

УДК 536:669.168

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
КАРБОТЕРМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ХРОМА  
ИЗ ОКСИДНОЙ СИСТЕМЫ  $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{--FeO--CaO--SiO}_2\text{--MgO--Al}_2\text{O}_3$**

© 2020 г. В. А. Салина<sup>а</sup>, \*, В. И. Жучков<sup>а</sup>, А. В. Сычев<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт металлургии Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия

\*e-mail: valentina\_salina@mail.ru

Поступила в редакцию 14.07.2020 г.

После доработки 19.07.2020 г.

Принята к публикации 22.07.2020 г.

В статье приведены результаты термодинамического моделирования карботермического процесса восстановления хрома из оксидной системы  $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{--FeO--CaO--SiO}_2\text{--MgO--Al}_2\text{O}_3$  в интервале температур ( $T$ ) 1673–1973 К с шагом 50 К при общем давлении в системе 0.1 МПа и количестве азота 2.24 м<sup>3</sup>. В качестве оксидной системы использовали составы хромовой руды, мас. %: 38  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ; 11.1 FeO; 0.17 CaO; 15  $\text{SiO}_2$ ; 29.7 MgO; 6  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и шлака феррохрома низкоуглеродистого (ФХНУ), мас. %: 13  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ; 4 FeO; 41.6 CaO; 21.2  $\text{SiO}_2$ ; 12.8 MgO; 7.4  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , добавляемого к руде в количестве 0; 5; 10; 20%. В качестве восстановителя использовали углерод, расход которого увеличен на 10% от стехиометрии на восстановление Fe и Cr и на 8% от массы металла для образования карбидов железа, хрома и кремния. Термодинамическое моделирование осуществлено с использованием программного комплекса HSC Chemistry 6.12 (Outokumpu, Финляндия). В базу данных введены термодинамические данные соединения  $\text{CrO(II)}$ , уточнены существующие в базе данных термодинамические характеристики соединений:  $\text{CaCr}_2\text{O}_4$ , SiC,  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ,  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ,  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ,  $\text{Fe}_3\text{C}$ ,  $\text{Al}_4\text{C}_3$ . Результаты термодинамического моделирования показали, что повышение температуры процесса с 1673 до 1973 К увеличивает степень восстановления хрома ( $\eta_{\text{Cr}}$ ) при различном содержании шлака в системе. Увеличение содержания шлака в системе с 0 до 20% уменьшает  $\eta_{\text{Cr}}$  с 94.8 до 94% при температуре 1973 К. Наибольшее значение степени восстановления хрома характерно для состава системы с 0% шлака. Химический состав металла при температуре 1973 К и 0% шлака, мас. %: 65.6 Cr; 22.7 Fe; 0.26 Si; 11.5 C. Результаты термодинамического моделирования могут быть использованы при разработке технологии получения хромсодержащего сплава с вовлечением в металлургический передел шлака феррохрома низкоуглеродистого.

*Ключевые слова:* оксидная система, карботермический процесс, термодинамическое моделирование, температура, степень восстановления хрома, химический состав металла

DOI: 10.31857/S0235010620060110

## ВВЕДЕНИЕ

Переработка техногенных отходов металлургического производства является актуальной задачей во всем мире. Отходами металлургического производства, в том числе ферросплавного, являются шлаки, пыль и шламы газоочистных сооружений. Объемы образования отходов зависят от применяемых шихтовых материалов и технологии производства [1, 2].

В настоящее время в России в шлаковых отвалах накоплено более 300 млн т шлаков сталеплавильного, литейного и ферросплавного производств, которые подлежат переработке [3–6]. На ферросплавных предприятиях при объеме выплавки ~2 млн т всех видов ферросплавов образуется ~1 млн т шлаков и ~130 тыс т пылей и шламов [7].

Шлаки производства высокоуглеродистого феррохрома высокопрочные и применяются в виде щебня в дорожном строительстве, а шлаки низко- и среднеуглеродистого феррохрома при остывании рассыпаются в порошок фракции <0.1 мм из-за образования двухкальциевого силиката ( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ). После магнитной сепарации они складываются на отвалах либо используются в виде различных добавок [8].

В литературе приведены данные о прогнозировании фазового состава шлаков и их стабилизации [8, 9], термодинамическом моделировании процесса восстановления элементов [10], применении хромсодержащих шлаков в металлургическом переделе с последующим получением товарного продукта [11–15].

Термодинамическое моделирование равновесного охлаждения шлаков внепечной обработки стали с применением ПК FactSage, проведенное авторами работы [8], показало возможность прогнозирования фазового состава шлаков. Анализ полученных данных позволил определить необходимый для стабилизации расход борсодержащей добавки в зависимости от состава шлака. Стабилизация в этом случае связана с замещением силикатных ионных групп на боратные, в результате чего затрудняется диффузия атомов и ионов, участвующих в полиморфном превращении.

В работе [9] показано применение боратной добавки для стабилизации высокотемпературной полиморфной фазы хромсодержащих шлаков при производстве нержавеющей стали, путем формирования твердого раствора с  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ . Результаты показали, что только определенная доля присаженного бората образует твердый раствор с  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ , а основная часть обнаружена в фазе кальциевого боратосиликата.

В работе [10] изучен процесс карботермического восстановления элементов системы Fe–Cr–O и термодинамически определены возможные продукты процесса восстановления. Установлено, что при высоких температурах и низких соотношениях  $n_{\text{C}} : n_{\text{O}}$  (исходное молярное отношение C к O в образце) образуется больше раствора Fe–Cr–C и меньше остаточного содержания углерода. Карбиды металлов образуются на начальной стадии процесса восстановления, а раствор Fe–Cr–C образуется, когда степень восстановления достаточно высокая.

Авторами работы [11] разработана технология получения прочных комплексных хромовых окатышей с заданными физико-химическими характеристиками для выплавки в электродуговых печах хромовых ферросплавов. В качестве шихтовых материалов использовали мелкодисперсный хромовый концентрат Донского ГОКа ( $\geq 50\% \text{Cr}_2\text{O}_3$ ), шлаки рафинированного феррохрома, железистую (~10% Fe и 60%  $\text{SiO}_2$ ) и/или высокожелезистую (~25% Fe и 25%  $\text{SiO}_2$ ) диатомитовую руду Муголжарской группы месторождений и кокс АО “Сары-Арка” с последующим окатыванием и спеканием. Состав шихты с 3% кокса для получения неметаллизированных окатышей позволяет снизить температуру обжига окатышей с 1350 до 1200°C, причем без существенного изменения аппаратурно-технологического оформления процесса обжига. Химический состав полученных окатышей, мас. %: 44  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ; 6.08  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 18.65  $\text{SiO}_2$ ; 12.48 FeO; 1.57 CaO; 9.95 MgO; 7.27 остальное. Средняя прочность при температуре обжига окатышей, Н/окатыш: 1323 К – 2893; 1373 К – 3971,7; 1423 К – 4511,1; 1473 К – 5325. В работе [12] пыль газоочистки от производства хромовых ферросплавов (20–43%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) применяли в качестве добавки при получении обожженных хромовых окатышей.

Авторами работы [13] разработана технология получения высокоуглеродистого феррохрома с использованием до 30–70% в навеске шихтовых материалов антрацита ( $P^d - 0.016\%$ ,  $S^d - 0.15\%$ ) в качестве частичной замены традиционного кокса. Шихто-

**Таблица 1.** Химический состав исходных материалов, мас. %

№ материала	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
1	38	11.1	0.17	15	29.7	6
2	13	4	41.6	21.2	12.8	7.4

вые материалы: хромовая руда, металлоконцентрат, шлак ферросилиция, хромовые отходы, отсеvy кварцита, хромовые брикеты. Коэффициент извлечения хрома составил 84.4% при использовании в качестве восстановителя кокса и антрацита (30–50% на колошу) и 84.7% при применении кокса и угля.

В работах [16, 17] изучено влияние основности шлака и количества восстановителя на степень восстановления хрома системы Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–FeO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub>–MgO–CaO–P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> с применением ПК HSC 6.12 Chemistry при температуре 1973 К. В качестве исходной системы использовали состав хромовой руды, содержащей 40% Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; восстановитель – ферросиликоникель. Определены оптимальная основность шлака (CaO)/(SiO<sub>2</sub>) и расход кремния-восстановителя, при которых степень восстановления хрома составила 95.1%.

Одним из способов утилизации шлаков и пылей производства ферро- и силикохрома является их добавка при выплавке. Процесс такого использования шлаков изучен недостаточно. В связи с этим нами проведено термодинамическое моделирование карботермического процесса восстановления хрома из состава смеси хромовой руды и шлака феррохрома низкоуглеродистого (ФХНУ).

### ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Целью настоящей работы является определение степени восстановления хрома ( $\eta_{Cr}$ ) от температуры ( $T$ ) и рационального расхода шлака ФХНУ методом термодинамического моделирования.

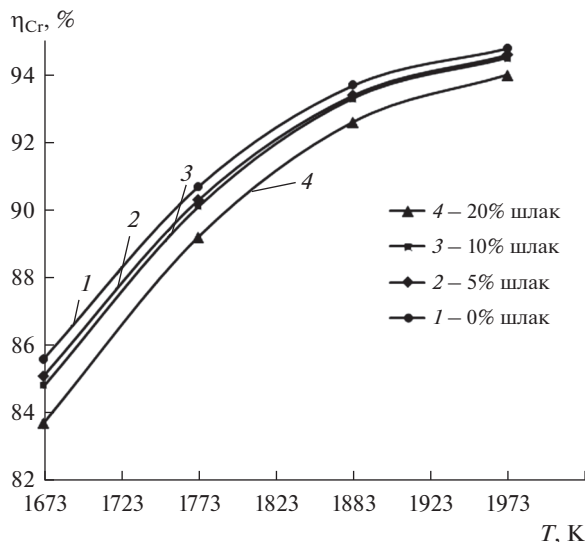
Термодинамическое моделирование процесса восстановления хрома из оксидной системы Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–FeO–CaO–SiO<sub>2</sub>–MgO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с применением в качестве восстановителя углерода проведено по следующим вариантам:

- 1) изучение влияния температуры процесса 1673–1973 К на степень восстановления хрома из смеси хромовой руды и шлака ФХНУ;
- 2) определение влияния количества шлака ФХНУ (0; 5; 10; 20%) на степень восстановления хрома при температуре 1973 К.

Химический состав материалов оксидных систем приведен в табл. 1. Состав материала 1 соответствует хромовой руде, состав 2 – шлаку ФХНУ.

В качестве восстановителя использовали углерод, расход которого увеличен на 10% от стехиометрически необходимого на полное восстановление железа и хрома и на 8% от массы металла для образования карбидов железа, хрома и кремния, что соответствует реальным условиям получения углеродистого феррохрома.

Для проведения термодинамического моделирования использовали программный комплекс (ПК) HSC Chemistry 6.12, разработанный Outokumpu, и основанный на минимизации энергии Гиббса и вариационных принципах термодинамики [18]. Равновесный состав многокомпонентной оксидной системы Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–FeO–CaO–SiO<sub>2</sub>–MgO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> определен с применением подпрограммы “Equilibrium Compositions”. Исходные параметры для проведения термодинамического моделирования: интервал температур 1673–1973 К с шагом 50 К, общее давление 0.1 МПа, количество N<sub>2</sub> 2.24 м<sup>3</sup>. В базу данных ПК HSC Chemistry 6.12 введены термодинамические характеристики



**Рис. 1.** Изменение степени восстановления хрома ( $\eta_{Cr}$ ) от температуры ( $T$ ) при содержании 0; 5; 10; 20% шлака.

оксида хрома  $CrO(II)$ , уточнены термохимические характеристики, существующие в базе соединений:  $CaCr_2O_4$ ,  $Fe_3C$ ,  $Cr_3C_2$ ,  $Cr_7C_3$ ,  $Cr_{23}C_6$ ,  $SiC$ ,  $Al_4C_3$  [19].

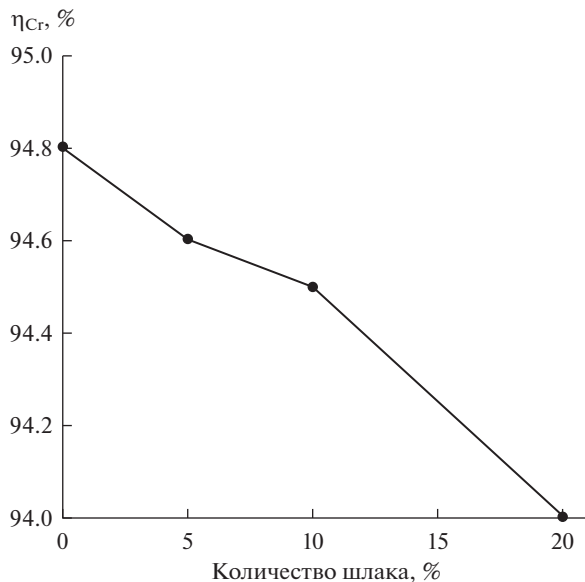
### РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты термодинамического моделирования процесса восстановления хрома из многокомпонентной оксидной системы  $Cr_2O_3-FeO-CaO-SiO_2-MgO-Al_2O_3$  с применением в качестве восстановителя углерода представлены в виде следующих графических зависимостей:

1) изменение степени восстановления хрома от температуры (1673–1973 К) при содержании 0; 5; 10; 20% шлака ФХНУ (рис. 1);

2) изменение степени восстановления хрома от количества шлака ФХНУ при температуре 1973 К (рис. 2).

На рис. 1 показано изменение степени восстановления хрома от температуры. Повышение температуры процесса с 1673 до 1973 К увеличивает степень восстановления хрома при различном содержании шлака ФХНУ в составе системы. Это связано с тем, что повышение температуры процесса увеличивает реакционную способность углерода, как элемента-восстановителя, что способствует образованию карбидов железа и хрома, которые затем выступают в качестве носителей углерода. Это приводит к дальнейшему восстановлению оксидов железа и хрома. Восстановление хрома в смеси  $Cr_2O_3-C-Fe$  наблюдается уже при 1373 К, тогда как без железа хром при указанной температуре не восстанавливается [20]. При повышении температуры процесса с 1673 до 1973 К степень восстановления хрома увеличилась на 9.2% для системы без шлака ФХНУ, на 9.5; 9.7 и 10.3% для систем с 5; 10 и 20% шлака соответственно. Наибольшее повышение степени восстановления хрома отмечено в интервале температур с 1673 до 1773 К, а наименьшее – с 1873 до 1973 К. Самая высокая степень восстановления хрома отмечена при температуре 1973 К для всех систем.



**Рис. 2.** Изменение степени восстановления хрома ( $\eta_{Cr}$ ) от количества шлака при температуре 1973 К.

На рис. 2 показано изменение степени восстановления хрома от количества шлака в составе системы при температуре 1973 К. Повышение количества шлака с 0 до 20% уменьшает степень восстановления хрома с 94,8 до 94%. Это связано с уменьшением суммарного содержания  $Cr_2O_3$  в системе при вводе шлака (с 38 до 33%  $Cr_2O_3$  при 20% шлака). При содержании 5% шлака в системе степень восстановления хрома составила 94,6% при температуре 1973 К.

В табл. 2 приведен химический состав металла, образующегося при температуре 1973 К.

При повышении количества шлака с 0 до 20% в составе шихты химический состав металла изменяется незначительно. Так, содержание хрома уменьшается с 65,6 до 65,3%, кремния – с 0,26 до 0,16%, а железа – увеличивается с 22,7 до 23,0%.

Термодинамический расчет показал возможность использования до 20% шлака ФХНУ при производстве высокоуглеродистого феррохрома без значительного снижения извлечения хрома в металл и изменения его химического состава.

**Таблица 2.** Химический состав металла, мас. %

Элемент	Количество шлака, %			
	0	5	10	20
Cr	65,6	65,5	65,3	65,3
Fe	22,7	22,7	23,0	23,0
Si	0,26	0,22	0,20	0,16
C	11,5	11,5	11,6	11,5

## ВЫВОДЫ

Результаты термодинамического моделирования карботермического процесса восстановления хрома из многокомпонентной оксидной системы  $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{--FeO--CaO--SiO}_2\text{--MgO--Al}_2\text{O}_3$  при содержании 0; 5; 10 и 20% шлака низкоуглеродистого феррохрома в составе шихты показали, что повышение температуры процесса с 1673 до 1973 К незначительно увеличивает степень восстановления хрома при различном содержании шлака в составе шихты. Наибольшее значение степени восстановления хрома характерно для состава системы с 0% шлака. Увеличение количества шлака с 0 до 20% незначительно понижает степень восстановления хрома (с 94.8 до 94%) и изменяет состав образующегося металла. Результаты термодинамического моделирования могут быть использованы при разработке технологии получения хромсодержащего сплава с вовлечением в металлургический передел шлака ФХНУ.

Авторы выражают благодарность за помощь заведующему лаборатории “Бор” Химико-металлургического института им. Ж. Абишева, д.т.н., профессору А.А. Акбердину.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-29-24027.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рысс М.А. Производство ферросплавов. М.: Металлургия. 1985.
2. Гасик М.И., Лякишев Н.П., Емлин Б.И. Теория и технология производства ферросплавов. М.: Металлургия. 1988.
3. Смирнов Л.А., Леонтьев Л.И., Сорокин Ю.В. Переработка и использование техногенных отходов металлургического производства // Тр. Междунар. конгресса “Фундаментальные основы технологий переработки и утилизации техногенных отходов”. Екатеринбург. 2012. С. 15–19.
4. Косырев К.Л., Паршин В.М., Фоменко А.П. Предпосылка и концепция создания энергометаллургических комплексов для переработки техногенных отходов // Тр. Междунар. конгресса “Фундаментальные основы технологий переработки и утилизации техногенных отходов”. Екатеринбург. 2012. С. 41–46.
5. Карпенко Н.И., Ярмаковский В.Н., Школьник Я.Ш. Состояние и перспективы использования продуктов переработки техногенных образований в строительной индустрии // Тр. Междунар. конгресса “Фундаментальные основы технологий переработки и утилизации техногенных отходов”. Екатеринбург. 2012. С. 49–56.
6. Государственный доклад “О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2015 г.”. Дата обращения 17.03.2020. [http://www.mnr.gov.ru/docs/o\\_sostoyanii\\_i\\_ob\\_okhrane\\_okruzhayushchey\\_sredy\\_rossiyskoy\\_federatsii/gosudarstvennyy\\_doklad\\_o\\_sostoyanii\\_i\\_ob\\_okhrane\\_okruzhayushchey\\_sredy\\_rossiyskoy\\_federatsii\\_v\\_2016\\_/](http://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii_v_2016_/).
7. Zhuchkov V.I., Zayakin O.V., Sychev A.V. Russian Metallurgy. 2020. 6. P. 662–666. <https://doi.org/10.1134/S003602952006018X>
8. Кушнерев И.В., Оржих М.Б., Либанов Б.Б., Коротеев С.А., Платонов А.А., Плюхин В.В. Стабилизация шлаков внепечной обработки стали от силикатного распада // Новые огнеупоры. 2018. № 4. С. 44.
9. Durinck D., Arnout S., Mertens G., Boydens E., Jones P.T., Elsen J., Blanpain B., Wollants P. // J. Amer. Ceramic Soc. 2008. 91. № 2. P. 548–554. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2007.02147.x>
10. Zhang Yang-ling, Liu Yang, Wei Wen-jie. // International J. Minerals, Metallurgy and Materials. 2013. 20. № 10. P. 931–940. <https://doi.org/10.1007/s12613-013-0817-1>
11. Bondarenko I.V., Tastanov E.A. // Metallurgist. 2019. 62. № 11–12. P. 1213–1218. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00776-0>
12. Beukes J.P., Dawson N.F., Van Zyl P.G. Theoretical and practical aspects of Cr (VI) in the South African ferrochrome industry // Proceedings of the Twelfth International Ferroalloys Congress. Sustainable Future. Helsinki. 2010. 1. P. 53–62.
13. Kaliakparov A.G., Baltabaev S.R., Strakhov V.M., Mukhtar A.A. // Metallurgist. 2017. 61. № 9–10. P. 765–769. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0561-x>
14. Жучков В.И., Сычев А.В., Заякин О.В., Леонтьев Л.И. Использование техногенных отходов ферросплавного производства // Тр. Междунар. конгресса “Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований “Техноген-2019”. Екатеринбург. 2019. С. 96–99.

15. Демин Б.Л., Сорокин Ю.В., Смирнов Л.А., Щербаков Е.Н. Существующие способы переработки и направления использования ферросплавных шлаков // Сб. трудов научно-практической конференции “Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершённых фундаментальных исследований и НИОКР: “Ферросплавы”. Екатеринбург. 2018. С. 346–350.
16. Salina V.A., Zhuchkov V.I., Zayakin O.V. // Russian Metallurgy. 2019. № 2. P. 162–164. <https://doi.org/10.1134/S003602951902023X>
17. Салина В.А., Жучков В.И., Заякин О.В. Изучение силикотермического способа получения комплексных никельхромсодержащих ферросплавов методом термодинамического моделирования // Наука и техника Казахстана. 2017. № 3–4. С. 85–90.
18. Roine A. Outokumpu HSC Chemistry for Windows. Chemical reactions and Equilibrium software with extensive thermochemical database. Pori: Outokumpu research OY, 2002.
19. Глушко В.П. Термические константы веществ. М.: Академия наук СССР. 1979.
20. Ryabchikov I.V., Mizin V.G., Yarovoi K.I. // Steel in Translation. 2013. 43. № 6. P. 379–382. <https://doi.org/10.3103/S096709121306017X>

## THERMODYNAMIC SIMULATION OF THE CARBOTHERMAL PROCESS OF CHROME REDUCTION FROM THE $\text{Cr}_2\text{O}_3$ – $\text{FeO}$ – $\text{CaO}$ – $\text{SiO}_2$ – $\text{MgO}$ – $\text{Al}_2\text{O}_3$ OXIDE SYSTEM

V. A. Salina<sup>1</sup>, V. I. Zhuchkov<sup>1</sup>, A. V. Sychev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of metallurgy of Ural Branch of the RAS, Yekaterinburg, Russia*

The results of thermodynamic simulation of the carbothermal process of chromium reduction from the  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ – $\text{FeO}$ – $\text{CaO}$ – $\text{SiO}_2$ – $\text{MgO}$ – $\text{Al}_2\text{O}_3$  oxide system in the temperature range ( $T$ ) 1673–1973 K after 50 K at total system pressure of 0.1 MPa and the amount of 2.24 m<sup>3</sup> N<sub>2</sub> are given in this article. The compositions of chromium ore, wt %: 38 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 11.1 FeO; 0.17 CaO; 15 SiO<sub>2</sub>; 29.7 MgO; 6 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and slag of low carbon ferrochrome (LC FeCr), wt %: 13 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 4 FeO; 41.6 CaO; 21.2 SiO<sub>2</sub>; 12.8 MgO; 7.4 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> added to the ore in an amount of 0; 5; 10; 20% was used as the oxide system. Carbon was used as a reducing agent, the amount of which was increased by 10% for the quantity stoichiometrically required for the reduction of Fe and Cr and by 8% by mass of the metal for the formation iron, chromium, and silicon carbides. Thermodynamic simulation was performed using the HSC Chemistry 6.12 software package developed from Outokumpu, Finland. Thermodynamic data of the CrO(II) compound were entered into the software package database. The thermodynamic characteristics of the CaCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, SiC, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, Fe<sub>3</sub>C, Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> available in the database were specified. The results of thermodynamic simulation were showed that the increase in the process temperature from 1673 to 1973 K increase the degree of chromium reduction ( $\eta_{\text{Cr}}$ ) at different slag contents in the composition of the system. The increase in the slag content in the system from 0 to 20% decreases  $\eta_{\text{Cr}}$  from 94.8 to 94% at the temperature 1973 K. The highest value the degree of chromium reduction was obtained for the composition of the system with 0% slag. The chemical composition of the metal at the temperature 1973 K and with out slag is, wt %: 65.6 Cr; 22.7 Fe; 0.26 Si; 11.5 C. The thermodynamic simulation results can be used to development the technology for producing a chromium-containing alloy using slag of low carbon ferrochrome in the metallurgical conversion.

*Keywords:* oxide system, carbothermal process, thermodynamic simulation, temperature, degree of chromium reduction, chemical composition of the metal

## REFERENCES

1. Ryss M.A. Proizvodstvo ferrosplavov [Production of ferroalloys]. M.: Metallurgiya. 1985. [In Russian].
2. Gasik M.I., Lyakishev N.P., Emlin B.I. Teoriya i tekhnologiya proizvodstva ferrosplavov [Theory and technology for the production of ferroalloys]. M.: Metallurgiya. 1988. [In Russian].
3. Smirnov L.A., Leont'ev L.I., Sorokin Yu.V. Pererabotka i ispol'zovanie tekhnogennyh othodov metallurgicheskogo proizvodstva [Processing and using of industrial wastes of metallurgical pro-

- duction] // Tr. Mezhdunar. kongressa "Fundamental'nye osnovy tekhnologij pererabotki i utilizacii tekhnogennyh othodov". Yekaterinburg. 2012. P. 15–19. [In Russian].
4. Kosyrev K.L., Parshin V.M., Fomenko A.P. Predposylka i koncepciya sozdaniya energometallurgicheskikh kompleksov dlya pererabotki tekhnogennyh othodov [The premise and concept of creating energometallurgical complexes for the processing of industrial waste] // Tr. Mezhdunar. kongressa "Fundamental'nye osnovy tekhnologij pererabotki i utilizacii tekhnogennyh othodov". Yekaterinburg. 2012. P. 41–46. [In Russian].
  5. Karpenko N.I., Yarmakovskij V.N., Shkol'nik Ya.Sh. Sostoyanie i perspektivy ispol'zovaniya produktov pererabotki tekhnogennyh obrazovanij v stroitel'noj industrii [The state and prospects of using products of the processing of technogenic formations in the construction industry] // Tr. Mezhdunar. kongressa "Fundamental'nye osnovy tekhnologij pererabotki i utilizacii tekhnogennyh othodov". Ekaterinburg. 2012. P. 49–56. [In Russian].
  6. Gosudarstvennyj doklad "O sostoyanii i ob ohrane okruzhayushchej sredy Rossijskoj Federacii v 2015 godu" [About the state and environmental protection of the Russian Federation in 2015]. Date of treatment 03.17.2020. [http://www.mnr.gov.ru/docs/o\\_sostoyanii\\_i\\_ob\\_okhrane\\_okruzhayushchej\\_sredy\\_rossiyskoj\\_federatsii/gosudarstvennyj\\_doklad\\_o\\_sostoyanii\\_i\\_ob\\_okhrane\\_okruzhayushchej\\_sredy\\_rossiyskoj\\_federatsii\\_v\\_2016\\_/](http://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchej_sredy_rossiyskoj_federatsii/gosudarstvennyj_doklad_o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchej_sredy_rossiyskoj_federatsii_v_2016_/) [In Russian].
  7. Zhuchkov V.I., Zayakin O.V., Sychev A.V. // Russian Metallurgy. 2020. **6**. P. 662–666. <https://doi.org/10.1134/S003602952006018X>
  8. Kushnerev I.V., Orzhekh M.B., Libanov B.B., Koroteev S.A., Platonov A.A., Plyuhin V.V. Stabilizatsiya shlakov vnepechnoj obrabotki stali ot silikatnogo raspada [Stabilization of slag of furnace treatment of steel from silicate decomposition] // Novye ognepopy. 2018. № 4. P. 44. [In Russian].
  9. Durinck D., Arnout S., Mertens G., Boydens E., Jones P.T., Elsen J., Blanpain B., Wollants P. // J. Amer. Ceramic Soc. 2008. **91**. № 2. P. 548–554. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2007.02147.x>
  10. Zhang Yang-ling, Liu Yang, Wei Wen-jie. // International J. Minerals, Metallurgy and Materials. 2013. **20**. № 10. P. 931–940. <https://doi.org/10.1007/s12613-013-0817-1>
  11. Bondarenko I.V., Tastanov E.A. // Metallurgist. 2019. **62**. № 11–12. P. 1213–1218. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00776-0>
  12. Beukes J.P., Dawson N.F., Van Zyl P.G. Theoretical and practical aspects of Cr(VI) in the South African ferrochrome industry // Proceedings of the Twelfth International Ferroalloys Congress. Sustainable Future. Helsinki. 2010. **1**. P. 53–62.
  13. Kaliakparov A.G., Baltabaev S.R., Strakhov V.M., Mukhtar A.A. // Metallurgist. 2017. **61**. № 9–10. P. 765–769. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0561-x>
  14. Zhuchkov V.I., Sychev A.V., Zayakin O.V., Leont'ev L.I. Ispol'zovanie tekhnogennyh othodov ferrosplavnogo proizvodstva [The using of industrial waste of ferroalloy production] // Tr. Mezhdunar. kongressa "Fundamental'nye issledovaniya i prikladnye razrabotki processov pererabotki i utilizacii tekhnogennyh obrazovanij "Tekhnogen-2019". Yekaterinburg. 2019. P. 96–99. [In Russian].
  15. Demin B.L., Sorokin Yu.V., Smirnov L.A., Shcherbakov E.N. Sushchestvuyushchie sposoby pererabotki i napravleniya ispol'zovaniya ferrosplavnnyh shlakov [Existing processing methods and directions using of ferroalloy slags] // Sb. trudov nauchno-prakticheskoy konferencii "Perspektivy razvitiya metallurgii i mashinostroeniya s ispol'zovaniem zavershennyh fundamental'nyh issledovanij i NIOKR: "Ferrosplavy". Yekaterinburg. 2018. P. 346–350. [In Russian].
  16. Salina V.A., Zhuchkov V.I., Zayakin O.V. // Russian Metallurgy. 2019. № 2. P. 162–164. <https://doi.org/10.1134/S003602951902023X>
  17. Salina V.A., Zhuchkov V.I., Zayakin O.V. Izuchenie silikotermicheskogo sposoba polucheniya kompleksnyh nikel'hromsoderzhashchih ferrosplavov metodom termodinamicheskogo modelirovaniya [Study of a silicothermic method of complex nickel chromium-containing ferroalloys production by thermodynamic modeling method] // Nauka i tekhnika Kazahstana. 2017. № 3–4. P. 85–90. [In Russian].
  18. Roine A. Outokumpu HSC Chemistry for Windows. Chemical reactions and Equilibrium software with extensive thermochemical database. Pori: Outokumpu research OY, 2002.
  19. Glushko V.P. Termicheskie konstanty veshchestv [Thermal constants of substances]. M.: Akademiya nauk SSSR. 1979. [In Russian].
  20. Ryabchikov I.V., Mizin V.G., Yarovoi K.I. // Steel in Translation. 2013. **43**. № 6. P. 379–382. <https://doi.org/10.3103/S096709121306017X>