

Ровин С.Л., Лежнев С.Н.

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ БРИКЕТОВ ДЛЯ ФЕРРОСПЛАВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Аннотация. В статье представлены результаты исследований, направленных на создание самовосстанавливающихся брикетов из техногенных отходов, предназначенных для замены стальной стружки при выплавке ферросплавов в руднотермических дуговых печах. Использование таких брикетов позволяет снизить себестоимость выплавки ферросплавов и в определенной мере решить задачу рециклинга техногенных отходов, образующихся при производстве стального проката. В ходе выполнения работы были разработаны состав и технология изготовления брикетов, при этом исследовалось влияние различных связующих материалов на прочностные характеристики брикетов, оптимизировалось соотношение железосодержащих компонентов (прокатной окалины и аспирационной пыли дуговых сталеплавильных печей), входящих в состав брикетировочной массы, опробовались различные варианты формирования и уплотнения брикетов (с применением вибропрессования, валкового пресса и кольцевого экструдера). Кроме того, в ходе работы были проведены лабораторные исследования процесса твердофазного восстановления полученных брикетов и определены оптимальные условия и режимы этого процесса. Работы проводились с использованием отходов, образующихся в сталеплавильном и прокатном производстве АО «Узметкомбинат». Апробация результатов работы – проведение опытно-промышленных плавов ферросилиция ФС45 с использованием разработанных самовосстанавливающихся брикетов, осуществлялась на рудотермической печи РВП-25,5 МВА ферросплавного производства АО «Узметкомбинат». Ожидаемый годовой экономический эффект, связанный с сокращением затрат на закупку стальной стружки для ферросплавного производства комбината по предварительной оценке составит около 300 тыс. долл. США.

Ключевые слова: ферросплавное производство, рециклинг, железосодержащие отходы, аспирационная пыль, окалина, брикетирование, самовосстанавливающиеся брикеты

Введение

Актуальной задачей любого производства, в том числе металлургического, является ресурсосбережение и сокращение себестоимости продукции. Одно из важнейших направлений в области ресурсосбережения – переработка и рациональное использование образующихся техногенных отходов, в том числе путем рециклинга – возвращения их в собственное производство [1-3]. Окалина и аспирационная пыль плавильных агрегатов составляют значительную долю отходов любого предприятия черной металлургии. И если на комбинатах полного цикла (таких, например, как АО «Qarmet» в Казахстане) задача рециклинга этих отходов в какой-то степени решается путем их использования в качестве добавки к рудному сырью в агломерационном производстве, то на электрометаллургических заводах этот вопрос остается открытым.

Так, на АО «Узметкомбинат» ежегодно образуется около 25 тыс. т прокатной окалины и аспирационной электросталеплавильной пыли, а ввод в эксплуатацию нового литейно-прокатного комплекса приведет практически к двукратному увеличению этих отходов. Традиционно большая их часть реализуется на цементные заводы, где они используются в качестве добавки при производстве клинкера, при этом цена окалины колеблется в пределах 40-45 долл. США за тонну, а аспирационной пыли около 7-8 долл. До последнего времени для нужд комбината эти отходы не использовались. Вместе с тем на предприятии есть собственное производство ферросплавов (ферросилиция и ферросиликомарганца), выплавка которых осуществляется в рудовосстановительных (руднотермических) электродуговых печах, где происходит вос-

становление кремния и марганца из оксидов, их расплавление и соединение в единый сплав с железом. В качестве источника железа традиционно используется стружка черных металлов, которая подается в печи с другими шихтовыми материалами. Текущая стоимость элементной стружки в Узбекистане составляет около 150 долл. США за тонну. В то же время в руднотермических печах есть все необходимые условия для восстановления не только марганца или кремния, но и оксидов железа. С учетом этого была поставлена задача по созданию самовосстанавливающихся брикетов из оксидных и многокомпонентных железосодержащих отходов собственного производства, каковыми являются прокатная окалина и аспирационная электросталеплавильная пыль. В качестве восстановителя в составе брикетов использовалась углеродсодержащая пыль, которая образуется на предприятии при производстве дирексила – высокоомного кокса, и сегодня тоже является техногенным отходом.

Методика и анализ результатов исследований

В состав брикетов были включены: в качестве источника железа – прокатная окалина (её содержание в брикете варьировалось в пределах от 55 до 75%) и аспирационная пыль, образующаяся при выплавке углеродистой стали в ДСП-100 (5-15%), в качестве восстановителя – пыль дирексила (15-30%), в качестве связующего использовались добавки огнеупорной глины (3-10%), жидкого стекла (5-10%), цемента (5-15%) и сульфитно-дрожжевой бражки (5-10%).

Усредненный состав основных компонентов брикетировочной массы был следующим:

– прокатная окалина (мас. %): FeO – 76,2, Fe₂O₃ – 21,4, C – 0,15, Si – 0,22, Mn – 0,43, S – 0,02, P – 0,01, прочие ~ 1,5 %;

– аспирационная пыль (мас. %): Fe_2O_3 – 45,0, CaO – 9,4, SiO_2 – 7,8, MgO – 6,2, Al_2O_3 – 2,4, MnO – 1,6, ZnO – 15,3, CuO – 0,1, CaS – 2,2, C – 0,4, FeS – 1,4, P_2O_5 – 0,2, прочие ~ 8%;

– дирексил (в % от сухой массы): углерод – 85,1, сера – 0,25, зольность – 9,1, летучие – 5,55.

Исследовалось влияние вида и количества связующего, а также соотношения основных железосодержащих компонентов на прочностные свойства брикетов – прочность на сжатие: сырую (сразу после приготовления образца) и сухую (после естественной сушки образца в течение суток), а также осыпаемость сухих образцов – как показатель поверхностной прочности. Образцы изготавливались в форме цилиндров диаметром 50 мм и высотой 50 мм в соответствии с ГОСТ 23409.6-78, прочность на сжатие определялась в соответствии с ГОСТ 23409.7-78, осыпаемость – по ГОСТ 23409.9-78. Смесь готовилась в лабораторном лопастном смесителе. Уплотнялись образцы на лабораторном копре.

Плотность образцов подбиралась в соответствии с плотностью брикетов, изготовленных на валковом прессе, и обеспечивалась необходимым количеством ударов копра. Для исследованных смесей плотность брикетов колебалась в интервале от 1800 до 2250 кг/м^3 . Валковый пресс был выбран в качестве основ-

ного агрегата для изготовления самовосстанавливающихся брикетов, исходя из соображений минимальных удельных энергозатрат на изготовление (по сравнению с вибропрессованием и экструзией), оптимальных размеров брикетов (эллипсоиды с размерами $\varnothing 50 \times 30$ мм), невысокой стоимости и надежности оборудования в сочетании с высокой производительностью (что компенсирует достаточно большой оборотный цикл – до 10-15%) и стабильным качеством получаемых брикетов.

Методика исследований отрабатывалась при выполнении аналогичных работ по рециклингу пылевидных отходов ферросплавного производства [5]. Основные из вариантов составов исследованных брикетировочных смесей представлены в табл. 1.

Выбор состава брикетов и соотношения компонентов осуществлялся исходя из принципа минимально достаточного содержания связующего и влаги для обеспечения требуемой формуемости, сырой прочности сразу после изготовления, сухой объемной и поверхностной прочности (осыпаемости) после отверждения.

На рис. 1-3 представлены гистограммы, отражающие указанные прочностные характеристики образцов, изготовленных из исследованных брикетировочных смесей во влажном и в отвержденном состоянии.

Таблица 1

Составы исследованных брикетировочных смесей

Наименование компонентов смеси	Содержание компонентов смеси, %											
	Номера смесей											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Прокатная окалина	60	55	60	63	70	60	55	73	65	60	63	60
Пыль ЭСПП	-	-	-	-	-	-	-	-	5	10	7	-
Дирексил	30	30	30	30	20	30	25	17	20	20	20	20
Жидкое стекло	-	5	5	7	10	7	5	-	-	-	-	-
Цемент	10	10	5	-	-	-	5	10	5	10	10	-
Огнеупорная глина	-	-	-	-	-	3	10	-	5	-	-	10
Сульфитно-дрожжевая бражка (СДБ)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10
Вода сверх (100%)	10	-	-	-	10	-	5	10	5	10	10	10

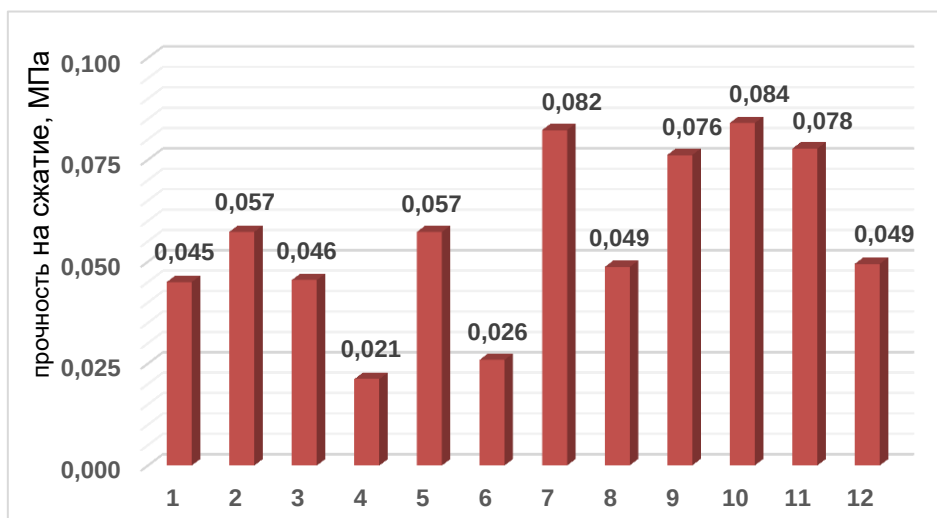


Рис. 1. Прочность образцов на сжатие во влажном состоянии

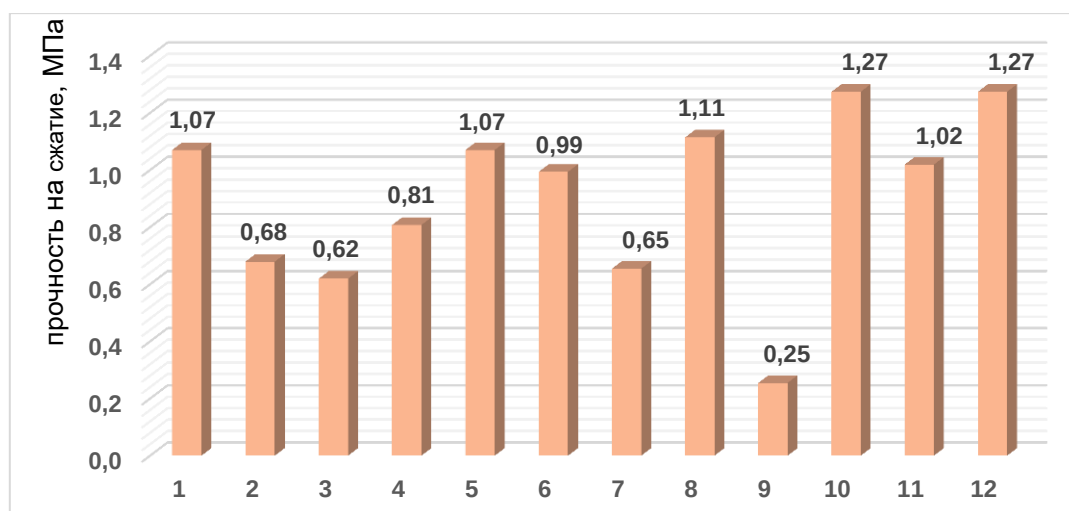


Рис. 2. Прочность образцов на сжатие после отверждения

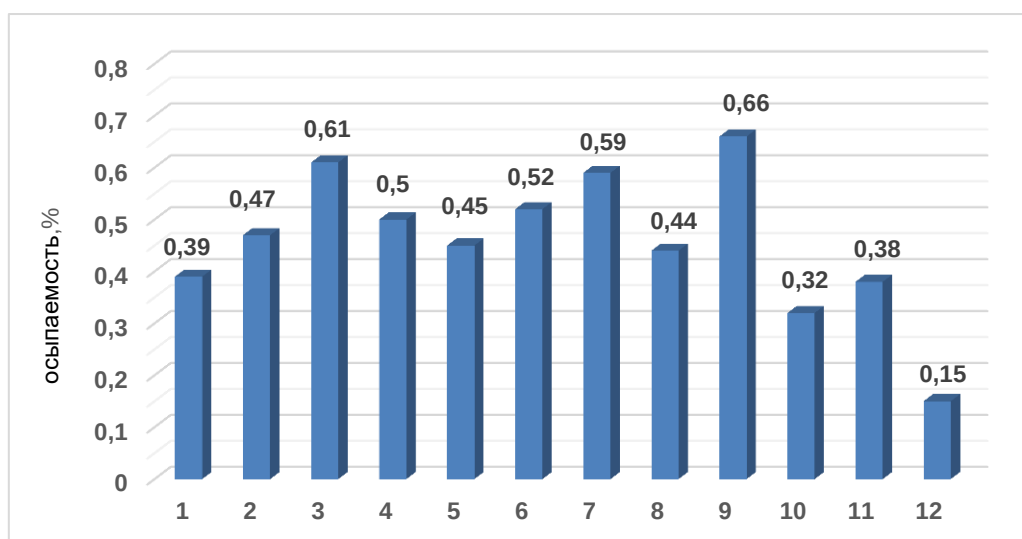


Рис. 3. Осыпаемость образцов после отверждения

Отверждение осуществлялось путем естественной сушки брикетов на воздухе при температуре +15-30°C (изначально ставилась задача не использовать специальное оборудование для упрочнения брикетов и обойтись без дополнительных затрат энергоносителей). При этом основным критерием было сохранение целостности брикетов и минимальных потерь на операциях сушки, загрузки и разгрузки в бункера, транспортировки, дозирования и подачи в печь [6-8]. На основании практических данных были определены пороговые значения прочности брикетов: прочность на сжатие в сыром состоянии – не ниже 0,05 МПа, прочность на сжатие после отверждения – не ниже 1,1 МПа, осыпаемость после отверждения – не более 0,4%.

По результатам испытаний в качестве рабочего был принят состав №10: прокатная окалина – 60%, дирексил – 20%, пыль ЭСПП – 10%, цемент – 10 % и вода сверх (100%) – 10%. Этот состав при хорошей формуемости обеспечивает высокую прочность сразу после приготовления и прессования, требуемую прочность после от-

верждения и достаточно низкую осыпаемость. Плотность сырых брикетов составила ~ 2100 кг/м³, плотность сухих (отвержденных) ~ 1900 кг/м³.

Исследования показали, что аспирационная пыль ДСП не только является источником железа в брикетах, но и повышает сырую прочность: наибольшую прочность в сыром состоянии показали образцы №7 и 10, в составе которых было 10 % глины и 10 % аспирационной пыли соответственно. Было выявлено также, что уменьшение размеров частиц окалина и повышение их однородности также способствует повышению прочности брикетов. Эти наблюдения соответствуют данным, которые приводят в своих работах и другие исследователи [9]. Образцы с глиной в качестве основного связующего ожидаемо демонстрировали неплохую сырую прочность, но после сушки значительно уступали смесям на цементном связующем. Высокую прочность и минимальную осыпаемость после отверждения показали образцы с добавкой сульфитно-дрожжевой бражки. Однако они существенно уступали брикетам на цементе в

сырой прочности. Кроме того, деструкция сульфитно-дрожжевой бражки в печи приводит к значительным газовыделениям в печи, ухудшая экологические параметры плавки.

На следующем этапе работ исследовались условия и режимы твердофазного восстановления железа в брикетах. Анализ проводился на составе №10, отобранном на первом этапе исследований. В процессе исследования определялась скорость восстановления при разных температурах (от 1000 до 1300°C, при меньших температурах восстановление шло с ничтожной скоростью) и степень восстановления в зависимости от времени выдержки при заданной температуре через 20, 40 и 60 мин. При температуре 1200°C дополнительно оценивалась степень металлизации через 90 мин выдержки, а при температурах процесса выше 1200°C взвешивание проводилось также через 5 и 10 мин.

Перед восстановлением смесь окалины, пыли ДСП и пыли дирексила в пропорциях, соответствующих составу №10 (цемент в тигли не добавлялся), просушивалась до постоянного веса при температуре $110 \pm 5^\circ\text{C}$. Навески исследуемой смеси массой 50-65 г засыпались в алуновы тигли емкостью 75 мл и помещались в предварительно разогретую до заданной температуры муфельную лабораторную печь. Процесс восстановления контролировался по убыли массы, взвешивание образцов осуществлялось на аналитических весах с точностью ± 1 мг. Результаты определялись по двум параллельным образцам. Если потери массы в них отличались более чем на 5%, эксперимент повторялся еще на двух образцах [10]. При оценке восстановления железа учитывались потери массы на газификацию дирексила и восстановление оксидов, которые могут восстанавливаться раньше или параллельно оксидам железа (напри-

мер, оксидов меди и цинка, в случае с цинком учитывались также потери, связанные с его испарением после восстановления при температурах, превышающих 906°C). Для снижения потерь на газификацию тигли во время выдержки в печи закрывались асбокартоном.

При определении степени металлизации железа экспериментальные значения потери массы сравнивали с максимально возможной потерей массы, рассчитанной исходя из количества и вида оксидов железа, содержащихся в окалине и аспирационной пыли. Состав и степень металлизации образцов, выдержанных в течение 60 и 20 мин при температуре 1300°C, перепроверялся с помощью рентгенофазового анализа.

Усредненные данные по итогам лабораторных исследований процесса восстановления представлены в сводной табл. 2.

Исследования показали, что железо из брикетировочной смеси начинает заметно восстанавливаться лишь при температурах 1000°C и выше. Скорость и степень восстановления с повышением температуры растут, хотя и не очень быстро: при 1000, 1100 и 1200°C через час металлизация достигает уровня ~ 58 , ~ 62 и $\sim 68\%$ соответственно. Заметное ускорение процесса наблюдалось при температурах выше 1200°C: при 1250°C через час степень восстановления железа превысила 82%, а при 1300°C уже через 20 мин достигла $\sim 86,65\%$ (рис. 4, 5). При таких температурах примеси начинают оплавляться и образец спекается. Однако для условий плавки в дуговой руднотермической печи это не является препятствием, наоборот, укрупнение частиц должно способствовать погружению восстановленного железа в расплав и перемешиванию его с продуктами восстановления марганца и кремния.

Таблица 2

Результаты исследования процесса восстановления железа из брикетировочной смеси при различных температурных и временных режимах

Номер образца	Время выдержки, мин	Температура выдержки, °C	Вес образца до восстановления, г	Потери массы образца, г	Потери массы, связанные с восстановлением железа, г	Степень металлизации, %
1	20	1000	60,445	11,755	5,199	52,57
2	40	1000	61,185	12,440	5,572	55,66
3	60	1000	60,510	12,700	5,737	57,95
4	20	1100	50,235	10,475	4,724	57,48
5	40	1100	50,515	10,955	4,991	60,39
6	60	1100	50,605	11,180	5,117	61,80
7	10	1200	60,300	12,800	5,800	58,79
8	20	1200	60,330	13,650	6,285	63,67
9	40	1200	60,815	14,185	6,578	66,11
10	60	1200	60,425	14,415	6,719	67,96
11	90	1200	60,350	14,860	6,976	70,65
12	20	1200	66,700	14,050	6,521	66,39
13	40	1200	65,090	14,690	6,923	73,79
14	60	1200	65,250	15,150	7,182	74,75
15	20	1250	63,000	14,800	6,875	66,70
16	40	1250	63,000	16,520	7,858	76,23
17	60	1250	62,000	17,350	8,357	82,38
18	5	1300	60,550	16,750	8,051	81,27
19	10	1300	60,250	17,500	8,487	86,09
20	20	1300	61,300	17,950	8,667	86,65

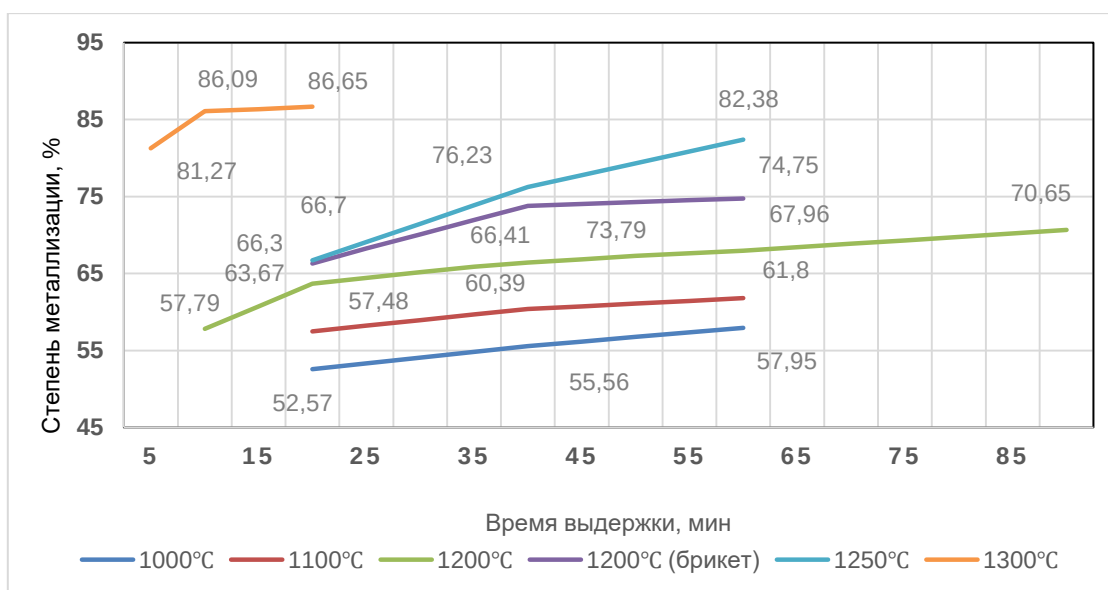


Рис. 4. Степень металлизации в зависимости от времени выдержки при разных температурах

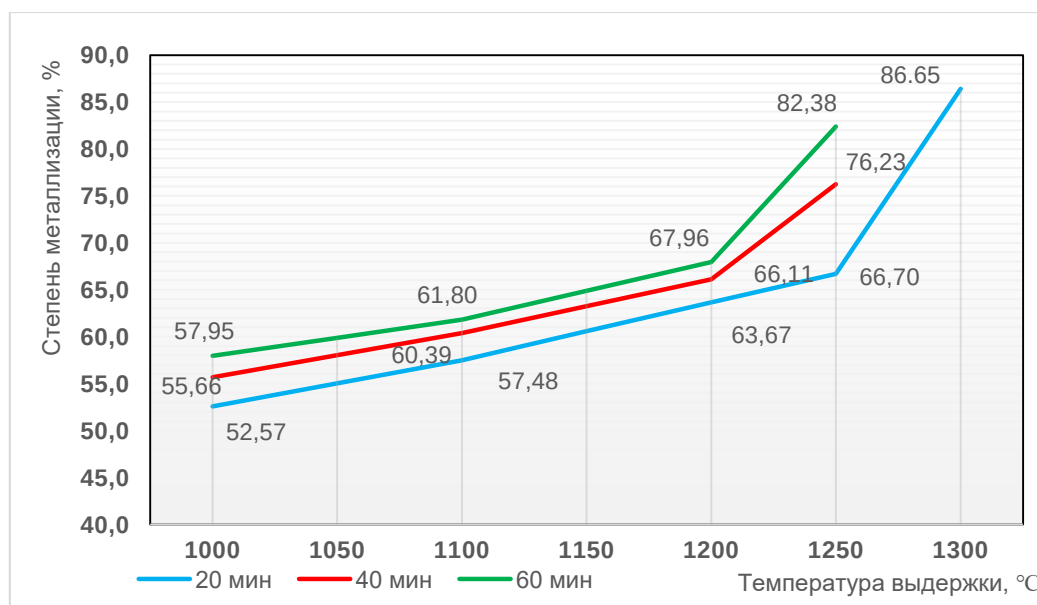


Рис. 5. Степень металлизации железа в зависимости от температуры и времени выдержки

С увеличением продолжительности процесса степень металлизации возрастает. Но, в соответствии с принципом протекания концентрационных процессов (химических и диффузионных), чем меньше остается в материале невосстановленного железа, тем медленнее идет процесс восстановления, что становится особенно заметно, когда степень металлизации достигает 75-80% и более. Так, на рис. 4 видно, что при температуре 1300°C в первые 5 мин скорость восстановления составляет в среднем 16% в минуту, в следующие 5 мин – не более 1 % / мин, а в следующие 10 – около 0,1 % / мин.

Лабораторные исследования показали также, что добавление цемента в состав не замедляет процесс восстановления. Более того, брикеты восстанавливались

даже быстрее, чем навеска в тигле (образцы №12, 13, 14 в табл. 2), что, возможно, связано с более тесным контактом частиц и более равномерным прогревом брикета по сравнению со слоем материала в тигле.

Закключение

Проведенные исследования позволили разработать и оптимизировать состав и технологию изготовления самовосстанавливающихся брикетов из техногенных металлургических отходов, образующихся на Узметкомбинате, которые могут быть использованы в качестве замены стальной стружки при выплавке ферросилиция и ферромарганца в руднотермических дуговых печах.

Совместное использование в составе окалины и аспирационной пыли позволяет улучшить механические свойства брикетов.

Разработанные самовосстанавливающиеся брикеты обладают необходимым комплексом физико-механических и технологических свойств, обеспечивающих минимальные потери при их транспортировке, хранении, дозировании и подаче в печи, и эффективное восстановление в условиях, соответствующих шлаковой ванне руднотермических дуговых печей.

Внедрение полученных результатов позволит заменить около 5000 т стальной стружки в год, что составляет около 50% от текущих потребностей комбината при производстве ферросилиция и ферросиликомарганца, утилизируя при этом около 7200 т прокатной окалины, ~ 1200 т аспирационной пыли электродуговой плавки стали и ~ 2400 т пыли, образующейся при производстве дирексила. Ожидаемое сокращение затрат на закупку стальной стружки составит при этом около 300 тыс. долл. США в год.

Список источников

1. Лисин В.С., Юсфин Ю.С. Ресурсо-экологические проблемы XXI века и металлургия. М.: Высшая школа, 1998. 447 с.
2. Пути повышения качества отливок и эффективности использования вторичных ресурсов / Калинин А.С., Рудницкий Ф.И., Николайчик Ю.А., Слуцкий А.Г., Шейнерт В.А., Ровин С.Л. // Металлургия в машиностроении Беларуси: итоги и перспективы научного обеспечения: сб. науч. ст. Минск: Беларуская навука, 2016. С. 95-114.
3. Аникин А.Е., Галевский Г.В., Руднева В.В. Исследование технологических режимов эффективной металлургической окислительной обработки отходов металлургического производства // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2020. № 5 (63). С. 335 - 343.
4. Юсфин Ю.С., Пашков Н.Ф. Металлургия железа. М.: Металлургия, 2007. 320 с.
5. Рециклинг аспирационной пыли электродуговой плавки ферросиликомарганца / Ровин С.Л., Гараев Р.С., Каримов А.М., Фозилов Б.Р. // Теория и технология металлургического производства. 2024. № 4 (51). С.13-17.
6. Котенев В.И. Брикеты из мелкодисперсных отходов металлургического и коксохимического производств – экономически выгодная замена традиционной шихты металлургических переделов // Металлург. 2002. № 10. С. 19-22.
7. Новицкий Н.А. Разработка технологических рекомендаций производства брикетированного шихтового материала из техногенного сырья и исследование физико-механических свойств окислительных брикетов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2017. 28 с.
8. Бижанов А.М., Загайнов С.А. Технологии брикетирования в черной металлургии: монография. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. 256 с.
9. Метод прогнозирования прочностных характеристик брикетов, полученных из сухих мелкофракционных материалов / Ващенко С.В., Худяков А.Ю., Баюл К.В., Семенов Ю.С. // Черные металлы. 2021. №6. С. 59-64.
10. Ровин С.Л., Каримов А.М. Разработка самовосстанавливающихся брикетов из прокатной окалины и аспирационной пыли ДСП для производства ферросплавов // Литейное производство и металлургия: сб. тр. 33-й Международной науч.-техн. конф. Минск: БНТУ, 2025. С.93-98.

Сведения об авторах

Ровин Сергей Леонидович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Металлургия черных, цветных и редких металлов» Алмалыкского филиала НИТУ «МИСиС», Республика Узбекистан, Ташкентская область, г. Алмалык. E-mail: rovinl@mail.ru

Лежнев Сергей Николаевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Металлургия и горное дело», Республика Казахстан, Костанайская область, г. Рудный. E-mail: sergeylegnev@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

INVESTIGATION AND OPTIMIZATION OF THE COMPOSITION OF SELF-REDUCING IRON-BEARING BRIQUETTES FOR FERROALLOY PRODUCTION

Rovin Sergey L. – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of «Metallurgy of Ferrous, Non-Ferrous and Rare Metals» at the Almalyk Branch of NUST MISIS, Republic of Uzbekistan, Tashkent Region, Almalyk. E-mail: rovinl@mail.ru

Lezhnev Sergey N. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of «Metallurgy and Mining», Republic of Kazakhstan, Kostanay Region, Rudny. E-mail: sergeylegnev@mail.ru

Abstracts. The article presents the results of research aimed at developing self-reducing briquettes from industrial waste intended to replace steel chips in ferroalloy smelting in submerged arc furnaces. The use of such briquettes makes it possible to reduce the production cost of ferroalloys and, to a certain extent, solve the problem of recycling industrial waste generated during steel production. During the study, the composition and manufacturing technology of the briquettes were developed. The influence of various binding materials on the strength characteristics of the briquettes was investigated, and the ratio of iron-containing components (rolling mill scale and aspiration dust from electric arc steelmaking furnaces) included in the briquetting mixture was optimized. Various methods of briquette forming and compaction were tested, including hydraulic pressing, roller pressing, and ring extrusion. In addition, laboratory studies of the solid-phase reduction process of the obtained briquettes were carried out, and the optimal conditions and operating parameters of this process were determined. The research was conducted using waste generated in the steelmaking and rolling production processes of JSC “Uzmetkombinat.” Pilot-industrial smelting tests of FS45 ferrosilicon using the developed self-reducing briquettes were performed in the RVP-25.5 MVA submerged arc furnace at the ferroalloy production facility of JSC “Uzmetkombinat.” The expected economic effect associated with reducing the cost of purchasing steel chips for the plant’s ferroalloy production is estimated at approximately USD 300 thousand per year.

Keywords: ferroalloy production, recycling, iron-bearing wastes, steelmaking dust, mill scale, briquetting, self-reducing briquettes

References

1. Lisin V.S., Yusfin Yu.S. Resource and environmental problems of the 21st century and metallurgy. Moscow: Vysshaya Shkola, 1998. 447 p.
2. Kalinichenko A.S., Rudnitsky F.I., Nikolaichik Yu.A., Slutsky A.G., Sheinert V.A., Rovin S.L. Ways to improve casting quality and the efficiency of secondary resource utilization // Metallurgy in mechanical engineering of Belarus: results and prospects of scientific support: collected scientific papers. Minsk: Belaruskaya Navuka, 2016. Pp. 95-114.
3. Anikin A.E., Galevsky G.V., Rudneva V.V. Investigation of technological parameters for efficient metallization of iron oxide-containing metallurgical wastes // Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2020. № 5 (63). Pp. 335–343.
4. Yusfin Yu.S., Pashkov N.F. Iron Metallurgy. Moscow: Metallurgiya. 2007. 320 p.
5. Rovin S.L., Garaev, R.S., Karimov, A.M., Fozilov, B.R. Recycling of electric arc ferrosilicomanganese smelting aspiration dust // Teoriya i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva [Theory and Technology of Metallurgical Production]. 2024. №4 (51). Pp. 13-17.
6. Kotenev V.I. Briquettes made from fine-dispersed waste of metallurgical and coke-chemical production as a cost-effective substitute for traditional charge materials in metallurgical processing // Metallurg [Metallurgist]. 2002, No. 10, pp. 19–22.
7. Novitsky N.A. Development of technological recommendations for the production of briquetted charge materials from technogenic raw materials and investigation of the physical and mechanical properties of mill scale–carbon briquettes: extended abstract of the Ph.D. (Engineering) Dissertation. Moscow, 2017. 28 p.
8. Bizhanov A.M., Zagainov S.A. Briquetting technologies in ferrous metallurgy: monograph. Moscow; Volgda: Infra-Inzheneriya, 2020. 256 p.
9. Vashchenko S.V., Khudyakov A.Yu., Bayul K.V., Semenov Yu.S. A method for predicting the strength characteristics of briquettes produced from dry fine-grained materials. Chernye Metally [Ferrous Metals]. 2021. № 6. Pp. 59-64.
10. Rovin S.L., Karimov A.M. Development of self-reducing briquettes from rolling mill scale and electric arc furnace aspiration dust for ferroalloy production // Foundry production and metallurgy, 2025. Belarus.: Proceedings of the 33rd International scientific and technical conference. Minsk: BNTU, 2025. Pp. 93-98.

Ссылка на статью:

Ровин С.Л., Лежнев С.Н. Исследование и оптимизация состава самовосстанавливающихся железосодержащих брикетов для ферросплавного производства // Теория и технология металлургического производства. 2026. №3(58). С. 22-28. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3\(58\)-22-28](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3(58)-22-28)

Rovin S.L., Lezhnev S.N. Investigation and optimization of the composition of self-reducing iron-bearing briquettes for ferroalloy production. *Teoriya i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2026, vol. 58, no. 3, pp. 22-28. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3\(58\)-22-28](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3(58)-22-28)