

ЛИТЕРАТУРА

1. **Сабилов, Б. Т.** Современное состояние добычи и переработки бентонитовых глин Узбекистана и перспективы их применения в металлургической отрасли Республики Беларусь / Б. Т. Сабилов // *Литье и металлургия*. – 2024. – № 4. – С. 13–16.
2. Бентонит : [сайт]. – URL: <https://bentonit.ru> (дата обращения: 08.09.2025).
3. **Куликов, С. А.** Совместное использование каолиновых и бентонитовых формовочных глин / С. А. Куликов, Ф. И. Рудницкий, В. А. Шумигай // *Литье и металлургия*. – 2024. – № 2. – С. 32–36.
4. Комплексное исследование бентонитовых глин перспективных месторождений Узбекистана / Б. Т. Сабилов, Ш. С. Намазов, Х. Л. Пулатов [и др.] // *Universum: технические науки: электрон. науч. журнал*. – 2020. – № 8(77). – [б.с.].

REFERENCES

1. **Sabirov B. T.** Sovremennoe sostojanie dobychi i pererabotki bentonitovyh glin Uzbekistana i perspektivy ih primenenija v metallurgicheskoy otrasli Respubliki Belarus' [The current state of mining and processing of bentonite clays in Uzbekistan and prospects for their application in the metallurgical industry of the Republic of Belarus]. *Lit'je i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2024, no. 4, pp. 13–16.
2. <https://bentonit.ru>
3. **Kulikov S. A., Rudnickij F. I., Shumigaj V. A.** Sovmestnoe ispol'zovanie kaolinovyh i bentonitovyh formovochnyh glin [Combined use of kaolin and bentonite molding clays]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2024, no. 2, pp. 32–36.
4. **Sabirov B. T., Namazov Sh. S., Pulatov H. L., Tairov S. S., Madatov T. A., Pardaev S. T.** Kompleksnoe issledovanie bentonitovyh glin perspektivnyh mestorozhdenij Uzbekistana [A comprehensive study of bentonite clays at promising deposits in Uzbekistan]. *Universum: tehicheskie nauki = Universum: Technical Sciences*, 2020, no. 8(77).



УДК 669.54.85+621.745.58

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И НАПРАВЛЕНИЙ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ ЧЕРНЫХ МЕТАЛЛОВ

О. М. ДЬЯКОНОВ, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. Тел.: +375 29 664-80-88. E-mail: deaconco@mail.ru

Проведен сравнительный анализ действующих и более совершенных новых экологически безопасных и экономически целесообразных технологий переработки и утилизации отходов металлообработки. Показаны направления и достигнутые успехи по переработке стальной и чугуновой стружки, отсевов ферросплавов, абразивных и безабразивных шламов, окалины, отходов дробеструйной обработки, аспирационной пыли. Для загрязненной СОЖ малоокисленной стружки приоритетными являются пламенно-индукционный нагрев в проходных муфельных печах и переплав россыпью в индукционных печах или горячее брикетирование с последующим переплавом брикетов без существенных потерь тепла в печах любого типа по традиционной технологии; для оксидных отходов – восстановительный обжиг и спекание в смеси с активным восстановителем в эндогазе или водороде с последующим горячим брикетированием и переплавом брикетов.

Ключевые слова. Стружка, шламы, оксидные отходы, переплав, печь, горячее брикетирование, восстановительный обжиг, спекание, эндогаз, водород, горячепрессованные брикеты.

ANALYSIS OF THE STATE AND DEVELOPMENT DIRECTIONS OF FERROUS METAL WASTE PROCESSES

O. M. D'JAKONOV, Belarusian National Technical University,
Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti Ave. Tel.: +375 29 664-80-88. E-mail: deaconco@mail.ru.

The report provides a comparative analysis of existing and more advanced new environmentally friendly and economically feasible technologies for processing and recycling metalworking waste. It presents the trends and achievements in processing steel and cast iron chips, ferroalloy screenings, abrasive and non-abrasive sludge, scale, shot blasting waste, and aspiration dust. For coolant-contaminated, low-oxidized chips, the priority is flame-induction heating in continuous muffle furnaces and bulk remelting in induction furnaces or hot briquetting followed by remelting of briquettes without significant heat losses in furnaces of any type using traditional technology; for oxide waste, the priority is reducing roasting and sintering in a mixture with an active reducing agent in endogas or hydrogen followed by hot briquetting and remelting of briquettes.

Keywords. Chips, sludge, oxide waste, remelting, furnace, hot briquetting, reducing roasting, sintering, endogas, hydrogen, hot-pressed briquettes.

Введение

Отходы черных металлов современных металлообрабатывающих предприятий представляют собой вторичный сырьевой ресурс литейного и металлургического производств, использование которого является важной и актуальной задачей. К ним относятся стальная и чугуновая стружка, отсеvy ферросплавов, отходы дробеструйной обработки, шлифовальные, опилочные и обкатные шламы, металлоабразивная пыль от обдирочных, наждачных и заточных станков, аспирационная пыль и др. Наименее окисленная стальная и чугуновая стружка (объем образования в Республике Беларусь составляет примерно 240–250 тыс. т в год) в основном поставляется на предприятия Белвторчермет и металлургические заводы с превышением действующих ограничений по содержанию безвредных примесей и масла, порядка 130–135 тыс. т в год экспортируется за рубеж. Шламы (около 45 тыс. т в год), содержащие абразив, бумагу, ветошь, масло, СОЖ и сухие оксидные отходы, вывозятся в отвалы или экспортируются в качестве доменного присада по низким ценам. При этом безвозвратно теряется большое количество металлов и, в том числе ценных легирующих элементов (вольфрам, молибден, ванадий, хром, никель и др.). Экспорт отходов металлообработки не является экономически оправданным и целесообразным. Накопление на поверхности земли, в грунте и водоемах огромного количества химически активных металлов, хрома и его вредных соединений, эмульсий и водно-солевых растворов ПАВ приводит к техногенным катастрофам.

Отходы черных металлов обладают специфическими свойствами: высокой степенью окисленности металлических частиц, неоднородностью микро- и макроструктуры, дефектами наружного и внутреннего строения, высокой степенью упрочнения и низким ресурсом пластичности, низкой сыпучестью и др. Все эти отличительные особенности влияют на характер поведения этих материалов в процессах их переработки.

Переплав металлоотходов без специальной подготовки нерационален из-за большого содержания в них влаги, масел и ПАВ, большой удельной поверхности и низкой насыпной плотности. Высокое содержание влаги является причиной быстрого окисления металла при хранении. Загрязненность металлоотходов отработанными маслами приводит к загрязнению транспортного оборудования и железнодорожных магистралей. Процесс плавки сопровождается насыщением металла газами и вредными примесями, высоким угаром и снижением выхода годного металла, повышенным расходом сырья, электроэнергии, кислорода и ферросплавов. Возгонка и сжигание масляной компоненты многократно увеличивают выбросы тепла и вредных веществ в атмосферу (сажистого углерода, акролеина, пыли и др.), приводят к созданию аварийных ситуаций из-за возгорания масла и выбросам металла при завалке стружки в печь. Замена фильтров пылегазоочистных установок (ПГУ) не является решением экологической проблемы и охраны труда работников предприятия. Большое количество газов и пыли не попадает в газоочистные тракты, например, при неработающей печи в момент завалки шихты, когда ПГУ не включены в рабочий режим.

По данным [1], из-за перечисленных выше проблем Белорусский металлургический завод до 2001 г. практически не использовал стружку в качестве металлошихты и только в 2001 г., когда по разным причинам резко снизились поставки кускового лома из России, предприятие из-за угрозы полной остановки было вынуждено начать использовать стружку и брикеты из нее. В марте 2001 г. поступившая на БМЗ от ГО «Белвтрормет» стружка по результатам входного контроля имела следующие показатели: содержание примесей и масла – 4–16% (в среднем 7%); серы – 0,02–0,10%; хрома – 0,1–1,0%; никеля – 0,1–2,4%; меди – 0,1–0,4%. При использовании в составе шихты всего 2,5–4,0% стружки количество незаказных плавок по превышению содержания никеля увеличилось на 2,2%. Удельный расход металлошихты увеличился на 23 кг/т, выход годного металла снизился на 1,9%. Время под током увеличилось на 1 мин. При увеличении стружки в составе шихты до 8–9% удельный расход металлошихты вырос на 45 кг/т. Время плавки увеличилось на 3 мин, выход годного металла снизился на 3,6%.

Подготовительные операции

Технологический процесс переработки отходов черных металлов в обязательном порядке должен включать в себя сортировку отходов по химическому составу, дробление и классификацию частиц на фракции заданного размера, удаление посторонних предметов, полное удаление влаги и продуктов нефтепереработки (масляные загрязнения и СОЖ). Стружка должна быть собрана непосредственно в местах образования и храниться в условиях, исключающих ее окисление. Обычно срок хранения на открытых площадках не должен превышать 3–4 дней.

Стальная сливная стружка подлежит дроблению на фракции до 20 мм. При данных размерах достигается наилучшая сыпучесть стружки при ее переработке. Наиболее эффективным для этой цели является применение валковых шредеров. Применение молотковых и других дробилок менее эффективно. Ножи роторных дробилок из-за неверно выбранной геометрии и ударного нагружения затупляются и требуют частой замены. Режущие кромки валковых шредеров выполняются под углом 90° и работают в условиях статического нагружения. Классификация стружки по размерам осуществляется с помощью наклонных сортировочных барабанов или вибросит с ячейками требуемого размера. Чугунная стружка надлома (5–10 мм) дроблению не подлежит.

Центрифугирование стальной и чугунной стружки нерационально и неэкономично. Поверхностно-активная СОЖ не удаляется полностью с поверхности металлических частиц. Более эффективным является нагрев с последующим переплавом чистого металла без потерь тепла. В данном случае естественным образом и в едином процессе полное удаление влаги и вредных нефтепродуктов совмещается с переплавом отходов и получением качественных отливок. Процентное содержание жидкой фазы в стружке при любом исходном значении после отстоя на наклонной бетонной площадке в течение 3–4 сут не превышает 8–12%. При таком содержании процесс нагрева является самым экономичным и производительным по сравнению со всеми известными способами удаления СОЖ, несмотря на некоторую задержку во времени и затраты энергии на парообразование. Стоимость этих затрат в разы меньше, чем

себестоимость организации и эксплуатации участка центрифугирования с подачей стружки на участок, операциями загрузки-выгрузки, подогрева стружки в зимнее время года, ремонтом оборудования, выплатой зарплаты обслуживающему персоналу и т. д.

Шлифовальные шламы (бруски абразива, ветошь, бумага, СОЖ, обломки металлорежущего инструмента и т. д.) с целью удаления посторонних предметов просеиваются на вибросите с размером ячеек 20 мм, после чего они подвергаются отмывке от СОЖ с помощью моющих средств и мокрой магнитной сепарации [2, с. 100–103]. Далее следует отжим порошка от влаги под прессом и размалывание прес-соков в бегунах или молотковой дробилке. Определенное количество абразива, содержащего такие соединения, как Al_2O_3 , SiO_2 , SiC и др., может быть использовано в качестве шлакообразующего материала.

Применение сухой магнитной сепарации исключено по причине неизбежного загрязнения атмосферы металлоабразивной пылью. Безабразивные обкатные и опилочные шламы магнитной сепарации не подлежат.

Среди известных и наиболее практикуемых способов рециклинга стружки черных металлов различают переплав стружки россыпью, а также в виде холодно- и горячепрессованных брикетов. Выбор способа зависит от типа плавильного агрегата и осуществляется, исходя из условия достижения наивысших экологических и технико-экономических показателей плавки.

Переплав стружки россыпью

Данная операция осуществляется в индукционных печах после полного удаления из стружки масла и СОЖ и применяется только для малоокисленной стружки. Мелкие частицы металла плавятся быстрее и с меньшими затратами энергии по сравнению с брикетами и кусковым ломом. Однако на выходе процентное содержание кислорода в металле должно быть в пределах нормы. Процессы восстановления оксидов железа в индукционных печах кратковременны и не протекают в должном объеме.

Технологический процесс плавки стружки россыпью описан в работе [2, с. 242]. Стружка нагревается в проходной муфельной печи с последующим переплавом «на болоте» в индукционной печи практически при отсутствии окисления металла и потерь тепла. В муфеле печи создается защитная атмосфера продуктов термической возгонки и деструкции СОЖ. На поверхности металлических частиц адсорбируется пироуглеродное покрытие толщиной 30–70 мкм, предотвращающее окисление металла вплоть до загрузки в печь. В процессе плавки угар металла предотвращается элетромагнитным перемешиванием и поглощением в расплав.

Утверждения некоторых авторов о том, что всю стружку и лишь с некоторыми исключениями нужно переплавлять в индукционных печах, не обоснованы. Например, переплав стружки в виде брикетов в дуговой печи совместно с кусковым ломом по традиционной технологии, включающей в себя окислительный и восстановительный периоды плавки, может оказаться более производительным, экономичным и качественным. Переплав стружки россыпью в дуговых печах не производится, так как угар металла доходит до 40–50 %.

В работах [3–7] представлен альтернативный способ рециклинга дисперсных железосодержащих отходов, основанный на непрерывном твердо-жидкофазном процессе, реализуемом в ротационных наклоняющихся печах (РНП). Это тип ротационных печей, снабженных устройством для наклона и качания барабана вокруг оси крепления в передней части корпуса с единым окном загрузки-выгрузки материалов. По мнению авторов (технология не внедрена в производство), данный способ позволит перерабатывать отходы практически любого состава и состояния от металлических до оксидных и многокомпонентных (стружка, окалина, шламы и др.), загрязненные влагой, маслами, органическими примесями, без их предварительной подготовки (очистка, гомогенизация, окомкование и т. д.).

Суть способа заключается в следующем. Исходный материал и твердый восстановитель (коксик, бой графита, лигнин) загружаются в печь без всякой предварительной подготовки и нагреваются с помощью газового или жидкого топлива до температуры 1000–1100 °С. После того как из стружки полностью удаляются вода и масло, процесс переводится в стадию твердофазного восстановления. В печи поддерживается температура 1000–1200 °С и восстановительная атмосфера: $CO/CO_2 = 1,5–2,5$. После того как степень металлизации достигает 70–80 %, температура повышается до 1700–1800 °С, металл плавится, процесс переводится в стадию жидкофазного восстановления. В печь загружаются флюсы, при необходимости добавляется восстановитель. После того как степень металлизации достигнет 98–99 %, металл может быть разлит в слитки с последующим использованием в качестве шихты в традиционных плавильных агрегатах, например, передан в жидком состоянии в электропечи для получения марочного сплава.

Прежде всего необходимо заметить, что плавильные печи с газовой горелкой не предназначены для осуществления операций рафинирования и высокотемпературного легирования чугунов и сталей, т.е. для доводки металла до заданного химического состава. Данный способ переплава металлоотходов не осуществляется с полным металлургическим циклом. Это лишь способ предварительной подготовки шихты, когда металл доводится до жидкого состояния. При этом возникает ряд вопросов:

1. Могут ли РНП, эти вращающиеся и качающиеся камерные печи, конкурировать с современным промышленным оборудованием (печи для восстановления и спекания порошковых и других дисперсных материалов, индукционные и электродуговые печи) по производительности и технико-экономическим показателям?

2. Стоит ли металл доводить до жидкофазного состояния, может быть проще и с меньшими потерями энергии переплавлять стружку россыпью «на болоте» в индукционных печах или передавать очищенный от СОЖ металл на переплавку практически в любых плавильных агрегатах в виде горячих спеков или горячепрессованных брикетов без существенных потерь тепла, например, с использованием термостатов?

3. Каким образом на первой стадии процесса при нагреве до 1000–1100 °С в закрытом барабане печи в контакте с пламенем горелки при наличии окислителя (воздух, пары воды) мелкие частицы металла защищены от окисления или полного сгорания, ведь роль твердого восстановителя в таких начальных условиях незначительна? Обычный (окислительный) нагрев можно использовать лишь до температуры ≤ 600 °С, при более высоких температурах начинается интенсивное окисление железа.

4. Каким образом при плавке отходов в РНП соблюдаются экологические нормы: отводятся дымовые газы, берутся пробы, загружаются флюсы и т.д.?

5. Являются ли РНП достаточно надежными, управляемыми и герметичными системами, способными выдерживать в условиях вращения и качания динамические нагрузки со стороны тяжелого жидкого металла?

Холодное брикетирование

Брикетирование стружки как таковое применяется с целью уменьшения ее удельной свободной поверхности и предотвращения окисления частиц металла в процессе плавки. Холодное брикетирование производится на гидравлических прессах под давлением 350–400 МПа. Диаметр стальных и чугунных брикетов составляет 70–180 мм, высота – 50–150 мм. К основным недостаткам процесса относятся значительные энергозатраты, большое остаточное содержание жидкой фазы в брикете 1,0–1,5 %, низкая плотность (4300–4800 кг/м³) и высокий процент осыпаемости брикетов. Холодному брикетированию не поддаются все виды мокрой чугунной стружки, а также труднодеформируемая малопластичная стружка высокоуглеродистых и высоколегированных сталей. Например, при указанных давлениях прессования стружка подшипниковой стали ШХ15 или пружинной стали 65Г после снятия нагрузки стремится восстановить свою форму и размеры. Брикет разрушается в результате упругого последействия. Увеличение давления до 1000 МПа не дает положительного результата.

Холоднопрессованные брикеты разваливаются при погрузочно-разгрузочных работах, сбрасывании с высоты 1,0–1,5 м. Их применение в металлозавалке носит ограниченный характер (5–7 %) из-за значительного снижения практически всех технико-экономических показателей плавки. Начальный период плавления сопровождается резким возгоном масел и СОЖ. Брикеты разрушаются под действием массы шихты и интенсивно окисляются. Окислению металла способствует флотация брикетов на поверхности металлической ванны. Угар металла и потери со шлаком составляют до 40–50 %, снижаются практически все параметры плавки и качество жидкого металла. Многие предприятия Беларуси (Белвтормет, БМЗ, МАЗ, МТЗ, МПЗ, ЛЛМЗ и др.) сталкиваются с большими трудностями при осуществлении холодного брикетирования и переплавке холоднопрессованных брикетов.

По данным ГО «Белвтормет» [1], на имеющихся на предприятиях Республики Беларусь гидравлических прессах типа Б6238 или Б6241 достичь плотности брикетов не менее 5000 кг/м³ практически невозможно. Так, поступившая на БМЗ в 2000 г. партия холоднопрессованных брикетов из стружки категории 7Б по ГОСТ 2787-75 так и не была использована по следующим причинам: количество примесей и масла составило 5–7 %, содержание влаги – 2,0–2,5 %, в то время как по ГОСТ 2787-75 общее содержание безвредных примесей и масла не должно превышать 3 %. Количество осыпавшейся стружки составило более 15 %, согласно ГОСТ 2787-75, это количество не должно превышать 5 %. Плотность брикетов была ниже 4500 кг/м³, что в принципе по указанным выше причинам недопустимо. Крупнейшие заводы

Европы и США (концерны Krupp, Corbern, Германия; заводы Midrex, Clairton, Corex, США и др.) вообще отказались от использования холоднопрессованных брикетов.

Горячее брикетирование

Этот процесс сочетает в себе полное удаление жидкой фазы и получение брикетов, плотность которых сопоставима с плотностью кускового лома. Горячепрессованные брикеты обладают высокой прочностью, не истираются и не разрушаются при транспортировке и сбрасывании с большой высоты вплоть до загрузки в плавильные агрегаты. Их транспортировка вследствие высокой насыпной плотности намного дешевле транспортировки любого другого вида металлолома. В процессе плавки они не всплывают на поверхность металлической ванны и не окисляются.

Экономическая эффективность горячего брикетирования обеспечивается снижением сопротивления металла деформированию при нагреве до температур 700–800 °С и соответственно затрат электроэнергии на работу брикетировочного пресса. В случае переплавки брикетов без существенных потерь тепла горячее брикетирование может рассматриваться как способ предварительного подогрева шихты, который, как известно, обеспечивает сокращение удельных затрат электроэнергии на плавку до 160–200 кВт·ч на 1 т расплава при общем сокращении расхода энергии на 25–30% [5]. При этом улучшаются практически все параметры плавки и рециклинга в целом. Во избежание охлаждения брикетов до загрузки в плавильный агрегат возможно применение термостатов.

Перспективным и весьма эффективным направлением является горячее брикетирование стружки труднодеформируемых малопластичных высокоуглеродистых и высоколегированных чугунов и сталей, не поддающихся брикетированию в холодном состоянии, а также мелкофракционной чугунной стружки, загрязненной маслами и СОЖ. Экономическая эффективность данного процесса в значительной степени возрастает в случае использования в брикетах углеродосодержащих, шлакообразующих и легирующих добавок. При плотности 6500–7100 кг/м³ стружковая матрица надежно удерживает в себе до 20% мелкофракционных наполнителей.

Перековка плотных, прочных и чистых брикетов в действующих печах литейного или металлургического производства технически не представляет сложности и позволяет заменить до 50% габаритного кускового лома против 5–7% при использовании холоднопрессованных брикетов. Удельный вес горячепрессованных брикетов в металлозавалке намного превышает удельный вес стружки россыпью или холоднопрессованных брикетов. Плавка горячепрессованных брикетов производится на всех без исключения плавильных агрегатах, не вызывая существенных отклонений от штатной технологии. При использовании ЭШП готовить шихту целесообразно в виде расходующихся электродов, изготовленных из собранных в трубе или сваренных брикетов.

Историческая справка

Горячее брикетирование стружки черных металлов стало применяться в СССР, США, Германии и других странах в 70–80-х годах прошлого столетия, однако, несмотря на свои очевидные и доказанные к настоящему времени преимущества, не получило широкого распространения. Так, в СССР по проекту и под руководством профессора, д-ра техн. наук Дорофеева Ю. Г. и других сотрудников Новочеркасского политехнического института [8, с. 42–50] на заводе РОСТСЕЛЬМАШ была внедрена установка динамического горячего брикетирования стружки на паровоздушном молоте с предварительным нагревом в ротационной газовой печи (РГП). Несколько позже по проекту ВНИПИВТОРЧЕРМЕТ на Липецком тракторном заводе была внедрена установка статического горячего брикетирования стружки (УГБС) на гидравлическом прессе Б6238 с тем же оборудованием для нагрева. Основным недостатком РГП является наличие окислительной атмосферы в барабане печи из-за его большого объема и низкой плотности защитной углеводородной атмосферы, образующейся в результате термической возгонки СОЖ. Мелкие частицы металла окисляются и сгорают в пламени газовой горелки. Необходимость улавливания отработанных газов в местах загрузки стружки во вращающийся барабан печи и выгрузки из него представляет собой непростую техническую задачу.

В России на ОАО «ГАЗ» (г. Нижний Новгород) в 2000–2006 гг., а затем и в Беларуси на ОАО «МТЗ» (г. Минск) в 2007–2008 гг. была внедрена технология двухстадийного горячего брикетирования чугунной стружки. Стружка вначале брикетировалась в холодном состоянии на прессе Б6238, а затем нагревается в проходной газовой печи до температуры 840 °С и подвергается допрессовке на чеканочном прессе. Получаются брикеты плотностью 5600–6300 кг/м³. Преимуществами данного способа являются

высокоэффективный отжим чугунной стружки от СОЖ на этапе холодного брикетирования, а также защита брикета от окисления при нагреве за счет внутреннего избыточного давления паров масла. К недостаткам следует отнести затрудненный выход паров воды и масла из глубины брикета, что приводит к дополнительным энергозатратам, увеличению времени нагрева и перерасходу природного газа. Нагрев брикета сопровождается интенсивным окислением его слабозащищенного наружного слоя на глубину 10–15 мм и производится с нарушением экологических норм и низким КПД (до 10%). Потери металла составляют 15–25 % от массы брикета. По данным ОАО «МТЗ», из-за перерасхода природного газа себестоимость 1 т чугунных брикетов выше покупной преysкурантной в 2,0–2,4 раза.

В Республике Беларусь в 1988–2004 гг. на Минском заводе ВТОРЧЕРМЕТ по проекту и при непосредственном участии сотрудников кафедры «Порошковая металлургия и технология конструкционных материалов» БГПА перерабатывали стружковые и шламовые отходы инструментальных и подшипниковых сталей. Технологический комплекс горячего брикетирования включал в себя УГБС с непрерывным муфельным нагревом в атмосфере продуктов термической возгонки и деструкции СОЖ [2, с. 231–241], а также линию мокрой магнитной сепарации шлифовальных шламов [2, с. 100–103]. Брикетыв поставлялись на заводы «КРУПП» (Германия), «ЭЛЕКТРОСТАЛЬ» (Россия), ОАО «ЛЛМЗ» и ОАО «БМЗ» (Беларусь). Таким образом, было достигнуто стабильно высокое качество брикетов, претензии металлургов относились лишь к способности брикетов удерживать в себе определенное количество мелкофракционных наполнителей при сбрасывании с большой высоты (до 4 м). К недостаткам следует отнести также низкий КПД печи (15–20 %) из-за неудовлетворительных условий теплопередачи стальному муфелю при нижнем расположении газовых горелок в прямом вертикальном канале топки печи.

В 2000–2004 гг. аналогичная УГБС по договору с БНТУ была внедрена на ОАО «МПЗ». В 2005 г. на ОАО «БМЗ» в рамках разработанного совместно с БНТУ и НАН Беларуси «Календарного плана проведения исследований по отработке технологического процесса плавки стали с использованием горячепрессованных брикетов» поступила опытная партия (65 т) брикетов из стружки стали ШХ15СГ. Характеристики брикетов по результатам входного контроля приведены в табл. 1.

Таблица 1. Усредненные значения входного контроля проб опытной партии (65т) горячепрессованных брикетов из стружки стали ШХ15СГ ОАО «МПЗ», изготовленной по технологии БНТУ

Наименование документа	Химический состав, %							Физические параметры		Засор
	Сг	Ni	Cu	Si	S	P	Mn	M, кг	ρ , кг/м ³	%
Входной контроль	1,5	0,13	0,22	0,4	0,03	0,016	1,2	6,11	6171	0,5
ГОСТ 2787-75 (ББ1)	0,4–1,8	не более 0,4	–	не более 1,6	–	–	0,2–1,9	2–50	не менее 5000	не более 1,0

Из таблицы видно, что опытный материал соответствует типовым требованиям ГОСТ 2787-75 для брикетов из стальной стружки категории ББ1. Отмечено небольшое осыпание брикетов (не более 3 %), которое не превысило допустимых значений. При использовании брикетов в составе шихты от 9 до 17 % расходный коэффициент увеличился на 21 кг/т, выход годного снизился на 1,5 %, длительность плавки под током увеличилась на 1 мин. Поэтому специалистами завода было рекомендовано использовать в составе шихты не более 10 % горячепрессованных брикетов. Рекомендовано было также создание на предприятиях-переработчиках вторичных металлов участков горячего брикетирования на примере ОАО «МПЗ».

Необходимо заметить, что представленные на испытания брикеты содержали 90 % стружки и 10 % порошков шлифовальных шламов той же марки стали. Предварительно шламы подвигали мокрой магнитной сепарации, в результате чего содержание абразива в них было снижено от 20–25 до 4,0–4,5 %. В брикетах оно составляло 0,4–0,45 %. В условиях ОАО «БМЗ» при транспортировке и в процессе металлозавалки в 100-тонную дуговую печь брикеты сбрасывали с высоты 3–4 м. Осыпание брикетов было вызвано выпадением тонкодисперсного порошка шлама из стружковой матрицы. Этот недостаток в дальнейшем был устранен применением пресс-формы с подвижной матрицей, практически устраняющей влияние на процесс уплотнения стружки сил бокового контактного трения [9]. Давление прессования было доведено до 470–500 МПа. При температурах прессования 700–800 °С плотность чугунных брикетов достигла значений 6500–6700 кг/м³, стальных – 6800–7100 кг/м³.

Технико-экономические параметры опытных плавов в ДСП-100 № 3 на ОАО «БМЗ» при выплавке стали марки 40Х с использованием горячепрессованных брикетов из стружки стали ШХ15СГ приведены в табл. 2, 3.

Т а б л и ц а 2. Техничко-экономические параметры опытных плавов в ДСП-100 № 3 ОАО «БМЗ» при выплавке стали марки 40Х

Номер плавки	Лом А, т	Лом АП, т	Лом А об., т	Лом Б об., т	Брикеты ШХ15СГ, т	Итого металлошихты, т	Масса жидкого металла в ковше, т	Выход годного, %
30 799	85,1	0	10	0	25	120,1	105	87,43
30 800	82,7	0	10,2	0	27,4	120,3	107	88,94
30 801	94,5	15,5	10	0	0	120	108	90,0
30 802	95	15,4	10	0	0	120,4	116	96,35
30 803	105,6	0	0	10,6	0	116,2	110	94,66
Среднее	92,58	6,18	8,04	2,12	10,48	119,4	109,2	91,48

Т а б л и ц а 3. Временные и температурные показатели, расход электроэнергии и кислорода при выплавке стали марки 40Х

Номер плавки	Общее время плавки, мин	Время под током, мин	Электроэнергия, кВт·ч		Кислород, м³		Температура стали на выпуске, °С
			общая	удельная на 1 т жидкой стали	общая	удельная на 1 т жидкой стали	
30 799	88	52	47 187	449,4	3162	30,11	1663
30 800	75	51	49 951	466,83	3339	31,21	1652
30 801	70	45	45 001	416,68	2771	25,66	1645
30 802	67	46	45 641	393,46	2633	22,7	1640
30 803	75	51	47 075	427,95	2628	23,89	1650
Среднее	75	49	46 971	412,7	2677	24,08	1650
Сравнее	68	51	48 208	423,62	3307	29,06	1650

Анализ полученных результатов показывает, что все перечисленные параметры в основном соответствуют плавкам согласно штатной технологии. Однако при этом требуется корректировка химического состава расплава путем повышения процентного содержания легирующих элементов в составе брикетов, например, с использованием продуктов дробления слитков ферросплавного производства. В случае широкомасштабного внедрения технологии горячего брикетирования мелкофракционные отсеивы ферросплавов (–10 мм) могли бы стать важнейшим источником поставок в Республику Беларусь наиболее ценных легирующих элементов, а в случае использования в брикетах привозных отходов ближнего и дальнего зарубежья расширилась бы номенклатура, увеличилось количество, повысилось качество металлургического сырья.

Существенным достижением в последние годы явилась разработка новой технологии комбинированного пламенно-индукционного нагрева стружки в проходной муфельной печи [10]. На этапе газопламенного нагрева до температуры 400–500 °С из стружки полностью удаляется вода и частично масло, после чего следует высокопроизводительный и энергоэффективный индукционный нагрев до температуры 700–800 °С. В ограниченном пространстве муфеля печи при ограниченном доступе окислителя создается защитная атмосфера в результате термической возгонки СОЖ. В топке печи пары масла сгорают совместно с природным газом, повышая КПД печи. Пары воды вступают в реакцию дожигания оксида углерода, способствуют очистке отходящих дымовых газов от твердых взвешенных частиц. Стружка очищается от влаги и масла в полном объеме. На поверхности частиц металла формируется защитное покрытие сажистого углерода, выполняющее помимо защитных функций роль смазки в процессе горячего прессования. Новая технология обеспечивает повышение производительности УГБС и КПД печи. При производительности УГБС 1,5–2,0 т/ч КПД печи достигает 40–45 %.

Индукционный нагрев, сочетаемый с радиационно-конвективным теплообменом в горячем муфеле, эффективен как для магнитных, так и парамагнитных или немагнитных материалов, входящих в состав брикетов (металлургических композитов).

Таким образом, в результате проведенных исследований и внедрения технологии горячего брикетирования стружки черных металлов в производство можно утверждать, что основу экологической и технико-экономической эффективности данного процесса составляют следующие достоинства и преимущества:

- осуществление процесса горячего брикетирования как способа предварительного подогрева шихты, включающего экологически безопасное удаление СОЖ с последующей мокрой очисткой

и охлаждением отходящих газов в насадочном скруббере Вентури, утилизация тепла дымовых газов для нагрева производственного помещения в зимнее время года или для других целей;

- использование масляной компоненты СОЖ в качестве топлива для нагрева стружки совместно с природным газом, создания защитной атмосферы в ограниченном пространстве муфеля печи, формирования защитного углеродного покрытия на поверхности частиц металла, выполняющего к тому же роль эффективной смазки в процессе горячего прессования;
- использование перегретого пара, образующегося в результате испарения водной компоненты СОЖ, для дожигания оксида углерода и других углеводородных соединений;
- применение высокоэффективного двухстадийного пламенно-индукционного нагрева стружки с целью повышения производительности и КПД нагревательной печи, уменьшения ее габаритов;
- снижение давления и работы прессования, а следовательно, и расхода электроэнергии в 2,0–2,5 раза за счет снижения сопротивления металла деформированию при нагреве металла до температур 700–800 °С;
- применение пресс-формы с подвижной матрицей, обеспечивающей снижение сил контактного трения, энергосиловых параметров, износа инструмента, повышение качества брикетов;
- получение металлургических композитов на основе стальной и чугуновой стружки, включающих углеродосодержащие, шлакообразующие и легирующие наполнители;
- использование горячепрессованных брикетов в качестве полноценных и дешевых заменителей габаритного кускового лома, чушкового чугуна, литейно-шихтовых слитков.

УГБС представляет собой автоматизированный технологический модуль с многокомпонентной загрузкой шихты, нагревом, прессованием и выгрузкой брикетов, дожиганием, очисткой и охлаждением дымовых газов при автоматическом контроле за состоянием выбросов.

Переработка шламов и других оксидных отходов

Задача рециклинга оксидных отходов металлообработки и особенно окалины, ржавчины, пыли и других гидратированных форм железосодержащих соединений до настоящего времени представляла собой трудноразрешимую проблему. Главный вопрос, который возникает в данном случае, это вопрос экономической целесообразности переработки отходов, решаемый путем сравнения затрат на переработку отходов и затрат на приобретение нового эквивалентного количества сырья. Причем к последним необходимо добавить затраты на вывоз в отвал и захоронение отходов.

Металлосодержащие шламы имеют большое процентное содержание металла (от 54 до 97% в твердой фазе), поэтому их обогащение (удаление неметаллических примесей), твердофазное восстановление и переплав в виде высокоплотных и высокопрочных брикетов является целесообразным и обоснованным. Порошкообразные и пылевидные отходы смешиваются с высокоактивным углеродосодержащим восстановителем, в качестве которого могут быть использованы коксовая мелочь (коквик), бой графита, лигнин, карбиды кремния и др., и подвергаются восстановительному обжигу в проходной печи в эндогазе или водороде при температурах 1000–1200 °С. На выходе из печи куски спеченного агломерата подвергаются горячему прессованию до плотности компактного металла и загружаются в плавильный агрегат без существенных потерь тепла. В процессе плавки неметаллические включения всплывают в шлак, при этом гарантированно обеспечивается высокое качество жидкого металла. Во избежание потерь тепла из-за задержки загрузки шихты в печь целесообразно применение термостатов. Рентабельность данного процесса обеспечивается низкой стоимостью эндогаза и углеродосодержащих восстановителей.

Процент металлзации и качество сырья, поступающего на переплав, зависит от продолжительности процесса восстановления. Шлифовальные шламы и металлизированная пыль от заточных станков предварительно подвергаются мокрой магнитной сепарации по технологии, изложенной в работе [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Терлецкий, С. В. О некоторых проблемах переработки стружки в современных дуговых сталеплавильных печах / С. В. Терлецкий // *Литье и металлургия*. – 2005. – № 3. – С. 76–78.
2. Дьяконов, О. М. Комплексная переработка стружки и металлосодержащих шламов / О. М. Дьяконов – Мн.: Технология, 2012. – 262 с.
3. Опыт утилизации металлической стружки / Д. М. Кукуй, Е. Л. Ровин, С. Л. Ровин [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2009 – № 1. – С. 47–50.
4. Получение чугуна из окалины в ротационных печах / Д. М. Кукуй, И. В. Емельянович, В. П. Петровский [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2009 – № 3. – С. 200–203.