



*New method of hot pressing of chips waste with continuous muffle heating and device for its realization are offered.*

О. М. ДЬЯКОНОВ, БНТУ

УДК 669.1.054.8

## ПОЛУЧЕНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ БРИКЕТОВ НА ОСНОВЕ СТРУЖКО-ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ ГОРЯЧИМ ПРЕССОВАНИЕМ

Вопрос о целесообразности и области применения горячего прессования стружковых отходов довольно остро обсуждается в литературе [1, 2]. При этом высказываются противоположные мнения, но чаще всего звучат доводы о том, что данный процесс неэффективен по причине окисления металла при нагреве, наличия вредных выбросов в атмосферу и высокой себестоимости [1]. Таким образом, без привлечения должной доказательной базы ставятся под сомнение не только возможность применения метода горячего прессования, но и целесообразность его дальнейшей разработки. При этом предпочтение отдается холодному брикетированию и в том числе с использованием связующих материалов.

Прежде всего заметим, что горячее брикетирование не призвано заменить холодное, если в такой замене нет необходимости. Напротив, в случае применения методов механического и термомеханического отжата стружки от СОЖ [3, 4] технологические возможности и область применения холодного брикетирования могут быть расширены. Использование же связующих материалов может оказаться не менее сложным, трудоемким и дорогостоящим процессом по сравнению с горячим брикетированием из-за высокой стоимости связующего и его низкой эффективности применительно к стружко-порошковым дисперсиям металла (присутствие влаги, масла, большой расход связующего, низкое качество брикетов, необходимость приобретения смесителей и специального оборудования для твердения связующего и т. п.).

На наш взгляд, горячее брикетирование должно применяться в дополнение к холодному как одна из технологических операций, без которой невозможно обойтись при переработке:

- труднодеформируемых и малопластичных высоколегированных или высокоуглеродистых ме-

таллов и сплавов, таких, например, как стружка подшипниковых, пружинных, штампово-инструментальных, нержавеющей и быстрорежущих сталей;

- тонкодисперсных некондиционных шламовых отходов, используемых в качестве добавки к стружке более крупной фракции и удерживаемой в горячепрессованном брикете благодаря его высокой плотности;

- мелкофракционной чугушной стружки, загрязненной маслами и СОЖ;

- стружки, шламов и других отходов при получении композиционных шихтовых материалов.

Экологическая проблема в данном случае решается удалением масла и СОЖ из металлоотходов до нагрева применением экологически чистых методов [3, 4], хотя и допускается при этом использование ограниченного количества масла (не более 1,5%) в технологических целях: для создания защитной атмосферы и формирования защитного пироуглеродного покрытия при нагреве стружки. При этом масло подвергается термической возгонке и термодеструкции с выделением максимально возможного количества пироуглерода, после чего остатки углеводородных соединений дожигаются в самой печи с регулируемой окислительной атмосферой и автоматическим контролем за состоянием выбросов. Пироуглеродное покрытие выполняет защитную функцию не только в печи, но и на выходе в открытую атмосферу, а также является эффективной смазкой в процессе горячего прессования. В конечном итоге, обеспечиваются высокое качество брикетов и полная экологическая безопасность технологического процесса. Плотность горячепрессованного брикета больше, чем холоднопредпрессованного на 24–34% и достигает значений  $\vartheta = 0,87–0,91$  ( $\rho = 6300–6500 \text{ кг/м}^3$  у чугушной стружки и  $\rho = 6800–7100 \text{ кг/м}^3$

у стальной) [5]. Горячепрессованный брикет не содержит масляных загрязнений, обладает более высокими прочностью, коррозионной стойкостью, тепло- и электропроводностью, термостойкостью.

Производительность установки горячего брикетирования стружки (УГБС) при наличии в технологическом комплексе оборудования для предварительной очистки стружки и шлама составляет 2–3 т/ч. Процесс горячего прессования отличается высокой стабильностью. УГБС работает в автоматическом и ручном режимах круглосуточно во избежание отключения и охлаждения нагревательной печи. Технологический процесс холодного брикетирования отличается нестабильностью, вызванной продолжительными простоями оборудования из-за превышения предельно допустимого процентного содержания в стружке и брикетах влаги (льда в зимнее время года), масляных загрязнений и СОЖ, гидроударов, неудовлетворительного качества брикетов.

Энергозатраты на нагрев стружки полностью компенсируются снижением работы прессования, а следовательно, и потребляемой электроэнергии, использованием масляной компоненты стружки для нагрева самой стружки, снижением стоимости исходного сырья за счет использования в составе стружки порошков шламов, отсутствием гидроударов и простоев оборудования, более высокой стоимостью горячепрессованных брикетов.

Как следует из теоретических расчетов [2, 6] и экспериментальных данных [5], полная работа горячего прессования стальной и чугуновой стружки в 1,6–2,0 раза меньше работы холодного прессования. Использование масляной компоненты стружки (1,5%), обладающей высокой теплотворной способностью, позволяет снизить расход природного газа на 25–30%. Давление прессования снижается в 2,8–4,8 раз, что положительно сказывается на эксплуатационной стойкости инструмента – уменьшается износ боковой цилиндрической поверхности рабочего пуансона у его рабочего торца, что в свою очередь приводит к уменьшению размеров тянущего и заклинивающего заусенца стружкового брикета, образующегося в зазоре между матрицей и пуансоном. Смазка частиц стружки пироуглеродным покрытием способствует снижению давления и работы прессования на 10–15%, давления выталкивания брикета из прессформы – на 15–20%.

Совместное горячее брикетирование металлоотходов благодаря высокой плотности брикетов и эффективной работе жидкостекольного (ЖС) связующего позволяет реализовать принцип смешения более качественного металлургического

сырья (стружки) с менее качественным (шламом) в допустимых пределах и, таким образом, использовать низкосортное сырье в составе шихтовых материалов. Использование в составе брикетов шламов, ранее вывозимых в отвал, снижает себестоимость сырья на производство брикетов, в то время как реализация металлоотходов производится по ценам брикетов. Стоимость горячепрессованных брикетов сопоставима со стоимостью габаритного кускового лома. При этом отпадает необходимость в вывозе шламов в отвал, уплате пошлины за их захоронение и т. д. В состав стружко-порошкового композита можно вводить до 20% порошка шлама, а при использовании ЖС-связующего – до 50%.

Как показали расчеты себестоимости процесса горячего брикетирования различных материалов с использованием в составе стружки порошка шлама, данный процесс является достаточно рентабельным, а при переработке высоколегированных металлоотходов – высокорентабельным.

Установка горячего брикетирования стружки показана на рис. 1 [7]. Стружка засыпается в бункер 1 и муфель 2, представляющий собой стальную плоскую трубу с радиусами закругления по бокам. Образованный внутри муфеля столб стружки

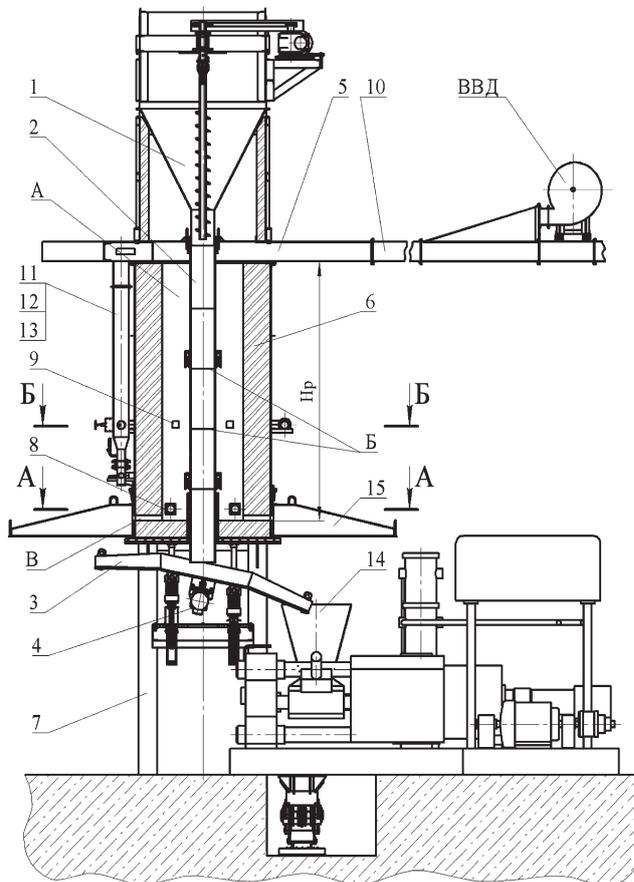


Рис. 1. Установка горячего брикетирования стружки (УГБС) с непрерывным муфельным нагревом

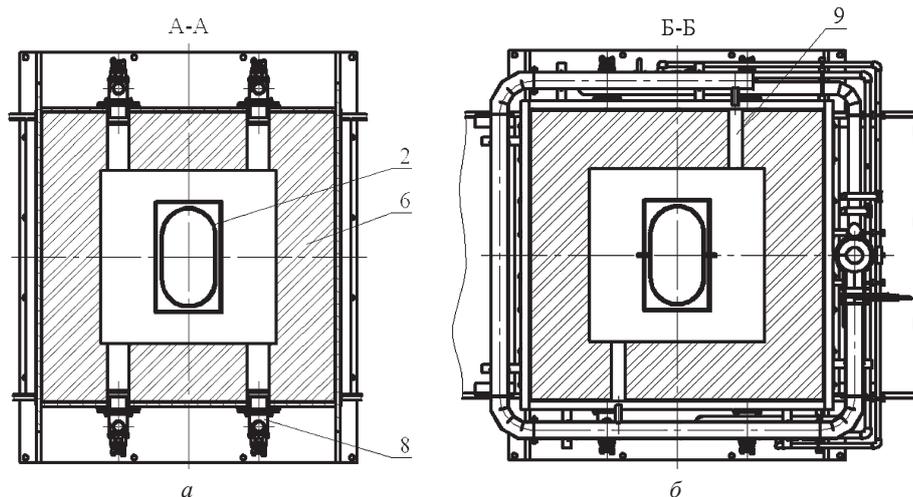


Рис. 2. Расположение газовых горелок (а) и фурм воздушного дутья (б) в поперечных сечениях нагревательной печи

ки представляет собой теплопроводную сердцевину, которая формируется на вибрлотке 3 с прикрепленным к его днищу электромеханическим вибратором 4. Плотность столба стружки, осаживаемого в муфеле под действием вибрации и сил инерции, превышает насыпную плотность на 25–30%. Величина плотности стружки в муфеле в значительной степени влияет на коэффициент теплопроводности этого материала, от которого зависят скорость нагрева и высота нагревательной печи.

Муфель 2 подвешен свободно на пустотелых балках-воздуховодах 5 и имеет возможность вертикального перемещения и вибрации. Он опирается своими верхними заплечиками на балки 5, в то время как его нижняя часть пропущена через отверстие в основании нагревательной печи 6. Печь 6 шахтного типа опирается на стальную опору 7. На этой опоре смонтирован механизм вибрлотки 3, обеспечивающий поворот (наклон) лотка в ту или иную сторону, а также перемещение по вертикали.

У основания печи расположены дутьевые газовые горелки 8, нагревающие ее рабочее пространство А и муфель 2. Для обеспечения нормальной работы горелок в них вдувается воздух, который через фурмы 9 подается также в рабочее пространство печи для сжигания газообразных отходов (углеводородов, СО и др.). Воздух нагнетается в горелки 8 и фурмы 9 вентилятором высокого давления (ВВД) через воздушный рекуператор 10, воздуховоды 5, коллекторную трубу 11 и опоясывающие печь коллекторы 12, 13. Печные газы удаляются из печи дымососом (на рисунке не показан).

Схемы расположения горелок 8 и фурм 9 в поперечных сечениях печи А-А и Б-Б показаны на рис. 2. Фланцевое соединение воздуховодов 5 с воздушным каналом 10.1 рекуператора 10, а так-

же рабочего пространства печи А с каналами отходящих печных газов 10.2 показано на рис. 3.

В результате теплообмена между газами, отходящими из печи, и воздухом, вдуваемым в горелки и в печь, воздух нагревается до 100–150 °С. Эффективному теплообмену способствует расположение балок-воздуховодов 5 непосредственно над рабочим пространством печи А, при котором они снаружи нагреваются восходящим потоком дымовых газов, а внутри охлаждаются потоком воздуха. Чрезвычайно важным является и то обстоятельство, что стружка начинает нагреваться уже в приемном бункере 1, который, так же как и воздуховоды 5, обогревается печными газами.

У основания печи 6 вблизи горелок 8 температура рабочего пространства равна 1100–1200 °С. По мере удаления от горелок по высоте печи она уменьшается и в верхней части шахты составляет порядка 300–400 °С. Таким образом, в рабочем пространстве печи формируется стационарное тепловое поле, которое обеспечивает заданный режим нагрева стружки.

Нагрев стружки происходит в процессе ее перемещения в муфеле 2 сверху вниз, после чего она направляется по вибрлотку 3 в приемный бункер брикетировочного пресса 14. Температура нагрева

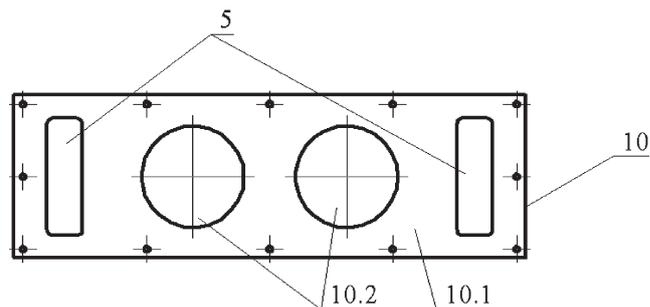


Рис. 3. Фланцевое соединение воздуховодов нагревательной печи с воздушным рекуператором

чугунной и стальной стружки на выходе из печи не должна превышать 650–700 °С, а в отдельных случаях при осуществлении теплого брикетирования она может составлять 300–400 °С. Скорость перемещения стружки определяется производительностью прессы, которая, так же как и высота рабочего пространства печи  $H_p$ , остается неизменной. Температура рабочего пространства регулируется автоматически мощностью газовых горелок в зависимости от заданной температуры нагрева стружки на выходе из печи. Передача тепла плотному теплопроводному слою стружки осуществляется различными механизмами теплопереноса (кондуктивным, радиационным и конвективным), при этом вначале нагревается муфель, а затем его сердцевина – объемная металлическая сетка, пустоты которой заполнены воздухом и СОЖ.

Процесс нагрева делится на два этапа: этап дегазации стружки и этап нагрева сухого металла. В процессе нагрева с поверхности стружки удаляется жидкая фаза. Вначале образуются пары воды и летучие фракции масла (100–350 °С), затем – газообразные продукты возгонки и термодеструкции масла (350–450 °С). В условиях ограниченного муфельного пространства газ продувает слой стружки под давлением, вытесняя воздух и создавая защитную углеводородную атмосферу.

Состав защитной атмосферы зависит от химического состава СОЖ. Чаще всего это угарный и углекислый газ, водород, углеводородные соединения, соединения азота, серы и фосфора, сажа и др. Избыточное давление и живучесть защитной атмосферы определяются величиной плотности газа, т. е. его необходимым и достаточным количеством в единице объема. Виброуплотнение стружки приводит к уменьшению объема и повышению плотности газа. Выходу газа из муфеля препятствует сопротивление пористого слоя стружки, высота которого измеряется расстоянием (шагом) между щелевыми отверстиями  $B$  в муфеле. Избыток газа непрерывно выпускается в печь через щелевые отверстия.

Выпуск газа из муфеля (дегазация) необходим для ускорения процесса обезвоживания и обезмасливания стружки. Чередование сплошных стенок и щелевых отверстий задерживает газ в муфеле настолько, насколько это необходимо для поддержания динамического равновесия между вновь образующимся объемом газа и объемом газа, который выходит из муфеля. Таким образом, объем газа в муфеле в установившейся стадии процесса дегазации поддерживается постоянным.

Термическая возгонка масляной фазы в основном протекает при температурах 350–450 °С. Этот

период дегазации наиболее продолжителен. При наличии масла на поверхности частиц стружки температура металла практически остается постоянной, равной температуре возгонки (испарения) масла. В условиях отсутствия окислителя и горения масляной фазы имеет место пиролитическое разложение продуктов возгонки. Стальная стружка является хотя и слабым, но присутствующим в большом количестве катализатором этого процесса. Пироуглерод адсорбируется на поверхности стружки, образуя твердый защитный слой, предохраняющий металлические частицы от окисления как в процессе нагрева, так и на выходе из печи.

Продукты возгонки СОЖ проходят все этапы термического разложения и только после этого выпускаются из муфеля в печь. Пористый слой стружки выполняет роль непрерывно обновляемого фильтра, на котором оседают частицы капельно-взвешенной жидкости и сажи. Таким образом, в рабочее (топочное) пространство печи  $A$  из муфеля  $2$  поступает очищенный газ, который сгорает практически в полном объеме как топливо совместно с природным газом. Тепло от сгорания идет на нагрев стружки.

Термическое разложение СОЖ, фильтрация газообразных продуктов позволяют значительно сократить количество вредных выбросов в атмосферу. Выделение твердого углерода из углеводородных соединений сокращает общий объем газовой выделений и упрощает задачу их сжигания и обезвреживания.

Эффективному теплообмену в муфеле способствует вибрация столба стружки. Частицы металла переводятся во взвешенное состояние – усиливается циркуляция газа в порах стружки, улучшается теплообмен, повышается скорость нагрева стружки. Нагрев стружки в псевдосжиженном (кипящем) слое по сравнению с другими известными способами нагрева является особенно эффективным [8].

Эффективному теплообмену, а также полному сгоранию природного и дымовых газов, дожиганию продуктов неполного сгорания способствует большая протяженность (высота) рабочего пространства печи ( $H_p$ ). Скорость потока газов в шахте печи (за пределами муфеля), а следовательно, и время для теплообмена и сгорания регулируются тягой, создаваемой дымососом в дымоходе 10.2. Сжигание паров масла за счет тепла от сгорания природного газа снижает перепад температур по высоте печи и интенсифицирует процесс нагрева стружки. Необходимую для этого поставку кислорода в соответствии со стехиометрическими соотношениями процесса горения обеспечивает воз-

душное дутье с регулируемым коэффициентом избытка воздуха.

В верхней части печи образуется завеса перегретого пара (зона парообразования, 300–400 °С) в результате испарения водной составляющей СОЖ в верхней части муфеля. Восходящие потоки печных газов проходят эту завесу, взаимодействуя с активными молекулами перегретого пара. Перегретый пар очищает газы от твердых частиц сажи и частично вступает в реакцию с оксидом углерода СО, завершая реакцию его полного сгорания. В результате этой реакции образуются углекислый газ и водород.

По окончании процесса дегазации температура стружки резко возрастает. Количество газа в муфеле убывает, что сопровождается интенсивной адсорбцией пироуглерода на поверхности частиц металла. Таким образом, на завершающей стадии процесса нагрева при полном истощении защитной атмосферы в муфеле и на выходе из печи стружка защищена от окисления твердым пироуглеродным покрытием.

При непрерывном нагреве и прессовании стружки нагревательная печь спарена с брикетировочным прессом. Производительность печи определяется производительностью пресса. Подача стружки в пресс может быть прерывной или непрерывной. Прерывная подача более предпочтительна, так как позволяет значительно уменьшить потери тепла стружки на лотке 3 (см. рис. 1). Уровень стружки в бункере пресса 14 поддерживается в заданных пределах, а сам пресс работает в автоматическом режиме.

Газообразные отходы, выходящие из муфеля вместе со стружкой, улавливаются вытяжными зонтами 15 и возвращаются в печь через щелевые отверстия В в футеровке печи у ее основания. Эти отходы дожигаются в печи совместно с основными топливными компонентами. Отходящие печные газы проходят воздушный 10 и водяной (на рисунке не показан) рекуператоры, отдают свое тепло и выбрасываются в атмосферу. Горячая вода от экономайзера поступает в систему отопления технологического модуля.

Более подробно процессы возгонки, термодеструкции и сгорания СОЖ, формирования пироуглеродного покрытия на поверхности металлических частиц описаны в работах [9–11].

С момента выгрузки стружки из печи до начала прессования проходит 1,0–1,5 мин. Температура металла понижается на 50–100 °С и составляет 600–650 °С. Режим прессования соответствует неполной горячей деформации стали, при которой фазовые превращения и рекристаллизация отсут-

ствуют. При этом разупрочняющие процессы в металле протекают в полном объеме. Материал пресуется по схеме всестороннего сжатия при одностороннем перемещении пуансона. Давление прессования достигает величины 300–350 МПа при максимальном давлении рабочей жидкости в главном цилиндре пресса 160 МПа.

Рабочий цикл пресса Б6238Г показан на рис. 4. Стружка с помощью вибрлотка подается в бункер 1 и заполняет сообщенную с ним полость рабочего контейнера 2. В исходном положении (рис. 4, а) контейнер 2 занимает левое крайнее положение, при котором запрессованная в него матрица 3 упирается в пуансон 4. Пуансон 4 закреплен неподвижно на станине пресса. Путем срабатывания трамбовок пресса стружка подается под пуансон 5, который вместе со штоком 6 совершают рабочий ход влево (рис. 4, б). Пуансон 5 захватывает определенный объем стружки и проталкивает ее в матрицу 3 (объемное дозирование). Стружка прессуется в брикет 7 в замкнутом объеме пресс-формы, образованном матрицей 3 и двумя пуансонами 4 и 5.

По достижении в гидросистеме пресса заданного давления включаются гидроцилиндры съема контейнера 2 (рис. 4, в). Контейнер 2 с матрицей 3 отводится вправо на расстояние, превышающее высоту брикета (обычно 190 мм), при этом шток 6, а вместе с ним и брикет 7 остаются неподвижными. В этом положении брикет зажат между пуансонами 4, 5 и при отходе контейнера 2 вправо выталкивается из матрицы 3. Далее шток 6, а вместе с ним и пуансон 5 также отходят вправо, освобождая брикет 7 (рис. 4, г). Брикет падает и скатывается по лотку на транспортер, который выносит брикеты за пределы производственного помещения. Подвижные детали и механизмы пресса возвращаются в исходное положение.

Горячее брикетирование стальной стружки осуществляется с одноразовой подтрамбовкой, чугунной – без подтрамбовки. Процентное содержание шлама в стружко-порошковой смеси рассчитывается таким образом, чтобы общее содержание твердых безвредных примесей в брикете не превышало 3% (ГОСТ 2787-75). При этом содержание шламового порошка в брикете не должно превышать 20% исходя из соображений прочности брикета. Если содержание порошка в брикете свыше 20%, в горячую стружко-порошковую смесь непосредственно перед брикетированием вводится ЖС (рис. 4, а). При этом шестеренчатый насос системы подачи ЖС включается синхронно с вибратором лотка. В процессе охлаждения брикета на воздухе ЖС отвердевает, связывая частицы стружки и повышая таким образом прочность брикета.

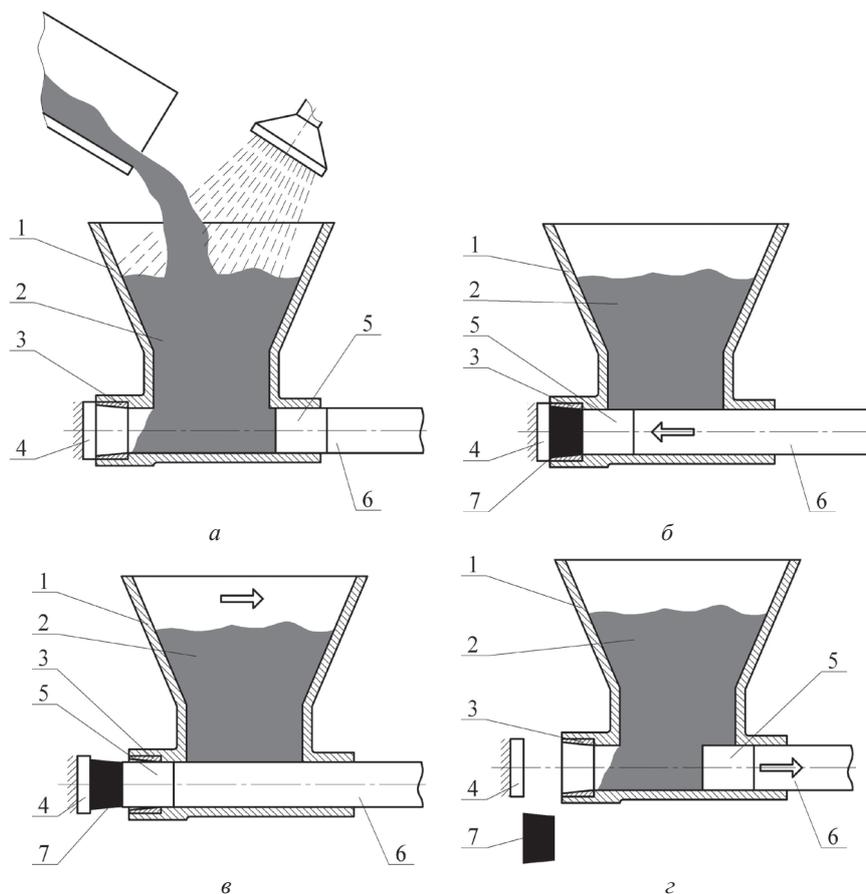


Рис. 4. Рабочий цикл гидравлического брикетировочного пресса Б6238Г (схема работы объемного дозатора)

Брикетирование металлоотходов с добавкой ЖС как связующего – одно из перспективных направлений получения высококачественного металлургического сырья. ЖС-связующее и одновременно защитное покрытие металла значительно повышают прочность, атмосферостойкость и термостойкость брикетов. При переплавке брикетов оно выполняет функции шлакообразующего материала.

Исследование структуры ЖС и механизма его взаимодействия с дисперсиями металла (металлической стружкой и шлифовальными шламами сталей ШХ15 и Р6М5) проводили с применением методов физико-химического анализа в температурном диапазоне 700–20 °С в процессе впрыскивания распыленного ЖС в нагретую смесь, горячего прессования и охлаждения брикетов на воздухе. Анализу подвергали образцы ЖС модулей 2,2, 2,6 и 3,0 плотностью 1460 кг/м<sup>3</sup> с содержанием основного вещества соответственно 26,24% SiO<sub>2</sub> и 12,2% Na<sub>2</sub>O; 30,1% SiO<sub>2</sub> и 12,1% Na<sub>2</sub>O; 30,0% SiO<sub>2</sub> и 10,0 Na<sub>2</sub>O. Поиск оптимальных режимов брикетирования заключался в определении минимального расхода ЖС при том или ином содержании порошка шлама в смеси. Критерием качества брикета выступала его прочность, определяемая

согласно ГОСТ 2787-75 как осыпаемость брикета после трехкратного сбрасывания с высоты 1,5 м на бетонную плиту в мас. %.

Механическую смесь стружки и шлама с исходным содержанием масляного компонента 1,5% нагревали в муфельной печи в собственной защитной углеводородной атмосфере до температуры 700 °С, после чего ее подавали в приемный бункер брикетировочного пресса Б6238 с помощью вибrolотка. Смесь прессовали под давлением 350 МПа. В процессе падения с лотка смесь обрабатывали распыленным потоком ЖС, нагнетаемого в распылитель шестеренчатым насосом. Включение вибратора осуществляли синхронно с включением шестеренчатого насоса. Производительность УГБС составляла 2000 кг/ч. Нагретую смесь подавали в бункер пресса периодически во избежание потерь тепла металла на выходе из печи. Получали брикеты со следующими размерами: диаметр 150 мм, высота 70–80 мм. Режимы и результаты испытаний приведены в табл. 1.

Как следует из таблицы, при содержании порошка шлама в брикете 20–50% наиболее оптимальным является добавление в стружко-порошковую смесь жидкого стекла в количестве 1,8–2,2%. Смесь, нагретая до 700 °С и обработанная

Таблица 1. Результаты испытаний и режимы химико-термического упрочнения горячепрессованных брикетов ЖС-связующим

Номер испытаний	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Модуль ЖС	2,2	2,2	2,2	2,6	2,6	2,6	3,0	3,0	3,0
Содержание порошка шлама в смеси, мас.%	30	40	50	30	40	50	30	40	50
Расход ЖС, %	1,8	2,0	2,2	2,1	2,8	3,6	1,9	2,7	3,3
Плотность брикета, кг/м <sup>3</sup>	6250	5970	5720	6240	5980	5730	6260	5990	5750
Предел прочности на сжатие, МПа	81,8–96,3	78,4–82,5	72,7–76,0	73,4–82,9	70,8–77,2	60,0–66,9	66,3–7,4	62,7–63,8	55,1–57,8
Прочность брикета, определяемая как осыпаемость после трехкратного сбрасывания брикета с высоты 1 м на бетонную плиту, мас.%	0	0	0	0,3	1,5	1,8	0,3	1,5	1,7

неорганическим связующим, уже на воздухе частично агломерируется с образованием комков неправильной формы размером 6–7 мм и выше. В горячепрессованном брикете ЖС-связка оплавляется, полимеризуется, а затем отвердевает в процессе охлаждения брикета в температурном диапазоне 700–350 °С, образуя прочные коррозионно-стойкие покрытия, прослойки и связи (предел прочности брикета на сжатие  $\sigma_B = 72,7–96,3$  МПа, осыпаемость согласно ГОСТ 2787-75 отсутствует). Оптимальным модулем ЖС, при котором достигается наивысшая прочность брикета при минимальном расходе ЖС, следует считать модуль, равный 2,2.

Проведенный нами электронно-микроскопический анализ растворов ЖС различных модулей [12] показал, что у ЖС с модулем 2,2 наблюдается мелкозернистая, равномерно-глобулярная структура коллоидного типа. Частицы коллоидов образованы из ассоциатов полимерных и мономерных

анионов силиката натрия. При взаимодействии ЖС с предварительно нагретой стружкой (600–650 °С) непосредственно перед брикетированием на поверхности металлических частиц в очень тонком приповерхностном слое образуется пленка гидросиликата железа за счет взаимодействия ЖС с оксидами металла. С ростом температуры этот процесс ускоряется. Основная масса металлического порошка и ЖС во взаимодействие между собой не вступают, а механическая прочность агломератов обусловлена силами когезионного взаимодействия в связующем.

Примеры шихтовых материалов, полученных из вторичных металлоотходов различных производств и их техническая характеристика, приведены в табл. 2. В их состав входят стальные порошки, очищенная стальная и чугунная стружка, брикеты, передельные композиты. Стальной порошок, получаемый из безабразивного обкатного шлама стали ШХ15, пригоден для изготовления фрикци-

Таблица 2. Металлургические шихтовые материалы и их техническая характеристика

Вид металлоотходов	Вид шихтового материала	Химический состав	Техническая характеристика		
			размеры, мм	плотность, кг/м <sup>3</sup>	масса, кг
1	2	3	4	5	6
Шлам обкатной безабразивный, сталь ШХ15	Порошок стальной, сталь ШХ15	Сталь ШХ15, окисленность 2–3%	0,1–0,7	1900–2100 (насыпная)	–
Стружка стали ШХ15, группа Б1	Брикет горячепрессованный сталь ШХ15, группа 6Б1	Сталь ШХ15, окисленность 1–2%	Ø150×70–80	6800–6900	7,5–8,0
Стружка стали Р6М5, группа 14Б Р6М5	Брикет горячепрессованный группа 6Б Р6М5	Сталь Р6М5, окисленность 1–2%	Ø150×70–80	6800–6900	7,5–8,0
Стружка коррозионно-стойких хромоникелиевых сталей, группа 14Б32	Брикет горячепрессованный сталь хромоникелиевая, группа 6Б32	Cr – 17–20%, Ni – 8–13%, O – 1–2%	Ø150×70–80	6800–6900	7,5–8,0
Стружка чугунная, группы 24А, 24Б	Брикет горячепрессованный чугун, группы 23А, 23Б	Чугун, окисленность 0,5%	Ø150×90–110	6300–6500	10–12
Стружка – 80–90%, шлам шлифовальный – 10–20%, сталь ШХ15, группа Б1	Композит передельный горячепрессованный, сталь ШХ15, группа 6Б1	Сталь ШХ15 – 97–98%, абразив – 2–3%, окисленность 1,5–2,5%	Ø150×70–80	6600–6700	7,0–7,5
Стружка, легированная хромом – 80–90%, группа Б1, хромистые отходы катализаторов – 10–20%	Композит передельный горячепрессованный, группа 6Б1	Cr – 5,5–6,0%, C – 0,5–1,0%, O – 1–2%	Ø150×80–90	6300–6500	7,0–7,5

1	2	3	4	5	6
Стружка, легированная хромом, никелем и молибденом, группа Б8 – 80–90%, шлам шлифовальный инструментальных сталей – 10–20%	Композит передельный горячепрессованный, группа 6Б8	Cr – 0,4–2,0%, Ni – 0,4–1,2%, Mo – 0,15–0,6%, O – 1–2%	Ø150×70–80	6600–6700	7,0–7,5
Стружка – 60–70%, шлам шлифовальный – 30–40%, группа 14Б Р6М5	Композит передельный горячепрессованный, группа 6Б Р6М5	Сталь Р6М5 – 97–98%, абразив – 2–3%, ЖС – 1,8–2,2%, O – 1,5–2,5%	Ø150×70–80	6600–6700	7,0–7,5
Стружка стальная углеродистая, группа 15А, 16А, известь СаО	Композит передельный горячепрессованный, группа 6А	Сталь углеродистая – 97%, известь негашеная СаО – 3%	Ø150×70–80	6700–6800	7,5–8,0
Стружка чугунная, группа 24А, 24Б, графит, кокс, алебаstra, каменноугольный песок	Композит передельный горячепрессованный, группа 23А, 23Б	Чугун – 97%, углеродсодержащие добавки – 3%	Ø150×90–110	6300–6400	10–11

онных покрытий дисков сцепления автомобилей и тракторов [13]. Очищенная стальная и чугунная стружка могут переплавляться россыпью на индукционных печах (переходной ванне – «болоте») с использованием дегазатора УГБС, спаренного с индукционной печью. Горячепрессованные брикеты и стружко-порошковые композиты могут переплавляться на всех без исключения металлургических агрегатах.

При необходимости более глубокой переработки металлоотходов (производство отливок или металлопроката) в состав технологического комплекса, помимо оборудования для предварительной очистки металлоотходов и УГБС, включаются индукционная печь, установка непрерывного литья, ЭШП или ЭШО, прокатный стан. Возможны и другие варианты использования технологического оборудования в зависимости от вида металлоотходов и выпускаемой продукции.

### Выводы

1. Предложены новый метод горячего прессования стружковых отходов с непрерывным муфельным нагревом и устройство для его осуществления, обеспечивающие безокислительный нагрев стружко-порошковых дисперсий металла в псевдо-скиженном (кипящем) слое в собственной защитной атмосфере, создаваемой в ограниченном пространстве муфеля нагревательной печи методом возгонки масляной компоненты (1,0–1,5%) при ограниченном и регулируемом доступе окислителя. Термодеструкция углеводородов при температурах 650–700 °С сопровождается выделением и осажде-

нием на поверхности металлических частиц защитного пироуглеродного покрытия, выполняющего роль смазки в процессе горячего прессования.

2. Дополнительное упрочнение передельных композитов при содержании порошка в стружковом брикете 20–50% производится введением в смесь ЖС-связующего методом диспергирования (распыления) как связующего, так и брикетизируемого материала с последующим отверждением связующего тепловым воздействием брикета.

В горячепрессованном брикете ЖС-связка оплавляется, полимеризуется, а затем отвердевает в температурном диапазоне 700–350 °С, образуя прочные коррозионно-стойкие покрытия, прослойки и связи (предел прочности брикета на сжатие  $\sigma_B = 72,7–96,3$  МПа, осыпаемость согласно ГОСТ 2787-75 отсутствует). Оптимальным модулем ЖС, при котором достигается наивысшая прочность брикета при минимальном расходе ЖС (1,8–2,2%), следует считать модуль, равный 2,2.

3. Дегазатор УГБС позволяет получать стальной порошок из безабразивного шлама и очищенную от СОЖ стружку и, кроме того, осуществлять плавку стружки россыпью «на болоте» с предварительным подогревом шихты. В состав технологического комплекса, помимо оборудования для предварительной очистки металлоотходов и УГБС, можно включать индукционную печь, установку непрерывного литья, ЭШП или ЭШО, прокатный стан. Возможны и другие варианты использования технологического оборудования в зависимости от вида металлоотходов и выпускаемой продукции.

### Литература

1. С в и д у н о в и ч, Н. А. Проблемы получения и использования брикетированных металлоотходов / Н. А. Свидуневич [и др.] // Литье и металлургия. 2003. № 3. С. 110–112.
2. Д ь я к о н о в, О. М. Сравнительный анализ холодного и горячего прессования стальной сливной дробленой стружки / О. М. Дьяконов // Порошковая металлургия. 2010. Вып. 33. С. 36–42.

3. Дьяконов, О. М. Обезвоживание и обезмасливание металлической стружки / О. М. Дьяконов // *Литье и металлургия*. 2011. № 3 (спецвыпуск). С. 186–191.
4. Дьяконов, О. М. Технология переработки металлосодержащих шламов / О. М. Дьяконов // *Литье и металлургия*. 2011. № 3 (спецвыпуск). С. 181–185.
5. Дьяконов, О. М. Горячее прессование стружки и стружко-порошковых смесей / О. М. Дьяконов // *Порошковая металлургия*. 2010. Вып. 33. С. 25–35.
6. Дьяконов, О. М. Силовой и энергетический расчет процесса прессования сливной дробленой стружки / О. М. Дьяконов // *Порошковая металлургия*. 2009. Вып. 32. С. 71–84.
7. Способ брикетирования металлической стружки и устройство для его осуществления: пат. 8755 Республика Беларусь. МПК7 С 22В 1/248.
8. Забродский, С. С. Безокислительный нагрев металла в аппаратах с псевдосжиженным (кипящим) слоем / С. С. Забродский [и др.] // *Тепло- и массоперенос*. Мн.: Энергия, 1966. Т. 5. С. 45–49.
9. Дьяконов, О. М. Совершенствование процесса термохимического модифицирования металлических отходов / О. М. Дьяконов // *Весті НАН Беларусі*. Сер. хім. навук. 2006. Вып. 3. С. 113–116.
10. Дьяконов, О. М. Термодеструкция масляной фазы при нагреве металлической стружки / О. М. Дьяконов, В. В. Шевчук // *Весті НАН Беларусі*. Сер. хім. навук. 2006. Вып. 4. С. 116–121.
11. Дьяконов, О. М. Формирование защитных пироуглеродных пленок на поверхности металлических частиц / О. М. Дьяконов // *Весті НАН Беларусі*. Сер. хім. навук. 2007. Вып. 2. С. 101–105.
12. Дьяконов, О. М. Влияние строения и свойств жидкого стекла на прочностные свойства дисперсий металлов при температурном воздействии / О. М. Дьяконов // *Порошковая металлургия*. 2006. Вып. 29. С. 307–312.
13. Дмитривич, А. А. Спеченные фрикционные материалы, применяемые в узлах автотракторной техники / А. А. Дмитривич, О. М. Дьяконов // *Перспективы развития Белорусского тракторостроения: материалы Междунар. науч.-техн. конф.* Минск, 29–30 мая 2006 г. Мн., 2006. С. 72–78.