

УДК 669.168:669.26.0018

**О. П. Петров**, н.с., ORCID 0000-0001-6873-6685**С. В. Греков**, н.с., ORCID 0000-0002-2848-0999**В. П. Піптюк**, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-2915-1756**О. В. Кукса**, к.т.н., н.с.**І. Р. Снігура**, к.т.н., н.с., ORCID 0000-0001-6873-6685*Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України*

## **ПРОГНОЗНА ОЦІНКА ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НОВИХ КОМПОЗИЦІЙ ХРОМОВІСНИХ ФЕРОСПЛАВІВ**

**Анотація.** Метою роботи було прогнозування найбільш значущих фізико-хімічних характеристик (температури плавлення і щільності) нових хромовмісних феросплавів зі зниженим вмістом хрому і підвищеним вмістом кремнію. Застосована методика і критерії кількісної оцінки враховували мікрогетерогенність багатокomпонентних металевих розплавів, температуру плавлення і щільність. Інформація про ці характеристики необхідна для вивчення кінетики плавлення, засвоєння провідних елементів феросплавів металевим розплавом, визначення ефективності їх застосування. До вирішення завдань моделювання використаний оригінальний підхід, в якого основі лежить концепція фізико-хімічного моделювання процесів міжатомної взаємодії в розплавах, розроблена під керівництвом професора С. В. Приходько. Відповідно до розробленої концепції металеві розплави розглядаються як хімічно уніфіковані системи, а зміна їх складу впливає на комплекс фізичних і хімічних властивостей, обумовлених зміною параметрів їх електронної структури. Для оцінки та врахування впливу мікрогетерогенності структури розплавів феросплавних систем була застосована методика розрахунку критеріїв ( $\Delta Z'$  і  $\Delta d$ ), що характеризують ступінь різниці в електронному і структурному стані розплаву як хімічно уніфікованої системи, на відміну від механічної суміші їх вихідних компонентів. Використовуючи ці критерії та експериментальні були отримані значення найважливіших фізико-хімічних характеристик нових складів хромовмісних феросплавів, що відсутні в літературі. Результати розрахунку цих властивостей можуть бути використані для зміни і поліпшення характеристик хромовмісних феросплавів з метою розробки їх раціональних складів.

**Ключові слова:** хромовмісні феросплави, металеві розплави, параметри міжатомної взаємодії, критерії, характеристики.

**Посилання на цитування:** Прогнозна оцінка фізико-хімічних властивостей нових композицій хромовмісних феросплавів/ О. П. Петров, С. В. Греков, В. П. Піптюк, О. В. Кукса, І. Р. Снігура. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2022. Вип. 36. С. 414-429. DOI: 10.52150/2522-9117-2022-36-414-429.

**Стан проблеми.** Хром - один з важливих легуючих елементів, в значних кількостях використовується в чорній металургії. Його добавки, як до звичайних, так і до легованих сталей, покращують їх фізичні та експлуатаційні характеристики: зносостійкість, корозійну стійкість, жароміцність і т. д. Зміст хрому в сталях варіюється від десятих часток до 30...40 % і залежить від призначення і вимог до сталі [1-4]. У середньолегованих сталях вміст хрому становить 5...10%, у хромово-кременистих (X9C2, X10C2M) 6...10% хрому, у хромовій сталі мартенситного класу 10...17% хрому, в високохромових сталях з азотом (X28AN) 17...30% хрому. Хром входить до складу інструментальних сталей і для марок сталей, які покращують механічну обробку (швидкорізальні) та обробку тиском (холодна і гаряча штамповка). Хромонікелеві сталі аустенітних і аустенітно-феритних марок застосовуються в агресивних середовищах (морська вода), включаючи видобуток нафти і газу. Різноманіття хромовмісних сталей, що випускаються, вимагає застосування різних марок ферохрому. У загальному світовому виробництві феросплавів на частку хромових сплавів припадає близько 27 %. На сьогоднішній день чорна металургія споживає понад 70 % видобутої хромової сировини. В середньому витрата ферохрому на виробництво сталі становить ~ 2,5 кг/т.

В теперішній час виробництво хромовмісних сталей на вітчизняних металургійних підприємствах реалізується тільки за рахунок використання стандартних хромовмісних феросплавів, виробництво яких в Україні відсутнє. Наша країна має лише 0,1 % світових запасів хромових руд. Єдині розвідані запаси цих руд на Побужжі не розробляються, а потенційні ресурсні можливості пов'язані з хромітоносними масивами гіпербазитів Капітановського родовища. Його експлуатація дозволила б частково задовольнити вітчизняні потреби власною хромовою і хромонікелевою сировиною. Про те в них дуже низький вміст хрому (27-30 %) при високому вмісті заліза ( $Cr/Fe \leq 0,9$ ) і отримуваний гранулометричний склад тонкої фракції (після збагачення) не дозволяють виробляти вуглецевий ферохром в рудовідновлювальних печах.

У свою чергу, потреба української металургії в хромовмісних феросплавах становить (тис. тонн): низьковуглецевий ферохром – 86,8; високовуглецевий ферохром – 62,0; силіконовий – 19,7; середній вуглецевий ферохром – 5,5; хром металевий – 1,07). Серед феросплавів, що імпортуються в Україну, ферохром становить 59,2 %. З кожним роком розрив між зростаючим попитом металургів на феросплави хрому і зменшенням запасів багатих хромових руд буде збільшуватися. У зв'язку з цією обставиною неминучим фактом стає залучення у виробництво бідних хромових руд (з вмістом < 38-40 %  $Cr_2O_3$ ). Використання більш бідної хромом сировини призведе до зміни складу (в основному до зниження вмісту хрому), а отже, і характеристик феросплавів.

У технічній і довідковій літературі відсутні відомості про важливі фізико-хімічні характеристики хромовмісних феросплавів, а наявні обмежені дані суперечливі і вимагають подальших досліджень. Тому особливий науковий і практичний інтерес представляють методи визначення цих властивостей.

**Метою роботи** було прогнозування найбільш значущих фізико-хімічних характеристик (температури плавлення і щільності) нових хромовмісних феросплавів зі зниженим вмістом хрому і підвищеним вмістом кремнію.

Ефективність застосування феросплавів для легування сталі багато в чому залежить від їх фізико-хімічних характеристик, від яких визначають ступінь і стабільність засвоєння легуючих елементів, їх рівномірний розподіл в обсязі металевого розплаву. Вивченням фізико-хімічних властивостей феросплавів займалися М. І. Гасик, І. П. Казачков, П. В. Гельд, І. І. Серебренніков, А. І. Строганов, В. С. Власенко, В. С. Ігнат'єв, В. А. Віхлевщук, В. Г. Мізін, В. І. Жучков та інші. Опубліковано кілька узагальнюючих монографій, серед яких: Н. П. Лякишев, М. І. Гасик «Металургія хрому»; В. І. Грищенко, О. І. Поляков та інші «Хром Казахстану» [26]; В. П. Чернобровін, І. Я. Пашкеєв, Г. Г. Михайлов та інші «Теоретичні основи процесів отримання вуглецевого ферохрому з уральських руд»; Е. Е. Абдулабеков, К. К. Каскіна, А. К. Нурумгалієва «Теорія і технологія виробництва хромових сплавів»), що містять велику інформацію про теоретичні основи і практику виробництва хромових сплавів. Всі ці роботи внесли істотний внесок в розвиток феросплавного виробництва. Однак ряд питань (термодинаміка складних систем, активність компонентів, вивчення фізико-хімічних, теплофізичних властивостей і т. д.) вивчені недостатньо.

У даній роботі автори використовували раніше розроблений метод прогнозування оцінки найбільш значущих фізико-хімічних властивостей: температури плавлення ( $T_{пл}, ^\circ\text{C}$ ) і щільності ( $D, 10^3, \text{кг/м}^3$ ) нового складу ферохрому зі зниженим вмістом хрому - «Charg come».

**Основний матеріал дослідження.** Один з методів розрахунку властивостей багатокомпонентних систем, до яких відносяться феросплави, розроблений і реалізується в ІЧМ НАНУ. В її основі лежить оригінальна концепція фізико-хімічного моделювання процесів міжатомної взаємодії в розплавах і розчинах, розроблена під керівництвом професора Є. В. Приходько [5]. Згідно з концепцією, металеві розплави розглядаються як хімічно уніфіковані системи, зміна складу яких впливає на комплекс фізико-хімічних і хімічних властивостей шляхом зміни параметрів їх електронної структури. При вивченні взаємозв'язку між складом, будовою і властивостями металевих розплавів, в тому числі багатокомпонентних, показана доцільність використання моделі ОЦК - аналогічного пакета атомів. При цьому співвідношення між ефективними

зарядами ( $Z$ ) для першої ( $Z_1^x$ ) і другої ( $Z_2^y$ ) координаційної сфер переважної більшості металевих розплавів описується рівнянням:

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

У фізичному сенсі рівняння (1) висловлює в термінах зарядів інтегральну умову рівноваги сил тяжіння і відштовхування, що діють на будь-який атом в багатоконпонентній системі партнерами його відносин з сусідами в перших двох координаційних сферах. Використання структурної моделі відкрило нові можливості для напівемпіричного узагальнення експериментальних даних про властивості розплавів і продуктів їх кристалізації. Ці можливості пов'язані з розробкою єдиної форми кодування інформації про склад розплавів, з'єднань і розчинів у вигляді поєднання інтегральної і часткової моделі параметрів міжатомної взаємодії. Основними з них є хімічний еквівалент складу ( $Z'$ ), який узагальнює інформацію про заряди компонентів з ймовірністю утворення зв'язків різних типів, і структурний параметр ( $d$ ), який характеризує середньовзважену статистичну відстань між атомами в розплаві. Крім хімічного еквівалента і структурного параметра, в деяких випадках використовується електрохімічний параметр -  $tg\alpha$ , який характеризує зміну радіусів іонів при зміні їх зарядів. У фізичному сенсі кожен з цих параметрів є аналогом електронного ( $Z'$ ), розмірного ( $d$ ) і електрохімічного ( $tg\alpha$ ) факторів.

Слід зазначити, що використовувані критерії  $Z'$  і  $d$  характеризують розплави як однорідні системи. Це припущення певною мірою ідеалізує стан їх будови. Для системного дослідження впливу мікрогетерогенності розплавів на їх властивості пропонується розрахувати надмірні значення  $Z'$  і  $d$  [6-7]. Відповідні значення ( $\Delta Z'$ ) і ( $\Delta d$ ) визначаються як різниця між  $Z'$  і  $d$  для неупорядкованих систем і механічною сумішшю початкових компонентів цієї системи, тобто  $\Delta Z' = Z'_{cнл} - \sum Z'_i \times n_i$  і  $\Delta d = d_{cнл} - \sum d_i \times n_i$ , де  $n_i$  - атомна частка компонента розплаву.

Введення цих критеріїв виявилось корисним для теоретичного узагальнення експериментальних даних. Методика їх визначення і використання значно розширила наукову базу для вирішення проблеми аналітичного узагальнення наявної експериментальної інформації про вплив складу на структуру і властивості багатоконпонентних металевих розплавів, і, зокрема, феросплавів. Поряд з цим, за минулий час з моменту публікації робіт вищевказаних авторів в практиці світової металургійної промисловості відбулися певні зміни як в перебудові методів виплавки сталі, так і в вдосконаленні позапічних методів обробки рідкого металу, збільшенні частки виробництва сплавів і складних їх композицій. При цьому значно зросли вимоги сталеплавильної промисловості, зокрема, до якості хромовмісних феросплавів.

Температура плавлення - одна з основних характеристик феросплавів. Вона пов'язана зі швидкістю і повнотою засвоєння елементів сплаву. Про важливість цієї характеристики свідчить той факт, що стандарти низки закордонних країн містять не тільки хімічний склад сплаву, але і температуру його плавлення. У довідковій літературі температура кристалізації (плавлення) феросплавів задається або одним значенням, або діапазоном плавлення. Це пов'язано з відсутністю єдиної методики визначення температури плавлення феросплаву і точного поняття терміна «температура плавлення феросплавів». Феросплави, як багатокомпонентні системи, плавляться в діапазоні температур (liquidus - solidus). Аналогічним чином вказується склад сплаву або як вміст хімічних елементів, або як марка феросплаву. Це вимагає системного підходу до наявної інформації про експериментальні дані. Для більшості систем подвійних металів відомі діаграми станів, за якими завжди можна визначити початкову температуру кристалізації сплаву будь-якого складу, чого не можна зробити для багатокомпонентних систем, таких як феросплави. Така оцінка можлива тільки при певній похибці. Також не існує методів поділу ліній рідини від термодинамічних даних для таких складних систем. Тому температури кристалізації, як правило, визначають експериментальним шляхом. Для цього існують різні методи, але в більшості випадків їх можна вважати приблизними, так як фіксація висновків носить візуальний і суб'єктивний характер. Дані про температуру плавлення деяких феросплавів надто обмежені, а для більшості з них таких даних практично не існує. В. І. Жучков та ін. [8] вважають, що доцільно брати температуру початку їх кристалізації як характеристику температури плавлення ( $T_n$ ) феросплавів, оскільки вона, по-перше, є найважливішою в процесах засвоєння провідних елементів феросплавів залізовуглецевим розплавом. По-друге, ця температура є найбільш точною і точно визначається експериментальним шляхом. Для систем подвійного металу ( $T_n$ ) збігається з температурою рідини.

Вважається, що оптимальна температура плавлення феросплаву, призначеного для обробки сталі, повинна бути нижче температури оброблюваного рідкого металу (1550-1660°C). При цьому виявлено невідповідність даних про емпіричний інтервал плавлення, наприклад, високовуглецевого ферохрому марки ФХ800 (за даними [9] - 1500-1650°C, а по [10] - 1625-1674°C) не дозволяє з достатнім ступенем точності оцінити його застосування в легуванні сталі.

Щільність феросплаву також є важливою характеристикою властивостей феросплаву, так як впливає на положення і рух його шматка в розплаві, ступінь і стабільність засвоєння провідних елементів сплаву, швидкість його плавлення (розчинення) і рівномірність розподілу в обсязі металу. Це пояснюється тим, що щільність феросплаву визначає гідродинаміку руху шматка і інтенсивність процесів теплообміну.

Оцінити раціональну щільність феросплавів, з точки зору технологічності його використання, досить складно, про що свідчать неоднозначні дані різних авторів. На думку А. І. Строганова [11], оптимальною щільністю сплаву слід вважати щільність, рівну щільності оброблюваного рідкого металу, тому що при більш високій щільності сплав опуститься на дно ковша (дно печі), а при меншій щільності буде вбиратися шлаком [12]. Вплив щільності на швидкість розчинення феросплавних частинок в сталевій ванні показало, що в пересуванні більш повно беруть участь феросплавні частинки, що мають щільність, рівну щільності рідкого розплаву. І. П. Казачков [13] вважає, що феросплавні частинки, що мають щільність, рівну щільності рідини, найбільш повно беруть участь в пересуванні і швидше розчиняються. Інші автори [14] вважають, що щільність феросплаву повинна бути трохи більше щільності легованої сталі. Найбільш сприятливі умови для розчинення феросплаву створюються при повному зануренні шматка в розплав і інтенсивному відносному руху розплаву і шматка. Аналіз щільності ряду промислових феросплавів показав [15], що їх значення залежить від хімічного складу. Рекомендована щільність промислових феросплавів, призначених для обробки чавуну і сталі, становить 5,0-7,0 кг/м<sup>3</sup>, а в залежності від розмірів добавки феросплаву вказуються межі оптимальної щільності. Ферохром - один з небагатьох промислових феросплавів, який, на думку виробників, має щільність, яка близька до такої, що у рідкій сталі. Згідно [10], щільність стандартного високовуглецевого ферохрому, що випускається підприємствами, становить 6,75-7,3 кг/м<sup>3</sup>, низьковуглецевого ферохрому - 6,70-7,1 кг/м<sup>3</sup>.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Використовуючи вищевказаний метод, нами раніше було проведено системне дослідження комплексу фізико-хімічних і теплофізичних властивостей ферохрому стандартних марок і комплексних хромовмісних феросплавів [16-18]. Так, для побудови прогностичних моделей стандартного (що містить  $\geq 65$  % хрому) ферохрому використовувалися експериментальні дані, для яких в літературі вказувався хімічний склад. В результаті були отримані рівняння (2-4). Оцінювалася температура плавлення низько-, середньо- і високовуглецевого ферохрому різних марок:

$$T_{лік.} = 15960 + 1307,7 Z^y - 5499,7 d - 1480,5 \Delta Z^y + 23768 \Delta d \quad (2)$$

$$T_{лік.} = 349,9 + 4466,9 Z^y - 1712,7 d - 4430,4 \Delta Z^y + 7113,3 \Delta d \quad (3)$$

$$T_{лік.} = 6412 - 2745,9 Z^y + 851 \Delta Z^y - 166,6 \Delta d \quad (4)$$

Для ілюстрації адекватності результатів розрахунку до відповідних експериментальних даних [10, 19, 20] в табл. 1 наведені порівняння значень температури початкової кристалізації ( $T_{лік.}$ , °C) для низько-, середньо- і високовуглецевого ферохрому різних марок. Як свідчать дані таблиці 1, розрахункові значення температури рідини узгоджуються з

експериментальними даними. За наведеним вище методом моделювання з використанням запропонованих фізико-хімічних критеріїв розрахована щільність стандартних марок ферохрому. Встановлено, що для практичного застосування розрахунку уявної щільності ( $D_{уяв}$ ) стандартного ферохрому (ГОСТ 4757-91 і ISO 5448-81) доцільно використовувати раніше отримане рівняння (5).

$$D_{уяв} = 37,8 - 29,8 Z^y + 6,1 d + 18,9 \Delta Z^y - 2,6 \Delta d \quad (5)$$

Таблиця 1 – Порівняння початкової температури кристалізації ( $T_{lic}, ^\circ C$ ) різних груп і марок ферохрому, що наведена в літературі, з розрахунковими значеннями.

Група ферохрому*	Література			За діаграмою стану	Рівнянням (2-4)
	[10]	[19]	[20]		
Низьковуглецева (Cr 65-75; $C \geq 0,01-0,5$ )	1610	1670	1690	1650	1655
Середньовуглецева (Cr 65-75; $C \geq 0,5-4,0$ )	1500	1580	1600	1580	1560
Високовуглецева (Cr 62-72; $C \geq 4,0-10,0$ )	1650	1660	1650	1650	1645

\* у дужках – межі вмісту хрому та вуглецю, %.

Порівняння розрахункових значень щільності стандартних марок низько-, середньо- і високовуглецевого ферохрому з літературними даними (табл. 2) свідчить про те, що прогноз достатній для практичних цілей. Для деяких груп ферохрому розрахункові значення уявної щільності кілька занижені, що, ймовірно, можна пояснити неповним хімічним складом феросплавів, представленим в довідковій літературі.

Таблиця 2 – Порівняння даних уявної щільності ( $D_{уяв} \times 10^3 \text{кг/м}^3$ ) для низько-, середньо- і високовуглецевих груп ферохрому, наведених в літературі з розрахунковими значеннями.

Група ферохрому	Література			Адитивний метод	Результати розрахунків за рівнянням (5)
	[10]	[21]	[22]		
Низьковуглецева	6,83	7,10	7,35	7,28	6,86-7,19
Середньовуглецева	6,85-7,28	6,9	7,1-7,3	7,5	6,61-6,75
Високовуглецева	6,75-6,93	6,3	6,7-7,1	6,8	6,51-6,89

Оскільки стандартні феросплави часто не мають необхідних технологічних характеристик з точки зору їх ефективного використання і якості обробки металевого розплаву, розвиток прогресивної технології виробництва сталі змушений підлаштовуватися під існуючий сортамент феросплавів. Були запропоновані [23] нові композиції ферохрому систем Fe-Cr-C-Si-Mn і Fe-Cr-C-Si-Mn-V. Автори даної роботи застосували

вищевказаний метод для прогнозової оцінки фізико-хімічних характеристик хромовмісних феросплавів нових складів. На основі експериментальних даних [24] методом кореляційно-регресійного аналізу були випробувані аналітичні вирази (6 і 7), записані з точки зору параметрів моделі, що дозволило оцінити фізико-хімічні властивості хромовмісних складних феросплавів різного хімічного складу, в тому числі і нових композицій.

$$T_{пл} = 2091,2 + 125,3 Z^y - 121,8 d - 817,0 \Delta Z^y - 2615,5 \Delta d \quad (6)$$

$$D_{уяв} = 3,81 - 1,59 Z^y + 172,0 d + 1,33 \Delta Z^y - 21,5 \Delta d \quad (7)$$

Нижче в табл. 3 наведені нормативні склади різних груп ферохрому і розрахункові значення отриманих параметрів моделювання.

Таблиця 3 – Діапазони змін хімічного складу в різних групах ферохрому (ГОСТ 4757-91 та ІСО 5448-81) та відповідні їм розрахункові значення інтегральних параметрів.

Група ферохрому	Вміст елементів, % від маси.					Інтегральні параметри			
	Не менше	Не більше ніж				$Z^y$	$d$	$\Delta Z^y$	$\Delta d$
		Cr	C	Si	P				
Низьковуглецева	65 - 68	0,01-0,50	0,8-2,0	0,02-0,03	0,02-0,03	1,9725- 2,0118	2,7575- 2,8259	0,5758- 0,6399	-0,0353- -0,0204
Середньовуглецева	65	1,0-4,0	2,0	0,03	0,04	2,0161- 2,0212	2,5061- 2,7138	0,6542- 0,7119	-0,0644- -0,0440
Високовуглецева	65	6,5- 9,0	2,0	0,03	0,05-0,06	1,9760- 2,0038	2,2803- 2,3802	0,7333- 0,7384	-0,0580- -0,0430

Значення температури плавлення і щільності феросплавів хрому різних складів, отриманих розрахунковим методом, порівнювали з літературними даними (рис. 1). На рисунку порівнюються розрахункові і експериментальні значення щільності ( $D_{уяв}$ ) і температура ліквідус ( $T_{лік}$ ) хромовмісних феросплавів різних груп і хімічного складу. Ці дані свідчать про те, що отримані розрахункові значення (за рівняннями (6) і (7)) в цілому можуть бути визнані прийнятними в порівнянні з експериментальними даними.



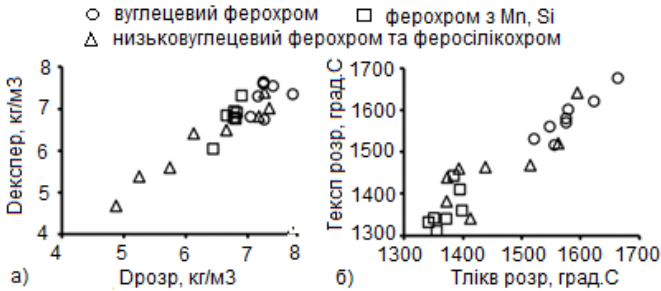


Рисунок 1 – Порівняння експериментальних і розрахункових значень уявленої щільності (а) і температури (б) феросплавів хрому.

Відповідно до діючих стандартів, ферохром, який використовується в даний час у вітчизняній металургії, містить від 62 % хрому. При цьому стандарт СРСР по ферохрому (ГОСТ 4757-91) останнім часом був максимально наближений до міжнародного стандарту ISO 5448-91. Вперше були змінені норми вмісту основних елементів в ферохромі в порівнянні з попередніми: знижені нижні межі вмісту хрому (не менше 45 %) і збільшені верхні межі вмісту кремнію (до 10 %) проти - не менше 62 % і не більше 2 % відповідно. Ця обставина дозволила розширити сферу використання бідних хромових руд різних родовищ зі зниженим співвідношенням Cr/Fe. Використання такої хроморудної сировини супроводжується отриманням нових складів вироблених з нього феросплавів, а отже, і зміною їх фізико-хімічних і споживчих характеристик. У зв'язку з цим виникає необхідність вивчення властивостей знову отриманих хромовмісних феросплавів (як ферохромових, так і складних сплавів), на основі яких і можуть бути побудовані їх раціональні склади. При виплавці хромовмісних сталей на закордонних підприємствах широке розповсюдження отримала технологія з використанням вуглецевих марок ферохрому зі зниженим вмістом хрому, так званим «Charg chrome». Температура плавлення «Charg chrome» може становити до 1579°C (табл. 4), а стандартного ферохрому з порівняно однаковим вмістом вуглецю - до 1660°C (табл. 1 та 4). Щільність «Charg chrome» може становити до  $7,25 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> (табл. 4), а стандартного ферохрому з таким же вуглецем - до  $7,72 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> (табл. 3 та 4). Такі значення є більш прийнятними для сплавів, призначених для обробки сталі, на відміну від стандартного ферохрому. Основними світовими виробниками «Charg chrome» є феросплавні підприємства Південної Африки і Фінляндії. Такий ферохром містить, як правило, % > 45 Cr; 6-8C; 1,5-10Si;  $\leq 0,03$  P;  $\leq 0,05$ S. Крім виробництва хромових сталей, «Charg chrome» використовується для виробництва середньовуглецевого ферохрому конвертерними процесами. Досвіду отримання і використання

«Charg some» в колишніх країнах СНД практично не було. На думку авторів, одним з факторів, що стримують виробництво і споживання нових видів сплавів (як «Charg some», так і комплексних), є відсутність інформації про споживчі характеристики цих феросплавів. Як вказувалося вище, вирішення питання про виробництво нових видів сплавів вимагає, зокрема, знання їх фізико-хімічних характеристик, що впливають на поведінку і засвоєння провідних елементи сплавів при обробці рідких металевих розплавів. Тому була проведена прогнозна оцінка температури плавлення і щільності «Charg some» (№№ 1-3 в табл. 4) в порівнянні з найбільш використовуваним стандартним вуглецевим ферохромом марки ФХ650 (№№ 4, 5 в табл. 4).

Таблиця 4 – Хімічний склад і прогнозні значення температури плавлення і щільності деяких феросплавів хрому.

№	Хімічний склад <sup>*)</sup> , %			Температура плавлення, °С	Щільність, 10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup>
	Cr	Si	C		
1	53,3	0,6	8,1	1579	7,25
2	52,2	4,8	7,5	1548	7,17
3	53,0	10,3	6,8	1521	7,04
4	63,0	0,2	8,3	1624	7,41
5	66,3	0,3	7,2	1664	7,72

\*) Решта – залізо і домішки.

В цілому отримані дані показали, що «Charg some» має більш технологічні властивості в порівнянні зі стандартним вуглецевим ферохромом при його застосуванні для обробки залізувуглецевих розплавів. Збільшення вмісту кремнію з 0,6 до 10,3 % при незначному зниженні вмісту вуглецю з 8,1 до 6,8 % і відносно постійному вмісті Cr (~53 %) призводить до зниження температури плавлення з 1579 до 1521°С. Виходячи з літератури [25], збільшення вмісту хрому від 63 % і більше призведе до підвищення температури початку кристалізації високовуглецевого ферохрому. Наприклад, ферохром, що містить 70,5 % Cr; 8,5 % C; 0,4 % Si, має температуру плавлення 1674°С. Зниження значень температури плавлення «Charg some» має підвищити ступінь засвоєння хрому при легуванні сталі.

Щільність ферохрому в певній мірі залежить від вмісту кремнію і в меншій мірі від кількості хрому в сплаві. Збільшення вмісту кремнію з 0,6 до 10,3 % призводить до зниження щільності з 7,25 до 7,04·10<sup>3</sup> кг/м<sup>3</sup>. Збільшення вмісту хрому на 13 % (стандартна марка ферохрому - № 5 в табл. 4) збільшує щільність до 7,72·10<sup>3</sup> кг/м<sup>3</sup>. Ефективним способом зниження щільності хромовмісних феросплавів до раціональних значень є підвищення вмісту кремнію в сплаві. Збільшення вмісту вуглецю в ферохромі при постійному вмісті інших елементів знижує щільність в меншій мірі. Порівняння представлених результатів показало, що «Charg

сгоме» має більш сприятливі значення щільності ніж стандартні марки.

### Висновки

Проведена прогнозна оцінка і визначені значення температури плавлення і щільності нових складів хромовмісних феросплавів «Сharg сгоме», які відрізняються від стандартних марок ферохрому підвищеним вмістом кремнію і зниженим вмістом хрому (%):  $\geq 52 \text{ Cr}$ ; 6-8 C; 1,5-10 Si. Отримані дані свідчать про достатню збіжність експериментальних і розрахункових значень розглянутих характеристик хромовмісних феросплавів. Показано принципову можливість використання отриманих аналітичних залежностей для прогновної оцінки сервісних характеристик хромовмісних феросплавів нових композицій, які повинні забезпечити більш ефективне використання, в порівнянні зі стандартними марками ферохрому. Організація виробництва нових феросплавів хрому може дати можливість використовувати бідні хромові руди. Визначено, що зниження вмісту хрому і підвищення вмісту кремнію в сплаві покращує його характеристики і має сприяти кращому засвоєнню хрому металевим розплавом.

### Перелік посилань

1. Гольдштейн М. І., Грачов С. В., Векслер Ю. Г. Спеціальні сталі. М. : МІСІС, 1999. 452 с.
2. Поволоцький Д. Я., Гудим Ю. А. Провідства з нержавіючої сталі. Челябінськ : Видавництво СУСУ, 1998. 236 с.
3. Поволоцький Д. Я. Фізико-хімічні основи процесів виробництва сталі. Челябінськ : Изд-во СУСУ, 2006. 183 с.
4. Рошин В. С., Рошин А. В. Електрометалургія і металургія сталі. Челябінськ : Видавництво СУСУ, 2013. 572 с.
5. Приходько Є. В. Про фізико-хімічну модель будови металевих розплавів. *Изв. АН ССРСР. Метали*. 1986. № 4. С. 20–26.
6. Приходько Є. В., Петров А. Ф. Фізико-хімічні критерії оцінки ступеня мікронеоднорідності металевих розплавів. *Металофізика і нові технології*. 1998. Т. 20. № 7. С. 64–74.
7. Приходько Є. В., Петров А. Ф. Роль спрямованої міжатомної взаємодії у формуванні мікро-гетерогенної структури металевих розплавів. *Известия вузов. Чорна металургія*. 1995. № 12. С. 5–12.
8. Жучков В. І., Ватолін Н. А., Зав'ялов А. Л. Оплоченки плавлять феросплави. *Известия АН ССРСР, Метали*. 1982. № 4. С. 45–46.
9. Сафіуллін Р. Б., Безобразов С. В. Температура плавлення промислових сортів ферохрому. *Чорна металургія. Ін-т «Черметінформація»*. 1974. № 19. С. 6–47.
10. Мізін В. Г., Чирков Н. А., Ігнат'єв В. С. Феросплави: референтне видання. М. : Металургія, 1992. 415 с.
11. Строганов А. І. Вимоги до феросплавів для розкислення і легування. *Виробництво феросплавів*. Новокузнецьк. 1980. С. 5–24.
12. Парімончик І. Б., Казачков І. П., Резчик В. Г. Моделювання процесу розчинення феросплавів у сталеплавильному ковші. *Металургія і коксохімія*.

1972. № 31. С. 62-65.
13. Казачков І. П. Легування сталі. К. : Техніка, 1982. 120 с.
  14. Власенко В. Є., Фролов В. Ф. Про критерії вибору феросплавного асортименту *Металургія марганця: Тез. докл. Всесоюз. совещан. Ін-т Металургії АН РСР*. М., 1975. С. 79-81.
  15. Ігнат'єв В. С., Віхлевщук В. А., Торевський В. С. Удосконалення технології мікросплавів сталевих феросплавів і лігатур рідкоземельних елементів. *Інформ. листівка. Запоріжжя: ЦНТІ*, 1985.
  16. Модель прогнозування температури плавлення ферохрому фізико-хімічним методом / Е. В. Приходько, В. П. Піптюк, І. Н. Логозинський, А. Ф. Петров, С. В. Греков. *Металургійна і гірничодобувна промисловість*. 2012. № 4. С. 49-53.
  17. Прогнозування щільності стандартних марок ферохрому методом фізико-хімічного моделювання / Е. В. Приходько, В. П. Піптюк, І. Н. Логозинський, А. Ф. Петров, С. В. Греков. *Металургійна і гірничодобувна промисловість*. 2013. № 6. С. 37-40.
  18. Моделювання фізико-хімічних характеристик складних хромовмісних феросплавів / Д. М. Тогобицька, А. Ф. Петров, І. Р. Снігура та ін. *Матеріали науково-практичної конференції з міжнародною участю та елементи школи молодих вчених «Перспективи розвитку металургії та машинобудування з використанням завершених фундаментальних досліджень і НДД»*. Єкатеринбург : Уральське відділення РАН, 2020. С. 90-99.
  19. Макуров С. Л., Мілянук А. Н. Експериментальне та розрахункове визначення теплофізичних властивостей промислових феросплавів. *Металургійна та гірничодобувна промисловість*. 2002. № 10. С. 128-131.
  20. Фізичні властивості легуючих сплавів / В. С. Ігнат'єв, І. А. Беспалькова, В. С. Тхоревський та ін. *ЦНШТЕІ чорної металургії*. 1973. Вип. 2. 16 с.
  21. Комплексне дослідження властивостей легуючих і мікролегуючих матеріалів / В. А. Віхлевщук, В. С. Ігнат'єв, Ю. Н. Омес, А. В. Кекух. *Теорія і практика металургії*. 1999. № 3. С. 29-30.
  22. Охотський В. Б. Моделі металургійних систем. *Системні технології*. Дніпропетровськ, 2006. 285 с.
  23. Комплексні дослідження високотемпературних фізико-хімічних процесів і вдосконалення технології отримання хромовмісних феросплавів / В. І. Жучков, О. В. Заякін, Н. А. Андреев, В. І. Афанасьєв. *Фізична хімія і технологія в металургії: сб. тр. Єкатеринбург: УрО РАН*, 2015. С. 271-280.
  24. Склад і службові характеристики хромових феросплавів / В. І. Жучков, Н. А. Андреев, О. В. Заякін. *Сталь*. 2013. № 5. С. 36-37.
  25. Гасик М. І., Лякишев Н. П. Теорія і технологія виробництва феросплавів. М. : Металургія, 1999. 784 с.
  26. Хром Казахстан: Справочник. Свойства хрома. Геология и геохимия. Минералогия и петрография. Разведка и запасы. Добыча. Обогащение / Под. общ. ред. М. И. Гасика. М. : Металлургия, 2001. 416 с.

## References

1. Goldshyteyn M. I., Grachev S. V., Veksler Yu. G. *Spetsialnyye stali [Special steels]*. Moskva: MISIS, 1999. [in Russian].
2. Povolotskiy D. Ya., Gudim Yu. A. *Proizvodstvo nerzhavayushchey stali. [Production*

- of stainless steel*]. Chelyabinsk: YUUrGU, 1998. [in Russian]
3. Povolotskiy D. Ya. *Fiziko-khimicheskiye osnovy protsessov proizvodstva stali. [Physical and chemical bases of steel production processes]*. Chelyabinsk: YUUrGU, 2006. [in Russian].
  4. Roshchin V. Ye., Roshchin A. V. *Elektrometallurgiya i metallurgiya stali. [Electrometallurgy and steel metallurgy]*. Chelyabinsk: YUUrGU, 2013. [in Russian].
  5. Prikhodko E. V. O fiziko-khimicheskoy modeli struktury metallicheskih rasplavov [On the physicochemical model of the structure of metal melts]. *Izv. AN SSSR. Metallurgiya – Izv. Academy of Sciences of the USSR. Metals*. 1986. No. 4. P. 20–26. [in Russian]
  6. Prikhodko E. V., Petrov A. F. Fiziko-khimicheskiye kriterii dlya otsenki stepeni mikroneodnorodnosti metallicheskih rasplavov [Physico-chemical criteria for assessing the degree of microheterogeneity of metallic melts]. *Metallofizika i noveyskiye tekhnologii – Metallophysics and latest technologies*, 1998. Vol. 20, No. 7, P. 64-74. [in Russian].
  7. Prikhodko E. V., Petrov A. F. Rol napravlenogo mezhatomnogo vzaimodeystviya v formirovani mikroneodnorodnogo stroyeniya metallicheskih rasplavov [The role of directed interatomic interaction in the formation of a microheterogeneous structure of metal melts]. *Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya – Izv. universities. Ferrous metallurgy*, 1995. No. 12. P. 5–12. [in Russian].
  8. Zhuchkov V. I. Vatolin N. A., Zavyalovm A. L. O temperaturakh plavleniya ferrosplavov [On the melting temperatures of ferroalloys]. *Izvestiya AN SSSR, Metallurgiya – Izv. Academy of Sciences of the USSR. Metals*, 1982. No. 4. P. 45-46. [in Russian].
  9. Safiullin R. B., Bezobrazov S. V. Temperatura plavleniya promyshlennykh sortov ferrokroma [Melting temperature of industrial grades of ferrochrome]. *Chernaya metallurgiya. Byul. In-ta «Chermetinformatsiya» – Ferrous metallurgy. Bull. Institute "Chermetinformation"*. 1974. No. 19, P. 46-47 [in Russian].
  10. Mizin V. G., Chirkov N. A., Ignatyev V. S. *Ferrosplavy: spravochnoye izd. [Ferroalloys: reference ed]*. Moskva: Metallurgiya, 1992. [in Russian].
  11. Stroganov A. I. *Trebvaniya k ferrosplavam dlya raskisleniya i legirovaniya [Requirements for ferroalloys for deoxidation and alloying]*. Proizvodstvo ferrosplavov – Production of ferroalloys. Novokuznetsk, 1980. P. 5–24. [in Russian].
  12. Parimonchik I. B., Kazachkov I. P., Rezhchik V. G. Modelirovaniye protsessa rastvoreniya ferrosplavov v staleplavilnom kovshe. [Modeling of the process of dissolution of ferroalloys in a steel-smelting ladle]. *Metallurgiya i koksokhimiya – Metallurgy and coke chemistry*. 1972, No. 31. P. 62-65. [in Russian].
  13. Kazachkov I. P. *Legirovaniye stali [Steel alloying]*. Kyiv: Tekhnika, 1982. [in Russian].
  14. Vlasenko V. Ye., Frolov V. F. O kriteriyakh pri vybore sortamenta ferrosplavov [On the criteria for choosing a range of ferroalloys]. *Metallurgiya margantsa - Metallurgy of manganese: Tez. dokl. Vsesoyuz. soveshch. In-t Metallurgii AN SSSR. - Proceedings. report All-Union. meeting Institute of Metallurgy of the Academy of Sciences of the USSR*. Moskva, 1975. P. 79-81. [in Russian].
  15. Ignatyev V. S., Vikhlevshchuk V. A., Tkhorevskiy V. S. *Sovershenstvovaniye tekhnologii mikrolegirovaniya stali ferrosplavami i ligaturami redkozemelnykh*

- elementov [Improving the technology of microalloying steel with ferroalloys and ligatures of rare earth elements]*. Inform. listok - Inform. sheet. Zaporozhye: TSNTI, 1985. [in Russian].
16. Prikhodko E. V., Piptyuk V. P., Logozinskiy I. N., Petrov A. F., Grekov S. V. (2012). Modelnoye prognozirovaniye temperatury plavlениya ferrokroma fiziko-khimicheskim metodom [Model prediction of the melting temperature of ferrochromium by the physicochemical method]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost - Metallurgical and Mining Industry*. 2012. No. 4. P. 49–53. [in Russian].
  17. Prikhodko E. V., Piptyuk V. P., Logozinskiy I. N., Petrov A. F., Grekov S. V. (2013). Prognozirovaniye plotnosti standartnykh marok ferrokroma metodom fiziko-khimicheskogo modelirovaniya [Prediction of the density of standard ferrochrome grades by the method of physicochemical modeling]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost - Metallurgical and Mining Industry*. 2013. No. 6. P. 37–40. [in Russian].
  18. Togobitskaya D. N. et al. Modelirovaniye fiziko-khimicheskikh kharakteristik kompleksnykh khromsoderzhashchikh ferrosplavov [Modeling of physical and chemical characteristics of complex chromium-containing ferroalloys]. Trudy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem i elementami shkoly molodykh uchenykh «Perspektivy razvitiya metallurgii i mashinostroyeniya s ispolzovaniyem zavershennykh fundamental'nykh issledovaniy i NIOKR». Abstracts of papers: *Proceedings of the scientific-practical conference with international participation and elements of the school of young scientists "Prospects for the development of metallurgy and mechanical engineering using completed fundamental research and R&D"*, Yekaterinburg: UrO RAN, 2020. P. 90–99. [in Russian].
  19. Makurov S. L., Milyanyuk A. N. (2002). Eksperimentalnoye i raschetnoye opredeleniye teplofizicheskikh svoystv promyshlennykh ferrosplavov [Experimental and computational determination of the thermophysical properties of industrial ferroalloys]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost - Metallurgical and Mining Industry*. 2002. No. 10. P. 128–131. [in Russian].
  20. Ignatyev V. S., Bepalkova I. A., Tkhorvskiy V. S. et al. Fizicheskiye svoystva legiruyushchikh splavov. [Physical properties of alloying alloys]. *TSNIITEII chernoy metallurgii - TsNIITEII ferrous metallurgy*. 1973. Issue 2, 16 p. [in Russian].
  21. Vikhlevischuk V. A. Ignatyev V. S., Omes Yu. N., Kekukh A. V. Kompleksnoye issledovaniye svoystv legiruyushchikh i mikrolegiruyushchikh materialov [Comprehensive study of the properties of alloying and microalloying materials]. *Teoriya i praktika metallurgii – Theory and practice of metallurgy*. 1999. No. 3. P. 29 – 30. [in Russian].
  22. Okhotskiy V. B. Modeli metallurgicheskikh sistem [Models of metallurgical systems]. Dnepropetrovsk: *Sistemnyye tekhnologii - System technologies*, 2006. [in Russian].
  23. Zhuchkov V. I., Zayakin O. V., Andreyev N. A., Afanasyev V. I. Kompleksnyye issledovaniya vysokotemperaturnykh fiziko-khimicheskikh protsessov i sovershenstvovaniye tekhnologii polucheniya khromsoderzhashchikh ferrosplavov [Comprehensive studies of high-temperature physical and chemical processes and

- improvement of the technology for obtaining chromium-containing ferroalloys] *Fizicheskaya khimiya i tekhnologiya v metallurgii - Physical Chemistry and Technology*. Yekaterinburg: UrO RAN, 2015. P. 271–280. [in Russian].
24. Zhuchkov V. I., Andreyev N. A., Zayakin O. V. Sostav i sluzhebnyye kharakteristiki khromovykh ferrosplavov [Composition and performance characteristics of chromium ferroalloys]. *Stal – Steel*. 2013. No. 5. P. 36–37. [in Russian].
  25. Gasik M. I., Lyakishev N. P. Teoriya i tekhnologiya proizvodstva ferrosplavov [Theory and technology of production of ferroalloys] Moskva: Metallurgiya, 1999. [in Russian].
  26. Gasik, M. I. (Eds). *Khrom Kazakhstana: Spravochnik. Svoystva khroma. Geologiya i geokhimiya. Mineralogiya i petrografiya. Razvedka i zapasy. Dobycha. Obogashcheniye*. [Chrome of Kazakhstan: Handbook. Chrome properties. Geology and geochemistry. Mineralogy and petrography. Exploration and reserves. Mining. Enrichment]. Moskva, Metallurgiya, 2001. [in Russian].

**A. F. Petrov**, Researcher, ORCID 0000-0001-6873-6685

**S. V. Grekov**, Researcher, ORCID 0000-0002-2848-0999

**V. P. Pipyuk**, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-2915-1756

**O. V. Kuksa**, Ph. D. (Tech.), Researcher

**I. R. Snigura**, Ph. D. (Tech.), Researcher, ORCID 0000-0001-6873-6685

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

### **PREDICTIVE EVALUATION OF PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF NEW COMPOSITIONS OF CHROMIUM-CONTAINING FERROALLOYS**

**Summary.** The aim of the work was to predict the most significant physicochemical characteristics (melting temperature and density) of new chromium-containing ferroalloys with reduced chromium content and increased silicon content. The applied methodology and criteria for quantitative assessment took into account microheterogeneity of multicomponent metal melts, melting temperature and density. Information about these characteristics is necessary for studying the kinetics of melting, assimilation of the leading elements of ferroalloys by the metal melt, and determining the efficiency of their use. An original approach is used to solve the modeling tasks, which is based on the concept of physicochemical modeling of interatomic interaction processes in melts, developed under the leadership of Professor E. V. Prykhodko. According to the developed concept, metal melts are considered as chemically unified systems, and a change in their composition affects a complex of physical and chemical properties caused by a change in the parameters of their electronic structure. To evaluate and take into account the influence of the microheterogeneity of the structure of melts of ferroalloy systems, the method of calculating criteria ( $\Delta Z_y$  and  $\Delta d$ ) was used, characterizing the degree of difference in the electronic and structural state of the melt as a chemically unified system, as opposed to a mechanical mixture of their initial components. Using these criteria and experimental ones, the values of the most important physicochemical characteristics of new compositions of chromium-containing ferroalloys, which are missing in the literature, were obtained. The results of the calculation of these properties can be used to change and improve the characteristics of chromium-containing

ferroalloys in order to develop their rational compositions.

**Key words:** chromium-containing ferroalloys, metal melts, interatomic interaction parameters, criteria, characteristics.

**For citation:** Prohnozna otsinka fizyko-khimichnykh vlastyvostei novykh kompozytsii khromovmistnykh ferosplaviv [Predictive evaluation of physical and chemical properties of new compositions of chromium-containing ferroalloys] / A. F. Petrov, S. V. Grekov, V. P. Piptyuk, O. V. Kuksa, I. R. Snigura // *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*. 2022. Collection 36. P. 414-429. [In Ukrainian]. DOI: 10.52150/2522-9117-2022-36-414-429.

*Стаття надійшла до редакції збірника 03.11.2022 р.  
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 5 від 20.12.2022 р.)*