

УДК 669.15-198

## РАЗРАБОТКА СОСТАВА И ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ФЕРРОСПЛАВОВ\*

*Жучков В.И., д.т.н., профессор, главный научный сотрудник*  
*Заякин О.В., д.т.н., главный научный сотрудник (zferro@mail.ru)*

Институт металлургии УрО РАН  
(620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

**Аннотация.** Основным видом продукции ферросплавных заводов являются стандартные ферросплавы, которые часто не обладают всеми необходимыми служебными характеристиками и малопригодны для обработки металла в ковше, а развивающаяся прогрессивная технология сталеплавильного производства вынуждена приспосабливаться к существующему сортаменту ферросплавов, стандарты на которые не обновлялись 50 и более лет. Кроме того, за последние годы поменялись источники и рынки ферросплавного сырья, снизились его качество и содержание ведущих элементов, что затрудняет или исключает возможность получения ферросплавов по существующим стандартам. В связи с этим требуется выпуск более эффективных ферросплавов нового поколения, пригодных для прогрессивных процессов развивающихся областей черной и цветной металлургии и выплавляемых из нетрадиционных видов отечественного рудного сырья. К ним, в первую очередь, относятся так называемые комплексные или многокомпонентные ферросплавы, содержащие, кроме железа, два и более функциональных элемента. Комплексные ферросплавы следует создавать в наиболее благоприятных сочетаниях компонентов, способствующих необходимому эффективному воздействию на железоуглеродистый расплав при высокой степени усвоения в нем полезных элементов. Для этого разработан комплексный подход к изучению физико-химических характеристик сплавов, ответственных за усвоение элементов в жидком металле и его качество. Создание научных основ формирования новых композиций многокомпонентных ферросплавов, обладающих высокими потребительскими свойствами, и исследование физико-химических процессов получения этих сплавов из нетрадиционного рудного сырья способствуют решению задач по разработке составов эффективных ферросплавов нового поколения и расширению рудной базы ферросплавного производства. При использовании разработанного метода конструирования состава комплексных ферросплавов с применением нетрадиционного сырья были разработаны технологии плавки, получены и применены в лабораторных и промышленных масштабах различные сплавы систем: Fe–Si–Cr; Fe–Si–B; Fe–Si–Ba–Ca; Fe–Si–Al–Nb; Fe–Si–Ca–Mg; Fe–Si–V–Ca–Mn; Fe–Si–Al.

**Ключевые слова:** металлургия, руда, комплексный ферросплав, шлак, кремний, хром, физико-химические свойства, сталь.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-10-791-795

Ферросплавы являются полупродуктом, применяемым при выплавке стали, чугуна и цветных металлов для их легирования, модифицирования, рафинирования. Объемы выплавки товарной продукции определяют масштабы производства ферросплавов [1 – 4]. В последние десятилетия в мире и РФ произошли коренные изменения как в технологии получения стали, так и в ее сортаменте, качественных показателях.

Повышение качества металла всегда являлось важнейшей задачей мировой металлургии. Особую значимость вопросы улучшения качества приобрели в последние годы. Появились новые, не имевшиеся ранее требования к качеству стали, причем, как правило, не по одному, а по комплексу свойств металла.

Поскольку основным методом воздействия на свойства стали и чугуна традиционно остается обработка жидкого металла ферросплавами, то ужесточение требований по качеству стали приводит к увеличению выпуска легированных марок, а, следовательно, к повышению удельного расхода ферросплавов [5].

Основным видом продукции ферросплавных заводов являются стандартные ферросплавы, которые часто не обладают всеми необходимыми служебными характеристиками и малопригодны для обработки металла в ковше. В то же время развивающаяся прогрессивная технология сталеплавильного производства вынуждена приспосабливаться к существующему сортаменту ферросплавов, стандарты на которые не обновлялись 50 и более лет. Это ведет к усложнению технологии, снижению производительности сталеплавильного производства и качества продукции.

Кроме того, за последние годы поменялись источники и рынки ферросплавного сырья, снизились его качество и содержание ведущих элементов [6 – 9], что затрудняет или исключает получение ферросплавов по существующим стандартам [10, 11]. В связи с этим требуется выпуск более эффективных ферросплавов нового поколения, пригодных для прогрессивных процессов развивающихся областей черной и цветной металлургии и выплавляемых из нетрадиционных видов отечественного рудного сырья. К ним, в первую очередь, относятся так называемые комплексные или многокомпонентные ферросплавы, содержа-

\* Работа выполнена по Государственному заданию ИМЕТ УрО РАН в рамках Программы фундаментальных исследований государственных академий.

щие, кроме железа, два и более функциональных элемента [12, 13].

Комплексные ферросплавы (КФ) следует создавать с наиболее благоприятным сочетанием компонентов, способствующих необходимому эффективному воздействию на железоуглеродистый расплав при высокой степени усвоения в нем полезных элементов [14].

Подбором полезных (целевых) и сопутствующих элементов сплава можно определить его рациональный состав, обеспечивающий высокое и стабильное усвоение элементов, быстрое растворение и равномерное их распределение в объеме железоуглеродистого расплава [15, 16]. Для этого разработан комплексный подход к изучению физико-химических характеристик сплавов, ответственных за усвоение элементов в жидком металле и его качество, включающий определение:

- температур начала и конца плавления;
- плотности ферросплава;
- кинетики его окисления;
- количества и формы образующихся неметаллических включений в обрабатываемом расплаве;
- теплового эффекта взаимодействия КФ с железоуглеродистым расплавом;
- продолжительности плавления ферросплава, его механических и теплотехнических характеристик.

При создании КФ учитывается, что в его составе должны находиться, помимо целевых, еще и элементы, которые благоприятно влияют на служебные характеристики ферросплавов, способствуя повышению усвоения его компонентов сталью. К числу таких элементов относится кремний, наиболее широко используемый в КФ. Достаточно сказать, что кремний входит в состав самого массового в мире ферросплава – ферросиликомарганца [17]. В современных условиях объемы производства ферросиликомарганца составляют около 1/3 всего сортамента ферросплавов [18].

Кремний благотворно влияет на такие важные характеристики ферросплава, как температура плавления, плотность, время плавления в жидком металле.

#### Химический состав хромосодержащих сплавов\*, %

Chemical composition of chromium-containing alloys\*, wt. %

| Номер сплава | Cr   | Fe   | Si   |
|--------------|------|------|------|
| 1            | 64,6 | 34,8 | 0,5  |
| 2            | 64,8 | 32,8 | 5,3  |
| 3            | 57,8 | 32,1 | 10,0 |
| 4            | 51,4 | 29,8 | 18,7 |
| 5            | 46,2 | 27,2 | 26,5 |
| 6            | 41,9 | 25,7 | 32,3 |
| 7            | 35,6 | 22,3 | 42,0 |
| 8            | 29,2 | 17,1 | 53,6 |

\* Содержание углерода ~0,1 %.

Авторами проведены эксперименты по изучению влияния кремния на характеристики сплавов системы Fe–Cr–Si [19]. Химический состав комплексных ферросплавов представлен в таблице (анализы выполнены с использованием оборудования ЦКП «Урал-М», ИМЕТ УрО РАН). Температурные интервалы плавления комплексных ферросплавов определяли методом фиксации температурных кривых при охлаждении образцов. Изучение плотности проводили пикнометрическим методом в соответствии с ГОСТ 22524-77. Для определения времени плавления сплавов в стали была выбрана математическая модель расчета времени плавления, разработанная учеными УрФУ и ИМЕТ УрО РАН. Модель включает гидродинамическую и тепловую части.

На рис. 1 приведена зависимость величины плотности, температур и времени плавления феррохрома от содержания в нем кремния. Данные рисунка показывают, что кремний оказывает существенное влияние на все приведенные характеристики сплавов. Особенно значительно воздействие кремния в диапазоне до 10 % (температура плавления КФ может снизиться до 200 °С).

Воздействие кремния на свойства ферросплавов можно наблюдать и для других видов сплавов (Fe–Ni–Si, Fe–Nb–Si и др.).

Марганец влияет на температуру плавления в меньшей степени, чем кремний. Так для низкоуглеродистого феррохрома (0,1 % C; 34 – 44 % Cr) увеличение содержания марганца с 12 до 31 % снижает температуру ликвидус всего на 50 град. (с 1360 до 1310 °С).

Важным преимуществом комплексных ферросплавов является возможность их получения из рудного сырья менее высокого качества, чем для выплавки стандартных сплавов, например из некондиционных материалов, отходов производства, бедных и комплексных руд и концентратов [6, 20, 21]. Это связано с тем, что в составе КФ находятся меньшие концентрации ведущих элементов по сравнению с составом стандартных марок ферросплавов (10 – 40, а не 60 – 90 %).

Благодаря низкой цене нетрадиционного сырья стоимость КФ будет ниже, а из-за возможности его использования появляется новая сырьевая база ферросплавного производства.

Необходимые для выплавки хромовых ферросплавов российские руды имеют низкое содержание хрома (30 – 40 %) и не могут использоваться для получения стандартного феррохрома (~65 % Cr). Проведенные в ИМЕТ УрО РАН исследовательские работы показали, что при замене богатой руды Кемпирсайского месторождения (Казахстан), содержащей 52 % Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, на бедную российскую Сарановского месторождения (38 % Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) технико-экономические показатели процесса плавки ухудшаются. Степень извлечения хрома в сплав снижается почти на 4 % (рис. 2), кратность шлака возрастает с 1,2 до 1,42, при этом остаточное

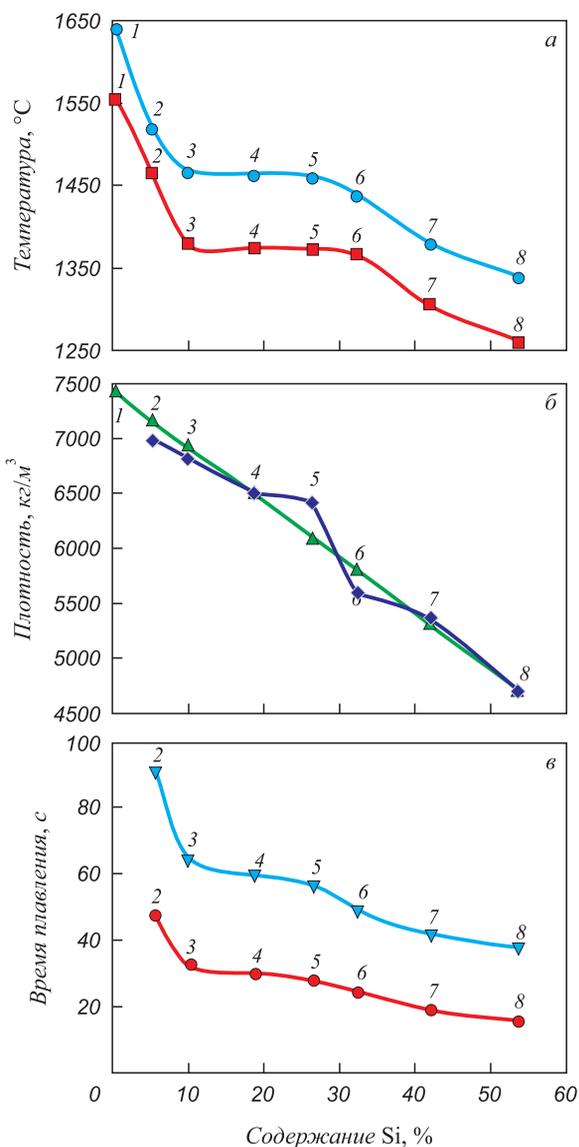


Рис. 1. Зависимость физико-химических характеристик феррохрома от содержания в нем кремния (номера на рисунке соответствуют номерам образцов в таблице):

*a* – зависимость температурных интервалов плавления (● – значения ликвидус; ■ – значения солидус); *б* – зависимость величины плотности (◆ – экспериментальные значения, ▲ – расчетные значения); *в* – зависимость времени плавления ферросплава в железоуглеродистом расплаве (▼ – фракция 50 мм; ● – фракция 30 мм)

Fig. 1. Dependences of the physicochemical characteristics of ferrochrome on the silicon content (the numbers in the figure correspond to the numbers of the samples in the table):

*a* – dependence of the temperature ranges of melting (● – liquidus, ■ – solidus); *б* – dependence of the density value (◆ – experimental, ▲ – calculated); *в* – dependence of melting time of the ferroalloy in iron-carbon melt (▼ – fraction 50 mm; ● – fraction 30 mm)

содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и  $\text{FeO}$  в нем поднимается (рис. 3). Содержание хрома в сплаве не менее 60 %, отвечающее требованиям большинства отечественных потребителей, обеспечивается при соотношении богатая/бедная руда, равном 35/65. При использовании 100 % Сарановской бедной руды в составе шихты высокоугле-

родистый феррохром содержит 55 – 57 % Cr при повышенном содержании кремния (3 – 10 %), положительно влияющем на служебные характеристики феррохрома.

При увеличении доли руды Сарановского месторождения в шихте изменяется структура стоимости высокоуглеродистого феррохрома. С одной стороны увеличиваются технологические затраты на получение сплава (на 22 % в расчете на единицу хрома) из-за возрастания удельного расхода электроэнергии, снижения степени извлечения хрома в сплав. С другой стороны снижаются затраты на рудную часть шихты, которая составляет 30 – 40 % себестоимости сплава из-за более низкой цены бедного рудного сырья. Суммарный экономический эффект от использования бедного сырья и получения феррохрома с пониженным содержанием хрома и повышенным кремнием выражается в снижении стоимости единицы хрома в сплаве на 20 – 35 % в зависимости от соотношения цен на отечественное и импортное хроморудное сырье.

**Выводы.** Таким образом, создание научных основ формирования новых композиций многокомпонентных ферросплавов, обладающих высокими потребительскими свойствами, и исследование физико-химических

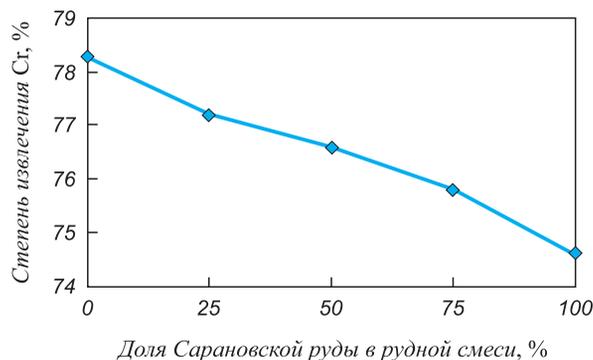


Рис. 2. Изменение степени извлечения хрома в сплав с увеличением доли Сарановской руды в рудной части шихты

Fig. 2. Change in the degree of chromium extraction into the alloy with an increase in quantity of Saranovskaya ore in ore part of the charge

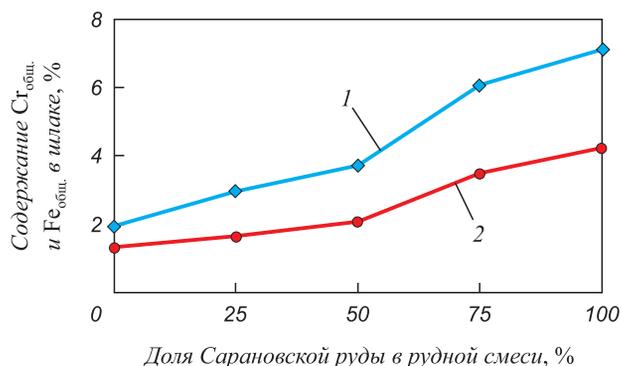


Рис. 3. Изменение содержание  $\text{Cr}_{\text{общ.}}$  (1) и  $\text{Fe}_{\text{общ.}}$  (2) в шлаке с увеличением доли Сарановской руды в рудной части шихты

Fig. 3. Change in the content of  $\text{Cr}_{\text{total}}$  (1) and  $\text{Fe}_{\text{total}}$  (2) in slag with an increase in quantity of Saranovskaya ore in ore part of the charge

процессов получения этих сплавов из нетрадиционного рудного сырья способствуют решению задач по разработке составов эффективных ферросплавов нового поколения и расширению рудной базы ферросплавного производства за счет вовлечения в технологический процесс новых видов рудного сырья.

Негативной стороной комплексных ферросплавов является утрата их универсализма из-за увеличения в них количества компонентов. В то же время применение КФ позволяет снизить число присаживаемых в расплав стали разных марок ферросплавов.

При использовании разработанного метода конструирования состава КФ с применением нетрадиционного сырья были разработаны технологии плавки, получены и применены в лабораторных и промышленных масштабах различные комплексные ферросплавы систем: Fe–Si–Cr; Fe–Si–B; Fe–Si–Ba–Ca; Fe–Si–Al–Nb; Fe–Si–Ca–Mg; Fe–Si–V–Ca–Mn; Fe–Si–Al. На составы и технологию получения многих сплавов получены российские и международные патенты на изобретения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Holappa L., Louhenkilpi S. On the role of ferroalloys in steelmaking // INFACON: The Efficient Technologies in ferroalloy industry. – Karaganda: “P. Dipner”, 2013. P. 1083 – 1090.
- Pariser H.H., Backeberg N.R., Masson O.C.M., Bedder J.C.M. Changing nickel and chromium stainless steel markets // INFACON XV: Int. Ferro-Alloys Congress, Edited by R.T. Jones & P. den Hoed, 2018. URL: <https://www.pyrometallurgy.co.za/InfaconXV/0001-Pariser.pdf>.
- Cobb H.H. The history of stainless steels // ASM International. 2010. P. 17 – 24.
- Krüger P., Silva C.A., Batista Vieira C. etc. Relevant aspects related to production of iron nickel alloys (pig iron containing nickel) in mini blast furnaces // Proceedings of the 12<sup>th</sup> Int. Ferroalloy Congress. Helsinki, Finland. Vol. 1. – Outotec Oyj, 2010. P. 671 – 680.
- Рынок ферросплавов в 2017-2018 г.: производство в России // Metal Research. Металлургические исследования. URL: [http://www.metalresearch.ru/ferroalloys\\_market\\_2017-2018.html](http://www.metalresearch.ru/ferroalloys_market_2017-2018.html).
- Жучков В.И., Леонтьев Л.И., Заякин О.В. Использование российского рудного сырья для производства ферросплавов // Изв. вуз. Черная металлургия. 2020. № 3 – 4. С. 211 – 217.
- Есенжулов А.Б., Островский Я.И., Афанасьев В.И. и др. Использование российского хроморудного сырья при выплавке высокоуглеродистого феррохрома в ОАО «СЗФ» // Сталь. 2008. № 4. С. 32 – 36.
- Толымбекова Л.Б., Ким А.С., Жунусов А.К., Бабенко А.А. Термические превращения в марганцевых рудах месторождения «Западный Камыс» и шихтах для производства окатышей в неизотермических условиях в потоке воздуха // Металлург. 2012. № 12. С. 47 – 51.
- Гасик М.И., Гладких В.А., Жданов А.В. и др. Расчетное определение ценности марганцеворудного сырья // Электromеталлургия. 2009. № 1. С. 32 – 34.
- Akuov A., Samuratov Ye., Kelamanov B. etc. Development of an alternative technology for the production of refined ferrochrome // Metallurgija. 2020. Vol. 59. No. 4. P. 529 – 532.
- Samuratov Ye., Kelamanov B., Akuov A. etc. Smelting standard grades of manganese ferroalloys from agglomerated thermomagnetic manganese concentrates // Metallurgija. 2020. Vol. 59. No. 1. P. 85 – 88.
- Alex T.C., Godiwalla K.M., Kumar S., Jana R.K. Extraction of silicomanganese from marine and low grade mineral resources // INFACON XI. India, New Delhi. 2007. P. 206 – 214.
- Yessengaliyev D., Baisanov S., Issagulov A. etc. Thermodynamic diagram analysis (TDA) of MnO–CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> and phase composition of slag in refined ferromanganese production // Metallurgija. 2019. Vol. 58. No. 3 – 4. P. 291 – 294.
- Жучков В.И., Заякин О.В., Леонтьев Л.И. и др. Основные направления переработки бедного отечественного хроморудного сырья // Электromеталлургия. 2008. № 5. С. 18 – 21.
- Строганов А.И. Требования к ферросплавам для раскисления и легирования // Производство ферросплавов: Сб. Сибирского металлургического института. – Новокузнецк: Изд. КузПИ, 1980. С. 5 – 24.
- Спанов С.С., Жунусов А.К., Толымбекова Л.Б. Опыт-промышленная выплавка стали с применением ферросиликоалюминия в ТОО «KSP STEEL» // Металлург. 2016. № 11. С. 43 – 47.
- Ringdalen E., Ostrovski O., Gaal S. Ore properties in melting and reduction reactions in silicomanganese production // Proceedings of the 12<sup>th</sup> Int. Ferroalloy Congress. Helsinki, Finland. Vol. 1. – Outotec Oyj, 2010. P. 487 – 496.
- Боярко Г.Ю., Хатьков В.Ю. Товарные потоки ферросплавов в России // Черные металлы. 2018. № 3. С. 60 – 63.
- Андреев Н.А., Жучков В.И., Заякин О.В. Изучение плотности хромсодержащих ферросплавов // Электromеталлургия. 2012. № 6. С. 15 – 16.
- Zhuniskaliyev T., Nurumgaliyev A., Zayakin O. etc. Investigation and comparison of the softening temperature of manganese ores used for the production of complex ligatures based on Fe–Si–Mn–Al // Metallurgija. 2020. Vol. 59. No. 4. P. 449 – 592.
- Толымбеков М.Ж., Келаманов Б.С., Байсанов А.С., Каскин К.К. Разработка технологии металлургической переработки хромоникелевых руд Казахстана // Сталь. 2008. № 8. С. 52 – 55.

Поступила в редакцию 10 августа 2020 г.  
После доработки 12 августа 2020 г.  
Принята к публикации 12 августа 2020 г.

### DEVELOPMENT OF COMPOSITION AND PROCESS OF OBTAINING MULTICOMPONENT FERROALLOYS

*V.I. Zhuchkov, O.V. Zayakin*

*Institute of Metallurgy of the UB RAS, Ekaterinburg, Russia*

**Abstract.** The main product of ferroalloy plants is standard ferroalloys. They often do not have all the necessary service characteristics and are not very suitable for metal processing in a ladle. The developing progressive technology of steelmaking is forced to adapt to the exist-

ing range of ferroalloys, the standards for which have not been updated for 50 years or more. In addition, in recent years, the sources and markets of ferroalloy raw materials have changed, and their quality and content of leading elements have decreased. This makes it difficult or excludes the possibility of obtaining ferroalloys according to existing standards. In this regard, the production of more efficient ferroalloys of a new generation is required, suitable for progressive processes in the developing areas of ferrous and non-ferrous metallurgy

and smelted from non-traditional types of domestic ore raw materials. These include complex or multicomponent ferroalloys containing, in addition to iron, two or more functional elements. Complex ferroalloys should be created in the most favorable combinations of component. It contributes to the necessary effective impact on the iron-carbon melt with a high degree of assimilation of useful elements in it. The creation of scientific foundations for the formation of new compositions of multicomponent ferroalloys with high consumer properties, and the development of physicochemical processes for obtaining these alloys from unconventional ore raw materials contributes to solving the problems of developing compositions of effective new generation ferroalloys and expanding the ore base of ferroalloy production. When using the developed method of designing the composition of complex ferroalloys using unconventional raw materials, melting technologies were developed; various alloys of the systems were obtained and applied on a laboratory and industrial scale: Fe–Si–Cr, Fe–Si–B, Fe–Si–Ba–Ca, Fe–Si–Al–Nb, Fe–Si–Ca–Mg, Fe–Si–V–Ca–Mn, Fe–Si–Al.

**Keywords:** metallurgy, ore, complex ferroalloy, slag, silicon, chromium, physical and chemical properties, steel.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2020-10-791-795

## REFERENCES

- Holappa L., Louhenkilpi S. On the role of ferroalloys in steelmaking. *INFACON: The Efficient Technologies in Ferroalloy Industry*. Karaganda: "P. Dipner", 2013, pp. 1083–1090.
- Pariser H.H., Backeberg N.R., Masson O.C.M., Bedder J.C.M. Changing nickel and chromium stainless steel markets. In: *INFACON XV: Int. Ferro-Alloys Congress*. R.T. Jones & P. den Hoed eds. 2018. Available at URL: <https://www.pyrometallurgy.co.za/InfaconXV/0001-Pariser.pdf>.
- Cobb H.H. The history of stainless steels. *ASM International*. 2010, pp. 17–24.
- Krüger P., Silva C.A., Batista Vieira C., Araújo F.G.S., Seshadri V. Relevant aspects related to production of iron nickel alloys (pig iron containing nickel) in mini blast furnaces. *Proceedings of the 12<sup>th</sup> Int. Ferroalloy Congress, Helsinki, Finland*. Vol. 1. Outotec Oyj, 2010, pp. 671–680.
- Ferroalloy market in 2017–2018: production in Russia. *Metal Research*. Available at URL: [http://www.metalresearch.ru/ferroalloys\\_market\\_2017-2018.html](http://www.metalresearch.ru/ferroalloys_market_2017-2018.html) (In Russ.).
- Zhuchkov V.I., Leont'ev L.I., Zayakin O.V. Application of Russian ore raw materials to ferroalloys production. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 50, no. 3-4, pp. 211–217. (In Russ.).
- Esenzhulov A.B., Ostrovskii Ya. I., Afanas'ev V. I., Zayakin O.V., Zhuchkov V.I. Russian chromium ore in smelting high-carbon ferrochrome at OAO SZF. *Steel in Translation*. 2008, vol. 38, no. 4, pp. 315–317.
- Toymbekova L.B., Kim A.S., Zhunusov A.K., Babenko A.A. Thermal transformations in manganese ores in the Zapadnyi Kamys deposit and charge materials used to produce in an air flow under nonisothermal conditions. *Metallurgist*. 2013, vol. 56, pp. 919–924.
- Gasik M.I., Gladkikh V.A., Zhdanov A.V. etc. Calculation of the value of manganese ore raw materials. *Elektrometallurgiya*. 2009, no. 8, pp. 756–758.
- Akuov A., Samuratov Ye., Kelamanov B., Zhumagaliyev Y., Taizhigitova M. Development of an alternative technology for the production of refined ferrochrome. *Metallurgija*. 2020, vol 59, no. 4, pp. 529–532.
- Samuratov Ye., Kelamanov B., Akuov A., Zhumagaliyev Y., Akhmetova M. Smelting standard grades of manganese ferroalloys from agglomerated thermo-magnetic manganese concentrates. *Metallurgija*. 2020, vol. 59, no. 1, pp. 85–88.
- Alex T.C., Godiwalla K.M., Kumar S., Jana R.K. Extraction of silicomanganese from marine and low grade mineral resources. *INFACON XI. India, New Delhi*, 2007, pp. 206–214.
- Yessengaliyev D., Baisanov S., Issagulov A., Baisanov A., Zayakin O., Abdirashit A. Thermodynamic diagram analysis (TDA) of MnO–CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> and phase composition of slag in refined ferromanganese production. *Metallurgija*. 2019, vol. 58, no. 3-4, pp. 291–294.
- Zhuchkov V.I., Zayakin O.V., Leont'ev L.I. etc. Main trends in the processing of poor chrome ore raw materials. *Elektrometallurgiya*. 2008, no. 8, pp. 709–712. (In Russ.).
- Stroganov A.I. Requirements for ferroalloys for deoxidation and alloying. In: *Proizvodstvo ferrosplavov: Sb. Sibirskogo metallurgicheskogo instituta* [Production of ferroalloys: Digest of Siberian Metallurgical Institute]. Novokuznetsk: Izd. KuzPI, 1980, pp. 5–24. (In Russ.).
- Spanov S.S., Zhunusov A.K., Tolymbekova L.B. Pilot plant melting of steel using ferro-silico-aluminum at KSP Steel. *Metallurgist*. 2017, vol. 60, no. 11-12, pp. 1149–1154.
- Ringdalen E., Ostrovski O., Gaal S. Ore properties in melting and reduction reactions in silicomanganese production. *Proceedings of the 12<sup>th</sup> Int. Ferroalloy Congress, Helsinki, Finland*. Vol. 1. Outotec Oyj, 2010, pp. 487–496.
- Boyarko G.Yu., Khat'kov V.Yu. Commercial streams of ferroalloys in Russia. *Chernye metally*. 2018, no. 3, pp. 60–63. (In Russ.).
- Andreev N.A., Zhuchkov V.I., Zayakin O.V. Density of chromium-containing ferroalloys. *Elektrometallurgiya*. 2013, no. 6, pp. 418–419. (In Russ.).
- Zhuniskaliyev T., Nurumgaliyev A., Zayakin O., Mukhambetgaliyev Y., Kuatbay Y., Mukhambetkaliyev A. Investigation and comparison of the softening temperature of manganese ores used for the production of complex ligatures based on Fe–Si–Mn–Al. *Metallurgija*. 2020, vol. 59, no. 4, pp. 449–592.
- Toymbekov M., Kelamanov B., Baisanov A., Kaskin K. Processing Kazakhstan's chromonickel ore. *Steel in Translation*. 2008, vol. 38, no. 8, pp. 58–55.

**Acknowledgements.** The work was performed in accordance with the State Order of the IMET UB RAS in the framework of the Program of Fundamental Research of State Academies.

### Information about the authors:

V.I. Zhuchkov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher

O.V. Zayakin, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher (zferro@mail.ru)

Received August 10, 2020

Revised August 12, 2020

Accepted August 12, 2020