

# РЕСПУБЛИКАНСКИЙ НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЦЕНТР РУП «МТЗ»

*Д. М. КУКУЙ, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Машины и технология литейного производства БНТУ,  
И. В. ЕМЕЛЬЯНОВИЧ, техн. директор РУП «МТЗ» – зам. ген. директора ПО «МТЗ» по развитию,  
В. П. ПЕТРОВСКИЙ, пом. гл. металлурга РУП «МТЗ»,  
Л. Е. РОВИН, канд. техн. наук, ГТТУ,  
С. Л. РОВИН, директор УП «ТЕХНОЛИТ», канд. техн. наук*

## ОПЫТ УТИЛИЗАЦИИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУЖКИ

На предприятиях Республики Беларусь ежегодно образуется примерно 250–300 тыс. т стружки и окалины черных металлов. Из этого количества 150–160 тыс. т стальной стружки, в том числе около 10 тыс. т – легированной и около 40 тыс. т – чугуновой.

Наиболее отработанные способы утилизации металлоотходов – переплавка в доменных после агломерации или использования в производстве металлизированных окатышей на горно-обогатительных комбинатах. Однако эти способы имеют определенные недостатки, связанные со сбором, транспортировкой, нестабильностью химического состава, что характерно для металлоотходов, собранных со многих заводов, и предполагают крупномасштабное производство. Поэтому во всем мире возрастает актуальность и соответственно заинтересованность в прямой переработке (рециклинге) железосодержащих отходов, прежде всего стружки, минуя доменный переплав.

Металлургами разработаны процессы Redsmelt, Hismelt, Primus, Midrex, Romelt и др., которые находятся пока в стадии опытно-промышленной проверки. Большинство этих процессов практически предусматривает весь цикл работы доменной печи, но его разбивают на отдельные процессы, выполняемые последовательно в специальных агрегатах: сушка сырья, брикетирование, нагрев и удаление загрязнений, предварительное восстановление в твердой фазе, плавление и рафинирование. Соответственно сохраняют и присущие доменному процессу недостатки, в том числе длительность и высокие энергозатраты, крупные масштабы и капиталовложения. Переработка по таким схемам относительно небольших объемов материала (порядка десятков тысяч тонн в год), как это имеет место в условиях Беларуси, нерентабельна.

Актуальность и привлекательность малотоннажного рециклинга, рассчитанного на переработку отходов непосредственно или вблизи предприятий, где они образуются, с каждым годом возрастают, особенно в странах (к ним относится и Беларусь), которые не имеют доменного передела или горно-обогатительных комбинатов и вынуждены импортировать дорогостоящее сырье.

Проблема утилизации (рециклинга) железосодержащих металлоотходов непосредственно в Беларуси может быть подразделена на несколько достаточно различных составляющих (задач).

1. Переплавка (утилизация): легированной стальной стружки; углеродистой стальной стружки; чугуновой стружки.

2. Восстановление и переплавка: окисленной (ржавой) стружки; окалины, ржавчины, шлама, аспирационной пыли.

По конечному продукту (цели переплавки) эти процессы также могут подразделяться на получение переделного шихтового материала взамен переделного или литейного чугуна и получение марочного сплава – чугуна или стали.

Последнее направление является, как показал отечественный и зарубежный опыт, наиболее затратным. Снижение себестоимости за счет уменьшения стоимости шихтового материала (стружка вместо чушкового доменного чугуна) нивелируется за счет увеличения энергозатрат на плавку, расходов модификаторов и флюсов, снижения производительности печей и качества жидкого металла.

Практически этот путь возможен только для рециклинга легированной стружки в электропечах: средне- и высокочастотных индукционных, дуговых, установках электрошлакового переплава (ЭШП). Стружка должна быть собрана непосредственно в местах образования и храниться в усло-

виях, исключаящих ее окисление. Перед загрузкой в электропечь целесообразно нагреть стружку до 800–900 °С в условиях безокислительного нагрева. Это требует соответствующих затрат: 80–85 м<sup>3</sup> природного газа и недорогого оборудования (стенды с использованием бадей-термосов, барабанных или ротационных печей).

Обычный (окислительный) нагрев можно использовать лишь до температуры ≤ 600 °С, так как при более высоких температурах начинается интенсивное окисление железа (угар увеличивается от 1–2 до 10–12% при нагреве от 600 до 800 °С).

Таким образом, рециклинг легированной стружки включает в себя следующие стадии: сбор и хранение в безокислительных условиях, формирование и подготовку партий (объемов) шихтовых материалов на основе идентичного химического состава, очистку, дробление, холодное брикетирование (без наполнителей), нагрев, плавку в средне- или высокочастотной печи, дуговой печи, установках ЭШП (рис. 1). При использовании индукционных или дуговых печей постоянного тока брикетирование не обязательно. При использовании ЭШП готовить шихту целесообразно в виде специальных расходоуемых электродов.

Во всех случаях стружку следует предварительно очищать от примесей, масел и СОЖ. Альтернативой может служить высокотемпературный нагрев, при котором загрязнители выжигаются. Предварительный нагрев стружки и брикетов улучшает практически все параметры плавки и рециклинга в целом.

Высокая стоимость легированной стали делает подобную схему рециклинга рентабельной даже при сравнительно высоких ценах на электроэнергию.

Стальная стружка при условии ее малой загрязненности (в соответствии с ГОСТ) легко окисляется в процессе образования и практически вся является окисленной. Кроме того, в процессе хранения, особенно в условиях повышенной влажности, ее окисленность возрастает, а часть гидратируется, превращаясь в ржавчину. Такая стружка составляет основную массу железосодержащих отходов.

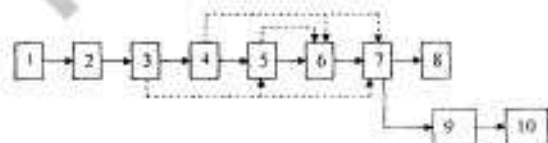


Рис. 1. Структурная схема рециклинга легированной стружки: 1 – сбор; 2 – хранение, химанализ, подготовка к плавке; 3 – дробление; 4 – очистка: промывка и сушка или нагрев и выжигание загрязнителей; 5 – брикетирование (холодное); 6 – нагрев (безокислительный); 7 – плавка; 8 – разливка в слитки; 9 – доводка по ТУ на сплав; 10 – разливка в слитки; ----- – возможные варианты процессов

Холодное брикетирование такой стружки осуществляется совместно с углеродсодержащими и связующими материалами с последующей переплавкой в действующих традиционных плавильных печах. Однако это приводит к большим потерям металла (угар и потери со шлаком составляют до 40–50%), снижению практически всех характеристик плавки и качества жидкого металла.

С целью сокращения угара железа и восстановления оксидов необходимо обеспечить в печах или предусмотреть дополнительные устройства, в которых проходил бы восстановительный режим, аналогичный режиму восстановительной зоны домы: температура – 1000–1200 °С, наличие твердых и газообразных восстановителей, условия для диффузии восстановителей внутрь материала (внутрипоровая диффузия), необходимая продолжительность процесса.

Отсюда вытекают требования к качеству брикетов, в том числе по его геометрическим параметрам. Элемент диаметром более 50 мм даже при избыточном наличии восстановителей в данных условиях потребует на восстановление 20–30 мин. Окашки диаметром 10–20 мм будут восстанавливаться быстрее, но слой окашек будет плотным, теплообмен затруднен и во внутренних слоях процесс замедлится.

Преимущества горячего брикетирования: удаление (выжигание) органических примесей, что при последующей плавке приводит к уменьшению неметаллических включений и газонасыщенности металла, т. е. повышению качества, а также улучшению экологических характеристик плавки. После нагрева брикеты целесообразно подвергнуть повторному прессованию, что увеличивает их плотность до 6500–6800 кг/м<sup>3</sup>, теплопроводность, магнитные свойства и др., как это имеет место в технологии комплексного брикетирования на РУП «МТЗ». Это делает подобные «горячие» брикеты более эффективными в качестве шихтового материала.

Переплавка плотных «чистых» брикетов в действующих печах в литейном или металлургическом производстве технически не представляет сложности и позволяет заменить 50% и более шихтовых материалов против 10% при использовании «холодных» брикетов. Кроме того, повышается качество жидкого металла. Переработка стальной стружки, как правило, окисленной и заржавленной (в разной степени в зависимости от условий хранения), содержащей органические и неорганические загрязнения (по ГОСТ до 3%, на практике до 10%), представляет значительные трудности. Однако такая стружка вместе с окалиной составляет

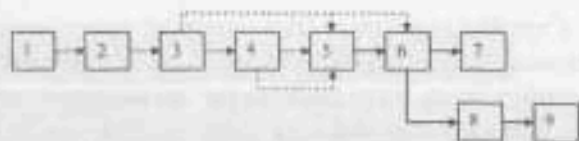


Рис. 2. Структурная схема переплавки стальной стружки без брикетирования (россыпью): 1 – сбор и хранение; 2 – хранение и подготовка шихты, включая введение восстановителей; 3 – дробление; 4 – очистка (промыть) и сушка; 5 – подогрев; 6 – плавка; 7 – разливка в слитки; 8 – доводка (рафинирование); 9 – получение отливок; ——— альтернативные варианты процессов

наибольшую долю отходов: примерно 150 000 т – стальная стружка и 60 000 т – окалина. В окалине содержится 75% железа (больше, чем в железной руде), в стружке – до 100%. Восстановление оксидов железа ( $Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4 \rightarrow FeO \rightarrow Fe$ ) и нагрев до 1700 °С требуют затрат тепла, равных 6 МДж/кг (1700 кВт ч/т без учета термического КПД или 175 м<sup>3</sup> природного газа на 1 т железа).

Эти данные соответствуют рециклингу окалины. При использовании малоокисленной стружки расходы соответственно снижаются. При переплавке «чистой» стружки при отлаженном процессе на электропечах расход может быть уменьшен до ~550 кВт ч/т. В доменных печах для сравнения расходуется до 0,5 т кокса и 100 м<sup>3</sup> газа на 1 т (с учетом термического КПД ~40%). Конечным продуктом является чушковый чугун.

При рециклинге (рис. 2) расходуются твердые восстановители, но в отличие от доменного процесса, где используется кокс, это «дешевые» материалы: углеродсодержащие отходы, местные продукты (например, лигнин, торф и т. п.) и др.

Стружка может переплавляться и в электрических индукционных среднечастотных печах. Но в этом случае содержание оксидов в ней должно быть минимальным. Без предварительной очистки и подогрева стружка может переплавляться в ротационных печах. Это сравнительно новый тип вращающихся печей, снабженный устройством для наклона или качания вокруг оси крепления в передней части корпуса. Такие печи, сохранив достоинства барабанных печей (высокая эффективность и скорость нагрева дисперсных частиц), имеют ряд дополнительных преимуществ: увеличенное вдвое время контакта, более полное использование рабочего пространства, высокую скорость плавления за счет перемешивания, сокращение цикла, возможность рафинирования, управления составом атмосферы в рабочей зоне, скоростями вращения и качания, использование жидкого или газообразного топлива. Подобные печи активно используют фирма «Sogemi» (Италия), на печах которой произведено в разных странах около

1 млн. т чугуна из отходов и стружки, фирма ГТС (Англия), начали разработки некоторые фирмы РФ и Украины (НПП «Литейный двор», ДонНИПИЦМ). В настоящее время на РУП «БМЗ» проводятся производственные испытания первой такой отечественной установки, разработанной специалистами БНТУ и ГТТУ, которая используется в первую очередь для восстановления и переплава окалины с целью получения из нее кондиционного перелдельного чугуна.

Для переработки стальной, в том числе окисленной, стружки в таких печах необходимо применять топливо – кислородные горелки (подобные использует БМЗ на электродуговых печах), обеспечивающие температуру факела до 2000–2200 °С. В начальный восстановительный период в печах поддерживается режим безокислительного нагрева (до 900 °С) в течение времени, необходимого для выжигания загрязнений, затем повышается температура до 1200 °С для проведения восстановления оксидов (длительность определяется окисленностью стружки), после этого за счет подачи кислорода в печи повышается температура для плавления и перегрева металла, рафинирования и т. п.

Применение водяного охлаждения крышки (наиболее теплонагруженного элемента печи) позволяет повысить стойкость футеровки до 600–900 плавов (по данным Sogemi), применение рекуператора – сократить расход топлива (газ/жидкое) до уровня 100–120 м<sup>3</sup>/т (90–100 л/т).

Преимуществом таких печей является отсутствие в выбросах сажи, паров масел и продуктов деструкции органических веществ, которые активно дожигаются в рабочей зоне. Это уменьшает затраты на очистку выбросов (по сравнению с индукционными печами). При рециклинге стружки дополнительные преимущества по экономии тепло- и энергоносителей могут быть обеспечены, если полученный жидкий металл (с известным химическим составом) используется непосредственно в завалке основных производственных плавильных печей, выплавляющих марочные чугуны и стали. При этом экономия составляет до 120 кВт ч электроэнергии на 1 т металла, т. е. до 15–20% в ДСП или ИЧТ. Этот вариант может быть использован как при плавке стружки в ротационных печах, так и специальных вагранках.

Брикетированная стружка с высоким содержанием оксидов и загрязнений может достаточно успешно переплавляться в специальных, приспособленных для этой цели, вагранках (рис. 3). Последние должны иметь расширенную по диаметру и высоте зону восстановления (над зоной плавления

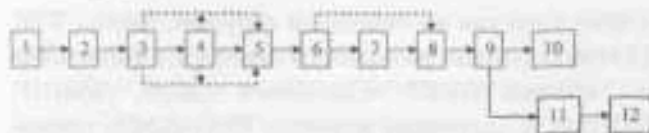


Рис. 3. Структурная схема переплавки стальной стружки с брикетированием: 1 – сбор и хранение; 2 – подготовка шихты, включая введение восстановителей; 3 – дробление; 4 – очистка и сушка; 5 – холодное брикетирование; 6 – подогрев; 7 – горячее прессование; 8, 9 – плавка; 10 – разливка в слитки; 11 – доводка; 12 – получение отливок; — — — — альтернативные варианты процессов

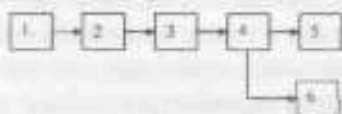


Рис. 4. Структурная схема переплавки чугуновой стружки в ротационной печи: 1 – сбор стружки; 2 – дробление; 3 – подготовка шихты, включая ввод флюсов и восстановителей, и доводка (в случае необходимости); 4 – плавка в ротационной печи; 5 – разливка в слитки; 6 – получение отливок

ния), горячее дутье (500–600 °С) и соответствующую систему очистки выбросов. Подобные вагранки могут также иметь сменную нижнюю часть (от зоны плавления до горна включительно), что позволит эксплуатировать их без остановки до 1 мес. и более.

Если при этом геометрические параметры и характеристики брикетов будут соответствовать заданным условиям восстановления (физико-химическим) и тепломассообмена в зоне восстановления, можно обеспечить не только безокислительную переплавку брикетов, но и восстановить оксидную часть материала. Расход кокса при этом составит 18–20% от массы металла. Качество чугуна с помощью введения феррославоов может быть откорректировано до уровня передельного доменного чугуна.

Стружка россыпью (без очистки) также может использоваться при переплавке в таких вагранках. В этом случае ее инжектируют непосредственно в зону холостой колоши над фурмами. Однако при этом расход кокса должен быть увеличен, а дутье обогащаться кислородом (до 25–26%) с целью повышения температуры в рабочей зоне. Технически такое решение более сложно в эксплуатации.

Переплавка чугуновой стружки может осуществляться по схеме стальной загрязненной, малоокисленной, т. е. в брикетах – в вагранках или россыпью после очистки – в индукционных среднечастотных печах.

Наиболее рациональным (рис. 4) является вариант с переплавкой стружки в ротационных печах, что позволит не только использовать наиболее дешевый энергоноситель, но и не проводить предварительную очистку стружки. При любых способах переплавки стружки целесообразно использовать полученный продукт (чугун) в качестве шихтового материала – заменителя доменного чугуна (передельного и литейного). При последующей переплавке это обеспечит наиболее высокое качество отливок и проката.

Все приведенные выше варианты утилизации металлической стружки нашли или постепенно находят свое место в литейных цехах различных компаний как у нас в стране, так и за рубежом (Caterpillar, США, Renault, Франция, Scania, Швеция и др.). Несомненно, что и в Беларуси с каждым годом будут возрастать объемы использования металлических отходов. При этом для выбора того или иного варианта технологии их утилизации необходимо пользоваться только одним критерием – экономической целесообразностью и полезностью сделанного выбора.