



УДК 669.15–198

DOI 10.17073/0368-0797-2024-2-161-166



Оригинальная статья

Original article

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ФЛЮСУЮЩИХ ДОБАВОК НА СВОЙСТВА ШЛАКА ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОГО ФЕРРОХРОМА

А. М. Акуов¹, Б. С. Келаманов², О. В. Заякин³,
Е. К. Самуратов¹, Д. А. Есенгалиев²

¹ ТОО Казфосфат (Казахстан, 080000, Жамбылская обл., Тараз, ул. Абая, 126)

² Актюбинский региональный университет им. К. Жубанова (Казахстан, 030000, Актюбинская обл., Актобе, пр. А. Молдагуловой, 34)

³ Институт металлургии Уральского отделения РАН (Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

✉ akuov.am@mail.ru

Аннотация. Промышленные шлаки высокоуглеродистого феррохрома имеют сложный состав. Они состоят из оксидной части (Cr_2O_3 , CaO , MgO , FeO , SiO_2 , Al_2O_3), а также «запутавшихся» металлических королек ($\text{Cr}_{\text{мет}}$). С целью увеличения степени полезного использования хрома и снижения потерь в виде металлических королек проведены эксперименты в лабораторных условиях по изучению изменения свойств шлака высокоуглеродистого феррохрома путем применения эффективных и доступных флюсующих материалов (керамзита, бората кальция и шлака рафинированного феррохрома). Изучено влияние флюсующих добавок в виде керамзита, бората кальция и шлака от производства низкоуглеродистого феррохрома на свойства шлака высокоуглеродистого феррохрома. Присадки до 8 % керамзита и шлака низкоуглеродистого феррохрома приводят к стабильному снижению температур размягчения конечных шлаков. При вводе 6 – 10 % бората кальция происходит интенсивное снижение температур начала размягчения. Наибольшее влияние на снижение температур размягчения оказывает добавка 10 % бората кальция при вводе в шлак высокоуглеродистого феррохрома, при этом наблюдается снижение температуры начала размягчения на 262 °С, конца размягчения – на 135 °С. Все исследованные флюсующие добавки оказывают положительное влияние на степень снижения остаточной концентрации металлического хрома в шлаке. При вводе 2 % флюсующих материалов наблюдается наиболее интенсивное снижение содержания $\text{Cr}_{\text{мет}}$ в шлаке. Наилучшие значения по остаточному содержанию 0,7 – 0,8 % $\text{Cr}_{\text{мет}}$ достигнуты при использовании 4 % шлака низкоуглеродистого феррохрома и бората кальция. При использовании керамзита для достижения таких показателей $\text{Cr}_{\text{мет}}$ необходима добавка в количестве 10 %. Показана эффективность использования исследованных флюсующих материалов при производстве высокоуглеродистого феррохрома для повышения степени извлечения хрома, содержание которого в шлаке снижается примерно на 84 %.

Ключевые слова: металлургия, феррохром, шлак, корольки металла, флюсующие материалы, керамзит, борат кальция

Для цитирования: Акуов А.М., Келаманов Б.С., Заякин О.В., Самуратов Е.К., Есенгалиев Д.А. Изучение влияния флюсующих добавок на свойства шлака высокоуглеродистого феррохрома. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2024;67(2):161–166.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-2-161-166>

INFLUENCE OF ADDITIVES ON PROPERTIES OF HIGH-CARBON FERROCHROME SLAG

A. M. Akuov¹, B. S. Kelamanov², O. V. Zayakin³,
E. K. Samuratov¹, D. A. Yessengaliyev²

¹ Kazphosphate LLP (126 Abaya Str., Taraz, Zhambyl Region 080000, Republic of Kazakhstan)

² K. Zhubanov Aktope Regional University (34 A. Moldagulova Ave., Aktope 030000, Republic of Kazakhstan)

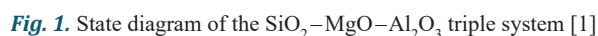
³ Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (101 Amundsena Str., Yekaterinburg 620016, Russian Federation)

✉ akuov.am@mail.ru

Abstract. Industrial slags produced by high-carbon ferrochrome are a material of complex composition consisting of an oxide part (Cr_2O_3 , CaO , MgO , FeO , SiO_2 , Al_2O_3) and “entangled” metal prills ($\text{Cr}_{\text{мет}}$). In order to increase the degree of chromium utilization and reduce losses in the form of metal prills, we conducted the laboratory experiments to study changes in properties of the slag produced by high-carbon ferrochrome through the use of effective and affordable fluxing materials: expanded clay, calcium borate and refined ferrochrome slag. The effect

For citation: Akuov A.M., Kelamanov B.S., Zayakin O.V., Samuratov E.K., Yessengaliyev D.A. Influence of additives on properties of high-carbon ferrochrome slag. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2024;67(2):161–166. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-2-161-166>

Температурный режим металла и шлака при выплавке высокоуглеродистого феррохрома определяется в первую очередь температурами размягчения оксидного материала (концентрацией SiO_2 и отношением $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$), а также соотношением между содержанием хрома и углерода в сплаве. Температуры плавления шлака выбранного состава должна быть выше температуры плавления металла на 100 – 150 °С, так как нагрев металла при выплавке высокоуглеродистого феррохрома идет через шлак, печь работает в режиме сопротивления. Шлак, получаемый при переработке хромовых руд Кемпирсайского массива, имеет высокие температуру плавления и вязкость. Такой шлак плохо выходит из ванны печи и способствует излишнему перегреву металла. Для снижения температуры плавления и вязкости шлака в шихту добавляют кремний-



содержащие флюсующие материалы в виде отсеков кварцита или высокозольных восстановителей.

За долгие годы эксплуатации Кемпирсайского месторождения по мере заглубления карьеров и шахт в добычу начали вовлекаться руды из нижних горизонтов, которые были в меньшей степени подвержены процессам выветривания, что оказало сильное влияние на состав вмещающей породы, произошло увеличение содержания оксида магния и уменьшение оксида алюминия. В связи с этим, значительно изменился и состав хромовых руд, получаемых в последние годы ферросплавными предприятиями. Состав шлаков определяется составом хромовых руд, следовательно, претерпели изменения и их составы в сторону увеличения содержания оксида магния (с 28 – 32 до 45 – 48 %) и уменьшения оксида алюминия (с 28 – 29 до 14 – 15 %), в то время как содержание оксида кремния SiO_2 осталось на уровне 29 – 34 %. Это подтверждается динамикой изменения состава конечных шлаков высокоуглеродистого феррохрома, из которой видим, что отношение $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ за последние десятилетия увеличилось с 1,8 до 3,0 и выше [4 – 6].

В соответствии с химическим составом значительные изменения претерпел и фазовый состав шлаков высокоуглеродистого феррохрома, который был смещен из поля магнезиальной шпинели ($\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) в поле форстерита ($2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$). Количество последнего в шлаках с момента пуска Кемпирсайского рудника и по настоящее время возросло с 35 до 70 %. Повышение содержания магнезии в шлаках в основном произошло за счет поставки более бедных хромовых руд и начала эксплуатации новых месторождений с повышенным содержанием магнезии.

Таким образом, дальнейшее наращивание объема производства хромосодержащих ферросплавов обуславливает необходимость широкого вовлечения наиболее распространенных высокомагнезиальных хромовых руд с содержанием 18 – 22 % MgO при концентрации 7 – 9 % Al_2O_3 .

Увеличение концентрации магнезии в шлаках приводит к увеличению потерь хрома. Значительное количество хрома теряется в виде металлической фазы, что связано с ухудшением физико-химических свойств образующихся высокомагнезиальных шлаков.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В работах [7 – 9] показано, что введение в шихту высокоуглеродистого феррохрома различных флюсующих и углеродсодержащих материалов способствует снижению тугоплавкости образующихся оксидных материалов, что позволяет сократить потери хрома со шлаком в виде запутавшихся королек металла [10 – 12].

Проведены лабораторные опыты по снижению температур размягчения шлаков при выплавке высокоуглеродистого феррохрома путем присадки различных флюсующих материалов для осаждения и коагуляции запутавшихся королек металла. В качестве флюсующих материалов использовали борат кальция [13 – 15], керамзит и стабилизированный шлак низкоуглеродистого (рафинированного) феррохрома (РФХ). В виду различного фракционного состава используемых материалов все образцы подвергали дроблению и фракционированию с получением материалов крупностью 1 – 3 мм. Химические составы рассматриваемых флюсующих материалов и исходного шлака ВУФХ представлены в таблице.

Экспериментальные плавки проводили в высокотемпературной печи сопротивления Таммана. Технические характеристики печи: потребляемая мощность – 40 кВт; напряжение сети – 380 В; максимальное напряжение на шинах печи – 15 В; максимально допустимая температура – 1800 °С; время разогрева до максимальной температуры – 30 мин.

Навеска исходного шлака ВУФХ для каждого эксперимента составляла 300 г. Флюсующие добавки задавали в количестве 2 – 10 % от массы исходного шлака с шагом 2 %. По каждому варианту шихтовки проведено не менее двух плавов. Температуры начала $T_{\text{нр}}$ и конца $T_{\text{кр}}$ размягчения определяли в соответствии с ГОСТ 26517 – 85. Предварительно дозированную смесь шлака и флюса засыпали в тигель, затем его помещали в печь и нагревали со скоростью 10 – 15 °С/мин. Замер температур осуществляли вольфрам-рениевой термопарой ВР 5/20.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ввод флюсующих добавок разносторонне влияет на химический состав и основность обработанных шла-

Химические составы флюсующих материалов

Chemical compositions of the fluxing materials

Материал	Содержание, мас. %, элементов							
	$\text{Cr}_{\text{мет}}$	Cr_2O_3	CaO	MgO	Al_2O_3	FeO	SiO_2	B_2O_3
Керамзит	–	0,10	3,01	2,59	15,27	7,38	62,30	–
Борат кальция	–	–	37,20	0,50	0,05	–	–	43,80
Шлак РФХ	1,3	8,60	46,80	12,80	5,80	1,90	22,90	0,30
Шлак ВУФХ	4,9	9,40	1,70	42,00	16,80	2,30	26,00	–

ков [16 – 18]. По данным химического анализа конечных шлаков при вводе керамзита до 10 % с основностью 0,09 происходит увеличение концентрации оксида SiO_2 с 26,0 до 32,1 %, что сопровождается снижением основности конечного шлака на 0,28.

Добавка высокоосновного шлака РФХ до 10 % приводит к увеличению основности конечного шлака на 0,12. В шлаке появляется оксид B_2O_3 с незначительной концентрацией 0,01 %. Необходимо отметить попутное положительное влияние присадки шлака РФХ, так как используются отходы собственного производства и дополнительно вводится 0,13 % $\text{Cr}_{\text{мет}}$. Вместе с тем, высокая температура плавления шлака РФХ при рассмотрении варианта ввода флюсующих материалов в ковш вызывает необходимость выполнения расчета теплового баланса для определения допустимого количества присадки. В случае присадок флюсующих материалов непосредственно в печь необходимо считаться с ростом основности конечного шлака, что может отразиться как на работе футеровки печи, так и на самом технологическом процессе выплавки высокоуглеродистого феррохрома [19 – 21].

Добавление бората кальция приводит к повышению до 5 % CaO и до 2,6 % B_2O_3 в конечном шлаке. Учиты-

вая, что оксид B_2O_3 относится к «кислым» материалам, можно сказать, что основность шлака изменяется не существенно (увеличивается на 0,02).

При выборе флюсующих материалов необходимо учитывать их стоимость. Перспективной является возможность использования отходов собственного производства (шлаков РФХ).

Результаты измерения температур начала размягчения представлены на рис. 2, а, конца размягчения – на рис. 2, б.

Для всех исследуемых образцов увеличение до 8 % флюсующих добавок от массы шлака ВУФХ приводит к снижению температуры начала размягчения. Увеличение до 10 % добавки флюса противоречиво отражается на изменении значений $T_{\text{нр}}$ (рис. 2, а): для керамзита и шлака РФХ – повышает, а для бората кальция, наоборот, резко снижает.

При добавке до 8 % шлака РФХ наблюдается плавное снижение температур начала размягчения (на 35 °С). Дальнейшее увеличение добавки РФХ приводит к резкому росту величины $T_{\text{нр}}$. При вводе 10 % шлака РФХ температура начала размягчения превышает значение $T_{\text{нр}}$ исходного шлака ВУФХ.

Для сравнения проплавили шлак высокоуглеродистого феррохрома без добавок флюсов. До температуры 1650 °С изменений в состоянии шлака не наблюдается, начиная с 1660 °С шлак переходит в тестообразное состояние. При температуре 1677 °С шлак представляет из себя густую вязкую массу, при достижении 1705 °С шлак полностью расплавился. Шлак менее жидкотекучий, чем при обработке флюсами.

При использовании бората кальция в количестве до 10 % от массы шлака температуры начала и конца размягчения шлака снижаются на 265 и 135 °С. В случае использования керамзита эти показатели составляют 39 и 80 °С. При добавках до 10 % стабилизированного шлака РФХ температура размягчения шлака увеличивается на 2 °С выше температуры размягчения исходного шлака ВУФХ.

На рис. 3 представлены данные по остаточному содержанию металлического хрома в шлаке после обработки флюсами.

Наилучшие результаты по осаждению королек получены при расходе 4 % бората кальция от массы шлака. Содержание $\text{Cr}_{\text{мет}}$ в шлаке снизилось на 83,7 %. Для шлаков, обработанных керамзитом, эта величина составляет 81,7 % при его расходе 10 % от массы шлака. В шлаках, обработанных стабилизированным шлаком РФХ в количестве 4 % от массы шлака, содержание $\text{Cr}_{\text{мет}}$ снизилось на 85,7 %.

Интенсивное снижение содержания металлического хрома в шлаке наблюдается при вводе 2 – 4 % исследуемых флюсующих материалов.

По снижению содержания $\text{Cr}_{\text{мет}}$ в шлаке можно прийти к выводу, что предпочтительнее использовать керамзит и стабилизированный бором шлак РФХ.

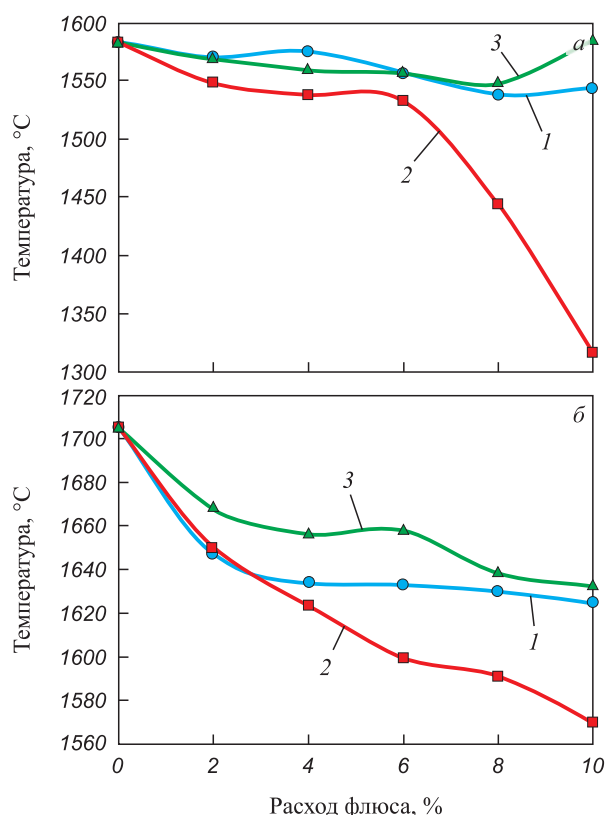


Рис. 2. Зависимость температуры начала (а) и конца (б) размягчения шлака от расхода флюса: 1 – керамзит; 2 – борат кальция; 3 – шлак РФХ

Fig. 2. Dependence of the temperature of beginning (а) and end (б) of slag softening on the flux flow rate: 1 – expanded clay; 2 – calcium borate; 3 – refined ferrochrome slag

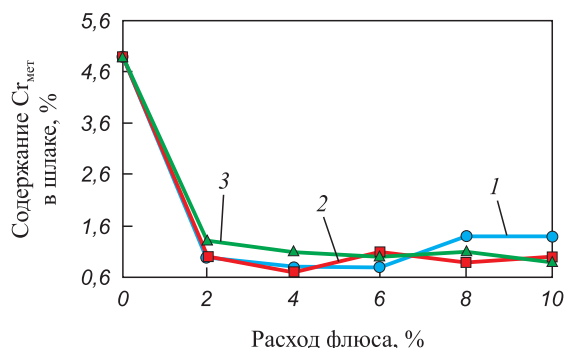


Рис. 3. Зависимость содержания $Cr_{мет}$ в шлаке от расхода флюса: 1 – борат кальция; 2 – шлак РФХ; 3 – керамзит

Fig. 3. Dependence of $Cr_{мет}$ content in the slag on the flux flow rate: 1 – calcium borate; 2 – refined ferrochrome slag; 3 – expanded clay

В промышленных условиях необходимо учитывать стоимость каждого вида флюсующих добавок.

ВЫВОДЫ

Изучено влияние флюсующих добавок в виде керамзита, бората кальция и шлака от производства РФХ на свойства шлака высокоуглеродистого феррохрома. Показано, что присадка до 8 % керамзита и шлака низкоуглеродистого феррохрома приводят к стабильному снижению температур размягчения конечных шлаков. Наибольшая интенсивность снижения температуры начала размягчения наблюдается при вводе 6–10 % бората кальция. Наибольшее влияние на снижение температур размягчения оказывает добавка бората кальция; при вводе в шлак ВУФХ 10 % бората кальция наблюдается снижение температуры начала размягчения на 262 °С, конца размягчения – на 135 °С.

Все исследованные флюсующие добавки оказывают положительное влияние на степень снижения остаточной концентрации металлического хрома в шлаке. Наиболее интенсивное снижение содержания $Cr_{мет}$ в шлаке наблюдается при вводе 2 % флюсующих материалов. Наилучшие значения по остаточному содержанию 0,7–0,8 % $Cr_{мет}$ достигнуты при использовании 4 % шлака РФХ и бората кальция. При использовании керамзита для достижения таких показателей содержания $Cr_{мет}$ необходима добавка в количестве 10 %.

Показана эффективность использования исследованных флюсующих материалов для повышения степени извлечения хрома при производстве высокоуглеродистого феррохрома, содержание остаточного в шлаке снижается примерно на 84 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Рысс М.А. Производство ферросплавов. Москва: Металлургия; 1985:344.
2. Бережной А.С. Многокомпонентные системы окислов. Киев: Наукова думка; 1970:544.
3. Akberdin A., Konurov U., Kim A., Sultangaziyev R., Issagulov A. Viscosity and electric conductivity of melt system of $CaO-Al_2O_3-B_2O_3$. *Metalurgija*. 2016;55(3):313–316.
4. Kim A.S., Akberdin A.A., Sultangaziyev R.B. Using basalt rocks for agglomeration of refractory chromite ores of Kazakhstan. *Metallurgist*. 2020;63(9–10):1005–1012. <https://doi.org/10.1007/s11015-020-00919-8>
5. Абдуллабеков Е.Э., Каскин К.К., Нурумгалиев А.Х. Теория и технология производства хромистых сплавов. Алматы: Республиканский издательский кабинет по учебной и методической литературе; 2010:280.
6. Sariev O., Kelamaov B., Zhumagaliyev Ye., Kim S., Abdirashit A., Almagambetov M. Remelting the high-carbon ferrochrome dust in a direct current arc furnace. *Metalurgija*. 2020;59(4):533–536.
7. Kuatbay Ye., Nurumgaliyev A., Zhuniskaliyev T., Smailov S., Yerzhanov A., Bulekova G. Development of carbon ferrochrome smelting technology using high-ash coal. *Metalurgija*. 2022;61(3-4):764–766.
8. Жило Н.Л., Острцова И.С., Мизин В.Г. и др. Физико-химические свойства шлаков углеродистого феррохрома. *Сталь*. 1983;(3):35–39.
Zhilo N.L., Ostretsova I.S., Mizin V.G., etc. Physico-chemical properties of carbon ferrochrome slags. *Stal'*. 1983;(3): 35–39. (In Russ.).
9. Kelamanov B., Samuratov Ye., Akuov A., etc. Thermodynamic-diagram analysis of Fe–Ni–C–O system. *Metalurgija*. 2022;61(1):261–264.
10. Yessengaliyev D., Kelamanov B., Zayakin O. Thermodynamic modeling of the recovery process of manganese by metallothermic method. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2022;57(6):1230–1234.
11. Akberdin A., Kim A., Sultangaziyev R., Karbayev M. Thermodynamic modeling of the borbarium ferroalloy smelting technological process. *Metalurgija*. 2020;59(3):333–336.
12. Гриненко В.И., Толымбеков М.Ж., Байсанов С.О., Мусина И.Б. Опыт использования в производстве высокоуглеродистого феррохрома низкофосфористых фракционированных углей. *Сталь*. 1999;(6):34–35.
Grinenko V.I., Tolymbekov M.Zh., Baisanov S.O., Musina I.B. Experience of using low-phosphorous fractionated coals in the production of high-carbon ferrochrome. *Stal'*. 1999;(6):34–35. (In Russ.).
13. Akuov A., Samuratov Y., Kelamanov B., Zhumagaliyev Y., Taizhigitova M. Development of an alternative technology for the production of refined ferrochrome. *Metalurgija (Zagreb, Croatia)*. 2020;59(4):529–532.
14. Shabanov E.Zh., Baisanov A.S., Toleukadyr R.T., Inkarebekova I.S. Study of phase transformations during heating of briquetted mono-charge from chromium-containing materials and carbon reducing agents. *CIS Iron and Steel Review*. 2023;25(1):26–30. <https://doi.org/10.17580/cisirs.2023.01.05>
15. Kim A.S., Akberdin A.A., Sultangaziyev R.B., Orlov A.S., Adamova G.H. Features of the slag regime of smelting boron containing silicochrome. *Metalurgija*. 2023;62(2):194–196.
16. Li J.–L., Xu A.–J., He D.–F., Yang Q.–X., Tian N.–Y. Effect of FeO on the formation of spinel phases and chromium distribution in the $CaO-SiO_2-MgO-Al_2O_3-Cr_2O_3$ system. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*.

2013;20(3):253–258.

<http://dx.doi.org/10.1007/s12613-013-0720-9>

17. Ma J., Li W., Fu G., Zhu M. Effect of B_2O_3 on the melting temperature and viscosity of $CaO-SiO_2-MgO-Al_2O_3-TiO_2-Cr_2O_3$ slag. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2021;7(3):1190–1199.

<https://doi.org/10.1007/s40831-021-00413-8>

18. Жданов А.В., Нурмаганбетова Б.Н., Павлов В.А. Изучение влияния добавок алюмосиликатных и силикатных материалов на температуры размягчения хромитовой руды. *Металлы*. 2015;(4):3–8.

Zhdanov A.V., Nurmaganbetova B.N., Pavlov V.A. Effect of additives of aluminosilicate and silicate materials on softening temperatures of chromite ore. *Metals*. 2015;(4):3–8. (In Russ.).

19. Shabanov Y., Makhambetov Y., Saulebek Z., Toleukadyr R., Baisanov S., Nurgali N., Shotanov A., Dossekenov M.,

Zhumagaliyev Y. Pilot tests of pre-reduction in chromium raw materials from Donskoy ore mining and processing plant and melting of high-carbon ferrochromium. *Metals*. 2024;14(202):1–15. <https://doi.org/10.3390/met14020202>

20. Panda C.R., Mishra K.K., Nayak B.D., Rao D.S., Nayak B.B. Release behaviour of chromium from ferrochrome slag. *International Journal of Environmental Technology and Management*. 2012;15(3-6):261–274.

<https://doi.org/10.1504/IJETM.2012.049227>

21. 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):32–36.

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;38(4): 315–317. <https://doi.org/10.3103/S096709120804013X>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Асхат Максотович Акуов, к.т.н., инженер-технолог, ТОО Казфосфат

ORCID: 0000-0002-5163-5378

E-mail: akuov.am@mail.ru

Бауыржан Сатыбалдылы Келаманов, к.т.н., ассоц. профессор, автор-корреспондент, профессор кафедры «Металлургия и горное дело», Актобинский региональный университет им. К. Жубанова

ORCID: 0000-0001-7646-9153

E-mail: kelamanov-b@mail.ru

Олег Вадимович Заякин, член-корреспондент РАН, д.т.н., главный научный сотрудник, заведующий лабораторией стали и ферросплавов, Институт металлургии Уральского отделения РАН

ORCID: 0000-0002-9442-5928

E-mail: zferro@mail.ru

Ерулан Каиржанович Самуратов, к.т.н., инженер-технолог, ТОО Казфосфат

ORCID: 0000-0001-8591-8547

E-mail: Samuratov.ek@mail.ru

Даурен Амангельдиевич Есенгалиев, к.т.н., доцент кафедры «Металлургия и горное дело», Актобинский региональный университет им. К. Жубанова

ORCID: 0000-0003-0792-0822

E-mail: dauralga@mail.ru

Askhat M. Akuov, Cand. Sci. (Eng.), Process Engineer, Kazphosphate LLP

ORCID: 0000-0002-5163-5378

E-mail: akuov.am@mail.ru

Bauyrzhan S. Kelamanov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Prof. of the Chair of Metallurgy and Mining, K. Zhubanov Aktobe Regional University

ORCID: 0000-0001-7646-9153

E-mail: kelamanov-b@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: 0000-0002-9442-5928

E-mail: zferro@mail.ru

Yerulan K. Samuratov, Cand. Sci. (Eng.), Process Engineer, Kazphosphate LLP

ORCID: 0000-0001-8591-8547

E-mail: Samuratov.ek@mail.ru

Dauren A. Yessengaliyev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Metallurgy and Mining, K. Zhubanov Aktobe Regional University

ORCID: 0000-0003-0792-0822

E-mail: dauralga@mail.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

А. М. Акуов – проведение лабораторных исследований, обработка данных.

Б. С. Келаманов – обзор литературных данных, проведение расчетов.

О. В. Заякин – анализ результатов исследований, формирование выводов.

Е. К. Самуратов – изучение остаточного содержания хрома в шлаках после лабораторных экспериментов.

Д. А. Есенгалиев – формирование целей и задач исследования, подготовка текста.

A. M. Akuov – conducting laboratory tests, data processing.

B. S. Kelamanov – review of the literary data, conducting calculations.

O. V. Zayakin – analysis of the research results, formulation of conclusions.

Ye. K. Samuratov – studying the residual chromium content in slags after laboratory experiments.

D. A. Yessengaliyev – formation of research goals and objectives, writing the text.

Поступила в редакцию 11.12.2023

После доработки 12.02.2024

Принята к публикации 19.02.2024

Received 11.12.2023

Revised 12.02.2024

Accepted 19.02.2024