

УДК 669.173.23:662.749.2(574)
DOI: 10.36979/1694-500X-2025-25-8-97-103

ПОЛУЧЕНИЕ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ВОССТАНОВИТЕЛЕЙ ИЗ УГЛЕЙ КАЗАХСТАНА

П.А. Осипов, Р.А. Шаяхметова, А.В. Шварук, А.Б. Сагындыков, В.М. Чернышенков

Аннотация. До недавнего времени основным восстановителем при выплавке ферросплавов служил коксовый орешек, однако его качественные характеристики нередко не соответствуют технологическим требованиям, а дефицит мелких классов кокса и ожидаемое ухудшение его свойств усиливают потребность в альтернативных восстановителях. Казахстан располагает значительными запасами некоксуемых углей с низким содержанием золы и вредных примесей, что делает их перспективным сырьем для производства специального кокса для ферросплавной отрасли. При этом действующие нормативы часто не отражают реальные эксплуатационные качества восстановителей в конкретных условиях выплавки, поэтому их пригодность окончательно подтверждается только промышленными испытаниями. Приведены результаты изучения возможности получения углеродсодержащего восстановителя из углей месторождений Казахстана, дана оценка его эффективности для выплавки ферросплавов.

Ключевые слова: уголь; углеродный восстановитель; ферросплав; термоокислительное коксование; пористость; прочность; удельное сопротивление; реакционная способность.

КАЗАКСТАНДЫН КӨМҮРҮНӨН КӨМҮРТЕКТҮҮ РЕДУКЦИЯЛООЧУ КАРАЖАТТАРДЫ АЛУУ

П.А. Осипов, Р.А. Шаяхметова, А.В. Шварук, А.Б. Сагындыков, В.М. Чернышенков

Аннотация. Жакынкы убакка чейин кокс жаңгагы ферросплавдарды эритүүдө негизги калыбына келтирүүчү зат болгон, бирок анын сапаттык мүнөздөмөлөрү көбүнчө технологиялык талаптарга жооп бербейт, ал эми кокстун майда класстарынын тартыштыгы жана анын касиеттеринин күтүлүп жаткан начарлашы альтернативдик калыбына келтирүүчү заттарга болгон муктаждыкты күчөтөт. Казакстанда күлү жана зыяндуу аралашмалары аз болгон кокстолбогон көмүрдүн Олуттуу запастары бар, бул аларды феррозеритүүчү тармак үчүн атайын Кокс өндүрүү үчүн келечектүү чийки зат кылат. Бул учурда, колдонуудагы ченемдер көп учурда эритүүнүн конкреттүү шарттарында калыбына келтирүүчүлөрдүн реалдуу эксплуатациялык сапаттарын чагылдырбайт, ошондуктан алардын жарактуулугу биротоло өнөр жай сыноолору менен гана тастыкталат. Казакстандын кендериндеги көмүрдөн көмүртек камтыган калыбына келтиргичти алуу мүмкүндүгүн изилдөөнүн жыйынтыктары келтирилди, феррозеритмелерди эритүү үчүн анын натыйжалуулугуна баа берилди.

Түйүндүү сөздөр: көмүр; көмүртекти азайтуучу зат; ферросплав; термо-кычкылдандыруучу кокстоо; көзөнөктүүлүк; күч; каршылык; реактивдүүлүк.

OBTAINING CARBON-CONTAINING REDUCING AGENTS FROM COALS OF KAZAKHSTAN

P.A. Osipov, R.A. Shayakhmetova, A.V. Shvaruk, A.B. Sagyndykov, V.M. Chernyshenkov

Abstract. Until recently, the main reducing agent in ferroalloy smelting was coke nut, but its quality characteristics often do not meet technological requirements, and the shortage of small coke grades and the expected deterioration of its properties increase the need for alternative reducing agents. Kazakhstan has significant reserves of non-coking coals with low ash and harmful impurities, which makes them a promising raw material for the production of special coke for the ferroalloy industry. At the same time, current standards often do not reflect the actual performance of reducing agents under specific smelting conditions, so their suitability is finally confirmed only by industrial tests. This study is

aimed at studying the possibility of obtaining a carbon-containing reducing agent from coal deposits in Kazakhstan and assessing its effectiveness for smelting ferroalloys.

Keywords: coal; carbon reducing agent; ferroalloy; thermal-oxidative coking; porosity; strength; specific resistance; reactivity.

Введение. Качество углеродистых восстановителей и их влияние на процесс выплавки ферросплавов давно находятся в центре внимания, однако ни в отечественной, ни в зарубежной практике до сих пор нет общепринятых подходов к выбору угля и технологии коксования для этих целей. Одной из причин является отсутствие единых представлений о роли углерода и комплексе необходимых физико-химических и физико-механических свойств восстановителя [1, 2].

В процессе электроплавки углеродистый материал претерпевает значительные изменения: разлагаются органические соединения, удаляются летучие вещества, изменяется структура и пористость. Поэтому к восстановителям предъявляют специальные требования [3]. Для разных ферросплавов нормы отличаются, но обычно контролируют следующие показатели:

- содержание нелетучего углерода, золы, летучих веществ, влаги и серы;
- химический состав золы;
- удельное электрическое сопротивление (УЭС);
- пористость;
- гранулометрический состав и прочностные характеристики;
- восстановительную способность по отношению к оксидам металлов.

При этом реакционная способность (по CO/CO_2) и восстановительная способность (по степени восстановления оксидов) имеют схожее значение, однако важнее учитывать их в комплексе с УЭС и другими параметрами, особенно в условиях высокой температуры и специфики печей.

Повышенная влажность ухудшает тепловой баланс за счёт расходов на испарение и усложняет рассеивание, а избыточная сухость приводит к пылению и повышает выход мелких классов. Умеренно увлажнённый углеродный восстановитель может даже улучшить режим плавки за счёт паровой активности.

Влияние летучих веществ на работу печи неоднозначно: их избыток снижает газопроницаемость колошника, ухудшает посадку электродов и работу газоочистки, способствует образованию пироуглерода, который уменьшает реакционную способность и УЭС [4]. При этом важно учитывать не только общий выход летучих, но и долю компонентов, способных образовать пиролитический углерод (смолы, бензол, метан).

Минеральные примеси в составе углеродистых материалов варьируются довольно широко. Зола включает SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , CaO , MgO и др. При этом кремнезем восстанавливается и переходит в сплав или играет роль флюса. Существенна не общая зольность, а количество золы на единицу углерода. Кроме того, важно учитывать жёсткие требования к содержанию фосфора ($\leq 0,04$ % для высококремнистых сплавов) и серы ($\leq 0,4$ – $0,5$ %), так как восстановитель обычно является их основным источником в сплаве [5–7].

Физико-механические свойства также критичны. На работу печи отрицательно влияют как мелкие (< 5 мм), так и слишком крупные куски углеродного восстановителя. Оптимальной считается фракция 5–30 мм, обеспечивающая хорошую газопроницаемость и стабильный режим [8]. Использование мелочи экономически выгодно, однако избыток мелких классов ухудшает газопроницаемость, увеличивает пылевынос и потери углерода на колошнике.

На склонность восстановителя к образованию мелочи влияют его прочностные характеристики. Структурная прочность более точно отражает это свойство, чем, например, остаток в барабане. Восстановитель для ферросплавов должен иметь остаток в барабане не менее 200–250 кг, показатель М40 на уровне 50–60 % и структурную прочность не ниже 45–55 %. В таблице 1 приведены характеристики основных углеродистых восстановителей.

Таблица 1 – Характеристика углеродсодержащих восстановителей

Технический анализ, %: показатель	Металлургический кокс	Коксик-орешек	Углеродный восстановитель	Древесный уголь
A^d	10,66	10,8	27,0	1,45
V^{daf}	1,44	1,2	5,6	14,54
W^p	0,44	1,3	1,9	2,1
S_t^d	0,89	1,34	0,91	0,04
C_t	87,02	86,66	71,49	83,97
Реакционная способность при 1323K, мл/(г·с)	0,69	0,929	8,0	11,1
$\rho_{уд}$ Ом·м (фракция 3–6 мм)	1,21	1,48	7500	$2 \cdot 10^6$
Структурная прочность, %	83,0	85,0	63,7	39,0
Плотность, г/см ³ : истинная	1,82	1,95	1,58	1,4
кажущаяся	0,91	0,93	0,93	0,4
Пористость, % (см ³ /г)	53,1 (0,49)	49,7 (0,51)	55,0 (0,67)	63,8 (1,1)
Состав золы, %:				
SiO ₂	35,4	36,5	75,7	1,9
Al ₂ O ₃	23,3	22,2	11,2	3,4
CaO + MgO	3,8	3,9	3,0	41,1
Fe ₂ O ₃	33,8	33,7	7,6	0,85
P ₂ O ₅	0,24	0,24	0,03	5,12
K ₂ O + Na ₂ O	2,13	2,64	1,18	0,29

В производстве ферросплавов применяются как ископаемые углеродистые восстановители (антрацит, каменные и бурые угли, торф), так и искусственные – металлургический кокс и его отходы, специальные коксы с добавками, пековый, нефтяной, полукокс различного типа. В меньших объёмах, из-за дефицита и высокой стоимости, используется древесный уголь – классический восстановитель для электротермии, удовлетворяющий большинству требований, кроме истираемости. Перспективной заменой древесного угля может служить кокс из лигнина, а также древесные отходы, широко применяемые за рубежом. Основными характеристиками восстановителей считаются: реакционная способность, удельное электросопротивление и гранулометрический состав.

Классическое слоевое коксование при 1000–1100 °С даёт прочный, но малореакционный и слабо пористый кокс с низким УЭС, тогда как специальные углеродные восстановители обладают высокой реакционной способностью и развитой пористостью, но имеют низкую механическую прочность и дают много мелочи (<5 мм), что снижает их эффективность. Отсутствие оптимальной технологии и свободных мощностей в СНГ до сих пор ограничивает производство специальных восстановителей слоевым способом. При этом создание полноценного заменителя древесного угля остаётся важной задачей для кремниевого производства.

Таким образом, использование различных углеродистых восстановителей при выплавке различных видов ферросплавов является необходимым не только по экономическим соображениям, но и для обеспечения максимальной восстановительной способности смеси, улучшения хода печи и создания оптимальных условий для наиболее полного извлечения ведущего элемента из руд.

Поиск равноценной замены металлургическому коксификату, несмотря на некоторые положительные результаты, пока не привел к широкому промышленному использованию новых видов углеродистых восстановителей, главным образом из-за отсутствия сведений об их соответствии специфичным требованиям ферросплавного производства и пригодности для выплавки конкретных марок ферросплавов [9, 10].

В производстве ферросплавов, исходя из накопленного практического опыта, наиболее эффективными восстановителями на сегодняшний день являются углеродистые материалы, полученные из молодых углей низкой стадии метаморфизма. При этом качество углеродных восстановителей будет зависеть как от характеристики исходного угля, так и от режимов его термообработки.

В проводимых нами исследованиях полученные пробы углей Казахстана в количестве 607,63 кг, были использованы для исследования физико-химических и технических характеристик, а также для отработки режимов коксования и получения опытных образцов кокса.

Рассев пробы угля по фракциям показал:

- фракция 0–10 мм – 183,2 кг,
- фракция 10–20 мм – 83,25 кг,
- фракция 20–30 мм – 79,45 кг,
- фракция 30–300 мм – 261,73 кг.

Во время отсева визуально были отобраны куски глины – 13,97 кг, что составляет 2,3 % от общей пробы.

Фракцию 30–300 мм подвергали измельчению на щековой дробилке. После отсева на грохоте фракции 10–30 мм составили 204,65 кг, т. е. 78,2 %, соответственно. Фракции 0–10 мм – 57,08 кг, т. е. 21,8 %.

Определение технического анализа предоставленных проб угля проводили в аккредитованной испытательной лаборатории ТОО «НИЦ «УГОЛЬ» по стандартным методикам.

Согласно результатам технического анализа, выход летучих веществ в представленных углях превышает 35 %, что позволяет проводить коксование угля в режиме термоокислительного пиролиза.

По литературным данным известно, что оксиды ряда элементов, содержащихся в золе восстановителей, оказывают активизирующее (Fe, Ca, Mn, щелочные элементы) или пассивирующее (Al, Si) влияние на реакционную способность углеродистых материалов по отношению к кислороду и углекислоте. Также минеральные примеси влияют на электропроводность, характер изменений структуры и пористого строения восстановителя, процесс графитизации, а также на состав и свойства реакционных расплавов в печи, в формировании которых оксиды золы принимают непосредственное участие.

Таким образом, по результатам лабораторных исследований представленные угли пригодны для получения углеродных восстановителей путем термоокислительного коксования. При этом по качественным показателям восстановитель будет полностью соответствовать стандарту для коксового орешка, широко применяемого в производстве ферросплавов.

Методы исследований. Для получения прочного кускового материала из углей Казахстана использовали метод высокоскоростного термоокислительного коксования, основанный на быстром нагреве частиц теплом, выделяющимся при сжигании летучих продуктов. Формирование структуры углеродного восстановителя шло через деструкцию угольного вещества и синтез новых соединений. Эксперименты проводили в лабораторной шахтной печи объемом 0,05 м³, оснащенной колосниковой решёткой для подачи дутья и системой для дожигания газа. Температуру контролировали тремя термометрами, нижняя из которых управляла автоматическим отключением компрессора.

Процесс включал подготовку угля (10–30 мм), загрузку через верхний люк, подачу дутья снизу и выгрузку готового восстановителя через нижний люк, при контроле температуры по высоте слоя термометрами.

Результаты и обсуждение. Важнейшей характеристикой углеродистого восстановителя для электротермических процессов является удельное электрическое сопротивление.

Стремление технологов максимально увеличить сопротивление шихты при выплавке ферросплавов непрерывным процессом объясняется необходимостью уменьшить долю тока шихтовой проводимости и увеличить долю тока, проходящего через электрическую дугу – высокотемпературный источник тепла. Ванна ферросплавной печи является объемным проводником электрического поля и распределение тока и мощности здесь в значительной степени зависит от электросопротивления шихты. УЭС углеродистых материалов является косвенной характеристикой совершенства их кристаллической структуры и степени графитизации.

Удельное электросопротивление специальных восстановителей в 2–5 раз выше, чем промышленных. По-видимому, это объясняется использованием в шихте малометаморфизированных углей с повышенным содержанием летучих веществ и измененными условиями коксования.

Результаты физико-химических исследований свойств восстановителя, полученного из углей Казахстана, представлены в таблице 2 в сравнении со свойствами доменного кокса.

Таблица 2 – Сравнительные технические характеристики доменного кокса и углеродного восстановителя

Наименование	A, % (зольность)	V, % (выход летучих)	P, % (содержание фосфора)	Реакционная способность, см ³ /г·с	Удельное электросопротивление, Ом·см (20 0С)
Углеродный восстановитель	18,89	2,54	0,057	1,13	15,4
Доменный коксовый орешек	12–14	0,5–1,0	0,06–0,08	0,5–0,7	4,31

Опытный восстановитель из углей Казахстана, полученный методом термоокислительного коксования, превосходит доменный коксовый орешек по реакционной способности в 2 раза, а по удельному электросопротивлению более чем в 3 раза, что способствует повышению производительности электропечей и снижению удельного расхода электроэнергии при выплавке ферросплавов. При содержании летучих веществ около 2,5 % и серы 0,73 %, а также низком содержании фосфора (0,057 %), этот восстановитель полностью удовлетворяет требованиям [11].

Фракционный состав кокса из угля месторождения Казахстана представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Фракционный состав кокса из угля месторождения Казахстана

Класс кокса, мм		
0–5	5–10	10–30
Выход фракций, %		
10,78 %	8,28 %	80,93 %

Содержание класса менее 5 мм в испытанной пробе составляет 10,78 %, и практически не содержит фракции выше 30 мм. Последнее обстоятельство позволяет исключить его дробление и, как следствие, образование дополнительного количества мелочи. Выход класса 5–30 мм находится на уровне 89,21 %, причем большую часть составляет восстановитель класса 10–25 мм, что способствует стабильной работе рудотермической печи.

В металлургической практике для оценки качества кокса используют показатель структурной прочности. Структурную прочность восстановителей оценивали по выходу класса >1 мм после совместного вращения восстановителя класса 3–6 мм, объемом 50 мл и 5 стальных шаров диаметром 15,08 мм, в течение 40 минут, со скоростью 25 об/мин.

В таблице 4 приведены результаты исследования структурной прочности углеродистых восстановителей, применяющихся на ферросплавных заводах в настоящее время.

Таблица 4 – Структурная прочность восстановителей

Восстановитель	Структурная прочность, %
Коксовый орешек	84,2
Кокс КНР	74,6
Полукокс лкзп	78,5
Углеродный восстановитель, полученный из углей Казахстана	56,32

Структурная прочность углеродного восстановителя, полученного из углей Казахстана, составляет 56,32 %, и находится немного ниже уровня остальных восстановителей, однако удовлетворяет требования к восстановителям в производстве ферросплавов.

Таким образом, исходя из полученных результатов исследований использования восстановителя для выплавки ферросплавов, полученный восстановитель характеризуется высокими качественными показателями.

Сравнительные данные по физико-механическим свойствам показывают, что кокс практически не уступает восстановителям, применяющимся в настоящее время в производстве ферросплавов. Фракционный состав, представленный классами 5–30 мм составляет 89,21 %, и структурная прочность – 56,32 % соответствуют требованиям, предъявляемым к коксу для электротермии.

На основании физико-химических и физико-механических свойств выработаны общие требования, предъявляемые к качеству восстановителя для выплавки ферросплавов, которые приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Общие требования к качеству восстановителя для выплавки ферросплавов

Показатели качества	
Гранулометрический состав, мм	5–30
Структурная прочность, %, не менее	45–55
Удельное электросопротивление (УЭС при 20 °С), ом·см, не менее	3–5
Реакционная способность, см ³ /г·с, не менее	0,5
Выход летучих веществ, %	2–20
Влажность, %	2–7
Зольность, %	10–50
Содержание серы, %	0,1–0,5
Содержание фосфора, %	0,01–0,10

Требования к технологическим показателям углеродистого восстановителя для производства ферросплавов являются универсальными для любого процесса, основанного на карботермическом восстановлении оксидов рудного сырья. В то же время, специфичные характеристики углеродных восстановителей из углей Казахстана представляют особый интерес для выплавки кремнистых ферросплавов. Особенности процесса восстановления кремния в горне электропечи обуславливают выраженную зависимость показателей плавки от таких свойств восстановителя, как пористость, реакционная способность и удельное электросопротивление. Как показывают результаты многочисленных полупромышленных испытаний по выплавке ферросплавов, наибольшая эффективность замены традиционных коксов с полученными термоокислительным способом восстановителями из углей Казахстана, достигается в процессах выплавки технического кремния ($Si \geq 96 \%$), высокопроцентного ферросилиция ($Si \geq 65 \%$) и ферросиликомарганца ($Si \geq 60 \%$).

Кроме того, восстановитель, полученный термоокислительным способом из углей Казахстана, имеет существенно меньшую стоимость по сравнению с такими широко применяемыми материалами, как коксик-орешек и древесный уголь. Учитывая, что массовая доля восстановителя в составе шихты

может достигать 30 % (например, при выплавке технического кремния), можно ожидать существенного снижения себестоимости ферросплава при внедрении в производство кокса, полученного термоокислительным способом.

Заключение. Результаты проведенных исследований показали, что угли Казахстана пригодны для получения восстановителя методом термоокислительного коксования. Полученный углеродный восстановитель обладает высокими показателями реакционной способности, пористости, удовлетворяет требованиям по содержанию серы и фосфора и соответствует физико-механическим стандартам. Это открывает большие возможности его эффективного применения в выплавке ферросплавов и позволяет рассчитывать на значительное снижение себестоимости продукции.

Поступила: 27.06.2025; рецензирована: 11.07.2025; принята: 14.07.2025.

Литература

1. Нурмуханбетов Ж.У. Углеродистые восстановители для выплавки ферросплавов: Аналитический обзор / Ж.У. Нурмуханбетов, В.А. Ким. Караганда: ЦНТИ, 2005. 38 с.
2. Грищенко С.Г. Освоение технологии выплавки силикомарганца с использованием высокорективных восстановителей / С.Г. Грищенко, В.С. Куцин, А.Н. Овчарук, Д.В. Чаплыгин, В.И. Ольшанский, И.Ю. Филиппов, А.Н. Таран // Сучасні проблеми металургії. 2016. №. 19 (1). С. 8–17.
3. Морозова Д.А. Влияние параметров доменной плавки на результаты работы доменных печей в условиях ОАО «Уральская Сталь» / Д.А. Морозова, А.Н. Шаповалов, М.Г. Потапов // Теория и технология металлургического производства. 2015. №. 1 (16). С. 26–29.
4. Теслев С.А. Использование ископаемых углей при производстве ферросилиция / С.А. Теслев, Е.П. Теслева, Д.В. Халтурина // Инновационные технологии в машиностроении: сб. трудов IX межд. науч.-практ. конф. г. Юрга, 24–26 мая 2018 г. Томск, 2018.
5. Жучков В.И. Перспективы использования бора в металлургии. Сообщение 2 / В.И. Жучков, О.В. Заякин, А.А. Акбердин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2021. Т. 64. №. 9. С. 660–668.
6. Карташев В.Г. Фосфор и сера в металлургическом коксе / В.Г. Карташев // Металлургия. 2016.
7. Сидоров Н.Н. Гранулометрический состав восстановителей / Н.Н. Сидоров // Металлургия. 2017.
8. Дмитриев А.Н. Формирование качества кокса за счет изменения состава угольной шихты для коксования, влияние качества кокса на его расход в доменной плавке и производительность / А.Н. Дмитриев // Черная металлургия. Бюлл. науч.-технич. и эконом. инф. 2018. Т. 1. №. 4. С. 40–44.
9. Грищенко С.Г. Исследование металлургических свойств высокорективного кокса для выплавки ферросплавов в электропечах / С.Г. Грищенко, А.Н. Овчарук, А.Ю. Таран // Экология и промышленность. 2015. №. 4. С. 63–65.
10. Галевский Г.В. Применение буроугольных полукоксов в металлургии: технологическая и экономическая оценка / Г.В. Галевский, А.Е. Аникин, В.В. Руднева, С.Г. Галевский // Глобальная энергия. 2016. №. 2 (243). С. 114–123.
11. ГОСТ 23083–2023 Кокс каменноугольный, пековый и термоантрацит. Методы отбора и подготовки проб для испытаний.