

ПО МАТЕРИАЛАМ КОНФЕРЕНЦИИ
«МЕТАЛЛУРГИЯ – 2021»

BASED ON THE MATERIALS OF THE CONFERENCE
“METALLURGY – 2021”



Оригинальная статья

УДК 669.168

DOI 10.17073/0368-0797-2022-8-548-554

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2366>



ИЗУЧЕНИЕ ВРЕМЕНИ ПЛАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ НИКЕЛЬСОДЕРЖАЩИХ ФЕРРОСПЛАВОВ В ЖИДКОЙ СТАЛИ

Д. С. Ренёв, О. В. Заякин, В. И. Жучков

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

Аннотация. Для разработки новых ферросплавов рационального состава необходимы данные об их физико-химических характеристиках. Одной из основных характеристик сплава, от которой зависит усвоение и распределение основных элементов ферросплавов в железоуглеродистом расплаве, является продолжительность его плавления. С применением математической модели расчета времени плавления, разработанной сотрудниками УрФУ и ИМЕТ УрО РАН, изучена продолжительность плавления комплексных никельсодержащих ферросплавов в жидкой стали. Программа позволяет рассчитывать температуру куска ферросплава, толщину намораживаемой стальной корки, размер куска сплава и длительность периодов плавления в зависимости от физико-химических и теплофизических характеристик ферросплавов. Механизм плавления ферросплавов определяет время их плавления в жидкой стали. В работе выполнено математическое моделирование плавления комплексных никелевых ферросплавов, содержащих 10 % Ni; 0,5 – 55,0 % Cr; 0,2 % C; 0,2 % Si в железоуглеродистом расплаве. Установлено, что все рассматриваемые сплавы относятся к группе легкоплавких ферросплавов и процесс их плавления протекает в три периода. С увеличением исходного размера куска ферросплава от 3 до 100 мм время плавления увеличивается в 250 – 300 раз. Показано, что увеличение содержания хрома в составе комплексного сплава до 37 % приводит к снижению времени плавления, а при дальнейшем его увеличении до 55 % происходит увеличение времени плавления. Снижение температуры ванны жидкой стали с 1700 до 1520 °C сопровождается увеличением продолжительности плавления комплексных ферросплавов в 7 – 8 раз. В целом, рассмотренные комплексные никелевые ферросплавы характеризуются значительно более быстрым протеканием процесса плавления в жидкой стали по сравнению со стандартными феррохромом и ферроникелем.

Ключевые слова: физико-химические свойства, время плавления, ферросплав, хром, никель, плавление, растворение, математическое моделирование

Финансирование: Работа выполнена по государственному заданию ИМЕТ УрО РАН при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 19-03-00451.

Для цитирования: Ренёв Д.С., Заякин О.В., Жучков В.И. Изучение времени плавления комплексных никельсодержащих ферросплавов в жидкой стали // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 8. С. 548–554. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-8-548-554>

Original article

MELTING TIME OF COMPLEX NICKEL-CONTAINING ALLOYS IN LIQUID STEEL

D. S. Renev, O. V. Zayakin, V. I. Zhuchkov

Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (101 Amundsena Str., Yekaterinburg 620016, Russian Federation)

Abstract. For development of new ferroalloys and their application, it is necessary to know their physical and chemical characteristics. The most important characteristics of the alloy, on which assimilation and distribution of the main elements of ferroalloys in the iron-carbon melt depend, are their time of melting and dissolution. Using a mathematical model for calculating the melting time, developed by the employees of the Ural Federal University and the Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, the authors studied the duration of melting of complex nickel-containing ferroalloys in liquid steel. The program allows one to calculate the temperature of a piece of ferroalloy, thickness of the frozen steel crust, size of the alloy piece and duration of the melting periods depending on physicochemical and thermophysical characteristics of the ferroalloys. The melting mechanism of ferroalloys determines the time of their melting in liquid steel. This work contains mathematical modeling of melting of complex nickel ferroalloys containing %: ~10 Ni; 0.5 – 55.0 Cr; ~0.2 C; ~0.2 Si, in iron-carbon melt. It was found that all the alloys under consideration belong to the group of low-melting ferroalloys and process of their melting proceeds in three periods. With an increase in the initial diameter of ferroalloy piece from 3 to 100 mm, the melting time increases by 250 – 300 times. It is shown that an increase in Cr content up to 37 % in complex alloy leads to a decrease in the melting time, and with a further increase in the Cr content to 55 %, an increase in the melting time occurs. A decrease in temperature of liquid steel bath from 1700 to 1520 °C is accompanied by an increase in the duration of melting of complex ferroalloys

by 7–8 times. In general, the considered complex nickel ferroalloys are characterized by a much faster melting process in liquid steel compared to standard ferrochrome and ferronickel.

Keywords: physical and chemical properties, melting time, ferroalloy, chromium, nickel, melting, dissolution, mathematical modeling

Funding: The work was performed according to the state task of the Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences with support of the RFBR grant no. 19-03-00451.

For citation: Renev D.S., Zayakin O.V., Zhuchkov V.I. Melting time of complex nickel-containing alloys in liquid steel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 8, pp. 548–554. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-8-548-554>

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие в мире значительно возросло производство коррозионностойких хромоникелевых сталей [1, 2]. По данным работы [3] в 2015 г. темпы роста потребления нержавеющей стали в мире являются самыми высокими среди других марок стали. Мировой объем производства продукции из нержавеющей стали в 2020 г. составил 50 млн т¹.

Основными легирующими компонентами нержавеющей стали являются ферросплавы, содержащие хром и никель [4]. Однако в настоящее время наблюдается недостаток относительно дешевых никельсодержащих ферросплавов [5]. Разработка новых составов ферросплавов, содержащих никель, является развивающимся направлением [6]. Такие ферросплавы возможно получать из бедного минерального сырья [7–10]. Знание физико-химических характеристик необходимо для разработки новых ферросплавов и их применения [11–15]. Важнейшими характеристиками сплава, от которых зависит усвоение и распределение основных элементов ферросплавов в железоуглеродистом расплаве, являются время плавления и растворения ферросплавов [16–18]. Механизм плавления ферросплавов определяет время их плавления в жидкой стали. По такой теме проводились исследования отечественными [19] и зарубежными [20–25] учеными-металлургами.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей работе была использована математическая модель расчета времени плавления, которую разработали сотрудники ИМЕТ УрО РАН и УрФУ. Модель плавления ферросплавов состоит из систем дифференциальных уравнений [26]. В этой программе можно рассчитать температуру, размер, толщину намерзаемой корки куска ферросплава и продолжительность периодов плавления. Модель состоит из гидродинамической и тепловой частей. От скорости движения, соотношения плотностей твердого ферросплава и жидкого металла, скорости проникновения куска в жидкую сталь зависит время плавления ферросплава. В математической модели плавления предполагается, что движе-

ние кусков происходит изолированно друг от друга. Тепловая часть модели основана на классификации ферросплавов в зависимости от соотношения их температур ликвидуса ($T_{\text{л}}$), ванны ($T_{\text{в}}$) и кристаллизации железоуглеродистого расплава ($T_{\text{км}}$) на легкоплавкие ($T_{\text{л}} \leq T_{\text{км}}$), тугоплавкие ($T_{\text{км}} < T_{\text{л}} < T_{\text{в}}$) и сверхтугоплавкие ($T_{\text{л}} \geq T_{\text{в}}$). На поверхности ферросплавов сначала образуется корочка твердой стали: это связано с тем, что в реальных условиях начальная температура куска ферросплава меньше температуры кристаллизации стали. Тепловая часть модели включает дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье для каждой из фаз (корки, твердого ядра, жидкого слоя ферросплава), количество которых зависит от типа ферросплава, периода плавления и граничных условий, определяемых конвективным теплообменом и процессом плавления. Соотношение температур $T_{\text{л}}$, $T_{\text{в}}$, $T_{\text{км}}$ определяет ход процесса. Когда ферросплав полностью расплавился, процесс плавления считается законченным.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для исследования выплавлены опытные образцы комплексных никелевых ферросплавов с содержанием хрома от 0,5 до 55,0 %. Химический состав исследуемых образцов представлен ниже (примерно 0,2 % C, Fe – остальное):

Образец	Содержание, %		
	Si	Ni	Cr
1	0,2	11,2	0,5
2	0,2	11,0	27,4
3	0,3	10,8	36,7
4	0,4	9,5	45,5
5	0,2	10,0	55,0

В расчетах принимали, что начальная температура ферросплава составляет 25 °С, температура кристаллизации железоуглеродистого расплава 1500 °С, температура ванны железоуглеродистого расплава 1520–1700 °С. Результаты моделирования представлены на рис. 1, 2.

Физико-химические характеристики (удельную теплоемкость, температуру ликвидуса, теплопроводность, плотность и другие) ферросплавов принимали по рас-

¹ International Stainless Steel Forum (ISSF). URL: <https://ussa.su/news/2076> (Дата обращения: 26.07.2022).

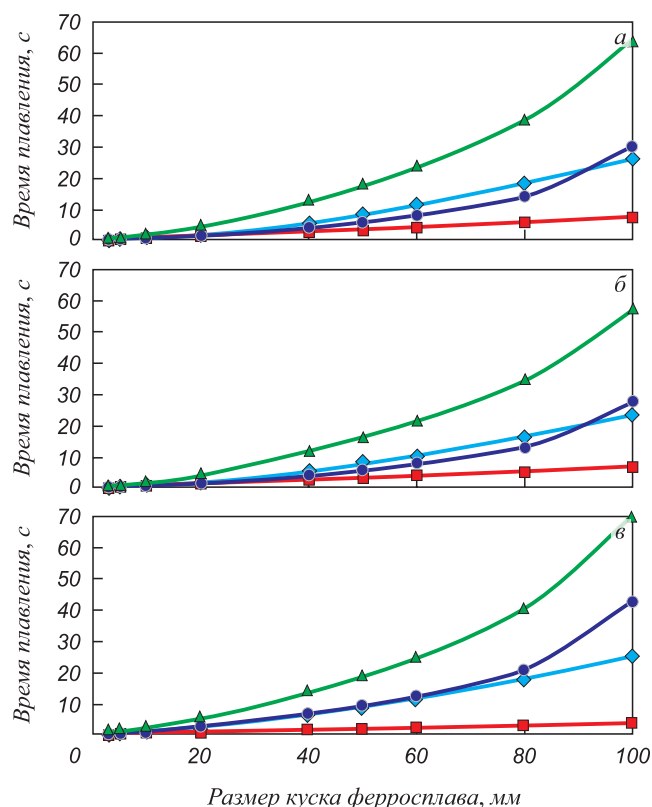


Рис. 1. Зависимость времени плавления по периодам плавления хромоникелевых ферросплавов 1, 3 и 5 (а, б и в) от фракционного состава: — время первого, второго и третьего периода плавления; — суммарное время плавления

Fig. 1. Dependence of melting time by the melting periods of chromium-nickel ferroalloys 1, 3 and 5 (a, б and в) on fractional composition: — time of the first, second and third melting period; — total melting time

четным [27] и ранее полученным экспериментальным данным [28, 29].

Процесс плавления рассматриваемых сплавов в железоуглеродистом расплаве происходит в три периода (так как они относятся к группе легкоплавких ферросплавов, у которых $T_{\text{л}} \leq T_{\text{км}}$). В течение первого периода на куске ферросплава образуется стальная корочка, сам кусок прогревается и при достижении поверхностью температуры плавления начинает плавиться. Ферросплав при этом находится в оболочке твердой стали, толщина которой увеличивается в начале периода и уменьшается к концу. Во втором периоде за счет тепла, поступающего от железоуглеродистого расплава, ферросплав плавится под коркой твердой стали. Данный период завершается, когда твердая оболочка расплавляется и кусок ферросплава непосредственно контактирует с жидкой сталью. Чем дольше длится первый период, тем сильнее прогревается и частично расплавляется корочка «намерзаемой» стали, за счет чего сокращается второй период. В третьем периоде твердый кусок ферросплава плавится, контактируя с жидкой сталью.

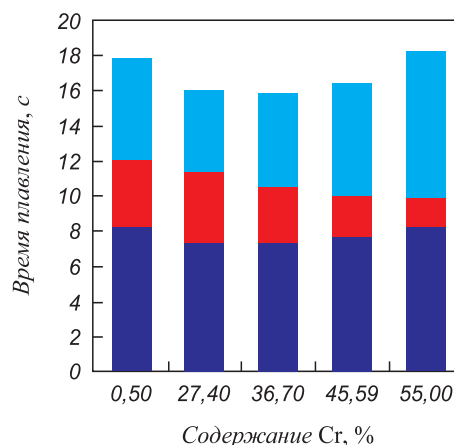


Рис. 2. Зависимость времени плавления по периодам плавления хромоникелевых ферросплавов от содержания хрома при размере куска ферросплава 50 мм и температуре железоуглеродистого расплава 1600 °С: — и — время первого (τ_1), второго (τ_2) и третьего (τ_3) периодов плавления

Fig. 2. Dependence of melting time by the melting periods of chromium-nickel ferroalloys on chromium content at a diameter of the ferroalloy sample of 50 mm and temperature of the iron-carbon melt of 1600 °C: — and — time of the first (τ_1), second (τ_2) and third (τ_3) melting periods

Как видно на рис. 1, крупность кусков ферросплава оказывает основное влияние на изменение времени их плавления. При увеличении размера куска возрастает масса сплавов, что приводит к увеличению толщины намерзаемой стальной корки и его теплосодержания. С увеличением размера куска общее время плавления увеличивается: в 250 – 300 раз при увеличении крупности кусков ферросплава от 3 до 100 мм (в 30 раз).

На рис. 2 показано, что увеличение содержания хрома от 0,5 до 36,7 % в рассматриваемых сплавах при размере кусков ферросплава 50 мм приводит к снижению суммарного времени плавления с 18 до 16 с, а при дальнейшем увеличении содержания хрома до 55 % происходит увеличение времени плавления до 18,2 с. Данную зависимость можно объяснить температурами ликвидуса комплексных ферросплавов, которые согласуются с характером линии ликвидуса на диаграмме равновесного состояния двухкомпонентной системы Fe–Cr [30]. Согласно диаграмме увеличение содержания хрома до 21 % сопровождается снижением температуры ликвидуса на 25 °С, а дальнейшее повышение концентрации хрома приводит к росту температуры ликвидуса двухкомпонентной системы.

На рис. 3 показана зависимость времени плавления по периодам плавления комплексных никелевых ферросплавов от температуры жидкой стали при исходном размере кусков ферросплава 50 мм. Выявлено, что снижение температуры ванны жидкой стали приводит к увеличению времени плавления ферросплава.

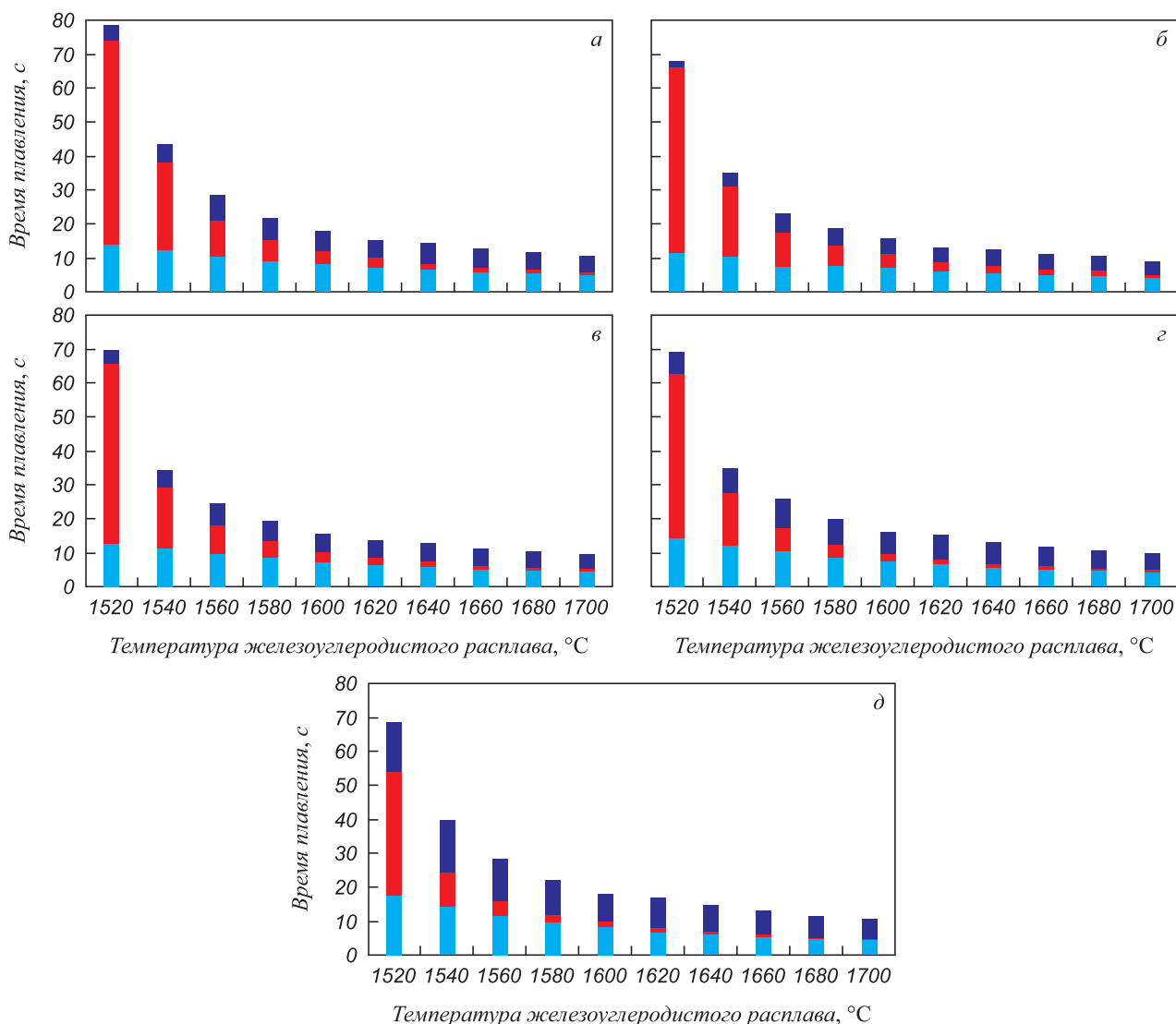


Рис. 3. Зависимость времени плавления по периодам плавления хромоникелевых ферросплавов от температуры железоуглеродистого расплава 1 – 5 (а – г) при диаметре куска ферросплава 50 мм:
 ■, ■ и ■ – время первого (τ_1), второго (τ_2) и третьего (τ_3) периодов плавления

Fig. 3. Dependence of melting time by the melting periods of chromium-nickel ferroalloys on temperature of the iron-carbon melt 1 – 5 (a – d) at a diameter the ferroalloy sample of 50 mm:
 ■, ■ and ■ – time of the first (τ_1), second (τ_2) and third (τ_3) melting periods

вов, особенно в низкотемпературной (1520 – 1560 °C) области. Основное увеличение времени плавления ферросплавов происходит за счет продолжительности второго периода, что связано с длительным процессом плавления стальной корочки на поверхности куска ферросплава при низкой температуре ванны стального расплава. При снижении температуры ванны жидкой стали с 1700 до 1520 °C наблюдается увеличение общего времени плавления комплексных ферросплавов в 7 – 8 раз.

В целом, рассматриваемые комплексные никель-содержащие ферросплавы характеризуются значительно более быстрым протеканием процесса плавления в жидкой стали по сравнению со стандартным феррохромом и ферроникелем [15].

Выводы

Методом математического моделирования изучено время плавления комплексных никелевых ферросплавов, содержащих примерно 10 % Ni, 0,5 – 55,0 % Cr, примерно 0,2 % C, примерно 0,2 % Si в железоуглеродистом расплаве. Установлено, что все рассматриваемые сплавы относятся к группе легкоплавких ферросплавов и процесс их плавления протекает в три периода. С увеличением исходного размера кусков ферросплава от 3 до 100 мм время плавления увеличивается в 250 – 300 раз. Показано, что увеличение содержания хрома в составе комплексного сплава до 37 % приводит к снижению времени плавления, а при дальнейшем увеличении содержания хрома до 55 % происходит уве-

личение времени плавления. Снижение температуры ванны жидкой стали с 1700 до 1520 °С сопровождается увеличением продолжительности плавления комплексных ферросплавов в 7–8 раз. В целом комплексные

никелевые ферросплавы характеризуются значительно более быстрым протеканием процесса плавления в жидкой стали по сравнению со стандартным феррохромом и ферроникелем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Pariser H.H., Backeberg N.R., Masson O.C.M., Bedder J.C.M. Changing nickel and chromium stainless steel markets – a review // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2018. Vol. 118. No. 6. P. 563–568. <http://dx.doi.org/10.17159/2411-9717/2018/v118n6a1>
2. Лукин А.С., Комолова О.А., Григорович К.В. Анализ технологии производства коррозионностойкой стали марки 08X18N10T. В кн.: Тр. конгресса с межд. участием и конф. молодых ученых «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований»: «ТЕХНОГЕН–2019». Екатеринбург: УрО РАН, 2020. С. 169–173.
3. Chen P.-X., Chu S.-J., Zhang G.-H. A new method to produce Ni–Cr ferroalloy used for stainless steel production // *High Temperature Materials and Processes*. 2016. Vol. 35. No. 7. P. 635–641. <https://doi.org/10.1515/htmp-2015-0054>
4. Токовой О.К. Аргонкислородное рафинирование нержавеющей стали. Челябинск: ЮУрГУ, 2015, 250 с.
5. Салина В.А., Жучков В.И., Заякин О.В. Изучение процессов получения сплавов системы Fe–Si–Ni–Cr методом термодинамического моделирования // *Расплавы*. 2019. № 1. С. 62–66. <https://doi.org/10.1134/S0235010619010183>
6. Shkolnik V.S., Zharmenov A.A., Tolymbekov M.Zh., Baisanov S.O., Chekimbaev A.F. Prospects of production complex aluminum silicon alloy. In: *The 13th Int. Ferroalloys Congress: Efficient Technologies in Ferroalloy Industry*, 9–12 June 2013. Almaty, 2013. P. 311–316.
7. Akuov A., Samuratov Ye., Kelamanov B., Zhumagaliyev Ye., Taizhigitova M. Development of an alternative technology for the production of refined ferrochrome // *Metallurgija*. 2020. Vol. 59. No. 4. P. 529–532.
8. Kelamanov B., Samuratov Ye., Akuov A., Abdirashit A., Burumbayev A., Orynbasar R. Research possibility of involvement Kazakhstani nickel ore in the metallurgical treatment // *Metallurgija*. 2021. Vol. 60. No. 3-4. P. 313–316.
9. Kelamanov B., Tolymbekov M., Kaskin K., Baisanov A. Thermal analysis of agglomerated nickel ore. In: *Proceedings of the 12th Int. Ferroalloys Congress: Sustainable Future*. Helsinki, Finland, 2010. P. 657–659.
10. Есенжулов А.Б., Островский Я.И., Афанасьев В.И., Заякин О.В., Жучков В.И. Использование российского хромородного сырья при выплавке высокоуглеродистого феррохрома в ОАО «СЗФ» // *Сталь*. 2008. № 4. С. 32–35.
11. Жучков В.И., Андреев Н.А., Заякин О.В., Афанасьев В.И. Состав и служебные характеристики хромсодержащих ферросплавов // *Сталь*. 2013. № 5. С. 36–37.
12. 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. P. 1149–1154. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0420-1>
13. Kobatake H., Brillo J. Density and viscosity of ternary Cr–Fe–Ni liquid alloys // *Journal of Materials Science*. 2013. Vol. 48. No. 19. P. 6818–6824. <https://doi.org/10.1007/s10853-013-7487-2>
14. Кель И.Н. Физико-химические исследования и разработка технологии получения комплексных борсодержащих ферросплавов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2021. 24 с.
15. Тогобицкая Д.Н., Петров А.Ф., Снигура И.Р., Головкин Л.А. Моделирование физико-химических характеристик комплексных хромсодержащих ферросплавов. В кн.: *Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершен-*
1. Pariser H.H., Backeberg N.R., Masson O.C.M., Bedder J.C.M. Changing nickel and chromium stainless steel markets – a review. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2018, vol. 118, no. 6, pp. 563–568. <http://dx.doi.org/10.17159/2411-9717/2018/v118n6a1>
2. Lukin A.S., Komolova O.A., Grigorovich K.V. Analysis of the production technology of corrosion-resistant steel 08Kh18N10T. In: *Proceedings of the Congress with Int. Participation and Conf. of Young Scientists “Fundamental Research and Applied Development of Processing and Utilization of Technogenic Formations”*: “TECHNOGEN–2019”. Yekaterinburg: UB RAS, 2020, pp. 169–173. (In Russ.).
3. Chen P.-X., Chu S.-J., Zhang G.-H. A new method to produce Ni–Cr ferroalloy used for stainless steel production. *High Temperature Materials and Processes*. 2016, vol. 35, no. 7, pp. 635–641. <https://doi.org/10.1515/htmp-2015-0054>
4. Tokovoi O.K. *Argon-Oxygen Refining of Stainless Steel*. Chelyabinsk: South Ural State University, 2015, 250 p. (In Russ.).
5. Salina V.A., Zhuchkov V.I., Zayakin O.V. Thermodynamic simulation of the manufacture of Fe–Si–Ni–Cr alloys. *Russian Metallurgy (Metall)*. 2019, vol. 2019, no. 2, pp. 162–164. <https://doi.org/10.1134/S003602951902023X>
6. Shkolnik V.S., Zharmenov A.A., Tolymbekov M.Zh., Baisanov S.O., Chekimbaev A.F. Prospects of production complex aluminum silicon alloy. In: *The 13th Int. Ferroalloys Congress: Efficient Technologies in Ferroalloy Industry*, 9–12 June 2013. Almaty, 2013, pp. 311–316.
7. Akuov A., Samuratov Ye., Kelamanov B., Zhumagaliyev Ye., Taizhigitova M. Development of an alternative technology for the production of refined ferrochrome. *Metallurgija*. 2020, vol. 59, no. 4, pp. 529–532.
8. Kelamanov B., Samuratov Ye., Akuov A., Abdirashit A., Burumbayev A., Orynbasar R. Research possibility of involvement Kazakhstani nickel ore in the metallurgical treatment. *Metallurgija*. 2021, vol. 60, no. 3-4, pp. 313–316.
9. Kelamanov B., Tolymbekov M., Kaskin K., Baisanov A. Thermal analysis of agglomerated nickel ore. In: *Proceedings of the 12th Int. Ferroalloys Congress: Sustainable Future*. Helsinki, Finland, 2010, pp. 657–659.
10. Esenzhulov A.B., Ostrovskii Ya.I., Afanas'ev V.I., Zayakin O.V., Zhuchkov V.I. The use of Russian chromium-ore raw materials in smelting of high-carbon ferrochrome in JSC “SZF”. *Stal'*. 2008, no. 4, pp. 32–35. (In Russ.).
11. Zhuchkov V.I., Andreev N.A., Zayakin O.V., Afanas'ev V.I. Composition and performance of chromium-bearing ferroalloys. *Steel in Translation*. 2013, vol. 43, no. 5, pp. 306–308. <https://doi.org/10.3103/S0967091213050240>
12. 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. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0420-1>
13. Kobatake H., Brillo J. Density and viscosity of ternary Cr–Fe–Ni liquid alloys. *Journal of Materials Science*. 2013, vol. 48, no. 19, pp. 6818–6824. <https://doi.org/10.1007/s10853-013-7487-2>
14. Kel' I.N. *Physico-chemical research and development of technology for the production of complex boron-containing ferroalloys: Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.* Yekaterinburg, 2021, 24 p. (In Russ.).
15. Togobitskaya D.N., Petrov A.F., Snigura I.R., Golovko L.A. Modeling of physical and chemical characteristics of complex chromium-containing ferroalloys. In: *Prospects for Development of Metallurgy and Machine Building Using Completed Fundamental Research and*

- ных фундаментальных исследований и НИОКР. Тр. науч.-пр. конф. с международным участием и элементами школы молодых ученых. Екатеринбург, 2020. С. 96–99.
16. Заякин О.В., Жучков В.И., Лозовая Е.Ю. Время плавления никельсодержащих ферросплавов в стали // Известия вузов. Черная металлургия. 2007. Т. 50. № 5. С. 13–16.
 17. Верховлюк А.М. Взаимодействие жидких и твердых фаз в металлургических процессах. М.: Инфра-Инженерия, 2021. 184 с.
 18. Петров А.Ф., Снигура И.Р., Головкин Л.А., Цюпа Н.А. Прогнозирование времени плавления комплексных ферросплавов методом физико-химического моделирования // Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. 2019. № 33. С. 205–214.
 19. Казачков И.П., Паримончик И.В. Кинетика плавления ферросплавов // Известия вузов. Черная металлургия. 1973. № 2. С. 55–59.
 20. Guthrie R.I.L., Clift R., Henein H. Contacting problems associated with aluminium and ferro-alloy additions in steelmaking-hydrodynamic aspects // Metallurgical Transactions. 1975. Vol. 6. Article 321. <https://doi.org/10.1007/BF02913576>
 21. Agryropoulos S.A. Dissolution characteristics of ferroalloys in liquid steel // Iron and Steelmaker. 1984. Vol. 11. No. 11. P. 48–57.
 22. Nakamura Y., Kuwabara M. Evaporation of Fe, Cr and Ni from liquid iron-alloys during electron-beam melting // Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan. 1975. Vol. 15. No. 2. P. 103–108. <https://doi.org/10.2355/isijinternational1966.15.103>
 23. Zhang L., Oeters F. Melting and dissolution of high-melting alloys in steel melts // Steel Research. 2000. Vol. 71. No. 5. P. 141–144. <https://doi.org/10.1002/srin.200005704>
 24. Ohno R. Steady-state rates of dissolution of stationary iron, cobalt and nickel cylinders in liquid copper // Metallurgical Transactions B. 1982. Vol. 13. P. 175–183. <https://doi.org/10.1007/BF02664574>
 25. Тогобицкая Д.Н., Пиптюк В.П., Петров А.Ф., Греков С.В., Миргородская А.С. Прогнозирование свойств ферросплавов для экспертной оценки эффективности их использования при доводке стали на УКП // Металлург. 2018. № 11. С. 27–32.
 26. Лозовая Е.Ю. Изучение кинетики плавления ферросплавов в железоуглеродистом расплаве: Автореферат дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2001. 23 с.
 27. Шурыгин П.М., Шантарин В.Д. О кинетике растворения легирующих металлов в жидком железе // Изв. АН СССР. Металлургия и горное дело. 1964. № 2. С. 38–40.
 28. Zayakin O.V., Renev D.S. Density of chrome–nickel ferroalloys // KnE Materials Science. 2019. Vol. 5. No. 1. P. 297–303. <https://doi.org/10.18502/kms.v5i1.3981>
 29. Жучков В.И., Заякин О.В., Мальцев Ю.Б. Изучение температур плавления и плотности никельсодержащих ферросплавов // Расплавы. 2001. № 1. С. 7–9.
 30. Ферросплавы: справ. изд. / В.Г. Мизин, Н.А. Чирков, В.С. Игнатъев, С.И. Ахманаев, В.Д. Поволоцкий. М.: Металлургия, 1998. 415 с.
 - R&D. Proceedings of the Conf. with Int. Participation and Elements of the School of Young Scientists. Yekaterinburg, 2020, pp. 96–99. (In Russ.).
 16. Zayakin O.V., Zhuchkov V.I., Lozovaya E.Yu. Melting time of nickel-containing ferroalloys in steel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2007, vol. 50, no. 5, pp. 13–16. (In Russ.).
 17. Verkhovlyuk A.M. *Interaction of Liquid and Solid Phases in Metallurgical Processes*. Moscow: Infra-Inzheneriya, 2021, 184 p. (In Russ.).
 18. Petrov A.F., Snigura I.R., Golovko L.A., Tsyupa N.A. Prediction of melting time of complex ferroalloys by physico-chemical modeling. *Fundamental'ni ta prikladni problemi chornoj metalurgii*. 2019, no. 33, pp. 205–214. (In Russ.).
 19. Kazachkov I.P., Parimonchik I.V. Kinetics of ferroalloy melting. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1973, no. 2, pp. 55–59. (In Russ.).
 20. Guthrie R.I.L., Clift R., Henein H. Contacting problems associated with aluminium and ferro-alloy additions in steelmaking-hydrodynamic aspects. *Metallurgical Transactions*. 1975, vol. 6, article 321. <https://doi.org/10.1007/BF02913576>
 21. Agryropoulos S.A. Dissolution characteristics of ferroalloys in liquid steel. *Iron and Steelmaker*. 1984, vol. 11, no. 11, pp. 48–57.
 22. Nakamura Y., Kuwabara M. Evaporation of Fe, Cr and Ni from liquid iron-alloys during electron-beam melting. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*. 1975, vol. 15, no. 2, pp. 103–108. <https://doi.org/10.2355/isijinternational1966.15.103>
 23. Zhang L., Oeters F. Melting and dissolution of high-melting alloys in steel melts. *Steel Research*. 2000, vol. 71, no. 5, pp. 141–144. <https://doi.org/10.1002/srin.200005704>
 24. Ohno R. Steady-state rates of dissolution of stationary iron, cobalt and nickel cylinders in liquid copper. *Metallurgical Transactions B*. 1982, vol. 13, pp. 175–183. <https://doi.org/10.1007/BF02664574>
 25. Togobitskaya D.N., Pipyuk V.P., Petrov A.F., Grekov S.V., Mirgorodskaya A.S. Prediction of ferroalloy properties for expert evaluation of the efficiency of their use during addition to steel in a ladle furnace unit. *Metallurgist*. 2019, vol. 62, no. 11–12, pp. 1115–1122. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00763-5>
 26. Lozovaya E.Yu. *Study of the kinetics of ferroalloys melting in iron-carbon melt: Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.* Yekaterinburg, 2001, 23 p. (In Russ.).
 27. Shurygin P.M., Shantarin V.D. On kinetics of dissolution of alloying metals in liquid iron. *Izv. AN SSSR. Metallurgiya i gornoe delo*. 1964, no. 2, pp. 38–40. (In Russ.).
 28. Zayakin O.V., Renev D.S. Density of chrome–nickel ferroalloys. *KnE Materials Science*. 2019, vol. 5, no. 1, pp. 297–303. <https://doi.org/10.18502/kms.v5i1.3981>
 29. Zhuchkov V.I., Zayakin O.V., Mal'tsev Yu.B. Study of melting temperatures and density of ferroalloys containing nickel. *Raspilav*. 2001, no. 1, pp. 7–9. (In Russ.).
 30. Mizin V.G., Chirkov N.A., Ignat'ev V.S., Akhmanov S.I., Povolutskii V.D. *Ferroalloys: Reference book*. Moscow: Metallurgiya, 1998, 415 p. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Дмитрий Сергеевич Ренёв, младший научный сотрудник лаборатории стали и ферросплавов, Институт металлургии УрО РАН
ORCID: 0000-0002-4850-5273
E-mail: sensel199@mail.ru

Олег Вадимович Заякин, член-корреспондент РАН, д.т.н., главный научный сотрудник, заведующий лабораторией стали и ферросплавов, Институт металлургии УрО РАН
ORCID: 0000-0003-2304-384X
E-mail: zferro@mail.ru

Владимир Иванович Жучков, д.т.н., главный научный сотрудник лаборатории стали и ферросплавов, Институт металлургии УрО РАН
E-mail: ntm2000@mail.ru

Dmitrii S. Renev, Junior Researcher of the Laboratory of Steel and Ferroalloys Steel, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0002-4850-5273
E-mail: sensel199@mail.ru

Oleg V. Zayakin, Corresponding Member of RAS, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Head of the Laboratory of Steel and Ferroalloys, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0003-2304-384X
E-mail: zferro@mail.ru

Vladimir I. Zhuchkov, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher of the Laboratory of Steel and Ferroalloys, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
E-mail: ntm2000@mail.ru

Вклад авторов

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Д. С. Ренев – проведение расчетов, обработка полученных данных, подготовка текста.

О. В. Заякин – научное руководство, формирование основной концепции, цели и задачи исследования.

В. И. Жучков – разработка модели расчета, анализ результатов исследований.

D. S. Renev – performing the calculations, processing the received data, preparing the text.

O. V. Zayakin – scientific guidance, formation of the main concept, goal and objectives of the study.

V. I. Zhuchkov – development of a calculation model, analysis of the research results.

Поступила в редакцию 30.12.2021

После доработки 01.06.2022

Принята к публикации 06.06.2022

Received 30.12.2021

Revised 01.06.2022

Accepted 06.06.2022