

О. П. Петров, н.с., ORCID 000-0001-7855-9267

І. Р. Снігура, к.т.н., н.с., ORCID 0000-0001-5872-7403

Л. А. Головко, к.х.н., н.с., ORCID 0000-0002-3872-5950

Н. Є. Ходотова, мон.с., ORCID 0000-0002-6958-4636

Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України

МОДЕЛЬНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ І ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НОВИХ ВИДІВ МАРГАНЦЕВМІСНИХ (Mn-50-60%) ФЕРОСПЛАВІВ

Анотація. Метою роботи є реалізація нового підходу до опису фізико-хімічних та теплофізичних характеристик легкоплавких марганцевмісних феросплавів (в інтервалі концентрацій Mn (50-60%), Si (3-8%), C (2,5-6%)) при розкисленні та легуванні металевих розплавів. Запропонований підхід орієнтовано на розробку методики та критеріїв для кількісної оцінки і обліку мікронеоднорідності багатоконпонентних металевих розплавів, до яких належать феросплави. Зазначений підхід дає можливість прогнозувати такі важливі характеристики, як температура плавлення, щільність, теплоємність, теплота плавлення, теплопровідність, питомий електроопір, коефіцієнт температур, що дозволить розширити розуміння процесів плавлення та засвоєння елементів з феросплавів. У роботі використано розроблений в Інституті чорної металургії НАН України спосіб вирішення завдань моделювання закономірностей, в основі якого лежить оригінальна концепція спрямованого хімічного зв'язку процесів взаємодії у розплавах та розчинах, що розроблена Е.В. Приходько. Для оцінки та врахування впливу мікронеоднорідності будови металевих розплавів феросплавного виробництва застосовано методику розрахунку критеріїв (ΔZ^Y та Δd), що характеризують ступінь відмінності електронного та структурного стану розплаву (як хімічно єдиної системи) від механічної суміші їх вихідних компонентів. З використанням зазначених критеріїв та наявних експериментальних даних, які виступали як реперні точки, розрахунковим шляхом отримані значення споживчих властивостей марганцевмісних феросплавів, які відрізняються від стандартних марок у бік збільшення вмісту кремнію і зменшення марганцю. На основі нових результатів розрахунку комплексу фізичних та теплофізичних властивостей проведено оцінку ефективності використання феросплавів. Показано принципову можливість графічних залежностей «властивість-параметр» визначати граничні умови для вибору оптимального складу нових типів феросплавів, цілеспрямовано керувати фізико-хімічним станом залізвуглецевого розплаву та, відповідно, впливати на властивості готового металу.

Ключові слова: марганцевмісні феросплави, металеві розплави, параметри міжатомної взаємодії, аналітичні залежності.

Посилання для цитування: *Петров О. П., Снігура І. Р., Головка Л. А., Ходотова Н. Є.* Модельне прогнозування фізико-хімічних і теплофізичних характеристик нових видів марганцевмісних (Mn-50-60%) феросплавів. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії.* 2021. Вип. 35. С. 186-199. (In Ukrainian). DOI 10.52150/2522-9117-2021-35-186-199

Стан проблеми. Відомо, що серед основних конструкційних матеріалів сталь займає, і в найближчому майбутньому займатиме чільну роль. Спостерігається неухильне зростання світового виробництва сталі, що супроводжується збільшенням попиту на феросплави, особливо на сплави марганцю. Марганець відноситься до елементів, що мають важливе стратегічне значення, основний обсяг якого (близько 95%) виробляється у вигляді феросплавів (силікомарганцю, вуглецевого, середньовуглецевого та низьковуглецевого феромарганцю, металевого марганцю, комплексних марганцевих сплавів) і використовується при виплавці різних типів сталі в якості розкислювача і легуючої добавки. У кількості від 0,05 до 15% Mn входить до складу практично всіх марок сталі. При цьому середня витрата марганцю становить 7-9 кг на 1 т сталі, а високолегованих може досягати 150 кг/тонну.

Марганець насамперед служить десульфуратором, здатним переводити сірку в шлак. Інша важлива властивість марганцю – сприяти утворенню рідких шлаків, що дозволяє відокремлювати метал наприкінці плавки. При легуванні марганець має подрібнюючу дію на структуру сталі, підвищує її міцність і зносостійкість, збільшує глибину прожарювання, покращує ковкість і прокочування сталі [1]. Серед легуючих елементів марганець займає особливе місце, оскільки суттєво впливає на температуру плавлення та розчинення оксидів та сульфідів заліза. Найбільш легкоплавким оксидним включенням є закис заліза (FeO), точка плавлення якої при взаємодії із сульфідом заліза FeS знижується приблизно з 1370 до 940 °С. Оксисульфіди заліза при високих температурах у вигляді рідких або напіврідких фаз розподіляються головним чином на межі первинних зерен. Присутність таких включень призводить до червоноламкості – утворення гарячих тріщин при розливанні, куванні та прокатці сталі. При введенні марганцю точка плавлення знову піднімається, оскільки замість FeO і FeS утворюються з'єднання MnO і MnS, що мають високу температуру плавлення. Сульфіди та оксиди марганцю розподіляються в сталі не у вигляді сітки по межах зерен, а у вигляді точкових тугоплавких включень. У цьому полягає специфічний вплив марганцю, що усуває червоноламкість [2].

Україна займає провідні позиції у світі з виробництва марганцевих феросплавів, маючи великі запаси необхідної сировини та потужності для

її переробки. На її території зосереджено 650 млн. т загальних та 630 млн. т розвіданих, що становить відповідно 7,5 та 18% світових запасів марганцевої руди. Нині для металургійної промисловості поставляються вітчизняні марганцеві концентрати кількох сортів. У вищих сортах вміст марганцю близько 43,6, фосфору 0,210 та кремнезему 13,1% (відношення P/Mn 0,0048). Як показують наведені результати, навіть вищі марки вітчизняних концентратів не задовольняють вимогам металургійної промисловості, тоді як марганцеві руди, які добуваються в таких країнах, як ПАР, Габон, Бразилія та Австралія, належать переважно до високосортних металургійних сортів із вмістом марганцю 40...52 і фосфору лише на рівні 0,045...0,120. Структура різних видів марганцевих феросплавів змінюється залежно вимог сталеплавильного виробництва. Основним видом продукції феросплавних підприємств України є стандартні феросплави. Нікопольський та Запорізький заводи (НЗФ та ЗФ) виробляють кілька видів феромарганцю (ФМн), феросилікомарганцю (МнС) та металевого марганцю (Мн). Ця продукція експортується (70-80%) до країн СНД, ЄС, Азії, Африки і лише 20-30% йде на внутрішній ринок. Силікомарганець, а за новою термінологією, згідно з ДСТУ-3548-97, феросилікомарганець є найбільш масовим сплавом. На частку феросилікомарганцю припадає ~ 57% від загальної кількості марганцевих сплавів, ~ 33% частка вуглецевого феромарганцю і ~ 10% на рафінований (низько- і середньовуглецевий) феромарганець і марганець металевий [3].

Сортамент феросплавів зазвичай визначається вимогами їх споживачів (переважно сталеплавильних підприємств), технологічними можливостями виробництва феросплавів і якістю рудних матеріалів. Тим часом технологія одержання сталі за останні 30-60 років зазнала суттєвих змін. З'явилися нові етапи металургійного циклу одержання сталі – позапічне (ковшове) оброблення, безперервне розливання, що вимагає нової якості феросплавів, пов'язаних, в основному, з температурними та тимчасовими особливостями їх плавлення, що спровокувало зміни низки фізико-хімічних характеристик феросплавів, пов'язаних зі зниженою температурою в ковші, обмеженим часом взаємодії реагентів і т.д.

Однак хімічний склад основного сортаменту феросплавів не переглядався з п'ятдесяти років минулого століття, що веде до ускладнення технології, зниження продуктивності сталеплавильного виробництва та якості продукції. Оскільки стандартні феросплави часто не мають необхідних службових характеристик для обробки металу в ковші, а прогресивна технологія сталеплавильного виробництва, що розвивається, змушена пристосовуватися до існуючого сортаменту феросплавів, необхідна розробка, поряд з існуючими, нових типів феросплавів. Потрібні такі феросплави, які здатні цілеспрямовано керувати фізико-хімічним

станом металевого розплаву та, відповідно, властивостями металовиробів. Нові високоефективні феросплави слід створювати в найбільш сприятливих поєднаннях компонентів, що сприяють ефективному впливу на залізовуглецевий розплав за високого ступеню засвоєння в ньому корисних елементів. Їхні фізико-хімічні властивості повинні мати необхідний вплив на розплав при меншій витраті порівняно зі стандартними сплавами або більшому ефекту при однаковій витраті. Слід зазначити, що альтернативним та економічно доцільним є застосування менш якісної рудної сировини, ніж для виплавки стандартних феросплавів, наприклад бідні руди, відходи виробництва тощо для отримання нових типів феросплавів. Це з тим, що ці сплави відрізняються низьким вмістом провідних елементів 50-60% порівняно із складом стандартних сплавів 65-90%.

Розробка нових та вдосконалення прийнятих технологічних рішень, спрямованих на підвищення ефективності процесів розкислення, легування та доведення металу за хімічним складом, пов'язана з вивченням кінетики плавлення та засвоєння елементів з феросплавів, що вводяться, що неможливо без урахування їх найважливіших фізико-хімічних і теплофізичних характеристик. Існуючі експериментальні методи визначення властивостей феросплавів досить трудомісткі і обмежені технічними можливостями устаткування, що використовується. Крім того, через хімічну та структурну неоднорідність аналізованих матеріалів-добавок не завжди вдається отримувати адекватні результати. В даний час відсутній і комплексний метод, який дозволяв би розробляти раціональні композиції феросплавів для обробки металевих розплавів. Тому особливий науковий та практичний інтерес становлять розрахункові методи визначення фізико-хімічних та теплофізичних властивостей, які дозволяють прогнозувати склади феросплавів з оптимальними характеристиками.

У той же час властивості феросплавів, дані про які відсутні, необхідні для використання їх як вихідні параметри при математичному та фізичному методах моделювання сталеплавильних процесів, що відбуваються в плавильному агрегаті або сталерозливному ковші при їх використанні в системах АСНД та АСУТП.

На цей час відомо ряд робіт, у яких наводяться властивості феросплавів або представлена систематизація фізичних та теплофізичних характеристик промислових феросплавів [4–9]. Однак для більшої частини використовуваних при виробництві сталі феросплавів їх властивості залишаються ще мало вивченими, а окремі, згадані в літературі відомості, мають суперечливий характер і тому вимагають уточнення.

Феромарганець [6] має невисоку температуру плавлення і підвищеним

вмістом у ньому вуглецю вона знижується на 20...25°C. У феросилікомарганцю з зниженням вмісту кремнію зменшується температура плавлення. Пов'язано це, мабуть, з руйнуванням більш тугоплавких силіцидів марганцю і утворенням більш легкоплавких силіцидів заліза. Марганець електролітичний має температуру плавлення, близьку до точки плавлення.

Сплави з марганцем мають оптимальну щільність, крім важких, низьковуглецевого та електролітичного марганцю. В роботі [7] встановлено, що щільність феромарганцю для марки ФМн78 і ФМн90 становить 7,30 г/см³, а марки ФМн88 - 7,40 г/см³. У роботі [1] наводяться експериментальні дані, згідно з якими феромарганець марки ФМн78 має щільність 6,80 г/см³, а для марок ФМн88 та ФМн90 вона становить 7,15 г/см³ та 7,20 г/см³.

В. І. Жучков, А. Л. Зав'ялов та ін. [6] теплофізичні характеристики марганцевмісних феросплавів марок ФМн0,5, ФМн1, ФМн78, СМн26, СМн17, СМн10 і Мр00 розраховували шляхом адитивного складання відповідних довідкових величин. В.С.Ігнат'єв, В.А. Вихлевщук у роботі [5] для деяких марганцевмісних феросплавів (Мр1, МрН6, ФМн75, ФМн1,5, СМн17, СМн20, СМн28) значення теплофізичних властивостей при високих температурах визначали розрахунковим шляхом (теплопровідність, теплота плавлення, коефіцієнт температуропровідності). В роботі [8] В. Г. Мізін, В. С. Ігнат'єв та ін. узагальнили наявні дані про фізико-хімічні та теплофізичні властивості промислових марок марганцевих феросплавів. Деякі з параметрів, що характеризують властивості феросплавів, що розглядаються, в літературі відсутні. Для деяких, широко застосовуваних марок, не виявлено надійних даних теплоємності в твердому (С_{тв}) і рідкому (С_р) станах, теплоті плавлення (Q), теплопровідності (λ) в рідкому стані. В аспекті викладеного є актуальною задача розробки розрахункових методів прогнозування властивостей феросплавів за їх хімічним складом.

При дослідженні взаємозв'язку між складом, будовою та властивостями металевих розплавів, включаючи багатоконпонентні, показано доцільність використання моделі ОЦК – подібної упаковки атомів. У цьому випадку співвідношення між ефективними зарядами (Z) для першої (Z₁^x) та другої (Z₂^y) координаційних сфер переважної більшості металевих розплавів описується рівнянням:

$$4Z_1^x = -Z_2^y. \quad (1)$$

За фізичним змістом рівняння (1) виражає в термінах зарядів інтегральну умову рівноваги сил тяжіння та відштовхування, що діють на

будь-який атом у багатокомпонентній системі з боку партнерів його зв'язків із сусідами у перших двох координаційних сферах.

Використання структурної моделі відкрило нові можливості для напівемпіричного узагальнення дослідних даних про властивості розплавів та продуктів їхньої кристалізації. Ці можливості пов'язані з розробкою єдиної форми кодування інформації про склад розплавів, сполук та розчинів у вигляді поєднання інтегральних та парціальних модельних параметрів міжатомної взаємодії. Основними з них є хімічний еквівалент складу (Z^Y), що підсумовує інформацію про заряди компонентів з урахуванням ймовірності утворення зв'язків різного типу та структурний параметр (d), що характеризує середньостатистичну відстань між атомами в розплаві. Додатково до хімічного еквіваленту та структурного параметру у ряді випадків використовується електрохімічний - $tg\alpha$, що характеризує зміну радіусів іонів при зміні їх зарядів. За фізичним змістом кожен із цих параметрів є аналогом електронного (Z^Y), розмірного (d) та електрохімічного ($tg\alpha$) факторів.

Слід зазначити, що критерії Z^Y і d , що використовуються, характеризують розплави як гомогенні системи. Це припущення певною мірою ідеалізує стан їхньої структури. Для системного обліку впливу мікронеоднорідності розплавів на їх властивості запропоновано розраховувати надлишкові значення Z^Y і d [9-10]. Відповідні значення (ΔZ^Y) та (Δd) визначаються як різниця між Z^Y та d для розупорядкованих систем та механічної суміші з вихідних компонентів цієї системи, тобто, $\Delta Z^Y = Z^Y_{\text{спл}} - \sum Z^Y \cdot n_i$ та $\Delta d = d_{\text{спл}} - \sum d_i \cdot n_i$, де n_i – атомна частка компоненту розплаву.

Введення цих критеріїв виявилось дуже корисним для теоретичного узагальнення дослідних даних. Методологія їх визначення та використання істотно розширюють наукову базу для вирішення завдання аналітичного узагальнення наявної експериментальної інформації про вплив складу на структуру та властивості багатокомпонентних металевих розплавів, до яких відносяться і феросплави.

Основний матеріал дослідження. За розглянутою вище схемою моделювання з використанням пропонованих фізико-хімічних критеріїв та експериментальних даних, які виступали як реперні точки, раніше нами проведено системне дослідження найважливіших споживчих властивостей стандартних марганцевмісних феросплавів промислового виробництва для розкислення та легування сталі. Розроблено аналітичні залежності, що дозволяють прогнозувати вплив зміни складу, вираженого через інтегральні параметри міжатомної взаємодії, на властивості температуру плавлення ($T_{\text{пл}}$, °C), щільність ($D \cdot 10^3$, кг/м³), теплоємність (C , Дж/кг·К),

теплоту плавлення ($Q_{пл}$, кДж/кг), коефіцієнту теплопровідності (λ , Вт/м·К), питомого електроопору (ρ , МОм·м), коефіцієнту температуропровідності ($\alpha \cdot 10^{-3}$, м²/с)), - високо-, середньо- і низьковуглецевого феромарганцю, феросилікомарганцю, марганцю металевого, наявні експериментальні дані щодо яких обмежені або носять суперечливий характер [11].

Як приклад у табл. 1 наведено розраховані за рівнянням (2) значення фізичних та теплофізичних властивостей для деяких марок стандартних марганцевих феросплавів, які зіставлені з наявними експериментальними значеннями.

$$D, T_{пл}, C_{ж}, Q, \lambda, \rho, \alpha \cdot 10^{-3} = f(Z^Y, d, \Delta Z^Y, \Delta d), i=1,2...n. \quad R \geq 0,98 \quad (2)$$

Таблиця 1 – Зіставлення розрахованих (рівняння 2) та експериментальних [5] значень фізичних та теплофізичних властивостей марганцевмісних феросплавів.

№	Феросплави	$T_{пл}$, °С	$D \cdot 10^3$, кг/м ³	C_p , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	Q , кДж/кг	$\alpha \cdot 10^{-3}$, м ² /с
1	ФМн965	1240/1245	7,14/7,14	754/756	43,2/42,7	267/267	7,1/7,0
2	ФМн78	1280/1279	7,24/7,23	754/754	28,2/28,3	251/251	5,2/5,21
3	ФМн90	1250/1243	7,26/7,27	800/797	31,4/32,0	293/293	5,4/5,53
4	СМн17	1260/1260	6,21/6,21	717/717	21,6/21,5	477/477	4,7/4,69
5	СМн20	1270/1309	6,16/6,08	733/747	18,8/15,3	482/483	4,1/3,4
6	СМн28	1350/1313	5,91/5,98	752/738	12,3/15,6	496/495	2,8/3,46
	$\Sigma \varepsilon$, %	1,14	0,46	0,74	8,2	0,07	7,48

* Чисельник та знаменник – відповідно експериментальні та розрахункові значення, ε – помилка модельної оцінки

Наведені та наявні для інших оцінюваних параметрів дані свідчать про те, що отримані розрахункові значення (табл. 1) для різних стандартних марок марганцевмісних феросплавів можна визнати прийнятними порівняно з експериментальними даними.

Оскільки стандартні феросплави не завжди пристосовані до сучасних сталеплавильних процесів і, як правило, малоефективні, постало завдання поряд з існуючими створювати нові типи феросплавів, що дозволяють цілеспрямовано управляти фізико-хімічним станом металевого розплаву і, відповідно, властивостями металовиробів. Для кожного нового феросплаву ефективність його застосування для розкислення, легування та модифікування залізвуглецевих розплавів досягається вибором оптимального складу та кількісного співвідношення елементів у сплаві з подальшим визначенням раціональної та економічної технології отримання цього феросплаву. З використанням запропонованої нами методики були розроблені аналітичні залежності (3-9) для розрахунку температури

плавлення ($T_{пл}, ^\circ\text{C}$), щільності ($D \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$), теплоємності (C , Дж/кг·К), теплоти плавлення ($Q_{пл}$, кДж/кг), коефіцієнтів теплопровідності (λ , Вт/м·К) нових комплексних марок феросплавів для позапічного розкислення та легування ($r \geq 0,95$) від параметрів міжатомної взаємодії у вигляді:

Для марганцевмісних комплексних марок феросплавів:

$$D = 11,8 - 9,9Z^Y + 3,5d + 6,1\Delta Z^Y + 12,3\Delta d \quad R=0,97 \quad (3)$$

$$T_{пл} = 2879,6 - 2436,4Z^Y + 580,3d + 2030,8\Delta Z^Y - 1394,4\Delta d \quad R=0,95 \quad (4)$$

$$C_{те.} = 545,6 + 308,6Z^Y - 248,7d + 20,8\Delta Z^Y - 191,7\Delta d \quad R=0,95 \quad (5)$$

$$C_{ж.} = 7586,2Z^Y - 1196,5d - 7218,6\Delta Z^Y - 7465,2\Delta d - 5147 \quad R=0,97 \quad (6)$$

$$Q_{пл} = 6511 - 982,9Z^Y - 1549,3d + 237,5\Delta Z^Y - 115,8\Delta d \quad R=0,99 \quad (7)$$

$$\lambda = 548,4Z^Y - 41,2d - 532,6\Delta Z^Y - 609,6\Delta d - 507,2 \quad R=0,99 \quad (8)$$

$$\tau = 205,5 - 134,8Z^Y + 1,56d + 96,5\Delta Z^Y + 23,3\Delta d \quad R=0,99 \quad (9)$$

Фрагмент хімічних складів комплексних феросплавів та їх фізико-хімічні та теплофізичні характеристики наведені у таблицях 2 та 3 на основі даних робіт [1-6].

Таблиця 2 - Хімічний склад, модельні параметри комплексних марганцевмісних феросплавів.

№	Феросплави	Хімічний склад, % ваг.					Модельні параметри			
		Mn	V	Si	Nb	Al	Z^Y	d	ΔZ^Y	Δd
1	ФН6САМн15	15	-	10,2	14,9	15,3	1,8294	2,7518	0,7857	-0,122
2	ФН6САМн30	30	-	8,4	12,3	12,6	1,8878	2,7793	0,8171	-0,105
3	ФС25Вд9Мн10	10	9,0	25,0	-	-	1,8737	2,5515	0,7303	-0,008
4	ФС25Вд9МнTi3	4,9	8,9	25,2	-	-	1,8837	2,5717	0,7420	-0,006

*Решта заліза. Сплав №4 містить 3% Ti

Таблиця 3 - Зіставлення розрахованих (рівняння 3-9) та експериментальних [1-7] значень фізичних і теплофізичних властивостей комплексних марганцевмісних феросплавів.

№	Феросплави	$T_{пл}$, $^\circ\text{C}$	$D \cdot 10^3$, кг/м^3	$C_{те.}$, Дж/(кг·К)	$C_{ж.}$, Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	Q , кДж/кг	τ , с
1	ФН6САМн15	1460/1445	6,57/6,56	479/465	697/677	38,3/38,5	589/650	37,3/36,1
2	ФН6САМн30	1427/1406	6,55/6,48	459/474	713/732	41,9/42,2	558/556	31,1/31,7
3	ФС25Вд9Мн10	1270/1267	6,70/6,49	495/505	787/800	31,9/31,0	891/891	28,2/27,2
4	ФС25Вд9МнTi3	1275/1279	6,45/6,56	497/501	781/773	29,0/29,0	904/902	27,3/27,9
	$\Sigma \varepsilon, \%$	0,76	1,52	2,25	2,05	1,02	2,74	2,73

*Чисельник та знаменник – відповідно експериментальні та розрахункові значення, ε – помилка модельної оцінки

Для виробництва марганцевої продукції, зокрема феромарганцю, використовуються марганцеві руди. Середній вміст металу становить від 17 до 53%. Вилучення марганцю з руди сягає 80%, а його угар при розкисленні і легуванні може сягати 31%. Тому наскрізне вилучення марганцю в залізовуглецеві розплави не перевищує 50%. Крім того, необхідно зазначити, що отримання феросплавів є найбільш енерго-, трудо- та матеріаломістким виробництвом у чорній металургії. Разом з тим, останніми роками (20-50 років) якість марганцевої сировини, що поставляється феросплавним заводам, помітно погіршилася і це призводить до зниження техніко-економічних показників процесів виплавки сплавів марганцю та погіршення їхньої якості. У зв'язку з дефіцитом марганцевого концентрату 1 сорту виникає необхідність розширення рудної бази шляхом залучення у виробництво сплавів карбонатних та бідних оксидних руд. В Україні частка бідних карбонатних марганцевих руд становить 77% і лише 15% оксидні руди. Щорічно розрив між зростаючою потребою металургів у марганцевих феросплавах і запасами багатих високосортних з вмістом марганцю (40...52%) концентратів, що знижуються, тільки зростатиме. У зв'язку з цим залучення у виробництво бідних марганцевих руд (з вмістом марганцю – 25–30%) як у нашій країні, так і в усьому світі стає неминучим. Використання біднішої по марганцю сировини призводитиме до зміни складу (переважно до зниження вмісту марганцю), отже, і показників феросплавів.

Нами розглянуто можливість використання нового підходу до опису фізико-хімічних характеристик марганцевмісних феросплавів в інтервалі концентрацій Mn (50-60%), Si (3-8%), C (2,5-6%), решта - домішки та залізо.

Нижче наведені отримані розрахунковим шляхом рівняння для розрахунку споживчих властивостей марганцевмісних феросплавів за модельними параметрами, які відображають згортку хімічного складу. Для побудови аналітичних залежностей, як реперні точки взяті експериментальні дані для деяких феросплавів з роботи [12]. Коефіцієнти кореляції між розрахунковими та експериментальними значеннями для цих рівнянь знаходяться на рівні 0,96 та вище.

$$D = 0,99\Delta Z^Y + 223,7tg\alpha - 14,1 \quad R=0,97 \quad (10)$$

$$T_{пл} = 1798,7 - 814,4\Delta Z^Y + 774\Delta d \quad R=0,98 \quad (11)$$

$$\lambda = 184,7 - 92,3Z^Y + 39,5\Delta d \quad R=0,99 \quad (12)$$

$$\tau = 423,1 - 198,6Z^Y + 7,65\Delta d \quad R=0,96 \quad (13)$$

З використанням наведених рівнянь було орієнтовно оцінено фізико-хімічні та теплофізичні властивості легкоплавких марганцевих феросплавів (108 складів). У табл. 4 представлено кілька рекомендованих

складів сплавів які мають більш оптимальні, ніж стандартні марки вуглецевого феромарганцю ФМн78, властивості. У роботах [1, 6] експериментально встановлено, що щільність для марки ФМн78 з вмістом (78%Mn, 1,78-2,0% Si, 6,35-6,5%С) становить 7,15 г/см³ та 7,14 г/см³ відповідно, а температура плавлення 1250°C і 1210°C. Значення теплопровідності цієї марки коливаться не більше 27,2- 61,2 Вт/м·К. Властивості марганцевмісних феросплавів, що наведені в таблиці 5, характеризуються нижчими значеннями температури плавлення і теплопровідності, а їх щільність близька до щільності рідкої сталі 7,0 г/см³. Всі розглянуті нові види сплавів мають більш високу швидкість плавлення в рідкій сталі 46,4-60,6 сек., порівняно зі стандартними марками вуглецевого феромарганцю – 80 сек (для діаметра 40 мм.) [6]

Таблиця 4 – Хімічний склад і модельні параметри марганцевмісних феросплавів.

№	Феросплави	Хімічний склад, % ваг.					Модельні параметри				
		Mn	Si	C	P	Fe	Z'	d	tgα	ΔZy	Δd
1	ФМн60	67,41	3,35	5,53	0,38	23,62	1,7951	2,404	0,091	0,675	-0,098
2	ФМн60	62,56	0,90	6,34	0,36	29,34	1,7919	2,384	0,092	0,683	-0,090
3	ФМн50	48,38	0,80	6,01	0,029	44,08	1,8205	2,401	0,093	0,717	-0,079
4	ФМн50	52,34	2,55	5,60	0,028	39,08	1,8388	2,410	0,092	0,729	-0,080
5	ФМн50	54,20	6,38	4,68	0,03	33,80	1,8704	2,423	0,091	0,752	-0,079
6	ФМн50	48,95	8,72	3,70	0,03	38,37	1,8978	2,460	0,090	0,774	-0,072

Таблиця 5 – Фізико-хімічні та теплофізичні властивості марганцевмісних феросплавів за рівняннями (10-13) властивості легкоплавких марганцевмісних феросплавів.

№	Феросплави	T _{пл} , °C	D·10 ³ , кг/м ³	λ, Вт/м·К	τ, сек	
1	ФМн60	1170/1173	6,95/6,92	15,3/15,1	65,0/66,0	
2	ФМн60	1180/1173	7,10/7,15	15,6/15,7	70,0/67,0	
3	ФМн50	1150/1154	7,28/7,27	13,9/13,5	60,0/61,0	
4	ФМн50	1140/1143	7,18/7,15	11,2/11,8	55,0/57,0	
5	ФМн50	1125/1125	6,98/6,96	8,9/8,9	50,0/51,0	
6	ФМн50	1115/1113	6,79/6,82	6,8/6,7	48,0/46,0	
	Σε, %		0,27	0,40	1,94	2,88

* Чисельник та знаменник – відповідно експериментальне та розрахункові значення, ε – помилка модельної оцінки

Висновки

Розрахунковим шляхом отримані значення фізико-хімічних характеристик марганцевмісних феросплавів (108 складів), які відрізняються від стандартних марок у бік збільшення вмісту кремнію та зменшення марганцю. На основі нових результатів розрахунку комплексу

фізичних та теплофізичних властивостей проведено оцінку ефективності їх використання. Показано принципову можливість графічних залежностей властивість-параметр визначати граничні умови для вирішення завдань вибору оптимального складу нових типів ферросплавів, що дозволяють цілеспрямовано керувати фізико-хімічним станом залізовуглецевого розплаву і, відповідно, впливати на властивості готового металу.

Перелік посилань

1. Жучков В. И., Смирнов Л. А., Зайко В. П., Воронов Ю. И. Технология марганцевых ферросплавов. Ч.1. Высокоуглеродистый ферромарганец. Екатеринбург : НИСОУрО РАН, 2007. 410 с.
2. Мысик В. Ф., Жданов А. В., Павлов В. А. Металлургия ферросплавов: технологические расчеты: учебное пособие. Екатеринбург : Изд-во Урал ун-та. 2018. 536 с.
3. Ольшанский В. И., Филиппов И. Ю., Гладких В. А., Рубан А. В., Дмитриева И. С., Цибуля Е. И. Влияние состава ферросиликомарганца на его качество и технологические показатели процесса. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2015. № 1. С. 36-41.
4. Еднерал Ф. П. Электрометаллургия стали и ферросплавов. Москва : Metallurgia, 1963. 640 с.
5. Игнатъев В. С., Вихлевщук В. А., Черногорецкий В. М. Изучение свойств ферросплавов и лигатур для микролегирования и раскисления стали. *Изв. ВУЗов. Черная металлургия*. 1988. № 6. С. 37-42.
6. Жучков В. И., Завьялов А. Л., Носков А. С. Физико-химические характеристики марганцевых ферросплавов. *Изв. ВУЗов. Черная металлургия*. 1994. № 10. С. 9-10.
7. Дурер Р., Фолькерт Г. Металлургия ферросплавов. Москва : Metallurgia, 1976. 480 с.
8. Мизин В. Г., Чирков Н. А., Игнатъев В. С., Ахманаев С. И., Поволоцкий В. Д. Ферросплавы. Справочное издание. Москва : Metallurgia. 1992. 415 с.
9. Приходько Э. В., Петров А. Ф. Физико-химические критерии для оценки степени микронеоднородности металлических расплавов. *Металлофизика и новейшие технологии*. 1998. Т. 20. № 7. С. 64-74.
10. Приходько Э. В., Петров А. Ф. Роль направленного межатомного взаимодействия в формировании микронеоднородного строения металлических расплавов. *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1995. № 12. С. 5-12.
11. Приходько Э. В., Петров А. Ф. Методика прогнозирования физических и теплофизических свойств марганцевых ферросплавов в зависимости от состава. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2008. № 6. С. 27-30.
12. Величко Б. Ф., Казачков И. П., Рогачев И. П., Овчарук А. Н., Ганцеровский О. Г., Ольшанский В. И., Филиппов И. Ю. Исследование и разработка легкоплавких марганцевых ферросплавов, технологии их выплавки

и применения в сталеплавильном производстве. *Сучасні проблеми металургії*. 2016. Т. 19. № 1. С. 77-86.

References

1. Zhuchkov V.I., Smirnov L.A., Zayko V.P., Voronov YU.I. (2007). *Tekhnologiya margantsevykh ferrosplavov. Ch.I. Vysokouglerodistyiy ferromarganets [Manganese ferroalloy technology. Part I. High-carbon ferromanganese]*. Yekaterinburg: NISOUrO RAN. 2007, 410 p. [In Russian].
2. Mysik V.F., Zhdanov A.V., Pavlov V.A. (2018). *Metallurgiya ferrosplavov: tekhnologicheskiye raschety: uchebnoye posobiye [Metallurgy of ferroalloys: technological calculations: textbook]*. Yekaterinburg: Izd-vo Ural un-ta. 2018, 536 p. [In Russian].
3. Olshansky V.I., Filippov I.Yu., Gladkikh V.A., Ruban A.V., Dmitriyeva I.S., Tsibulya Ye.I. (2015). Vliyaniye sostava ferrosilikomargantsa na yego kachestvo i tekhnologicheskiye pokazateli protsessa [Influence of the composition of ferrosilicomanganese on its quality and technological indicators of the process]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. [Metallurgical and mining industry], 2015, 1, 36-41* [In Russian].
4. Yedneral F.P. (1963). *Elektrometallurgiya stali i ferrosplavov [Electrometallurgy of steel and ferroalloys]*. Moskva: Metallurgiya. 1963, 640 p. [In Russian]
5. Ignat'yev V.S., Vikhlevshchuk V.A., Chernogretskiy V.M. (1988). Izucheniye svoystv ferrosplavov i ligatur dlya mikrolegirovaniya i raskisleniya stali [Study of the properties of ferroalloys and master alloys for microalloying and deoxidation of steel]. *Izv. VUZov. Chernaya metallurgiya [Izv. Universities. Ferrous metallurgy], 1988, 6, 37-42*. [In Russian].
6. Zhuchkov V.I., Zav'yalov A.L., Noskov A.S. (1994) Fiziko-khimicheskiye kharakteristiki margantsevykh ferrosplavov [Physicochemical characteristics of manganese ferroalloys]. *Izv. VUZov. Chernaya metallurgiya [Izv. Universities. Ferrous metallurgy], 1994, 10, 9-10* [In Russian].
7. Durer P., Fol'kert G. (1976). *Metallurgiya ferrosplavov [Metallurgy of ferroalloys]*. Moskva: Metallurgiya. 1976, 480 p. [In Russian].
8. Mizin V.G., Chirkov N.A., Ignat'yev V.S., Akhmanayev S.I., Povolotskiy V.D. (1992). *Ferrosplavy. Spravochnoye izdaniye [Ferroalloys. Reference edition]*. Moskva: Metallurgiya. 1992, 415 p. [In Russian]
9. Prikhod'ko E.V., Petrov A.F. (1998). Fiziko-khimicheskiye kriterii dlya otsenki stepeni mikroneodnorodnosti metallicheskiikh rasplavov [Physicochemical criteria for assessing the degree of microheterogeneity of metal melts]. *Metallofizika i noveyshiye tekhnologii [Metallophysics and Advanced Technologies], 1998, Vol. 20, 7, 64-74* [In Russian].
10. Prikhod'ko E.V., Petrov A.F. (1995). Rol' napravlennoogo mezhatomnogo vzaimodeystviya v formirovaniі mikroneodnorodnogo stroeniya metallicheskiikh rasplavov [The role of directed interatomic interaction in the formation of the microheterogeneous structure of metal melts]. *Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya [Izv. universities. Ferrous metallurgy], 1995, 12, 5-12* [In Russian].
11. Prikhod'ko E.V., Petrov A.F. (2008). Metodika prognozirovaniya fizicheskikh i

teplofizicheskikh svoystv margantsevykh ferrosplavov v zavisimosti ot sostava [Methodology for predicting the physical and thermophysical properties of manganese ferroalloys depending on the composition]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and mining industry], 2008, 6, 27-30. [In Russian].

12. Velichko B.F., Kazachkov I.P., Rogachev I.P., Ovcharuk A.N., Gantserovskiy O.G., Ol'shanskiy V.I. et al. (2016). Issledovaniye i razrabotka legkoplavkikh margantsevykh ferrosplavov, tekhnologii ikh vyplavki i primeneniya v staleplavil'nom proizvodstve [Research and development of low-melting manganese ferroalloys, technologies for their smelting and application in steelmaking]. *Suchasni problemi metalurgii* [Current problems of metallurgy], 2016, Vol. 19, 1, 77-86. [In Russian].

A. F. Petrov, Researcher, ORCID 0000-0001-7855-9267

I. R. Snigura, Candidate of technical sciences, Researcher, ORCID 0000-0001-5872-7403

L. A. Golovko, Candidate of chemical sciences, Researcher, ORCID 0000-0002-3872-5950

N. E. Hodotova, Junior Researcher, ORCID 0000-0002-6958-4636

Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine

MODEL PREDICTION OF PHYSICO-CHEMICAL AND THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF NEW TYPES OF MANGANESE-CONTAINING (Mn-50-60%) FERROALLOYS

Abstract. The aim of the work is to implement a new approach to the description of physicochemical and thermophysical characteristics of low-melting manganese-containing ferroalloys (in the range of concentrations of Mn 50-60%, Si 3-8%, C 2.5-6%) during deoxidation and alloying of metal melt. The proposed approach is focused on the development of methods and criteria for the quantitative assessment and accounting of microhomogeneity of multicomponent metal melts, which include ferroalloys. This approach makes it possible to predict such important characteristics as melting temperature, density, heat capacity, heat of fusion, thermal conductivity, resistivity, temperature coefficient, which will expand the understanding of melting processes and assimilation of ferroalloy elements. The method of solving regularity modeling problems developed at the Iron and Steel Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, which is based on the original concept of directed chemical bonding of interaction processes in melts and solutions, developed by E.V. Prikhodko. To assess and take into account the influence of microhomogeneity of the structure of metal melts of ferroalloy production, the method of calculating criteria (ΔZ^Y and Δd), which characterize the degree of difference between electronic and structural state of the melt (as a chemically unified system) from the mechanical mixture of their initial components. Using these criteria and

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2021. – Випуск 35

«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2021. – Vyusk 35

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2021. – Collection 35

the available experimental data, which acted as reference points, the calculated values of the consumer properties of manganese-containing ferroalloys, which differ from standard brands in the direction of increasing the silicon content and decreasing manganese. On the basis of new results of calculation of a complex of physical and thermophysical properties the estimation of efficiency of use of ferroalloys is carried out. The fundamental possibility of graphical dependences «property-parameter» to determine the boundary conditions for choosing the optimal composition of new types of ferroalloys, purposefully control the physicochemical state of the iron-carbon melt and, accordingly, to influence the properties of the finished metal.

Keywords: manganese-containing ferroalloys, metal melts, parameters of interatomic interaction, analytical dependences.

For citation: *Petrov A.F., Snigura I.R., Golovko L.A., Khodotova N.E. Modelne prohnozuvannya fizyko-khimichnykh i teplofizychnykh kharakterystyk novykh vydiv marhantsevmisnykh (Mn-50-60%) ferosplaviv [Model prediction of physico-chemical and thermophysical characteristics of new types of manganese-containing (Mn-50-60%) ferroalloys]. Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy], 2021, 35, 186-199. (In Ukrainian). DOI 10.52150/2522-9117-2021-35-186-199*

*Стаття надійшла до редакції збірника 15.11.21 року,
пройшла внутрішнє і зовнішнє рецензування
(Протокол засідання редакційної колегії
збірника № 4 від 22 грудня 2021 року)*