



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-58-66>  
УДК 669.54.85+621.745.58

Поступила 20.02.2025  
Received 20.02.2025

## ОТХОДЫ ЧЕРНЫХ МЕТАЛЛОВ, ИХ БЕЗОПАСНАЯ И ЭКОНОМИЧНАЯ ПЕРЕРАБОТКА

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

*В статье проведен сравнительный анализ существующих подходов, мнений и предложений по экологически безопасным и экономически целесообразным способам переработки и утилизации отходов металлообработки. Показаны направления и достигнутые успехи по переработке стальной и чугунной стружки, отсевов ферросплавов, шлифовальных, обкатных и опилочных шламов, окалины, отходов дробеочистки, металлоабразивной и аспирационной пыли. Для переработки стружки приоритетными являются переплав малоокисленной стружки россыпью в индукционных печах и горячее брикетирование, для окисных отходов – восстановительный обжиг и спекание в смеси с активным восстановителем в эндогазе с последующим переплавом брикетов, спеков в печах любого типа по традиционной технологии.*

**Ключевые слова.** Стружка, шламы, окисные отходы, переплав, печь, горячее брикетирование, восстановительный обжиг, спекание, эндогаз, брикеты, спеки.

**Для цитирования.** Дьяконов, О. М. Отходы черных металлов, их безопасная и экономичная переработка / О. М. Дьяконов // *Литье и металлургия*. 2025. № 1. С. 58–66. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-58-66>.

## FERROUS METAL WASTE, THEIR SAFE AND ECONOMICAL PROCESSING

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

*The article provides a comparative analysis of existing approaches, opinions and proposals on environmentally safe and economically feasible methods of processing and recycling metalworking waste. The directions and achievements in processing steel and cast iron chips, ferroalloy screenings, grinding, rolling and filing sludge, scale, shot blasting waste, metal abrasive and aspiration dust are shown. For processing chips, the priority is remelting of low-oxidized chips in bulk in induction furnaces and hot briquetting; for oxide waste, the priority is reducing roasting and sintering in a mixture with an active reducing agent in endogas, followed by remelting of briquettes and sinters in furnaces of any type using traditional technology.*

**Keywords.** Chips, sludge, oxide waste, remelting, furnace, hot briquetting, reducing roasting, sintering, endogas, briquettes, sinters.

**For citation.** D'jakonov O.M. Ferrous metal waste, their safe and economical processing. *Foundry production and metallurgy*, 2025, no. 1, pp. 58–66. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-58-66>.

### 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 чугунная стружка, отсеvy ферросплавов, отходы дробеочистки, шлифовальные, опилочные и обкатные шламы, металлоабразивная пыль от обдирочных, наждачных и заточных станков, аспирационная пыль и др. Наименее окисленная стальная и чугунная 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, около 130–135 тыс. т в год экспортируется за рубеж. Шламы (≈ 45 тыс. т в год), содержащие абразив, бумагу, ветошь, масло, СОЖ и сухие окисные 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.

Наиболее широкое применение в практике переработки металлоотходов получил плавильный передел как наиболее универсальный метод. Переплавление металлоотходов без специальной подготовки не рационально 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 ОАО «БМЗ» от ОАО «Белвормет» 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 повысился 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 shredders. 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 shredders 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 не рационально и неэкономично. Поверхностно-активная СОЖ не удаляется полностью с поверхности металлических частиц. Более эффективным является нагрев с последующим переплавлением чистого металла без потерь тепла. В данном случае естественным образом и в едином процессе полное удаление влаги и вредных нефтепродуктов совмещается с переплавлением 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, стр. 100–103]. Далее следует отжим порошка от влаги и размалывание прессовок 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, исправляющее 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 нужно переплавлять в индукционных печах необоснованы. Например, переплав стружки в виде брикетов в дуговой печи совместно с кусковым ломом по традиционной технологии, включающей 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 (коквик, 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 поддерживаются 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  $\leq 600$  °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/м<sup>3</sup>) 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 резкой возгонкой 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 (Белвормет, БМЗ, МАЗ, МТЗ, МПЗ, ЛЛМЗ и др.) сталкиваются с большими трудностями при осуществлении холодного брикетирования и переплавке холоднопрессованных брикетов.

По данным ГО «Белвормет» [1], на имеющихся на предприятиях Республики Беларусь гидравлических прессах типа Б6238 или Б6241 достичь плотности брикетов не менее 5000 кг/м<sup>3</sup> практически невозможно. Так, поступившая на ОАО «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  $4500 \text{ кг/м}^3$ , что в принципе по указанным выше причинам недопустимо. Крупнейшие заводы Европы и США (концерны Krupp, Korpern, 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  $700\text{--}800^\circ\text{C}$  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  $160\text{--}200 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$  на  $1 \text{ т}$  расплава при общем сокращении расхода энергии на  $25\text{--}30\%$  [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 мелкофракционных углеродосодержащих, шлакообразующих и легирующих наполнителей. При плотности  $6500\text{--}7100 \text{ кг/м}^3$  стружковая матрица надежно удерживает в себе до  $20\%$  порошков шламов, коксовой мелочи, извести, отсеков ферросплавов.

Переплавка плотных, прочных и чистых брикетов в действующих печах литейного или металлургического производств технически не представляет сложности и позволяет заменить до  $50\%$  габаритного кускового лома против  $5\text{--}7\%$  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 ЭСПП 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  $70\text{--}80\text{-х}$  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 д-ра техн. наук, проф. Ю.Г. Дорофеева 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  $2000\text{--}2006$  гг., а затем и в Беларуси на ОАО «МТЗ» (г. Минск) в  $2007\text{--}2008$  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  $840^\circ\text{C}$  и подвергается допрессовке на чеканочном прессе. Получаются брикеты плотностью  $5600\text{--}6300 \text{ кг/м}^3$ . 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, чем по прейскуранту, в 2,0–2,4 раза.

В Республике Беларусь в 1988–2004 гг. на заводе «ВТОРЧЕРМЕТ» по проекту и при непосредственном участии сотрудников кафедры «Порошковая металлургия и технология конструкционных материалов» БГПА перерабатывались 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]. Брикетные 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        |
|------------------------|----------------------|--------------|------|--------------|------|-------|---------|----------------------|----------------------------|--------------|
|                        | Cг                   | Ni           | Cu   | Si           | S    | P     | Mn      | M, кг                | $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> | %            |
| Входной контроль       | 1,5                  | 0,13         | 0,22 | 0,4          | 0,03 | 0,016 | 1,2     | 6,11                 | 6171                       | 0,5          |
| ГОСТ 2787-75 (6Б1)     | 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 6Б1. 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, а также создать на предприятиях-переработчиках вторичных металлов участки 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 подвергали мокрой магнитной сепарации, в результате 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 сбрасывались 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/м<sup>3</sup>, стальных – 6800–7100 кг/м<sup>3</sup>.

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, % |
|--------------|----------|-----------|--------------|--------------|-------------------|-----------------------|----------------------------------|------------------|
| 30799        | 85,1     | 0         | 10           | 0            | 25                | 120,1                 | 105                              | 87,43            |
| 30800        | 82,7     | 0         | 10,2         | 0            | 27,4              | 120,3                 | 107                              | 88,94            |
| 30801        | 94,5     | 15,5      | 10           | 0            | 0                 | 120                   | 108                              | 90,0             |
| 30802        | 95       | 15,4      | 10           | 0            | 0                 | 120,4                 | 116                              | 96,35            |
| 30803        | 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 |                                  |
| 30799        | 88                      | 52                   | 47187                 | 449,4                        | 3162         | 30,11                        | 1663                             |
| 30800        | 75                      | 51                   | 49951                 | 466,83                       | 3339         | 31,21                        | 1652                             |
| 30801        | 70                      | 45                   | 45001                 | 416,68                       | 2771         | 25,66                        | 1645                             |
| 30802        | 67                      | 46                   | 45641                 | 393,46                       | 2633         | 22,7                         | 1640                             |
| 30803        | 75                      | 51                   | 47075                 | 427,95                       | 2628         | 23,89                        | 1650                             |
| Среднее      | 75                      | 49                   | 46971                 | 412,7                        | 2677         | 24,08                        | 1650                             |
| Сравнение    | 68                      | 51                   | 48208                 | 423,62                       | 3307         | 29,06                        | 1650                             |

Из таблицы видно, что все приведенные 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 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 удаляются 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:

1) 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;

2) 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;

3) использование перегретого пара, образующегося в результате испарения водной компоненты СОЖ, для дожигания оксида углерода и других углеводородных соединений;

4) применение высокоэффективного двухстадийного пламенно-индукционного нагрева стружки с целью повышения производительности и КПД нагревательной печи, уменьшения ее габаритов;

5) 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;

6) применение пресс-формы с подвижной матрицей, обеспечивающей снижение сил контактного трения, энергосиловых параметров, износа инструмента, повышение качества брикетов;

7) получение металлургических композитов на основе стальной и чугуновой стружки, включающих углеродосодержащие, шлакообразующие и легирующие наполнители;

8) 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 металлоотходов, пыли и особенно окалины, ржавчины и других гидратированных форм железосодержащих соединений представляет 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 использование в брикетах вместе со стружкой является целесообразным и обоснованным. Металлическая составляющая шлама по своему химическому составу соответствует марке стали прессуемой стружки. Неметаллическая, помимо СОЖ, содержит абразивные включения и оксиды железа. В состав брикетов входит также сажистый углерод – продукт пиролиза масляной компоненты СОЖ. В обкатных и опилочных шламах подшипниковых сталей примеси абразива отсутствуют.

Обогащенные и очищенные от СОЖ порошки шламов могут вводиться в состав горячепрессованных брикетов. Главное при этом – не допустить дальнейшего окисления металла. При выплавке стали абразивная составляющая служит полезной шлакообразующей добавкой. Оксиды железа участвуют в процессе окисления примесей на окислительном этапе плавки. На этапе раскисления стали свободный углерод и карбид кремния являются активными восстановителями железа.

Использование в составе композитов порошков металлосодержащих шламов, ранее вывозимых в отвал, снижает себестоимость сырья на производство брикетов, в то время как реализация этих порошков производится по ценам брикетов. Снижается расход ферросплавов и шлакообразующих материалов при общем повышении технико-экономических показателей плавки. Отпадает необходимость в вывозе шламов в отвал и уплате пошлины за их захоронение.

Существует и другой подход к переработке оксидных металлоотходов. Очищенные от масла и СОЖ порошки шламов, окалина, тонкодисперсные и сухие пылевидные отходы смешиваются с высокоактивным углеродосодержащим восстановителем, в качестве которого могут быть использованы коксовая мелочь (коксик), бой графита, лигнин и др. В отличие от доменного процесса, где используется кокс, эти материалы достаются предприятию либо бесплатно, либо меньшей стоимостью. Смесь подвергается восстановительному обжигу во многоподовой шахтной печи вертикального исполнения в эндогазе при температурах 1000–1200 °С. При данных условиях протекает активная внутрипоровая диффузия атомов углерода внутрь металла, при которой железо восстанавливается твердым углеродом кокса – прямое восстановление. Кроме того, железо интенсивно восстанавливается продуктами неполного сгорания природного газа и кокса (углеводородные соединения, водород, угарный газ) – косвенное восстановление.

Процент металлизации и качество сырья, поступающего на переплав, зависят от продолжительности процесса восстановления. Прочные куски спеченного агломерата загружаются в плавильный агрегат в горячем состоянии 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.

## 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 – Минск: Технология, 2012. – 262 с.
3. Опыт утилизации металлической стружки / Д.М. Кукуй [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2009. – № 1. – С. 47–50.
4. Получение чугуна из окалины в ротационных печах / Д.М. Кукуй [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2009. – № 3. – С. 200–203.
5. Кукуй, Д.М. Энерго- и ресурсосберегающие технологии в литейном производстве / Д.М. Кукуй, С.Л. Ровин, Л.Е. Ровин // *Литье и металлургия*. – 2011. – № 4. – С. 45–52.
6. Исследование и переработка пыли дробеочистки / С.Л. Ровин [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2022. – № 2. – С. 34–39.
7. Ровин, С.Л. Исследование и утилизация аспирационной пыли сталеплавильных дуговых печей / С.Л. Ровин, Д.И. Курач, С.В. Григорьев // *Литье и металлургия*. – 2023. – № 1. – С. 73–78.
8. Дорофеев, Ю.Г. Динамическое горячее прессование пористых материалов / Ю.Г. Дорофеев. – М.: Наука, 1968. – 120 с.
9. Литвинко, А.А. Технология горячего брикетирования отходов черных металлов в пресс-формах с подвижной матрицей / А.А. Литвинко // *Наука и техника*. – 2023. – Т. 22. – № 5. – С. 367–375.
10. Дьяконов, О.М. Технология пламенно-индукционного нагрева стружки черных металлов в установках горячего брикетирования / О.М. Дьяконов, В.Ю. Середа // *Литье и металлургия*. – 2024. – № 2. – С. 72–81.

## REFERENCES

1. Terleckij S.V. O nekotoryh problemah pererabotki struzhki v sovremennyh dugovyh staleplavil'nyh pechah [On some problems of processing chips in modern electric arc furnaces]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2005, no. 3, pp. 76–78.
2. D'jakonov O.M. *Kompleksnaja pererabotka struzhki i metallosoderzhashchih shlamov* [Complex processing of chips and metal-containing sludge]. Minsk, Tehnologija Publ., 2012, 262 p.
3. Kukuj D.M., Emel'janovich I.V., Petrovskij V.P., Rovin L.E., Rovin S.L. Opyt utilizacii metallicheskoj struzhki [Experience of utilization of metal chipping]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2009, no. 1, pp. 47–50.
4. Kukuj D.M., Rovin L.E., Rovin S.L., Matochkin V.A., Terleckij S.V., Prohorenko V.N. Poluchenie chuguna iz okaliny v rotacionnyh pechah [Obtaining cast iron from scale in rotary kilns]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2009, no. 3, pp. 200–203.
5. Kukuj D.M., Rovin L.E., Rovin S.L. Jenergo- i resursosberegajushhie tehnologii v litejnom proizvodstve [Energy and resource-saving technologies in foundry production]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2011, no. 4, pp. 45–52.
6. Rovin S.L., Shejnert V.A., Grigor'ev S.V., Teleshova E.V. Issledovanie i pererabotka pyli drobeochistki [Research and processing of shot blasting dust]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2022, no.2, pp. 34–39.
7. Rovin S.L., Kurach D.I., Grigor'ev S.V. Issledovanie i utilizacija aspiracionnoj pyli staleplavil'nyh dugovyh pechej [Research and utilization of aspiration dust from steel-making arc furnaces]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 1, pp. 73–78.
8. Dorofeev Ju.G. *Dinamicheskoe gorjachee pressovanie poristykh materialov* [Dynamic hot pressing of porous materials]. Moscow, Nauka Publ., 1968, 120 p.
9. Litvinko A.A. Tehnologija gorjachego briketirovaniya othodov chernyh metallov v press-formah s podvizhnoj matricej [Technology of hot briquetting of ferrous metal waste in press forms with a moving matrix]. *Nauka i tehnika = Science and Technology*, 2023, vol. 22, no. 5, pp. 367–375.
10. D'jakonov O.M., Sereda V.Ju. Tehnologija plamenno-indukcionnogo nagreva struzhki chernyh metallov v ustanovkah gorjachego briketirovaniya [Technology of flame-induction heating of ferrous metal chips in hot briquetting units]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2024, no.2, pp. 72–81.