El-Chazaly S., Tardy P., Karoly G. Replacing CaSi by injecting CaO-based slag mixtures to improve quality of DX-65 HSLA steel. «*Scaninject., 3: 3Int. Cont. Refining Iron and Steel Powder Inject., Lulea, June 15–17, 1983 Prepr. Pt. 2*». Lulea, 1983. P. 44/1-44/18.
11. Юсии Т., Ямада К., Маяшита Р., Танабе Х., Ханмио М., Тагучи К. Производство стали для магистральных трубопроводов продувкой газом и порошками. *Инжекционная металлургия '80*. Лulea, Швеция, 1980. Пер. с англ. Москва: Металлургия, 1982. С. 128–139.
12. Ицкович Г.М. Раскисление стали и модифицирование неметаллических включений. Москва: Металлургия, 1981. 296 с.
13. Смирнов Н.А., Кудрин В.А. Рафинирование стали продувкой порошками в печи и в ковше. Москва: Металлургия, 1986. 168 с.
14. Техтинен К., Вайнола Р., Сэндхольм Р. Вдувание порошков в раскисленную алюминием сталь для МНЛЗ. *Инжекционная металлургия '80*. Лulea, Швеция, 1980. Пер. с англ. Москва: Металлургия, 1982. С. 239–248.
15. Поволоцкий Д.Я. Раскисление стали. Москва: Металлургия, 1972. 208 с.

Надійшла 16.11.2021

**REFERENCES**

1. Kutsin, V.S., Grishchenko, S.A., Gasik, M.I. (2017). The main directions of development of the global ferroalloy industry. *All-Ukrainian scientific and technical conference "Actual problems of development of metallurgical science and education", dedicated to the 100th anniversary of the birth of George Grigoryevich Efimenko*. Dnipro: NMetAU, pp. 62–72 [in Russian].
2. Medovar, L.B., Grischenko, S.G., Stovpchenko, G.P. (2015). On Probable Ways of Steelmaking and Ferroalloy Industry Development. *Proceedings of INFACON XIV. The fourteenth international ferrolloys congress*. Kyiv, Ukraine, vol. 2, pp. 779–786.

3. David, M., Janne, M., Poupon, M., Senanyuch, D. (1982). Industrial experience of injection of silicocalcium into a ladle. *Injection metallurgy '80*. Moscow: Metallurgiya, pp. 248–256 [in Russian].
4. Folmo, G., Kaspersen, I., Eide, A.E., Johansen, K. (1982). Desulfurization of steel in an acid ladle using silicocalcium and mixtures of lime and fluorspar. *Injection metallurgy '80*. Moscow: Metallurgiya, pp. 148–156 [in Russian].
5. Smirnov, N.A., Sidorenko, M.F., Kuntsevich, I.A., Sivkov, S.S., Tyurin, E.I. (1981). Improving the quality of complex-alloyed structural steels by blowing powder materials in a ladle. *Steel*, no. 5, pp. 31–35 [in Russian].
6. Meredith, J.G., Moore, V. (1982). Development and research of mixtures of powders based on lime for blowing into metal. *Injection metallurgy '80*. Moscow: Metallurgiya, pp. 301–309 [in Russian].
7. Motte, J.P., Cordier, J. (1978). Insufflation profonde de poudres la fonte ou L'acier liquid. *Circ. informs. techn. Centr. doc. sider*, vol. 35, no. 4, pp. 775–788 [in French].
8. Koros, P.J., Mosca, K.U., Parsley, R.G. (1982). Desulfurization of steel by injection of lime and magnesium. *Injection metallurgy '80*. Moscow: Metallurgiya, pp. 157–166 [in Russian].
9. Saxena, S.K. (1983). The potential of magnesium as a refining agent in steelmaking. *Proceedings of 40<sup>th</sup> World Magnesium Conf*, Toronto, 12–15 June, 1983. Dayton, Ohio, s. a., pp. 70–76.
10. Repasi, G., El-Chazaly, S., Tardy, P., Karoly, G. (1983). Replacing CaSi by injecting CaO-based slag mixtures to improve quality of DX-65 HSLA steel. *Scaninject.*, 3: *3Int. Cont. Refining Iron and Steel Powder Inject*, Lulea, Sweden, June 15–17, 1983. Prepr. Pt. 2, pp. 44/1-44/18.
11. Yusii, T., Yamada, K., Mayashita, R., Tanabe, H., Hanmio, M., Taguchi, K. (1982). Production of steel for main pipelines by blowing gas and powders. *Injection metallurgy '80*. Moscow: Metallurgiya, pp. 128–139 [in Russian].
12. Itskovich, G.M. (1981). Steel deoxidation and modification of nonmetallic inclusions. Moscow: Metallurgiya, 296 p. [in Russian].
13. Smirnov, N.A., Kudrin, V.A. (1986). Steel refining by blowing powders in the furnace and in the ladle. Moscow: Metallurgiya, 168 p. [in Russian].
14. Tehtinen, K., Vainola, R., Sandholm, R. (1982). Injection of powders into aluminum-deoxidized steel for continuous casting machine. *Injection Metallurgy '80*. Moscow: Metallurgiya, pp. 239–248 [in Russian].
15. Povolotskiy, D.Ya. (1972). Steel deoxidation. Moscow: Metallurgiya, 208 p. [in Russian].

Received 16.11.2021

## Summary

**K.H. Niziaiev**, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Head of Department,  
e-mail: metsteel.dmeti@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9260-0964>

**V.I. Khotiun**, PhD student, e-mail: vadym.khotiun@gmail.com,  
<https://orcid.org/0000-0002-1678-6082>

**O.M. Stoianov**, PhD (Engin.), Associate Professor, Assistant Professor,  
e-mail: metsteel.dmeti@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7136-7403>

**Ye.V. Synehin**, PhD (Engin.), Associate Professor, Assistant Professor,  
e-mail: sinegin.ev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9983-3971>

*Ukrainian State University of Science and Technology (Dnipro, Ukraine)*

## Development of rational technology of microalloying and modifying of killed steel with powder materials

*The article analyzes the efficiency of microalloying and modifying steel with various materials. The data of laboratory tests are presented, rational options for the technology of introducing microalloying and modifying additives into the ferrous melt are proposed in order to obtain high-quality metal.*

**The purpose of this work** is to study various options for microalloying and modifying a medium-carbon metal with the possibility of further optimizing the technological process and improving the quality of metal products.

**Research methodology.** A high-temperature experiment was carried out on the introduction of a microalloying additive both by the deposition method in the form of a lump material and by its injection in a powdery state. Injection of powdered ferroniobium was carried out both in pure form and using lime-based mixtures. An analysis of the technological parameters of experimental melts was carried out, which confirmed the advantage of injecting powdered reagents into the depth of the melt in comparison with the deposition method in the form of a lump.

**Findings.** Based on the results of the analysis of the technological parameters of experimental melts, rational modes of introducing powdered ferroniobium into a teeming ladle were determined, which simultaneously provides both a high degree of assimilation of powder particles by a liquid metal melt, and a high degree of oxygen removal together with lime.

**Originality.** According to the results of experimental heats, the features of the interaction of powder particles injected into a liquid metal melt were confirmed and refined.

**Practical value.** The technological parameters of the process of injection of powdery materials (ferroniobium, lime, fluor-

*spar) have been determined, which, on the one hand, provide a high degree of assimilation of the microalloying element, and, on the other, significantly reduce the contamination of steel with oxide non-metallic inclusions, thereby reducing the total oxygen content in the steel.*

**Keywords**

*Microalloying, ferroalloys, steel, nonmetallic inclusions, powder materials.*