Код МРНТИ 53.31.17

***Р. Т. Төлеуқадыр[1], А. Қ. Смағұлов[1], Ж. О. Садық[1], О. В. Заякин[2]**

[1]Химико-металлургический институт им. Ж. Абишева (г. Караганда, Казахстан),

[2]Институт металлургии им. академика Н. А. Ватолина Уральского отделения Российской академии наук (г. Екатеринбург, Российская Федерация)

ПРЯМОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ СТАЛИ ХРОМОМ В ИНДУКЦИОННОЙ ПЕЧИ МЕТОДОМ МЕТАЛЛОТЕРМИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ

Аннотация. В статье представлены результаты исследования возможности прямого легирования стали хромом в индукционной печи без применения феррохрома и вакуумных технологий. Целью работы являлась оценка возможности восстановления хрома из хромового концентрата непосредственно в металлическом расплаве с использованием комплексного восстановителя ФАСК. Исследованы три варианта металлической основы шихты: стальной лом, восстановленный железный порошок и их смесь. Среднее извлечение хрома составило 60–82%, а содержание хрома в металле — 12,49–22,12%. Научная новизна работы состоит в апробации прямого легирования хромом с применением ФАСК в атмосферных условиях и оценке влияния металлической основы шихты на тепловой режим и извлечение хрома.

Ключевые слова: *хром, сталь, металлотермия, индукционная печь, легирование, шлак.*

Металлотермиялық тотықсыздандыру әдісімен индукциялық пеште болатты хроммен тікелей легірлеу

Аңдатпа. Мақалада феррохромды және вакуумдық технологияларды қолданбай, индукциялық пеште болатты хроммен тікелей легірлеу мүмкіндігін зерттеу нәтижелері ұсынылған. Жұмыстың мақсаты ФАСК кешенді тотықсыздандырғышын пайдалана отырып, хром концентратынан хромды тікелей металл балқымасында тотықсыздандыру мүмкіндігін бағалау болды. Шихтаның металл негізінің үш нұсқасы зерттелді: болат сынығы, тотықсыздандырылған темір ұнтағы және олардың қоспасы. Хромның орташа алыну дәрежесі 60–82%, ал металдағы хром мөлшері 12,49–22,12% болды. Жұмыстың ғылыми жаңалығы атмосфералық жағдайда ФАСК қолдану арқылы хроммен тікелей легірлеуді сынақтан өткізуден және шихтаның металл негізінің жылулық режим мен хромның алынуына әсерін бағалаудан тұрады.

Түйінді сөздер: *хром, болат, металлотермия, индукциялық пеш, легірлеу, қож.*

Direct alloying of steel with chromium in an induction furnace by metallothermic reduction

Abstract. This paper investigates the feasibility of direct chromium alloying of steel in an induction furnace without using ferrochrome or vacuum technology. The aim was to evaluate the reduction of chromium from chromium concentrate directly in a metallic melt using the FeAlSiCa complex reductant. Three metallic charge bases were investigated: steel scrap, hydrogen-reduced iron powder, and their mixture. Mean chromium recovery ranged from 60 to 82%, while the chromium content of the metal was 12.49–22.12%. The novelty of the work lies in testing direct chromium alloying with FeAlSiCa under atmospheric conditions and evaluating the influence of the metallic charge base on the thermal regime and chromium recovery.

Keywords: *chromium, steel, metallothermy, induction furnace, alloying, slag.*

Введение

Методы выплавки легированных сталей можно классифицировать по основному технологическому агрегату, используемому в процессе плавки, включая конвертеры, мартеновские, электродуговые и индукционные печи, а также комбинированные маршруты с применением агрегатов внепечной обработки [1, 2]. Несмотря на разнообразие подходов, легирующие элементы, как правило, вводятся в металлической форме, преимущественно в виде ферросплавов (ферросилиций, ферромарганец, феррохром и др.) [3]. Их широкое применение обусловлено технологичностью и стабильным усвоением, однако сопровождается рядом недостатков, таких как наличие нежелательных примесей и высокая стоимость высококачественных, в частности низкоуглеродистых, марок [3].

Для коррозионностойких сталей ключевым легирующим элементом является хром: при его содержании свыше ~12% формируется устойчивая пассивная оксидная пленка, обеспечивающая высокую коррозионную стойкость. Наиболее распространенной технологией является получение таких сталей с использованием феррохрома (ФХ), вводимого в шихту электродуговой печи, с последующим рафинированием стали (прежде всего обезуглероживанием) во внепечных агрегатах, например в аргоно-кислородных конвертерах (AOD) [4]. Данный маршрут включает двукратное расплавление сырья и дополнительные операции по удалению углерода, что приводит к повышенным энерго- и ресурсозатратам [5]. Производство ФХ является чрезвычайно энергоемким (3–4.7 МВт·ч/т), сопровождается потерями хрома до 30% и образованием экологически опасных хромсодержащих шлаков [6].

В связи с этим разрабатываются альтернативные методы легирования стали хромом, направленные на исключение отдельной стадии получения ФХ. Одним из перспективных подходов является технология прямого легирования, при которой хром вводится в расплав стали в неметаллической форме (например, в виде оксидов) и восстанавливается *in situ*. Показано, что использование хромсодержащего сырья совместно с углеродным восстановителем обеспечивает степень перехода хрома в металл на уровне 90% и выше при корректировке состава шлака и условий плавки [7, 8]. Вакуумно-углеродный и силикотермический варианты процесса позволяют достигать извлечения хрома до 95–97% при одновременном снижении содержания кислорода и неметаллических включений в стали [9, 10].

Особый интерес представляет реализация прямого легирования в индукционных печах, которые широко применяются для выплавки легированных и нержавеющих сталей, особенно в литейных производствах. Индукционная плавка характеризуется низким уровнем окисления металла, однако не обеспечивает активного рафинирования расплава, что требует использования тщательно подобранной шихты [11]. В связи с этим актуальной задачей является разработка эффективного способа прямого легирования хромом именно в условиях индукционной плавки.

В настоящем исследовании в качестве восстановителя выбран ФАСК, компоненты которого (***Si***, ***Al*** и ***Ca***) термодинамически способны восстанавливать оксиды хрома; соответствующие реакции могут сопровождаться выделением тепла. Рабочая гипотеза состояла в том, что применение ФАСК позволит осуществить прямое легирование в атмосферных условиях, без использования вакуума. Возможность получения хромсодержащего металла требуемого состава, а также потенциального исключения отдельной энергоемкой стадии производства феррохрома оценивали по результатам лабораторных плавок.

Материалы и методы

Шихта состояла из двух частей. Первая включала стальной лом и восстановленную железную губку, полученную путем восстановления прокатной окалины водородом. Вторая — хромовый концентрат, восстановитель ферроалюмосиликокальций (ФАСК) и флюс — известь. Выбор состава второй части шихты основывался на ранее выполненных исследованиях по получению низкоуглеродистой (НУ) ФХ в индукционной печи [12]. Химический состав всех исходных материалов приведен в таблице 1.

В дальнейших плавках железная губка, хромовый концентрат, ФАСК и известь использовались с размером частиц < 120 мкм, тогда как стальной лом применяли в виде обрезков прутка диаметром около 1 см и высотой 0,5–1,5 см. На основе ранее проведенных исследований [12] был рассчитан состав исходной шихты, исходя из предположения полного перехода металлической части шихты в состав стали, а также стехиометрического расчета количества восстановителя по суммарному содержанию кислорода в оксидных компонентах хромового концентрата.

Исследовали три варианта шихты, различавшиеся только видом металлической основы: стальной лом (1), восстановленный железный порошок (2) и их смесь в массовом соотношении 1:1 (3). Для всех вариантов соотношение компонентов сохраняли постоянным: металлическая основа – 35,4%, хромовый концентрат — 12,5%, ФАСК — 26,7% и известь — 25,4%. Доля хромового концентрата была задана исходя из целевого получения хромсодержащего металла, а количество ФАСК рассчитано по кислородному балансу оксидных компонентов концентрата с учетом результатов работы [12], чтобы обеспечить восстановление хрома и ограничить избыточный переход кремния в металл. Количество извести выбрано по расчетному составу шлака для достижения основности около 1,0 и связывания продуктов восстановления в оксидную фазу. Постоянство соотношения концентрата, восстановителя и флюса позволяло оценивать влияние вида металлической основы на нагрев и извлечение хрома. Для каждого варианта шихты в одинаковых условиях провели по три параллельные плавки. Если не указано иное, далее приведены средние арифметические результаты по трем плавкам.

Плавки проводили в индукционной печи мощностью 16 кВА в атмосферных условиях с постепенным увеличением силы тока до 600 А и выдержкой 6 мин. В качестве основного использовали керамический тигель (99,9% Al_2O_3), установленный в графитовый тигель, нагреваемый индукционным способом. Охлаждение продукта плавки осуществляли на воздухе в тигле, после чего тигель разрушали для извлечения металла и шлака.

Полученные металлические образцы исследовали методом растровой электронной микроскопии с использованием микроскопа Zeptools ZEM20, оснащенного ЭДС-детектором Oxford Instruments. Содержание элементов ***S***, ***P***, ***N***, ***C***, а также состав шлаков определяли стандартными методами аналитической химии, включая кислотное разложение, гравиметрические и титриметрические методики.

Результаты

Температуру в тигле фиксировали термопарой в ходе каждой плавки. На рис. 1 представлены средние температурные профили по трем плавкам каждого варианта.

Из рис. 1 следует, что шихта на основе лома характеризуется более интенсивным нагревом по сравнению с восстановленным порошком и их смесью во всем диапазоне силы тока до ~460 А. В этом интервале разница температур между шихтами составляет порядка 200–250 °С, что указывает на более эффективный теплообмен и электромагнитное взаимодействие в системе с металлической основой.

При увеличении силы тока до 450 А и выше температурный разрыв между вариантами шихты существенно

Таблица 1

Химический состав исходных материалов, %

Кесте 1

Бастапқы материалдардың химиялық құрамы, %

Table 1

Chemical composition of the starting materials, %

	Fe	***Cr***	***Si***	***Al***	***Ca***	***C***	***S***	***P***	***Mn***	***Ti***	***V***
Лом	ост.	0,13	0,21	-	-	0,19	0,05	0,04	0,60	-	-
Железная губка	ост.	0,09	0,10	-	-	0,07	0,03	0,02	0,15	-	-
ФАСК	ост.	-	68,35	12,45	10,12	0,69	0,018	0,040	-	0,94	0,29
	Fe_2O_3	Cr_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	***CaO***	***MgO***	***S***	***P***	Потери при прокаливании		
Хромовый концентрат	12,59	ост.	5,03	7,44	0,69	18,0	0,021	0,004	3,96		
Известь	-	-	≤ 1,8	-	≥ 92,00	-	≤ 0,03	≤ 0,02	≤ 6		

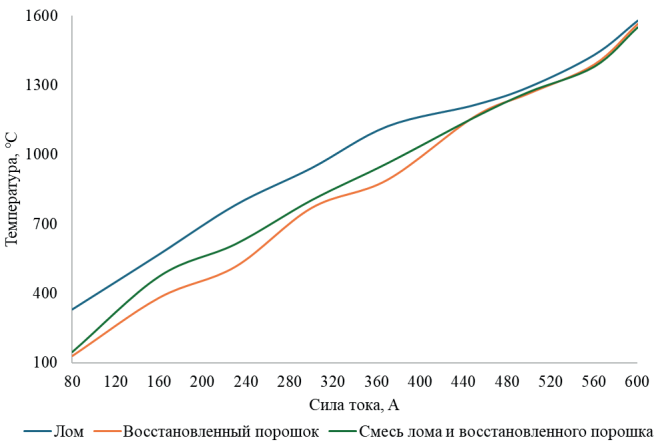


Рис. 1. Температурный профиль процесса нагрева в индукционной печи в зависимости от основы шихты и силы тока.
Сурет 1. Шихта түрі мен ток күшіне байланысты индукциялық пеште қыздыру үрдісінің температуралық профилі.
Figure 1. Temperature profile of the heating process in an induction furnace depending on the charge base and current strength.

сокращается и не превышает 50–100 °С. Данное поведение связано с развитием экзотермических реакций окисления компонентов в составе ФАСК, сопровождающихся кратковременными температурными всплесками. В обоих вариантах шихты в этом диапазоне фиксируются температурные колебания с локальным повышением температуры от ~1200 °С до 1400–1500 °С, что свидетельствует о протекании интенсивных восстановительных процессов.

При достижении максимальной силы тока 600 А и изотермической выдержке в течение 6 мин постоянная температура составляет 1550–1580 °С, практически одинаковая для всех вариантов шихты.

После цикла нагрева и выдержки, тигель извлекали из рабочей зоны печи и остужали на воздухе. На рис. 2 представлен внешний вид типичного продукта плавки при извлечении его из тигля.

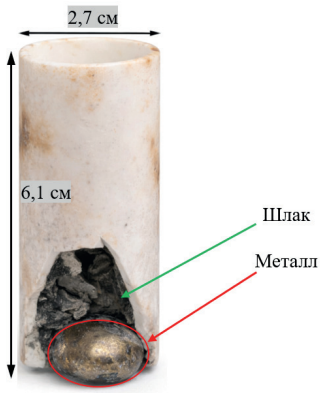


Рис. 2. Типичный внешний вид продукта плавки.
Сурет 2. Балқытылу өнімінің әдеттегі түрі.
Figure 2. Typical appearance of the smelting product.

Из рис. 2 можно заметить образование металла и наличие камневидного твердого шлака. При извлечении металла можно было заметить практически отсутствие значимых корольков в объеме шлака (не более 1–2% от общей массы металла).

После каждой плавки металл извлекали, взвешивали и определяли его химический состав. В таблице 2 приведены средние значения по трем параллельным плавкам для каждого варианта шихты.

С учетом состава и массы исходной шихты, а также массы и химического состава полученного металла для каждой плавки определяли сквозное извлечение хрома в сталь. Средние значения для вариантов на основе стального лома, восстановленного железного порошка и их смеси составили соответственно 60, 82 и 64%.

Обсуждение

Восстановительные реакции при температуре 1200 °С можно описать следующим образом:

$$Cr_2O_3 + 3Si = 2Cr + 3SiO_2 \ (\Delta G \approx -294 \text{ кДж/моль}). \quad (1)$$

$$Cr_2O_3 + 2Al = 2Cr + Al_2O_3 \ (\Delta G \approx -524 \text{ кДж/моль}). \quad (2)$$

$$Cr_2O_3 + 3Ca = 2Cr + 3CaO \ (\Delta G \approx -604 \text{ кДж/моль}). \quad (3)$$

Таблица 2

Химический состав металла из разных вариантов шихты, %

Кесте 2

Әртүрлі шихта түрлерінен алынған метал құрамы, %

Table 2

Chemical composition of metal from different charge options, %

Основа шихты	*Fe*	*Cr*	*Si*	*Ti*	*V*	*C*	*S*	*P*
Лом	ост.	12,49	0,59	-	-	0,20	0,022	0,030
Восстановленный порошок	ост.	22,12	1,18	0,23	0,46	0,19	0,023	0,029
Смесь лома и восстановленного порошка	ост.	16,33	0,72	0,10	0,12	0,19	0,020	0,029

Значения изменения энергии Гиббса восстановительных реакций при температуре 1200 °C были получены с использованием метода линейной температурной интерполяции на основе доступных термодинамических данных для более высоких температур. Поскольку рассматриваемый температурный интервал (1200–1500 °C) является относительно узким, температурная зависимость величины ΔG в данном диапазоне может быть аппроксимирована линейной функцией.

Данный подход широко применяется при предварительном термодинамическом анализе и сравнительной оценке восстановительной способности различных восстановителей, когда основной целью является определение относительной термодинамической предпочтительности реакций, а не точный расчет равновесных параметров.

Исходя из представленных данных можно отметить значительную экзотермичность процесса, что дает предпосылки к самоподдерживающемуся режиму восстановления.

Ранее при индукционной плавке НУФХ с применением ФАСК в аналогичных восстановительных условиях регистрировались значительно более высокие температуры — до ~2100–2200 °C [12]. В рассматриваемом случае более низкий температурный уровень объясняется меньшим содержанием восстановителя, а также локальным характером экзотермического перегрева, при котором выделяющееся тепло перераспределяется в объеме относительно холодного металлического расплава, основой которого являются лом и восстановленный порошок. На данном этапе процесса формируется жидкая фаза, способствующая интенсификации тепломассопереноса.

Извлечение хрома в проведенных экспериментах оказалось сопоставимым с уровнем, достигаемым при отдельном получении НУФХ. При отдельном восстановлении хрома из хромового концентрата степень его перехода в сталь составляла порядка **65%** при использовании такой доли ФАСК, которая позволяла минимизировать нежелательный переход кремния в металлическую фазу [12].

Для сопоставления следует отметить, что при промышленном производстве ФХ в закрытых руднотермических печах степень извлечения хрома обычно составляет 83–88% при использовании предварительно окисленных окатышей, тогда как при традиционной плавке неотсортированного хромита данный показатель, как правило, не превышает 70–75%.

Более высокое извлечение хрома — до 90% — достигается при карботермическом восстановлении смеси хромитовой руды и лома в индукционной печи [8]. При этом авторы подчеркивают, что использование железного порошка является более предпочтительным с точки зрения извлечения хрома. Вместе с тем, в указанной работе процесс плавки осуществлялся в атмосфере аргона, что существенно снижало окислительное воздействие окружающей среды. Аналогично, при прямом легировании стали хромом в силикотермическом процессе степень извлечения ***Cr*** до 95.4% была обеспечена при индукционной плавке в среде аргона чистотой 99,999% [10].

Полученные результаты указывают на существенное влияние газовой атмосферы на эффективность извлечения хрома. Это влияние накладывается на окисленную природу исходного сырья, а также на высокую склонность компонентов ФАСК к окислению. Известно, что при выплавке коррозионностойких сталей в дуговых печах в шлаке может накапливаться до 2–10% Cr_2O_3, что говорит о дополнительных потерях хрома. В условиях вакуума при карботермическом восстановлении, за счет снижения парциального давления ***CO***, степень извлечения хрома может превышать 95% [9]. Однако применение вакуумных технологий существенно усложняет процесс и приводит к заметному росту его стоимости.

Максимальное извлечение хрома при использовании восстановленного железного порошка в настоящей работе составило порядка 82%, что обусловлено совокупным влиянием перечисленных выше факторов. Существенную роль играет и основность шлака, поскольку известно, что повышение основности способствует увеличению степени извлечения хрома. В проведенных экспериментах основность шлака для всех вариантов шихты находилась в диапазоне 0,9–1,0, что соответствует значениям, характерным для базовых исследований по выплавке НУФХ в индукционной печи с применением ФАСК [12]. Для НУФХ в целом типичен интервал основности 0,8–1,4 [6], что указывает на возможность ее целенаправленного увеличения в дальнейшем с целью повышения извлечения хрома.

Следует также отметить, что при традиционном вводе хрома в виде феррохрома значительные потери хрома являются неизбежными: до 30% хрома теряется в шлак на стадии производства самого ферросплава, а дополнительные потери возникают при последующем легировании стали. В этом контексте прямое легирование позволяет избежать двойного окисления хрома.

Для всех исследованных вариантов шихты зафиксировано низкое содержание вредных примесей в полученных металлических образцах (***S***, ***P*** < 0.03%), что указывает на эффективность протекающих рафинирующих реакций. В частности, это может быть связано с добавлением извести, обеспечивающей связывание серы и фосфора в шлак. Аналогичные эффекты рафинирования ранее наблюдались и при отдельном получении НУФХ с использованием ФАСК [12].

Помимо возможности прямого легирования стали хромом, открывающей перспективы непосредственного получения коррозионностойких сталей, важным преимуществом разработанного подхода является стабильность образующегося шлака. Известно, что в шлаках феррохрома возможно образование двухкальциевого силиката, который при охлаждении переходит в γ-Ca_2SiO_4 и приводит к саморассыпанию шлака [12]. В настоящем исследовании, судя по стабильному состоянию шлаков при хранении более 40 суток, данного эффекта удалось избежать. Аналогичные результаты были ранее получены при отдельной выплавке НУФХ в индукционной печи с применением ФАСК [12].

Заключение

Серии лабораторных плавок показали принципиальную возможность прямого легирования стали хромом в индукционной печи с использованием хромового концентрата и восстановителя ФАСК в атмосферных условиях.

Для каждого из трех вариантов шихты выполнено по три параллельные плавки. Среднее содержание хрома в металле составило 12,49–22,12%, а среднее сквозное извлечение хрома — 60–82%.

Наиболее высокие средние значения содержания хрома (22,12%) и его извлечения (82%) получены в варианте с восстановленным железным порошком. Для вариантов на основе стального лома и смеси лома с порошком среднее извлечение составило соответственно 60 и 64%. Полученные различия свидетельствуют о влиянии вида металлической основы на тепловой режим и восстановление хрома.

Во всех сериях плавок среднее содержание серы и фосфора в металлических образцах не превышало соответственно 0,023 и 0,030%, а образовавшийся шлак сохранял стабильность при хранении более 40 суток. Троекратное повторение каждого варианта и использование средних значений повышают обоснованность выводов о принципиальной осуществимости предложенного процесса и влиянии металлической основы шихты на извлечение хрома.

Благодарность

Данные исследования были проведены в рамках программно-целевого финансирования Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (BR24992758).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Достижения в области планирования и диспетчеризации производства в сталеплавильной промышленности: обзор и его интеллектуальное развитие / Y. Wang [и др.] // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. – 2025. – № 32. – С. 2322–2340 (на английском языке)*
2. *Suer J., Traverso M., Jäger N. Обзор оценок жизненного цикла стали и экологический анализ будущих сценариев производства стали // Sustainability. – 2022. – № 14. – Ст. 14131 (на английском языке)*
3. *Jalkanen H., Gasik M. Теория переработки ферросплавов // Handbook of Ferroalloys: Theory and Technology / под ред. M. Gasik. – Оксфорд: Butterworth-Heinemann, 2013. – С. 29–82 (на английском языке)*
4. *Эволюция оксидных включений в процессе выплавки нержавеющей стали 304L для ядерной энергетики / X. Chen [и др.] // Metals. – 2019. – № 9. – Ст. 257 (на английском языке)*
5. *Bhonde P. J., Ghodgaonkar A. M., Angal R. D. Различные методы получения низкоуглеродистого феррохрома // Proceedings of INFACON XI. – 2007. – С. 85–90 (на английском языке)*
6. *Безуглеродная выплавка феррохрома с использованием сплава ФАСК / A. Akhmetov [и др.] // Processes. – 2025. – № 13. – Ст. 1745 (на английском языке)*
7. *Прямое легирование хромом с использованием хромитовой руды в присутствии металлического железа / X. Hu [и др.] // Journal of Mining and Metallurgy. Section B: Metallurgy. – 2013. – № 49. – С. 207–215 (на английском языке)*
8. *Прямое легирование стали хромом с использованием брикетов из хромитовой руды, прокатной окалины и нефтяного кокса / X. Hu [и др.] // Steel Research International. – 2017. – № 88. – Ст. 1600247 (на английском языке)*
9. *Исследование прямого легирования стали восстановлением Cr2O3 углеродом в вакууме / T. Song [и др.] // Journal of Materials Research and Technology. – 2024. – № 28. – С. 3903–3910 (на английском языке)*
10. *Y. Chen, Z. Xue, S. Song. Прямое легирование стали посредством силико-термического самовосстановления хромитовой руды с использованием кремнийсодержащих твердых отходов // Metals. – 2024. – № 14. – Ст. 138 (на английском языке)*
11. *Плавка и обработка стали для литья // Foseco Ferrous Foundryman's Handbook / под ред. J. R. Brown. – 11-е изд. – Оксфорд: Butterworth-Heinemann, 2000. – С. 121–129 (на английском языке)*
12. *Использование хромитового шпинелевого порошка в металлотермической выплавке низкоуглеродистого феррохрома / Y. Makhambetov [и др.] // Processes. – 2025. – № 13. – Ст. 2288 (на английском языке)*

ПАЙДАЛЫНҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. *Өндірісті жоспарлау және диспетчерлеу саласындағы жетістіктер: шолу және оның интеллектуалды дамуы / Y. Wang [және т. б.] // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. – 2025. – № 32. – Б. 2322–2340 (ағылшын тілінде)*
2. *Suer J., Traverso M., Jäger N. Болаттың өмірлік циклін бағалау бойынша шолу және болашақ болат өндірісінің сценарийлерін экологиялық талдау // Sustainability. – 2022. – № 14. – 14131 (ағылшын тілінде)*
3. *Jalkanen H., Gasik M. Ферроқорытпаларды өңдеу теориясы // Handbook of Ferroalloys: Theory and Technology / ред. M. Gasik. – Оксфорд: Butterworth-Heinemann, 2013. – Б. 29–82 (ағылшын тілінде)*
4. *Ядролық энергетикаға арналған 304L тот баспайтын болатты балқыту процесіндегі оксидтік қосындылардың эволюциясы / X. Chen [және т. б.] // Metals. – 2019. – № 9. – 257 (ағылшын тілінде)*
5. *Bhonde P. J., Ghodgaonkar A. M., Angal R. D. Төмен көміртекті феррохром алудың әртүрлі әдістері // Proceedings of INFACON XI. – 2007. – Б. 85–90 (ағылшын тілінде)*
6. *Кешенді ФАСК қорытпасын қолдана отырып феррохромды көміртексіз балқыту / A. Akhmetov [және т. б.] // Processes. – 2025. – № 13. – 1745 (ағылшын тілінде)*
7. *Металл темірдің қатысуымен хромит рудасын пайдаланып хроммен тікелей легірлеу / X. Hu [және т. б.] // Journal of Mining and Metallurgy. Section B: Metallurgy. – 2013. – № 49. – Б. 207–215 (ағылшын тілінде)*
8. *Хромит рудасы, прокаттық окалина және мұнай коксы негізіндегі брикеттерді қолдана отырып болатты хроммен тікелей легірлеу / X. Hu [және т. б.] // Steel Research International. – 2017. – № 88. – 1600247 (ағылшын тілінде)*

9. *Вакуум жағдайында Cr_2O_3 көміртекпен тотықсыздандыру арқылы болатты тікелей легірлеуді зерттеу / T. Song [және т. б.] // Journal of Materials Research and Technology. – 2024. – № 28. – Б. 3903–3910 (ағылшын тілінде)*
10. *Chen Y., Хие Z., Song S. Құрамында кремний бар қатты қалдықтарды пайдалану арқылы хромит рудасының силико-термиялық өзін-өзі тотықсыздандыруы негізінде болатты тікелей легірлеу // Metals. – 2024. – № 14. –138 (ағылшын тілінде)*
11. *Құюға арналған болатты балқыту және өңдеу [Melting and Treatment of Steel for Casting] // Foseco Ferrous Foundryman's Handbook / ред. J. R. Brown. – 11-басылым. – Оксфорд: Butterworth-Heinemann, 2000. – Б. 121–129 (ағылшын тілінде)*
12. *Төмен көміртекті феррохромды металлотермиялық балқытуда хромит шпинель ұнтағын пайдалану / Y. Makhambetov [және т. б.] // Processes. – 2025. – № 13. – 2288 (ағылшын тілінде)*

REFERENCES

1. *Advancements in production planning and scheduling within steel manufacturing: A review and its intelligent development / Y. Wang et al. // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. – 2025. – No. 32. – P. 2322–2340 (in English)*
2. *Suer J., Traverso M., Jäger N. Review of life cycle assessments for steel and environmental analysis of future steel production scenarios // Sustainability. – 2022. – No. 14. – Article 14131 (in English)*
3. *Jalkanen H., Gasik M. Theory of Ferroalloys Processing // Handbook of Ferroalloys: Theory and Technology / ed. M. Gasik. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. – P. 29–82 (in English)*
4. *Oxide-inclusion evolution in the steelmaking process of 304L stainless steel for nuclear power / X. Chen et al. // Metals. – 2019. – No. 9. – Article 257 (in English)*
5. *Bhonde P.J., Ghodgaonkar A.M., Angal R.D. Various techniques to produce low carbon ferrochrome // Proceedings of INFACON XI. – 2007. – P. 85–90 (in English)*
6. *Carbon-free smelting of ferrochrome using FeAlSiCa alloy / A. Akhmetov et al. // Processes. – 2025. – No. 13. – Article 1745 (in English)*
7. *Direct chromium alloying by chromite ore with the presence of metallic iron / X. Hu // Journal of Mining and Metallurgy. Section B: Metallurgy. – 2013. – No. 49. – P. 207–215 (in English)*
8. *Direct alloying steel with chromium by briquettes made from chromite ore, mill scale, and petroleum coke / X. Hu et al. // Steel Research International. – 2017. – No. 88. – Article 1600247 (in English)*
9. *Study of direct alloying of steels by carbon reduction of Cr2O3 under vacuum / T. Song et al. // Journal of Materials Research and Technology. – 2024. – No. 28. – P. 3903–3910 (in English)*
10. *Chen Y., Xue Z., Song S. The direct alloying of steel through silicothermic self-reduction of chromite ore utilizing Si-containing solid waste // Metals. – 2024. – No. 14. – Article 138 (in English)*
11. *Melting and Treatment of Steel for Casting // Foseco Ferrous Foundryman's Handbook / ed. J. R. Brown. – 11th ed. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000. – P. 121–129 (in English)*
12. *Utilization of chromite spinel powder in the metallothermic smelting of low-carbon ferrochrome / Y. Makhambetov et al. // Processes. – 2025. – No. 13. – Article 2288 (in English)*

Сведения об авторах:
Толеукадыр Р. Т., докторант Ph.D по образовательной программе 8D07201 — «Металлургия», научный сотрудник, Химико-металлургический институт им. Ж. Абишева (г. Караганда, Казахстан), *ruslan-94kz@mail.ru;* https://orcid.org/0000-0002-1606-838X
Смағұлов А. Қ., м. т. н., инженер, Химико-металлургический институт им. Ж. Абишева (г. Караганда, Казахстан), *arnatsmagulov@gmail.com;* https://orcid.org/0000-0001-5837-4257
Садық Ж. О., магистрант, инженер Химико-металлургический институт им. Ж. Абишева (г. Караганда, Казахстан), *sadzhad03@gmail.com*; https://orcid.org/0009-0006-8557-1532
Заякин О. В., д. т. н., заведующий лабораторией «Сталь и ферросплавы», Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук (г. Екатеринбург, Российская Федерация), *zferro@mail.ru;* https://orcid.org/0009-0009-9831-1993

Авторлар туралы мәліметтер:
Төлеуқадыр Р. Т., 8D07201 — «Металлургия» білім беру бағдарламасы бойынша Ph.D докторанты, ғылыми қызметкер, Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты (Қарағанды қ., Қазақстан)
Смағұлов А. Қ., т. ғ. м., инженер, Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты (Қарағанды қ., Қазақстан)
Садық Ж. О., магистрант, инженер, Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты (Қарағанды қ., Қазақстан)
Заякин О. В., т. ғ. д., «Болат және ферроқорытпалар» зертханасының меңгерушісі, Ресей ғылым академиясы Орал бөлімшесінің Металлургия институты (Екатеринбург қ., Ресей Федерациясы)

Information about the authors:
Toleukadyr R. T., Ph.D student in the educational program 8D07203 — «Metallurgy», junior research fellow, Chemical-Metallurgical Institute named after Zh. Abishev (Karaganda, Kazakhstan)
Smagulov A. K., master of tech. sci., engineer, Chemical and Metallurgical Institute named after Zh. Abishev (Karaganda, Kazakhstan)
Sadyk Zh. O., master's student, engineer, Chemical-Metallurgical Institute named after Zh. Abishev (Karaganda, Kazakhstan)
Zayakin O. V., Doctor of Technical Sciences, Head of the «Steel and Ferroalloys» Laboratory, Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Yekaterinburg, Russian Federation)