

А.Ф. Петров, н.с., ORSID 0000-0001-7855-9267

И.Р. Снигура, м.н.с., ORSID 0000-0001-5872-7403

Л.А. Головки, к.х.н., с.н.с., ORSID 0000-0002-3872-5950

Н.А. Цюпа, к.т.н., с.н.с.

*Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины*

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВРЕМЕНИ ПЛАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ ФЕРРОСПЛАВОВ МЕТОДОМ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

**Аннотация.** Целью работы является реализация нового подхода к описанию продолжительности плавления (растворения) комплексных ферросплавов нового поколения при раскислении и легировании металлического расплава. Этот подход ориентирован на разработку методики и критериев для количественной оценки и учета микронеоднородности многокомпонентных металлических расплавов и прогнозирования на их основе такой важной для сталеплавильного производства характеристики, как время плавления ферросплавов, описание межатомного взаимодействия в которых позволяет глубже понять механизм процессов легирования, раскисления и рафинирования стали. В работе использован разработанный в Институте черной металлургии НАН Украины подход к решению задач моделирования закономерностей, которые связывают между собой состав, структуру и свойства расплавов. В его основе лежит оригинальная концепция физико-химического моделирования процессов межатомного взаимодействия в расплавах и растворах, разработана Е.В. Приходько. Согласно ей, металлические расплавы рассматриваются как химически единые системы. Изменение их состава сказывается на комплексе физико-химических свойств через изменение параметров их электронной структуры. Для оценки и учета влияния микронеоднородности строения металлических расплавов ферросплавного производства применена методика расчета критериев ( $\Delta Z^0$  и  $\Delta d$ ), характеризующие степень различия электронного и структурного состояния расплава, как химически единой системы, от механической смеси их исходных компонентов и параметр  $\rho l$ , учитывающий кластерообразование в металлических расплавах. С использованием указанных критериев и имеющихся экспериментальных данных получены аналитические зависимости для расчета времени плавления комплексных (марганец, ванадий, ниобий и борсодержащих) ферросплавов нового поколения. Это позволит оценить их эффективность применения, связанную с максимально высоким усвоением основных элементов, влияет на расход сплава, стабильность и стоимость обрабатываемого металла.

**Ключевые слова:** ферросплавы, металлические расплавы, параметры межатомного взаимодействия, прогнозные модели

**Ссылка для цитирования:** Петров А.Ф., Снугура И.Р., Головки Л.А., Цюпа Н.А. Прогнозирование времени плавления комплексных ферросплавов методом физико-химического моделирования // «Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вып.33. – С.205-214. (In Russian). DOI 10.52150/2522-9117-2019-33-205-214

**Состояние проблемы.** Время плавления является одной из важнейших характеристик ферросплавов, которая позволяет определить как степень эффективности их усвоения, так и распределения ведущих элементов сплава в железоуглеродистом расплаве. Создание новых марок ферросплавов, определение способов их ввода в сталь тесно связаны с необходимостью изучения их свойств зависящих от комплекса физико-химических индивидуальных особенностей добавок. В настоящее время существуют различные экспериментальные и расчетные методы изучения времени плавления ферросплавов. Экспериментальные методы чаще всего связаны с измерением скорости изменения массы образца ферросплава путем непрерывного или периодического взвешивания [1,2].

Анализ литературных данных по экспериментальным методам определения времени плавления свидетельствует не только о важности для сталеплавильного производства данного параметра, но и о том, что они сложны, недостаточно учитывают реальные условия растворения ферросплавов и в ряде случаев имеют неудовлетворительную точность. В научной литературе достаточно широко используются методы математического моделирования плавления кусковых ферросплавов в жидкой стали [3,4]. В этих работах решается система дифференциальных уравнений с соответствующими граничными и начальными условиями. Обладая удовлетворительной сходимостью с практикой, они все же сложны для оперативного использования в промышленных условиях.

**Цель работы** – выявление влияния химического состава комплексных ферросплавов на время их плавления с целью выбора наиболее оптимальной композиции легирующих и рафинирующих элементов.

#### **Основной материал исследования.**

В настоящей работе на основе оригинальной концепции направленной химической связи разработанной Приходько Э.В. рассмотрена возможность прогнозирования времени плавления комплексных ферросплавов [5,6].

Для численных расчетов и исследования взаимосвязи между составом, строением и свойствами расплавов ферросплавного производства предлагается принять основные положения концепции направленной химической связи, согласно которым расплав – это целостная химически единая система и ввести в качестве модельных параметры межатомного взаимодействия ( $Z^y$  – параметр зарядового

состояния системы,  $e$ ;  $d$  – среднестатистическое межъядерное расстояние,  $10^{-1}$  нм;  $tg\alpha$  – константа для каждого элемента, характеризующая градиент изменения радиуса иона при изменении его заряда;  $\rho_l$  – средневзвешенная направленная зарядовая плотность атомов в системе,  $e/\text{нм}$ ).

Как показывает многолетний опыт использования методики «свертки» химического состава на основе параметров межатомного взаимодействия является эффективным научно-обоснованным подходом для направленного формирования свойств металлических расплавов.

Расчет интегральных параметров для металлических расплавов проводится в специализированном проблемно-ориентированном комплексе «Металл» (рис. 1).

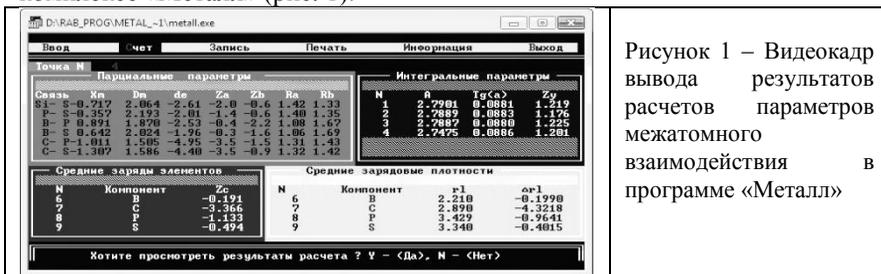


Рисунок 1 – Видеокادر вывода результатов расчетов параметров межатомного взаимодействия в программе «Металл»

Рассчитанные значения модельных параметров для некоторых комплексных марганецсодержащих ферросплавов на основе данных работы [7] представлены в табл. 1.

Анализ взаимосвязей параметров межатомного взаимодействия с временем плавления марганецсодержащих ферросплавов позволил установить, что наиболее информативным является параметр микронеоднородности  $\rho_l$ , который учитывает кластерообразование в металлических расплавах, как показано в работе [8].

Учет микронеоднородности металлических расплавов (рис. 2, а, б) является важным резервным потенциалом для расширения описательных возможностей физико-химических процессов протекающих на границе раздела «добавка-металл-шлак», повышения качества металлопродукции и технико-экономических показателей плавки.

Поиск путей учета влияния микронеоднородности расплавов на их свойства зависит от выбранной для анализа теории, концепции, модели строения металлического расплава. Так, например, в работе [9] предложено использовать избыточные параметры ( $\Delta Z^y$ ,  $\Delta d$ ) по которым оценивали степень отличия процессов взаимодействия в расплавах, как химически единых системах от аналогичных параметров, свойственных механическим смесям. Эти параметры оказались эффективными для нобийсодержащих ферросплавов.

Таблица 1 – Химический состав и модельные параметры комплексных марганецсодержащих ферросплавов по данным [7]

№	Ферросплавы	Химический состав, % вес.					Модельные параметры			
		<i>Mn</i>	<i>V</i>	<i>Si</i>	<i>Nb</i>	<i>Al</i>	<i>Z'</i>	<i>d</i>	<i>tg α</i>	<i>ρl</i>
1	ФМн20Н6	20,0	–	–	20,0	–	1.8606	2.9337	0.0834	3.5900
2	ФМн30Н6	30,0	–	–	17,5	–	1.9198	2.9318	0.0832	3.5947
3	ФН6САМн5	5,0	–	11,4	17,1	16,6	1.7718	2.7315	0.1053	3.2781
4	ФН6САМн15	15,0	–	10,2	14,9	15,3	1.8294	2.7518	0.1037	3.2934
5	ФН6САМн30	30,0	–	8,4	12,3	12,6	1.8878	2.7793	0.1004	3.3447
6	ФС26Вд9Мн5	5,0	9,5	26,5	–	–	1.8361	2.5315	0.0879	3.9098
7	ФС25Вд9Мн10	10,0	9,0	25,0	–	–	1.8737	2.5515	0.0876	3.8909
8	ФС26Вд9МнTi3	4,8	9,2	26,0	–	–	1.8606	2.5509	0.0878	3.8827
9	ФС25Вд9МнTi3	4,9	8,9	25,2	–	–	1.8853	2.5721	0.0877	3.8545
10	ФМн50Вд10	50,0	10,0	3,0	–	–	1.9428	2.8481	0.0838	3.6425

\* Остальное железо. Сплав №8 и №9 содержат соответственно 3 и 6% Ti

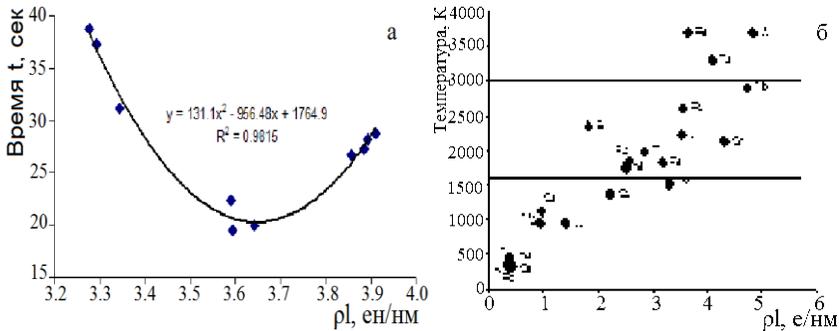


Рисунок 2 – Зависимость: а) – времени плавления марганецсодержащих ферросплавов от направленной зарядовой плотности; б) – температуры существования кластера однокомпонентных металлических расплавов от параметра  $\rho l$

С учетом указанной информации и использованием экспериментальных данных [10] в качестве реперных точек, методом корреляционно-регрессионного анализа были получены аналитические зависимости (1-4) для определения времени плавления комплексных ферросплавов систем  $Fe-Mn-V$ ,  $Fe-Mn-Nb$ ,  $Fe-Nb-Si$ ,  $Fe-Nb-Al$ ,  $Fe-Si-B$ ,  $Fe-Mn-Si-V$ ,  $Fe-Nb-Si-Al$ ,  $Fe-Si-V-Mn$ ,  $Fe-Mn-Si-V-Ti$ ,  $Fe-Mn-Si-Nb-Al$ . Показано, что изменение времени полного расплавления различных групп комплексных ферросплавов описываются следующими уравнениями:

$$\text{Для марганецсодержащих ферросплавов:} \\ \tau, c = f(\rho l) \quad R^2 = 0.982 \quad (1)$$

$$\text{Для ванадийсодержащих ферросплавов:} \\ \tau, c = f(\rho l, tg \alpha) \quad R^2 = 0.692 \quad (2)$$

$$\text{Для ниобийсодержащих ферросплавов:} \\ \tau, c = f(Z^y, d, \Delta Z^y, \Delta d) \quad R^2 = 0.725 \quad (3)$$

$$\text{Для борсодержащих ферросплавов:} \\ \tau, c = f(\rho l, d) \quad R^2 = 0.903 \quad (4)$$

Высокий коэффициент корреляции ( $R^2 = 0,69-0,99$ ) с параметрами межатомного взаимодействия достигнут за счет учета физико-химической индивидуальности каждой системы ферросплавов, микронеоднородности ( $\rho l$ ), ( $\Delta Z^y$ ,  $\Delta d$ ).

Для марганецсодержащих ферросплавов  $R^2 = 0.982$ , а ошибка точности прогноза не превышает  $\Sigma \zeta, \% = 2,7$ , что подтверждает адекватность модели.

Полученные данные свидетельствуют о достаточно высокой сходимости экспериментальных и расчетных значений рассматриваемых характеристик ферросплавов. Это подтверждает возможность применения

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. – Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

полученных уравнений (1-4) для прогнозной оценки времени плавления комплексных ферросплавов нового поколения, выбора на этой основе оптимального их химического состава.

### **Выводы.**

С использованием предложенной методики и критериев показана возможность прогнозной оценки одной из важнейших характеристик комплексных ферросплавов нового поколения.

Получены аналитические зависимости для расчета времени плавления комплексных (марганец, ванадий, ниобий и борсодержащих) ферросплавов нового поколения, что позволят обеспечить решение задач выбора ведущих микролегирующих элементов сплава и их лучшего усвоения в железоуглеродистом расплаве.

### **Библиографический список**

1. *Вихлевщук В.А.* Экспериментальное исследование микролегирующих ферросплавов и лигатур в стали / В.А. Вихлевщук, В.П. Пиптюк, В.А. Кондрашкин, Ю.Б. Бадогин // Сборник трудов «Производство стали в конвертерных и мартеновских цехах». – М.: Металлургия. – 1988. – С. 75-80.
2. *Игнатьев В.С.* Изучение свойств ферросплавов и лигатур для микролегирования и раскисления стали / В.С. Игнатьев, В.А. Вихлевщук, В.М. Черногорецкий [и др.] // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. – 1988. – № 6. – С. 37-42.
3. *Носков А.С., Жучков В.И., Завьялов А.Л.* Плавление ферросплавов в железоуглеродистом расплаве // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. – 1985. – № 10. – С. 32-37.
4. *Игнатьев В.С.* Изучение свойств ферросплавов и лигатур для микролегирования и раскисления стали / В.С. Игнатьев, В.А. Вихлевщук, В.М. Черногорецкий [и др.] // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. – 1988. – № 6. – С. 37-42.
5. *Приходько Э.В.* Прогнозирование физико-химических и теплофизических свойств ферросилиция стандартных марок / Э.В. Приходько, В.П. Пиптюк, А.Ф. Петров, С.В. Греков // «Металлургическая и горнорудная промышленность». – Днепропетровск. – 2009. – №5. – С. 17-20.
6. *Приходько Э.В., Петров А.Ф.* Методика прогнозирования физических и теплофизических свойств марганцевых ферросплавов в зависимости от состава // «Металлургическая и горнорудная промышленность». – Днепропетровск. – 2008. – №6. – С. 27-30.
7. *Жучков В.И., Носков А.С., Завьялов А.Л.* Растворение ферросплавов в жидком металле // Свердловск: УНЦ АН СССР. – 1990. – 134 с.
8. *Тогобицкая Д.Н., Головкин Л.А., Снигура И.Р.* Исследование микронеоднородности однокомпонентных металлических расплавов в области надликвидусных температур на основе параметров межатомного взаимодействия. // VII Международная научно-практическая конференция «Наука в современном мире» – Киев, 19 марта 2016 г. – С. 37 – 44

*«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33*

*«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33*

*ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33*

9. *Петров А.Ф., Приходько Э.В., Ворона Е.Н.* Физико-химические критерии для прогнозирования термодинамических свойств многокомпонентных металлических систем // Сб. научн. тр. ИЧМ НАНУ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – Днепропетровск. – 2005. – Вып.11. – С. 170–179.
10. *Петров А.Ф.* Прогнозирование физико-химических и теплофизических свойств борсодержащих ферросплавов / А.Ф. Петров, О.В. Кукса, Л.А. Головкин, С.В. Греков // «Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць». – Дніпро: – 2016. – №2(103). – С. 44–49.

## References

1. Vihlevshuk V.A., Piptyuk V.P., Kondrashkin V.A. & Badogin Yu.B. (1988). Eksperimentalnoe issledovanie mikrolegi-ruyushih ferrosplavov i ligatur v stali [Experimental study of microalloying ferroalloys and master alloys in steel]. *Sbornik trudov «Proizvodstvo stali v konverternyh i martenovskih cehah» [Collection of works "Steel production in converter and open-hearth shops"]*, Moskva: Metallurgiya, 1988, pp.75-80. (In Russian).
2. Ignatev V.S., Vihlevshuk V.A. & Chernogreckij V.M. et al. (1988). Izuchenie svojstv 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 [Izvestiya. Ferrous metallurgy]*, 1988, 6, 37-42. (In Russian).
3. Noskov A.S., Zhuchkov V.I. & Zavyalov A.L. (1985). Plavlenie ferrosplavov v zhelezouglerodistom rasplave [Melting of ferroalloys in iron-carbon melt]. *Izv. Vuzov. Chernaya metallurgiya [Izvestiya. Ferrous metallurgy]*, 1985, 10, 32-37. (In Russian).
4. Ignatev V.S., Vihlevshuk V.A. & Chernogreckij V.M. et al. (1988). Izuchenie svojstv ferrosplavov i ligatur dlya mikrolegirovaniya i raskisleniya stali [Study of the properties of ferroalloys and ligatures for microalloying and deoxidation of steel]. *Izv. Vuzov. Chernaya metallurgiya [Izvestiya. Ferrous metallurgy]*, 1988, 6, 37-42. (In Russian).
5. Prihodko E.V., Piptyuk V.P., Petrov A.F. & Grekov S.V. (2009). Prognozirovaniye fiziko-himicheskikh i teplo-fizicheskikh svojstv ferrosiliciya standartnykh marok [Prediction of physical, chemical and thermophysical properties of standard ferrosilicon grades]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost [Metallurgical and mining industry]*, Dnepropetrovsk, 2009, 5, 17-20. (In Russian).
6. Prihodko E.V. & Petrov A.F. (2008). Metodika prognozirovaniya fizicheskikh i teplofizicheskikh svojstv margancevykh 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]*, Dnepropetrovsk, 2008, 6, 27-30. (In Russian).
7. Zhuchkov V.I., Noskov A.S. & Zavyalov A.L. (1990). *Rastvorenije ferrosplavov v zhidkom metalle [Dissolution of ferroalloys in liquid metal]*. Sverdlovsk: UNC AN SSSR, 1990, 134 p. (In Russian).

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вып.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

8. Togobickaya D.N., Golovko L.A. & Snigura I.R. Issledovanie mikroneodnorodnosti odnokomponentnykh metallicheskih rasplavov v oblasti nadlikvidusnykh temperatur na osnove parametrov mezhatomnogo vzaimodejstviya [Study of microheterogeneity of one-component metal melts in the region of supra-liquidus temperatures based on the parameters of interatomic interaction]. *VII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya «Nauka v sovremennom mire» 19 marta 2016 g [VII International Scientific and Practical Conference "Science in the Modern World"]*. Kiev, 37–44. (In Russian).
9. Petrov A.F., Prihodko E.V. & Vorona E.N. (2005). Fiziko-himicheskie kriterii dlya prognozirovaniya termodinamicheskikh svoystv mnogokomponentnykh metallicheskih system [Physicochemical criteria for predicting the thermodynamic properties of multicomponent metal systems]. *Fundamental'nyye i prikladnyye problemy chernoy metallurgii. Sb. nauchn. tr. ICHM. [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy. Collection of scientific articles ISI NANU]*. Dnepropetrovsk, 2005, 11, 170–179. (In Russian).
10. Petrov A.F., Kuksa O.V., Golovko L.A. & Grekov S.V. (2016). Prognozirovaniye fiziko-himicheskikh i teplofizicheskikh svoystv borsoderzhashih ferrosplavov [Prediction of physicochemical and thermophysical properties of boron-containing ferroalloys]. *Sistemni tehnologii. Regionalnij mizhvuzivskij zbirnik naukovih prac [System technologies. Regional interuniversity collection of scientific works]*. Dnipro, 2016, 2(103), 44–49. (In Russian).

**А.Ф. Петров**, н.с., ORSID 0000-0001-7855-9267

**І.Р. Снігура**, м.н.с., ORSID 0000-0001-5872-7403

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

**Н.О. Цюпа**, к.т.н., с.н.с.

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

### **Прогнозування часу плавлення комплексних феросплавів методом фізико-хімічного моделювання**

**Анотація.** Метою роботи є реалізація нового підходу до опису тривалості плавлення (розчинення) комплексних феросплавів нового покоління при розкисненні та легуванні металевого розплаву. Цей підхід орієнтований на розробку методики та критеріїв для кількісної оцінки і обліку мікронеоднорідності багатокomпонентних металевих розплавів і прогнозування на їх основі такої важливої для сталеплавильного виробництва характеристики, як час плавлення феросплавів, опис міжатомної взаємодії в яких дозволяє глибше зрозуміти механізм процесів легування, розкиснення, та рафінування сталі. У роботі використаний розроблений в Інституті чорної металургії НАН України підхід до вирішення завдань моделювання закономірностей, які пов'язують між собою склад, структуру і властивості розплавів. В його основі лежить оригінальна концепція фізико-хімічного моделювання процесів міжатомної взаємодії в розплавах і розчинах, розроблена Е.В. Приходько. Відповідно до неї, металеві розплави розглядаються як хімічно єдині системи. Зміна їх складу позначається на комплексі фізико-хімічних властивостей через зміну параметрів їх електронної

*«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33*

*«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33*

ISSN 2522-9117 *«Fundamental'nyye i prikladnyye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33*

структури. Для оцінки та обліку впливу мікронеоднорідності будови металевих розплавів феросплавного виробництва застосована методика розрахунку критеріїв ( $\Delta Z'$  і  $\Delta d$ ), що характеризують ступінь відмінності електронного і структурного стану розплаву, як хімічно єдиної системи, від механічної суміші їх вихідних компонентів та параметр  $\rho l$ , який враховує кластероутворення в металевих розплавах.

З використанням вказаних критеріїв і наявних експериментальних даних отримано аналітичні залежності для розрахунку часу плавлення комплексних (марганець, ванадій, ніобій і бормістких) феросплавів нового покоління. Це дозволить оцінити їх ефективність застосування, пов'язану з максимально високим засвоєнням основних елементів, що впливає на витрату сплаву, стабільність і вартість оброблюваного металу.

**Ключові слова:** феросплави, металеві розплави, параметри міжатомної взаємодії, прогнози моделі

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

**I.R. Snihura**, Junior Researcher, ORCID 0000-0001-5872-7403

**L.A. Golovko**, PhD in Chemistry, Senior Researcher, ORCID 0000-0002-3872-5950

**N.A. Tsyupa**, PhD (Engin.), Senior Researcher,

*Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine*

### **Prediction of melting time of complex ferroalloys by physical and chemical modeling**

**Summary.** The purpose of this work is to implement a new approach to the description of the duration of melting (dissolution) of complex new generation ferroalloys during the deoxidation and doping of a metal melt. This approach is aimed at developing a methodology and criteria for the quantification and accounting of the micro-heterogeneity of multicomponent metal melts and their prediction on such important for steelmaking production characteristics as the melting time of ferroalloys, the description of the inter-mine interaction, which allows a deeper understanding of the process. deoxidation and refining of steel. In the work, the approach developed in the Institute of Ferrous Metallurgy of the National Academy of Sciences of Ukraine to solve problems of modeling of non-conformities that relate the composition, structure and properties of melts is used in the work. It is based on the original concept of physicochemical modeling of the processes of interatomic interaction in melts and solutions, developed by E.V. Prihodko. According to it, metal melts are considered as chemically unified systems. Changing their composition affects the complex of physicochemical properties due to changes in the parameters of their electronic structure. The method of calculation of criteria ( $\Delta Z'$  and  $\Delta d$ ), characterizing the degree of difference between the electronic and structural state of the melt, as a chemically unified system, from the mechanical mixture of their initial components and the parameter was used to evaluate and account for the influence of the micron homogeneity of the structure of the metal melts of ferroalloy production.  $\rho l$ , which takes into account the cluster spin in metal melts.

Using these criteria and the available experimental data, analytical dependences were obtained to calculate the melting time of complex (manganese, vanadium, niobium and boron) ferroalloys of the new generation. This will allow them to evaluate their effectiveness of application, which is associated with the highest assimilation of the main elements that affect

**Keywords:** ferroalloys, metal melts, parameters of interatomic interaction, predictive models

**For citation:** Petrov A.F., Snigura I.R., Golovko L.A., Tsyupa N.A. Prognostirovaniye vremeni plavleniya kompleksnykh ferrosplavov metodom fiziko-khimicheskogo modelirovaniya. [Prediction of the melting time of complex ferroalloys by the method of physical and chemical modeling]. «*Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii*». [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy] 2020, 34. 205-214. (In Russian). DOI 10.52150/2522-9117-2019-33-205-214

*Статья поступила в редакцию сборника 17.10.2019 года,  
прошла внутреннее и внешнее рецензирование (Протокол заседания  
редакционной коллегии сборника №2 от 23 декабря 2019 года)*