

В.М. Павловец

Сибирский государственный индустриальный университет

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОРООБРАЗУЮЩИХ ДОБАВОК РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩЕГО ОКУСКОВАННОГО СЫРЬЯ

Брикетиrowание – один из способов окускования металлургического сырья. Этот способ обладает универсальностью, он применим для малотоннажного производства брикетов [1]. При окусковании промышленных отходов в брикетах сохраняются исходные свойства материалов, их оригинальный минералогический и химический состав. К достоинствам такого производства можно отнести малые площади участка брикетирования, низкую стоимость оборудования, возможность реализации безобжиговой технологии и переработки шламов широкого диапазона гранулометрического, минерального составов и влажности, возможность переработки около источника образования [1]. Для процесса брикетирования характерны экологическая чистота производства, возможность формирования структуры брикетов с заданными свойствами и применения брикетов в процессах прямого восстановления железа и в других металлургических процессах [1 – 4].

При холодном брикетировании материалы прессуются с применением связующих добавок органического или минерального происхождения. Структура брикета и пористость формируются при непосредственном контакте между зёрнами шихты или прослоек связующего материала за счет усилия прессования. Процесс брикетирования позволяет получать прочный кусковой продукт с заданными формой, размерами, плотностью, а также обеспечивает сохранение неизменными состава и свойств исходного сырья.

Холодное брикетирование отличается простотой технических и технологических решений, низкой энергоёмкостью и экологической безопасностью, возможностью размещения небольших производств в местах образования отходов. Особенностью холодного брикетирования является формирование закрытых мелких пор, размер которых не превышает 0,1 – 0,2 от среднего размера частиц шихты и достигает 20 – 100 мкм [3 – 5]. Прочность брикетов с такой структурой достаточно высокая, а реакционная способность сравнительно низкая. При такой структуре брикета затруднен диффузионный перенос технологических газов в глубину бри-

кета в ходе металлургической плавки. Для успешного протекания термохимических процессов пористость куска должна быть преимущественно открытой, необходима проницаемость для восстановительных газов, минимальная извилистость пор. На этапе сушки необходима облегченная диффузия пара из центральной части куска на его поверхность. Это требуется для предотвращения предельных структурных и термических напряжений и процесса трещинообразования. При наличии в шихте окускованных продуктов топливных и восстановительных добавок благоприятная поровая структура дает возможность протекания окислительных процессов и реакций пиролиза [3, 4].

Модельные схемы, иллюстрирующие различные варианты реакционной способности брикетов в зависимости от характера пористости, показаны на рис. 1.

В большинстве промышленных технологий для формирования пористости чаще всего применяют выгорающие добавки, используется газопенный метод [3, 6]. Таким способом может быть решена проблема повышения реакционной способности железосодержащих брикетов. Однако механическая прочность брикетов, структурно содержащих порообразующие добавки (ПД), ограничена. Это необходимо учитывать при разработке технологии брикетирования. В компримисном варианте следует учитывать требования ГОСТ по формированию необходимой прочности (40 – 60 МПа) и применять более эффективные связки или предусматривать дополнительную упрочняющую термообработку [1 – 3].

Порообразующие добавки должны удерживаться на поверхности частиц шихты и обеспечивать необходимую холодную и горячую прочность брикетов при минимальном расходе связующего материала. Такие добавки должны обеспечивать оптимальную схватываемость и высокую пластичность прессуемой массы, содержать минимальное количество вредных, балластных и других примесей, опасных для обслуживающего персонала и снижающих качество конечного продукта. Порообразующие добавки не должны ухудшать условий плавки бри-

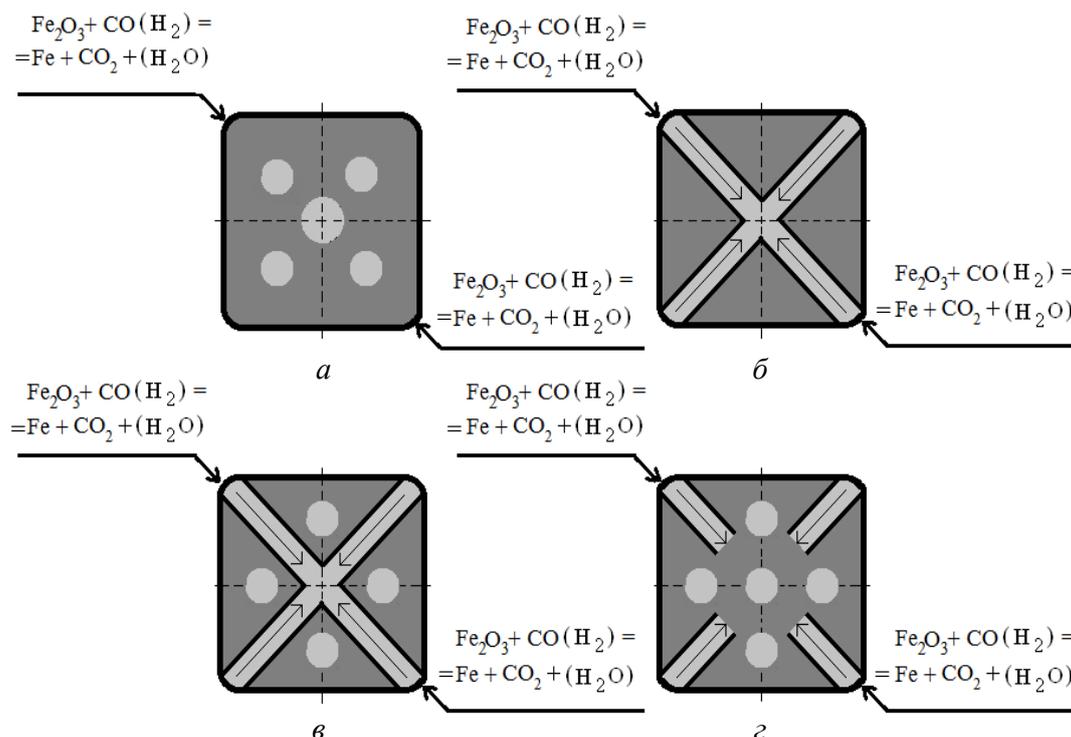


Рис. 1. Схемы различных вариантов реакционной способности брикетов в зависимости от вида пористости: *a* – закрытая труднопроницаемая для газов; *б* – открытая легкопроницаемая для газов; *в, г* – комбинированные варианты

кетов, быть распространенными и иметь невысокую стоимость и низкие транспортные затраты по их доставке на фабрику, не требовать сложных приемов и операций по их использованию. Этим требованиям во многом удовлетворяют порообразующие добавки растительного происхождения (ПД РП) – отходы сельхозпроизводства, которые широко распространены, имеют низкую стоимость и обладают многими необходимыми для порообразующих добавок свойствами [4].

Целью настоящей работы явилось исследование технологии брикетирования железосодержащих шламов металлургического производства, содержащих порообразующие добавки растительного происхождения, которые обеспечивают повышение реакционной способности окускованного продукта в ходе металлургической плавки.

На первом этапе работы была поставлена задача выбора материалов растительного происхождения, которые формируют в структуре брикетов проницаемые каналы с минимальной извилистостью. Этому критерию должны удовлетворять частицы игольчатой формы, которые после сушки и обжига формируют сквозные проницаемые поровые каналы (рис. 1, *б*) [3, 4]. В ходе экспериментов установлено, что порообразующие материалы должны обладать высокой жесткостью и минимальной крошимостью. Это необходимо, чтобы при смешивании компонен-

тов шихты формировались игольчатые частицы длиной 3 – 7 мм, с учетом того, что диаметр брикетов составляет 15 мм. После анализа макроструктуры ПД РП пришли к выводу, что такому условию удовлетворяют отходы растительного происхождения: высушенные стеблевые отходы травяных и злаковых культур, полученные после обмолота зерна.

На втором этапе работы оценена возможность различных методов измельчения продукта для получения заданной структуры ПД РП. В частности, проанализирована макроструктура частиц, полученных методом резания на многосекционном резаке, и продукты, измельченные на лабораторном дисковом измельчителе ПМ-16. Для отсева частиц на фракции применяли сита с продольными ячейками. Установлено, что измельченные способом резания стебли растительного происхождения сохраняют свой поперечный размер (диаметр частиц 1 – 3 мм), исходную трубчатую и желобчатую структуру. При этом все частицы имеют практически близкий продольный размер, который можно регулировать настройкой режущих ножей в пределах 2 – 10 мм. Недостатком этого способа измельчения является трудность получения частиц диаметром менее 1 мм.

На дисковом измельчителе в процессе механического истирания стеблевых ПД РП структура полученных частиц, напротив, сильно меняется: форма частиц – игольчатая, стержневая и

Фракционный состав и насыпная плотность измельченных ПДРП

Показатель	Размер частиц, мм					
	<0,1	0,1 – 0,2	0,2 – 0,4	0,4 – 0,6	0,6 – 1,0	>1,0
Массовое содержание, %	12,1	24,2	36,3	18,2	6,4	3,1
Насыпная плотность, кг/м ³	760	740	710	660	650	610

частично желобчатая; фракционный состав частиц полидисперсный; диаметр частиц изменяется от 0,05 до 2,00 мм, длина частиц – в пределах 0,1 – 5,0 мм. Особенностью таких частиц является то, что продольный размер частиц увеличивается с ростом диаметра частиц. Частицы диаметром 0,05 – 0,10 мм характеризуются низкой жесткостью и крошимостью, продольные размеры составляют менее 0,1 – 0,5 мм. Частицы диаметром более 0,6 – 1,0 мм более прочные и жесткие, их продольный размер существенно выше, составляет 2 – 7 мм. Можно прогнозировать, что частицы размером менее 0,1 мм не способны формировать протяженные и пронизываемые поровые каналы в структуре брикетов. Доизмельчение этих частиц до «мучного» состояния формирует вязущие свойства [7]. Регулировать размеры частиц можно путем изменения скорости вращения диска, междискового расстояния, количества загружаемого материала и другими способами. Фракционный состав и насыпная плотность измельченных стеблевых растительных отходов приведены в таблице.

Внешний вид измельченных материалов, разделенных по фракциям, показан на рис. 2.

На следующем этапе экспериментов проведено холодное брикетирование железосодержащих шламов ККЦ–2 АО «ЕВРАЗ Западно-Сибирский металлургический комбинат». Средний размер частиц 0,068 мм. В качестве связующего использовали 50 %-ный водный раствор жидкого стекла. Такая связка обеспечивает необходимое повышение длительности схватывания массы. Брикет, полученные на лаборатор-

ном гидравлическом прессе (давление прессования 50 МПа), имели форму, близкую к форме Архимедова цилиндра (высота брикета была близка к диаметру d и составляла 15 – 16 мм). В процессе прессования визуально фиксировали схватываемость (твердение) и поведение брикетизируемой массы в процессе смешивания и прессования. Термообработку брикетов осуществляли при температурах 105 °С (режим сушки), 500 °С (режим обжига) и 800 °С (режим выгорания) ПДРП при постоянной температуре в электропечи «Термикс», время обработки – 20 мин. Для определения прочности сухих и обожженных брикетов использовали гидравлический пресс модели ИО ИК 500.01, скорость разрушающей нагрузки составляла 0,1 кН/с. Записывали диаграмму разрушения образцов $F = f(l)$ (где F – силовая разрушающая нагрузка, Н; l – деформация образца, мм). Деформация образцов перед разрушением брикетов составляла 0,8 – 2,2 мм. В качестве характеристики прочности брикетов на сжатие использовали параметр P , МПа:

$$P = F/S,$$

где $S = (\pi d^2)/4$ – площадь поверхности брикета, к которой приложена разрушающая нагрузка, м².

Установлено, что прочность брикетов уменьшается с увеличением размеров частиц $d_{\text{пд}}$ порообразующих добавок (рис. 3).

Крупные (более 0,2 мм) частицы создают в структуре брикетов сквозные пронизываемые каналы. Области образования этих каналов явля-



Рис. 2. Внешний вид частиц, полученных измельчением на дисковой мельнице, размером 0,1 – 0,4 мм (а), 0,4 – 0,6 мм (б) и 0,6 – 1,0 мм (в)

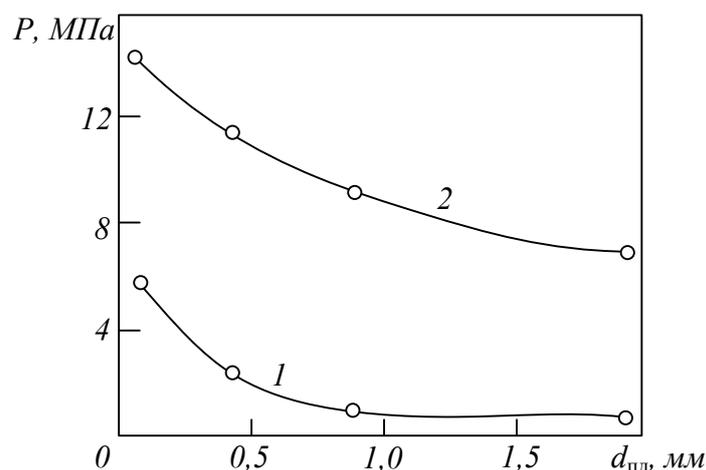


Рис. 3. Влияние размеров частиц ПД на прочность брикетов (количество связки 10 %, количество ПД РП 5 %) после брикетирования (1) и после термической сушки (2)

ются местами концентрации разрушающих напряжений. Некоторые растительные частицы, преимущественно размером 0,8 – 2,0 мм, располагаются по радиусу брикета с выходом на его поверхность; это способствует формированию пронизываемых каналов в структуре брикетов. Порообразующие добавки (диаметром более 1,0 мм) в шихте для брикетирования в количестве 3 – 5 % уже на стадии прессования дают поперечные трещины и снижают прочность сырых брикетов. Результаты экспериментов привели к выводу, что при использовании крупноразмерных частиц ПД РП необходимо увеличивать расход связующего на 10 – 20 % относительно его первоначального содержания или повышать давление прессования до 100 – 150 МПа. Хорошие результаты дает предварительное вымачивание ПД РП и насыщение их поверхности более эффективными связующими (сульфитно-дрожжевая бражка, сульфит-спиртовая бражка) при температуре более 100 °С [8] или модифицирование поверхности ПД. Такая обработка (модифицирование) направлена

на улучшение сцепления частиц шлама с растительной поверхностью путем формирования на ней армирующих элементов: нитей, полостей, цапапин и др. Это позволяет повысить прочность брикетов еще до термообработки.

Зависимость прочности брикетов (P) от количества (V) порообразующих добавок показана на рис. 4.

С увеличением количества и размеров частиц порообразующих добавок прочность брикетов существенно уменьшается. Крупные частицы ПД РП формируют недостаточно стабильную структуру брикетов, неравномерно распределяются по сечению брикетов, в результате прочность брикетов снижается. Наибольшую прочность придают частицы, измельченные до «мучного» состояния (размер менее 0,1 мм), но такие частицы не позволяют сформировать пронизываемые поры. Это обусловлено ломкостью и крошимостью сверхтонких частиц. В результате прогнозировать существенное увеличение реакционной способности брикетов проблематично,

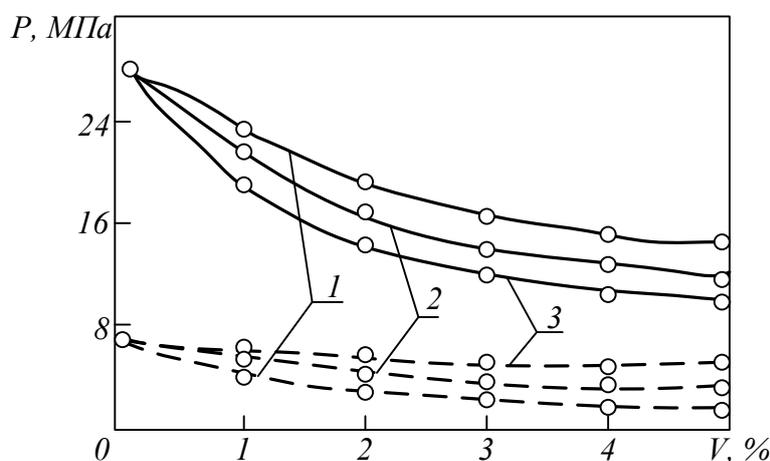


Рис. 4. Влияние количества ПД на прочность брикетов после термической сушки (—) и после холодного брикетирования (---) при размерах частиц ПД 0,1 – 0,2 мм (1), 0,2 – 0,4 мм (2), 1,5 – 2,0 мм (3)

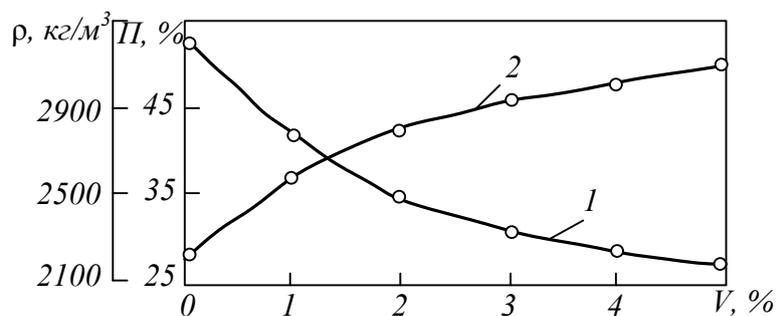


Рис. 5. Влияние количества ПД на плотность (1) и пористость (2) брикетов (количество ПДРП 5 %)

поскольку они не имеют игольчатой структуры, в них не сформированы проникаемые каналы (рис. 1, б). Таким образом, для промышленного использования можно рекомендовать фракцию частиц ПД РП 0,1 – 0,6 мм; такие частицы обладают игольчатой структурой.

Влияние количества порообразующих добавок на плотность (ρ) и пористость (Π) брикетов показано на рис. 5.

Увеличение пористости напрямую зависит от размера частиц ПД и их количества. Это объясняется тем, что частицы ПД РП обладают собственной пористостью, которая остается даже после измельчения. Желобчатая и трубчатая структура особенно крупных частиц ПД РП обуславливает низкую насыпную плотность и собственную высокую пористость. До 40 – 50 % собственной пористости сохраняется в трубчатой структуре частиц ПД РП, полученных резанием. В процессе прессования доля собственной пористости, безусловно, уменьшается. Создание устойчивого структурного каркаса брикета осуществляется в несколько стадий, характерных для любого процесса брикетирования: сначала жидкие связующие наносятся на частицы и формируются различные зерноклеевые комплексы, связующее переходит в вязкотекучее состояние; далее разнообразные зерноклеевые комплексы соединяются в процессе прессования; при сушке брикетов связующее переходит в «твердое» конечное состояние, формирующее заключительную прочность [1]. На этапе подготовки шихтовой смеси важны условия смачивания всех структурных компонентов связующим. Если схватываемость массы высокая, то коагулянты способствуют формированию неоднородного состава шихты и снижению прочности куска после брикетирования. Это свойство необходимо учитывать при выборе связующего и его количества.

Плотность брикетов уменьшается с увеличением количества порообразующих добавок, а пористость, напротив, увеличивается. Это можно объяснить тем, что крупные частицы ПД РП (особенно размером 1 – 2 мм) обладают трубча-

той структурой; такие частицы занимают большой объем в структуре брикета. Кроме этого пористость может образоваться за счет механического перекрытия пустоты крупными частицами ПД РП, образования шихтовых агломератов, хорошо заметных визуально, и раннего схватывания брикетируемой массы в процессе перемешивания. На пористость, плотность и на процесс уплотнения массы оказывает влияние негативный демпфирующий (пружинящий) эффект трубчатых частиц ПД РП.

Зависимость прочности брикетов от количества частиц ПД РП и температуры обжига (t_0) представлена на рис. 6.

При температуре 20 °С показана (рис. 6) сушка брикетов в естественных условиях в течение 24 ч. Установлено, что брикеты без добавок игольчатых частиц имеют максимальную прочность 30 МПа, которая увеличивается с ростом температуры обжига до 44 МПа ($t_0 = 800$ °С; $\tau = 20$ мин). С ростом количества частиц ПД РП размером 0,1 – 0,6 мм от 1 до 3 % прочность брикетов существенно снижается при всех режимах термообработки. Ограничить снижение прочности брикетов можно путем подбора особой формы частиц ПД РП, предварительной механической обработки сырья, модификации поверхности или предварительного вымачивания ПД [7 – 10]. Однако эти методы не в полной мере могут компенсировать снижение прочности брикетов. Можно использовать повышенное количество связующих добавок. Прочность брикетов, подвергнутых термообработке при 20 и при 100 °С, достаточно близка. При этих температурах происходит упрочнение массы за счет твердения связки. При $t = 500$ °С ($\tau = 20$ мин) происходит медленное выгорание частиц ПД РП, в результате в структуре брикетов образуются радиальные поровые каналы, снижающие прочность брикетов при количестве ПД РП 2 – 3 %. При таком количестве ПД РП при температуре обжига (800 °С) происходит интенсивное воспламенение и выгорание порообразующих добавок, образуется большое количество продуктов горения, существенно снижается прочность по-

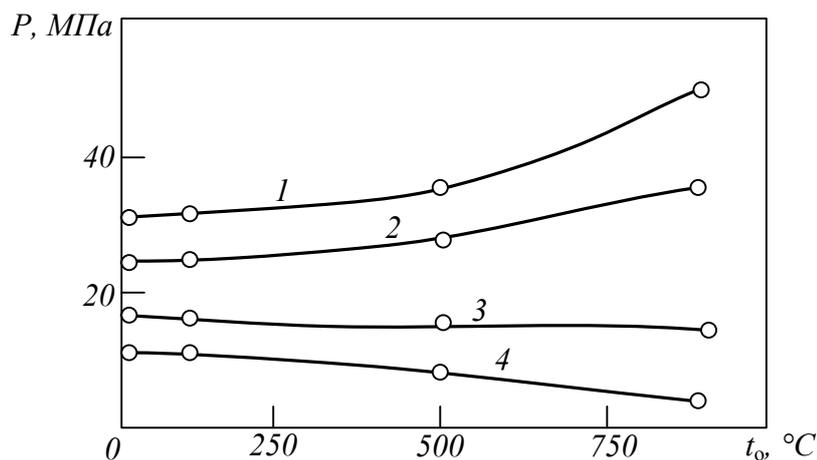


Рис. 6. Зависимость прочности брикетов от температуры обжига и количества ПД РП в шихте образцов:
1 – 0; 2 – 1,0 %; 3 – 2,0 %; 4 – 3,0 %

лученных брикетов. При содержании ПД РП 1 % процесс выгорания добавок в меньшей степени влияет на разупрочнение брикетов: происходит рост прочности при всех температурах обжига; формируется зональная структура. При $t = 800$ °C окисляется поверхность образцов, они имеют характерный бурый цвет гематита. Для устранения эффекта зональности структуры брикетов следует повысить температуру обжига выше 800 °C

и увеличить длительность термообработки до 25 – 30 мин.

На рис. 7 показана макроструктура излома брикетов после сушки и низкотемпературного обжига.

После сушки при 100 °C порообразующие добавки в шлифах и разломах имеют желтый соломенный цвет, а после обжига при 800 °C они оставляют золотой след сгоревших частиц



Рис. 7. Макроструктура излома брикетов после сушки при $t_{об} = 100$ °C (а, в) и высокотемпературного обжига при $t_{об} = 500$ °C (б, г) (количество ПД РП 2 %):

а, б – частицы ПД РП получены измельчением; в, г – частицы ПД РП получены способом резания

ПД РП. Расположение частиц ПД РП в структуре брикетов довольно хаотичное, но некоторые частицы располагаются по радиусу брикета и формируют слабоизвилистые проницаемые поровые каналы, расположенные между поверхностью и центром брикета. При наличии ПД РП в комбинации с собственной пористостью материала брикета возможно формирование структуры окускованного продукта, позволяющей прогнозировать повышение его реакционной способности в ходе металлургической плавки.

Выводы. При проведении эксперимента учитывали характеристики частиц ПД РП, условия подготовки отходов растительного происхождения, режим формирования брикетируемой массы по условиям схватываемости и прессуемости, прочностные характеристики брикетов после брикетирования и термообработки. В результате анализа полученных данных температуру обжига ограничили значением 500 °С, а количество ПД РП размером 0,1 – 0,6 мм установили на уровне 0,5 – 1,0 %. Такие параметры технологии брикетирования позволяют получить железшламовые брикеты прочностью более 45 МПа, общей пористостью более 40 %, в структуре которых преобладают открытые поры, позволяющие прогнозировать повышение реакционной способности брикетов в ходе металлургической плавки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ожогин В.В. Основы теории и технологии брикетирования измельченного металлургического сырья. – Мариуполь: ПГТУ, 2010. – 442 с.
2. Павловец В.М. Окатыши в технологии экстракции металлов из руд. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2014. – 345 с.
3. Павловец В.М. Расширение функциональных возможностей агрегатов для подготовки железорудного сырья к металлургической плавке. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2016. – 373 с.
4. Павловец В.М. Развитие техники и технологии окомкования железорудного сырья в металлургии. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2019. – 386 с.
5. Павловец В.М. Капиллярная пропитка образцов, полученных напылением влажной железорудной шихты на гарнисаж окомкователя // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 8. С. 11 – 14.
6. Павловец В.М. Огнеупорные и теплоизоляционные материалы. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2015. – 334 с.
7. Патент № 2679853 РФ, МПК⁷ С22В 1/14. Способ получения окатышей / В.М. Павловец; заявл. 31.05.2018; опубл. 13.02.2019. Изобретения и полезные модели. Бюл. № 5.
8. Патент № 2634524 РФ, МПК⁷ С22В 1/14. Способ получения окатышей / В.М. Павловец; заявл. 28.12.2016; опубл. 31.10.2017. Изобретения и полезные модели. Бюл. № 31.
9. Патент № 2423533 РФ, МПК⁷ С22В 1/14. Способ получения окатышей / В.М. Павловец; заявл. 11.01.2010; опубл. 10.07.2011. Изобретения и полезные модели. Бюл. № 19.
10. Павловец В.М. Повышение реакционной способности окускованного железосодержащего сырья // Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии. 2019. Вып. 41. С. 62 – 72.

© 2019 г. В.М. Павловец
Поступила 3 сентября 2019 г.