



УДК 669.54.85 + 621.745.58

Поступила 20.11.2017

ПЕРЕРАБОТКА СТРУЖКИ ЧЕРНЫХ МЕТАЛЛОВ RECYCLING OF FERROUS METAL SHAVINGS

С. Л. РОВИН, УП «Технолит», г. Минск, Беларусь, ул. Я. Коласа, 24. E-mail: technolit@tut.by
Л. Е. РОВИН, Т. М. ЗАЯЦ, О. М. ВАЛИЦКАЯ, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, г. Гомель, Беларусь, пр. Октября, 48. E-mail: kaf_metallurgy@gstu.by

S. L. ROVIN, Technolit Co, Minsk, Belarus, 24, Kolasa str. E-mail: technolit@tut.by
L. E. ROVIN, T. M. ZAYAC, O. M. VALICKAYA, Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoj, Gomel, Belarus, 48, Ochyabrya ave. E-mail: kaf_metallurgy@gstu.by

Наиболее перспективным и универсальным способом рециклинга стружки черных металлов является технология прямой переплавки стружки в ротационных наклоняющихся печах (РНП) непосредственно на предприятиях-источниках образования этих отходов. Однако сложившаяся практика переработки чугунной и стальной стружки базируется на ее брикетировании и последующей переплавке в традиционных печах.

Для сокращения затрат при брикетировании стружки и организации участков горячего брикетирования в местах ее образования предлагается использовать высокоэффективное оборудование – ротационные сушила и РНП. Обосновывается возможность и эффективность использования разработанных печей для низко- и высокотемпературного нагрева стружки в линиях брикетирования. Термический КПД таких печей при нагреве дисперсных материалов значительно выше барабанных или проходных печей. При брикетировании горячей стружки снижается усилие прессования, что также сокращает удельные энергозатраты. Применение РНП позволяет сократить номенклатуру технологических операций и оборудования участков изготовления брикетов.

The most advanced and universal way of chips recycling of ferrous metals is the technology of direct chips remelting in rotational tilting furnaces (RBF) directly at the enterprises-sources of waste generation. However common practice of iron and steel chips recycling is based on its briquetting and subsequent remelting in traditional furnaces.

For cost reduction when chip briquetting and organization of hot briquetting sections in places of its formation highly efficient equipment – rotational dryer and RBF is proposed. The possibility and effectiveness of developed furnaces for low- and high-temperature chip heating in briquetting lines is proved. Thermal efficiency of such furnaces when dispersed materials heating is much higher than drum or feed-through furnaces. Hot briquetting of shavings reduces the pressing force, which reduces the specific energy consumption. The use of rotary kilns can reduce technological operations and equipment of production sites for the manufacture of briquettes.

Ключевые слова. Стружка черных металлов, брикетирование, ротационная печь, рециклинг.

Keywords. Ferrous metal shavings, briquetting, rotary furnace, recycling.

Возрастающее накопление металлоотходов, в том числе металлической стружки, удорожание энергоресурсов, ужесточение природоохранных требований приводят к необходимости поиска экономичных и эффективных способов ее переработки (рециклинга) [1–3].

По ориентировочным оценкам, вновь образующиеся дисперсные металлоотходы только в Беларуси составляют 250–300 тыс. т в год. В отвалах нашей страны на сегодняшний день накоплено по некоторым оценкам около 8 млн. т различных, в большей мере сильно окисленных металлоотходов (рис. 1).

Доля стружки черных металлов, которая используется и перерабатывается в Беларуси, по оценкам специалистов, не превышает 60%.

Специфика этой проблемы обусловлена наличием большого количества предприятий-источников подобных отходов, что увеличивает затраты и трудности со сбором, транспортировкой, хранением, унификацией по видам и химическому составу и соответственно осложняет переработку и повторное использование стружки. Продавать стружку за рубеж, а затем покупать первичные (доменные) шихтовые материалы, что и происходит в настоящее время экономически невыгодно.



Рис. 1. Примерное распределение стружки по видам сплавов: первая цифра – количество образующейся за год стружки, тыс. т; вторая цифра – %

Характеристики стружки как продукта обработки материалов резанием изучены в сравнении с другими видами металлоотходов значительно полнее, но, тем не менее, с точки зрения решения задачи ее рециклинга в исходном неокискованном виде имеющихся сведений недостаточно, особенно в части поведения стружки при нагреве в ротационных печах, при взаимодействии с дисперсными восстановителями и при многостадийном прессовании.

Так, химический состав стружки обычно указывается как идентичный обрабатываемому металлу. Однако при обработке стружка, особенно поверхностные слои, подвергается окислению и обезуглероживанию, а при сборе металлоотходов происходит неизбежное смешивание различных марок сплавов (рис. 2).

Активное окисление стружки и загрязнение продолжаются и в процессе многочисленных перевалок и хранения. В исходном состоянии стружка имеет высокое содержание влаги, СОЖ и масел (от 3–5 до 8–10%). Таким образом, стружка, поступающая на переработку, имеет неопределенный состав и значительное количество неметаллических примесей. Технология рециклинга должна быть адаптирована к такому положению.

Форма частиц произвольная, тем не менее, для дробленой и пластинчатой стружки коэффициент формы (f_{ϕ}) можно считать равным 1,3–2,75 для мелкой и от 2,45 до 7,5 для крупной фракций. Собственно дисперсной в исходном состоянии является лишь хрупкая чугунная стружка, обычно она имеет форму пластинок (чешуек) толщиной 0,1–1,0 мм и длиной от 1–3 до ~ 10 мм и более. При перегрузках чешуйки ломаются и кажущаяся дисперсность возрастает с $l_{50} \approx 5-8$ до $l_{50} \approx 2-3$ мм (здесь l_{50} – наибольший медианный размер). Стальная стружка, как правило, сливная спиралевидная или суставчатая, перед всеми видами переработки требует предварительного дробления, технология и техника которого достаточно хорошо отработаны. В этом случае о дисперсности можно судить по материалам, полученным после дробления. Как правило, это чешуйки или «полоски» длиной до 10–15 мм с включениями меньших фракций.

Дисперсность стружки наиболее наглядно можно показать на логарифмически-вероятностной шкале координат. На рис. 3 приведены типичные образцы чугунной и стальной стружки, каждый из которых



Рис. 2. Стружка в местах сбора

является смесью продуктов обработки на разных станках и при различных режимах, что характерно для существующей системы сбора стружки, особенно в масштабах страны. Нормальное распределение фракций, характерное для монопроцесса обработки, на данной диаграмме представлялось бы прямой линией.

Угол естественного откоса α_0 стружки, не прошедшей обработку, может составлять от 34 до 52°. Это зависит от многих факторов, в том числе от загрязненности и фракционного состава стружки.

Образцы смешанной стальной стружки, образующейся на одном и том же машиностроительном предприятии, имели насыпную плотность 525; 1155; 834; 579; 1239 кг/м³ (указаны средние значения по 10 замерам в каждой партии). При этом стружка не проходила предварительной обработки и не подвергалась длительному вылеживанию. При длительном хранении стружки на площадках и в отвалах насыпная плотность увеличивается до 1700–1900 кг/м³, возрастает окисленность, уменьшается содержание масел, увеличивается количество дефектов поверхности и структуры. Стружка, как правило, содержит значительное количество оксидов: чугунная – до 0,5%, стальная – 2–10%. При длительном хранении стружки особенно на открытых площадках в отвалах окисленность стружки сильно возрастает, вплоть до полного окисления. При этом оксиды стальной стружки изначально располагаются в основном в поверхностном слое толщиной 0,05–0,1 мм, в чугунной – по всей толщине. Это объясняется наличием большого количества дефектов в чугунной стружке. Поверхность чугунной стружки ($\delta = 0–0,2$ мм) содержит на 10–15% меньше углерода (графита), что возможно связано с механической обработкой и выкрашиванием графитовых включений.

Требования по содержанию примесей в соответствии с СТБ 2026–2010 трудно выполнимы для организаций-поставщиков, сдающих металлоотходы без их предварительной подготовки.

Количество масла в стружке при сходе ее со станков составляет примерно 30% от массы стружки. При транспортировании и хранении стружки количество масла уменьшается до 8–10%. Учитывая большое количество смазочно-охлаждающей жидкости в исходной стружке, необходимы определенные меры при ее хранении. Для предотвращения загрязнения грунтовых вод стружка должна храниться в герметичных контейнерах, установленных на гидроизолированных площадках. При транспортировании такой стружки загрязняются дороги, вагоны, складские платформы и безвозвратно теряется значительное количество масла. Автоперевозки в контейнерах – самый дорогостоящий способ транспортировки.

Объемная масса стружки в 3–4 раза меньше плотности кускового лома. Поэтому для сбора и транспортирования стружки требуется специальная тара больших размеров, занимающая значительное место в цехе. Все это приводит к повышению затрат на хранение и транспортировку. В состав загрязняющих стружку СОЖ входят растворы электролитов, мыла, минеральные, животные и растительные масла с добавками фосфора, серы и хлора (сульфофрезолы), керосин, растворы ПАВ, масла и эмульсии с добавками твердых смазывающих веществ (графита, парафина, воска и др.). Это ухудшает брикетирование и резко снижает металлургическую ценность полученных брикетов. Наличие масла в стружке увеличивает содержание серы в выплавляемых стали и чугуне. При сгорании органических примесей в печи образуются тугоплавкие зольные остатки, что увеличивает содержание неметаллических включений. При разложении влаги и углеводов металл насыщается водородом, увеличивается количество флокенов, волосовин и микротрещин при последующей обработке металла. Выбросы испаряющихся масел и продуктов деструкции органики, которые образуются при нагреве стружки перед брикетированием, загрязняют окружающую среду [1, 2].

Прямое использование дешевой низкокачественной шихты – стружки россыпью в существующих плавильных печах литейных цехов (даже при небольших добавках) приводит к снижению всех технико-экономических показателей плавки и превосходит выгоду от снижения стоимости шихты. Аналогичные результаты получают и электрометаллургические предприятия. Проведенные исследования выявили

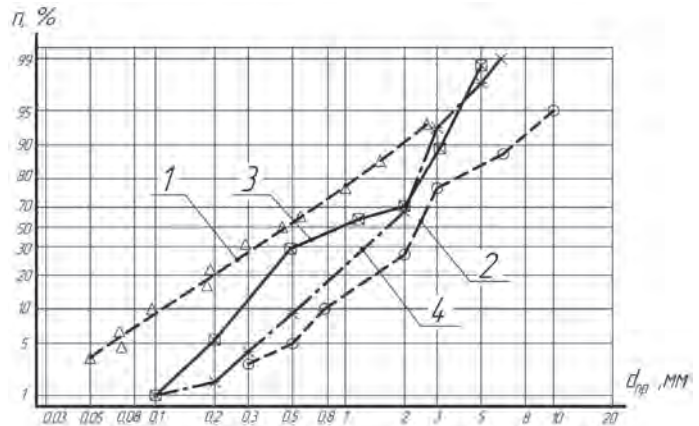


Рис. 3. Дисперсный состав стружки: 1 – чугунная стружка после нагрева в ротационной наклоняющейся печи (РНП) до 700–800 °С; 2 – чугунная крупная стружка (строгание, обдирка, грубая механическая обработка); 3 – чугунная и стальная мелкая стружка (чистовая обработка); 4 – чугунная и стальная смешанная стружка

значительный до 30–50% угар стружки и ухудшение технических показателей работы сталеплавильных дуговых печей [4].

Исследования, выполненные в последние годы специалистами УП «Технолит» и УО ГГТУ им. П. О. Сухого, позволяют сделать вывод о том, что наиболее перспективным и универсальным способом рециклинга дисперсных металлоотходов, к которым относится и стружка черных металлов, является технология прямой, т. е. без предварительной подготовки, переплавки стружки в ротационных наклоняющихся печах (РНП) непосредственно на предприятиях-источниках образования этих отходов.

Этот тип плавильных агрегатов позволяет перерабатывать любое низкокачественное дисперсное сырье и при любой степени загрязнения (чем больше масел, тем лучше – ниже удельный расход топлива). Нагрев и массообмен осуществляются в динамическом продуваемом слое. Ротационные печи компактны и удобны в эксплуатации. Благодаря возможности качания (наклона вокруг горизонтальной оси) в ротационные печи легко загрузить шихту, выгрузить нагретую до 700–800 °С стружку или расплавить и слить жидкий расплав, если не используется дуплекс-процесс «РНП-ИЧТ». Полезная емкость подобных печей лимитируется только технологическими потребностями и может варьироваться от 0,5 до 20 т [5].

Однако до настоящего времени сложившаяся практика переработки чугуновой и стальной стружки базируется на ее брикетировании и последующей переплавке в традиционных агрегатах – вагранках, электродуговых и индукционных печах.

Наиболее широко применяется холодное брикетирование, включающее ряд стадий: дробление (для витой стружки), очистку от влаги, масел и СОЖ (промывка, центрифугирование и сушка), дозирование, введение добавок (связующих и восстановителей), прессование [2, 3].

Для обезжиривания (удаления влаги, СОЖ, масел) металлической стружки перед холодным брикетированием обычно применяют следующие способы: центрифугирование, промывку стружки горячей водой или щелочным раствором в специальных моечных машинах, обжиг стружки в различных нагревательных печах, где органические примеси испаряются и выгорают.

Влажную стружку нельзя использовать на литейных предприятиях, во избежание взрывов (хлопков) при попадании влажных материалов в жидкий металл, особенно опасна такая ситуация в холодное время года, когда влага превращается в лед.

Сушка металлической стружки на предприятиях, как правило, проводится при температурах 250–350 °С. Сушка – энергоемкий и длительный процесс, особенно применительно к дисперсным материалам из-за низкой теплопроводности слоя. Нагрев слоя в печах камерного, проходного типа происходит при граничных условиях первого рода. При высоких градиентах температур по толщине слоя, коэффициенте теплопроводности до 0,2 Вт/(м·К) и объемном коэффициенте передачи тепла 35–40 Вт/(м³·К) нагрев происходит медленно. Коэффициент полезного действия таких печей находится в пределах 5–7%. На нагрев стружки до 250 °С затраты составляют более 1000 МДж/т или более 35 м³/т природного газа. Определенные трудности представляют такие печи и при загрузке-выгрузке.

Более высокий КПД при нагреве дисперсных материалов обеспечивают печи, работающие с динамическим слоем: барабанные, ротационные, печи с псевдоожиженным слоем и др. Важнейшее преимущество этих печей – интенсификация теплообмена за счет резкого повышения эффективности передачи тепла конвекцией в динамическом слое (1,2–2,5 кВт/(м³·К)). Термический КПД этих печей составляет 20–25%. Однако такая эффективность достигается при достаточной длительности пребывания газов-теплоносителей в печи, т. е. при большой длине печи (15–20 м), при соотношениях длины и диаметра 10–15 крат и более. Соответственно такие печи обычно рассчитаны на переработку больших объемов материала и непрерывную работу и не позволяют осуществлять децентрализованную рентабельную переработку стружки в небольших количествах.

Учитывая это, было принято решение исследовать работу ротационных сушилок и нагревательных печей с целью изыскания возможности повысить их эффективность и снизить удельные затраты топлива.

В результате исследований были разработаны рекомендации для новых конструкций печей, позволяющих практически вдвое повысить КПД при малотоннажном нагреве дисперсных материалов [6–9].

Применение новых печей (сушилок) позволяет снизить эксплуатационные расходы, сократить занимаемые площади и главное повысить производственную гибкость рециклинга металлоотходов. Переработку в таких установках можно производить без накопления значительных объемов стружки по мере ее образования. Пример подобного решения представлен на рис. 4.

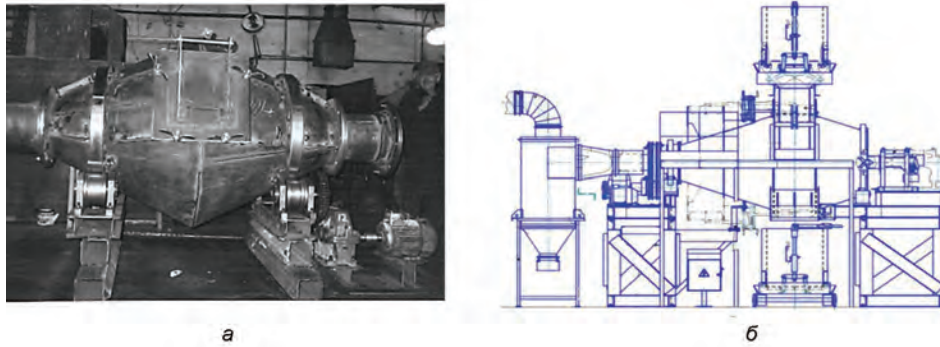


Рис. 4. Двухконусное ротационное сушило периодического действия: *а* – сушило емкостью 0,5 т; *б* – схема установки с устройствами загрузки-выгрузки



Рис. 5. Брикеты холодного прессования: *а* – брикеты из смешанной стружки; *б* – разрушение брикетов при перегрузках

Холодное брикетирование, как правило, осуществляют в закрытых матрицах без каких-либо связующих. Для получения плотного брикета из стальной стружки необходимо создать в пресс-камере (матрице) пресса давление более 2500 кгс/см^2 , а для окускования чугунной стружки – более $3500\text{--}4500 \text{ кгс/см}^2$. Тем не менее, достигаемая плотность не превышает $5,0\text{--}5,5 \text{ кг/см}^3$, что почти в 1,5 раза ниже плотности металла, кроме того, холодные брикеты имеют низкую механическую прочность, из-за чего легко разрушаются в процессе транспортировки и загрузки. Из-за остатков в брикете эмульсии и влаги (до 1,5–2%) и большой площади активной поверхности, в 5–6 раз превышающей поверхность монолита, брикеты подвергаются интенсивной коррозии, в 4–8 раз превышающей скорость коррозии монолитного металла. Недостаточная плотность брикетов является причиной того, что окислительные газы проникают внутрь брикета и, тем самым, увеличивают степень окисленности металла (рис. 5).

Брикетирование стружки в холодном состоянии не решает проблему ее использования. Экономические показатели работы плавильных агрегатов при применении брикета из стружки мало чем отличаются от плавления стружки россыпью (рис. 6). Брикетирование в основном преследует цель улучшить условия транспортировки, погрузочно-разгрузочных работ и хранения стружки, и частично снижает содержание масла и эмульсии в шихте.

Избавиться от остатков масел, воды и добиться повышения плотности брикета более 6000 кг/м^3 возможно лишь при горячем прессовании.

В настоящее время горячее брикетирование, как правило, осуществляется в две стадии: предварительное прессование дробленой очищенной (в том числе с проведением сушки при $250\text{--}350 \text{ }^\circ\text{C}$) или неочищенной стружки, затем нагрев брикетов до температуры $650\text{--}750 \text{ }^\circ\text{C}$ и повторное прессование.

Горячее брикетирование позволяет улучшить качество брикетов, но делает их значительно дороже, что сводит к минимуму экономический эффект.

Цены на холодные брикеты из стальной и чугунной стружки в 2,0–2,5 раза выше, чем стружки россыпью, а горячие брикеты еще в 2–3 раза дороже холодных.



Рис. 6. Эффективность использования холоднопрессованных брикетов при плавке

Основную долю в себестоимости горячих и холодных брикетов составляют энергозатраты, идущие на нагрев стружки. Линии брикетирования занимают большие производственные площади, имеют низкий КПД. При этом предъявляются высокие требования к подготовке стружки перед прессованием, в том числе ее сушке.

В ряде работ указывается в качестве оптимального интервала нагрев стружки до 650–700 °С [2, 3]. Причем обосновывается эта величина началом интенсивного окисления металла.

Наши исследования нагрева стружки в динамических слоях показали, что скорость окисления наибольшая в интервале 400–600 °С и замедляется при дальнейшем повышении температуры, что можно объяснить тормозящим влиянием образующегося слоя оксидов. При интенсивном нагреве в РНП до 800–850 °С окисление металла составляет не более 0,3–0,5%, что меньше чем в традиционных печах при нагреве до 450 °С, и не может служить ограничивающим фактором.

Более рациональным является уровень нагрева вплоть до ~850 °С, который ограничен температурами начала «сваривания» частиц. Нагрев при этом должен осуществляться до температур пластической деформации. При этом плотность полученного брикета и его качество как шихтового материала будут приближаться к плотному металлу.

Подобные идеи – осуществление горячего брикетирования в одну стадию выдвигались неоднократно. Однако процесс во всех случаях трудно поддавался реализации, как представляется, в основном из-за отсутствия эффективного оборудования для безокислительного высокотемпературного нагрева полидисперсного материала.

Агрегатом, позволяющим обеспечить высокоэффективный нагрев дисперсных материалов, в том числе стружки, является новый тип печей – ротационные печи с наклоняющейся осью вращения, в которых обеспечивается петлеобразное движение газов (РНП) (рис. 7). Высокая эффективность РНП, производственная гибкость и компактность, возможность осуществлять нагрев стружки без потерь на угар до температур 800–850 °С позволяют перейти к одностадийному прессованию при брикетировании. В этом случае весь процесс сводится к сбору, при необходимости – дроблению, высокотемпературному нагреву в РНП и прессованию горячей стружки.

Преимущества РНП здесь очевидны. Они дают возможность быстро и качественно нагревать любую неподготовленную (за исключением витой стружки), загрязненную, замасленную (без ограничений) стружку при минимальных затратах топлива до максимальных температур. Немаловажным преимуществом является возможность без всяких перестроек обрабатывать в печи различную по составу стружку, например, стальную, чугунную, легированную и т. п.

Термический КПД при нагреве дисперсных материалов (стружки, окалины, шлама и т. д.) достигает 50–55%, что в 2–3 раза превышает КПД традиционных печей. РНП обеспечивает почти 2-кратное увеличение производительности и сокращение времени нагрева и в 2–3 раза меньшие затраты времени на операции завалки-разгрузки. Нагрев стружки в печи емкостью 2–4 т осуществляется в течение 12–20 мин при расходе 8–12 м³ природного газа на 1 т. Причем меньшие цифры относятся к наиболее загрязненной маслами стружке.

При нагреве в РНП в динамическом слое до температур 700–800 °С стружка значительно меняет свои свойства. Полностью теряются влага, масла и СОЖ, соответственно изменяются адгезионные и когезионные характеристики и поведение материала в слое – угол естественного откоса снижается до 28–30°. В результате нагрева в РНП в течение 20–25 мин при указанной температуре дисперсность чугунной стружки увеличивается в 2–3 раза (см. рис. 3, 8). Стальная стружка имеет существенно большую прочность и меньшую хрупкость: после часовой обработки в ротационной печи при тех же режимах степень измельчения стальной дробленой стружки не превысила 10–15%. Из-за снижения адгезионных свойств

горячая стружка при выгрузке течет подобно жидкости. Значительно, в 1,5–2,3 раза (в зависимости от материала) повышается насыпная плотность стружки, что имеет большое значение при последующем прессовании.

Затраты энергии при брикетировании стружки состоят из расходов на нагрев и механическую работу собственно прессования [11].

С учетом снижения сил внешнего трения (при термообработке в РНП адгезия стружки снижается в 2–3 раза) можно принять, что величина работы прес-

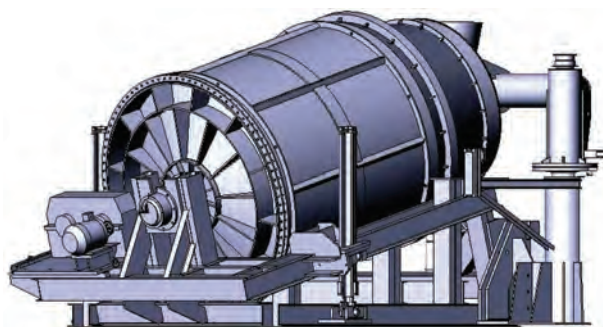


Рис. 7. Ротационная наклоняющаяся печь (РНП)



Рис. 8. Стружка до и после нагрева

сования будет примерно равна работе идеального процесса при достижении максимальной относительной плотности $\nu = 1$:

$$A_{p.k} = \frac{p_k S_n h_k \beta_0}{(\beta_0^n - 1)} \left[\frac{1}{h-1} (\beta_0^{n-1}) - \frac{\beta_0 - 1}{\beta_0} \right],$$

где p_k – нормальное давление контакта; S_n , h_k – соответственно площадь и высота прессовки (брикета); β_0 – относительный объем брикета.

Данное упрощение вполне допустимо, так как снижение твердости и прочности материала в 2,0–2,5 раза при максимальных температурах нагрева позволяют получить относительный объем и плотность прессовки, соответственно β_0 и ν , более 0,9.

Величина n зависит от механических свойств материала, насыпной плотности, адгезионных свойств и особенностей прессования, в том числе соотношения диаметра и высоты прессовки (брикета). Для условий брикетирования $n = 2,7-3,2$.

Сравнивая затраты энергии на холодное и горячее прессование, необходимо учесть, что в первом случае при идентичных давлениях (300–350 МПа) пластическая деформация частиц практически не развивается, что и объясняет недостаточную прочность и осыпаемость брикета.

В результате прессования стружки в горячем состоянии (750–800 °С) при сохранении величины давления в пределах 300–350 МПа относительная плотность брикета достигает величины $\nu = 0,91-0,93$ и более, при этом абсолютная плотность возрастает до 7250 кг/м³ (для стальной стружки). Соответственно уменьшается пористость брикета, возрастают теплопроводность и прочность (62,3–78,2 МПа), что немало важно при переплавке и транспортировке. Несколько меньше плотность брикетов из чугуновой стружки (до 6500 кг/м³), однако прочность, устойчивость против ударов и другие параметры также повышаются.

Работа прессования горячей стружки уменьшается по сравнению с холодным процессом примерно в 2,0 раза и более и составляет 32 000–57 000 кДж на 1 т брикетов размером 120–150 мм в диаметре и высотой 50–60 мм. С учетом КПД это эквивалентно 22–38 кВт·ч/т против 45–80 кВт·ч/т при холодном прессовании. На нагрев 1 т стружки расходуется в среднем ~ 10 м³ газа (в эквиваленте 100 кВт·ч) или при работе на неочищенной стружке – 8 м³/т против 19–25 м³/т при использовании традиционного оборудования.

Таким образом, ликвидация технологических операций (центрифугирование, сушка (нагрев до 250°), первая стадия прессования до $\nu = 0,3-0,6$) при использовании печей РНП (нагрев стружки до $t = 750-850$ °С) и переход к одностадийному прессованию позволяют получить более качественный плотный брикет не только не увеличивая энергозатраты, но даже снизив их в среднем на 120–180 кВт·ч на 1 т стружки черных металлов.

При сохранении холодного прессования, но с использованием ротационных сушил и ликвидацией центрифугирования (в качестве первого малозатратного этапа модернизации) сокращение энергозатрат составит около 50–60 кВт·ч на 1 т брикета.

Немаловажными преимуществами нового оборудования являются производственная гибкость и малая потребность в площадях. На базе нового оборудования возможен переход к рентабельному децентрализованному рециклингу – переработке металлоотходов на предприятиях-источниках и отказ от дорогостоящей логистической системы сбора в масштабах страны.

Литература

1. Дьяконов О. М. Комплексная переработка стружки и металлосодержащих шламов / О. М. Дьяконов. Минск: Технология, 2012. 262 с.

2. **Гарост А. И.** Использование замасленной чугунной стружки для замены дорогостоящего дефицитного лома / А. И. Гарост // *Литье и металлургия*. 2012. № 2. С. 17–26.
3. **Стеблов А. Б., Герман М. Л.** Переработка стружки черных металлов / А. Б. Стеблов, М. Л. Герман // *Рынок вторичных металлов*. 2007. № 1/39. С. 46–49.
4. **Терлецкий С. В.** О некоторых проблемах переработки стружки в современных дуговых сталеплавильных печах / С. В. Терлецкий // *Литье и металлургия*. 2005. № 3. С. 76–78.
5. **Ровин С. Л.** Рециклинг металлоотходов в ротационных печах / С. Л. Ровин. Минск: БНТУ, 2015. 382 с.
6. Ротационная установка для термообработки и плавки дисперсных и кусковых материалов: пат.1424 Респ. Беларусь, МПК F27B 7/00 / Л. Е. Ровин, О. М. Валицкая, С. Л. Ровин.
7. Ротационная качающаяся установка для термообработки и плавки дисперсных и кусковых материалов: пат.1732 Респ. Беларусь, МПК F27B 7/00 / Л. Е. Ровин, О. М. Валицкая, С. Л. Ровин.
8. Ротационная установка для термообработки и сушки дисперсных и кусковых материалов: пат.2428 Респ. Беларусь, МПК F27B 7/00 / Л. Е. Ровин, О. М. Валицкая, С. Л. Ровин.
9. Ротационная установка для плавки дисперсных и кусковых материалов: пат.2770 Респ. Беларусь, МПК F27B 7/00 / Л. Е. Ровин, О. М. Валицкая, С. Л. Ровин.
10. **Ровин С. Л., Матюшенко В. М., Валицкая О. М.** Чугунная стружка как шихтовой материал / С. Л. Ровин и др. // *Литье и металлургия*. 2008. № 3. С. 158–161.
11. **Жданович Г. М.** Теория прессования металлических порошков / Г. М. Жданович. М: Металлургия, 1969. 264 с.

References

1. **Dyakonov O. M.** *Kompleksnaya pererabotka struzhki i metallosoderzhashchih shlamov* [Complex processing of metal shavings and sludge]. Minsk, Tekhnologiya Publ., 2012, 262 p.
2. **Garost A. I.** Ispol'zovanie zamaslennoy chugunnoy struzhki dlya zameny doryogostoyashchego deficitnogo loma [The use of oily cast iron chips to replace the expensive scarce scrap]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2012, no. 2, pp. 17–26.
3. **Steblov A. B., German M. L.** Pererabotka struzhki chernyh metallov [Processing of ferrous metal shavings]. *Rynok vtorichnykh metallov = Secondary market*, 2007, no. 1/39, pp. 46–49.
4. **Terleckiy S. V.** O nekotorykh problemah pererabotki struzhki v sovremennykh dugovykh staleplavil'nykh pechah [Some problems of processing chips in modern arc steel-melting furnaces]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2005, no. 3, pp. 76–78.
5. **Rovin S. L.** *Recikling metalloothodov v rotacionnykh pechah* [Recycling of metal wastes in rotary furnaces]. Minsk, BNTU Publ., 2015, 382 p.
6. **Rovin L. E., Valickaya O. M., Rovin S. L.** *Rotacionnaya ustanovka dlya termoobrabotki i plavki dispersnykh i kuskovykh materialov* [Rotary device for heat treatment and melting of the dispersed and bulk materials]. Patent RB, no. 1424, MPK F27B 7/00.
7. **Rovin L. E., Valickaya O. M., Rovin S. L.** *Rotacionnaya kachayushchayasya ustanovka dlya termoobrabotki i plavki dispersnykh i kuskovykh materialov* [Rotary tilting device for heat treatment and melting of the dispersed and bulk materials]. Patent RB, no. 1732, MPK F27B 7/00 /.
8. **Rovin L. E., Valickaya O. M., Rovin S. L.** *Rotacionnaya ustanovka dlya termoobrabotki i sushki dispersnykh i kuskovykh materialov* [The rotary device for heat treatment and drying of dispersed and bulk materials]. Patent RB, no. 2428, MPK F27B 7/00.
9. **Rovin L. E., Valickaya O. M., Rovin S. L.** *Rotacionnaya ustanovka dlya plavki dispersnykh i kuskovykh materialov* [Rotary device for melting dispersed and bulk materials]. Patent RB, no. 2770, MPK F27B 7/00.
10. **Rovin S. L., Matyushenko V. M., Valickaya O. M.** Chugunnaya struzhka kak shihtovoy material [The use of iron shavings as charge]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2008, no. 3, pp. 158–161.
11. **Zhdanovich G. M.** *Teoriya pressovaniya metallicheskih poroshkov* [Theory of pressing of metal powders]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1969, 264 p.