

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-367-375>

УДК 620.531.433

Технология горячего брикетирования отходов черных металлов в пресс-формах с подвижной матрицей

Инж. А. А. Литвинко¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. В работе описана технология горячего брикетирования структурно-неоднородных отходов металлообработки в пресс-формах с подвижной матрицей, отличающаяся от известных аналогов возможностью повышения качества брикетов при минимальном количестве подготовительных операций. Целью работы является совершенствование процесса горячего брикетирования. Решаемые задачи заключаются в разработке технологической схемы и физико-математической модели процесса, снижении сил контактного трения и износа инструмента, оптимизации энергосиловых параметров по критериям плотности и прочности брикетов. Технологическая схема брикетирования представлена пресс-формой с подвижной матрицей, в которой в качестве упругой опоры используется сжатый воздух. В процессе брикетирования матрица и прессуемый металл перемещаются в одном и том же направлении. Сила бокового трения является активной, направленной в сторону усилия брикетирования. В итоге снижаются усилие и работа брикетирования, износ пресс-формы, а сам брикет получается высокого качества – однородным по плотности и без внутренних дефектов. В результате численного расчета модели получены зависимости напряженного состояния прессовки и давления прессования от координат и плотности на контактных поверхностях и в глубине материала, что позволяет производить расчет на прочность деталей пресс-формы и подобрать оборудование для осуществления процесса брикетирования. Изучены закономерности формирования структуры брикета, показаны преимущества применения предложенной технологической схемы в сравнении с брикетированием в неподвижной матрице. Предлагаемая технология исключает выполнение предварительной операции удаления смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) центрифугированием или другими известными способами. СОЖ удаляется термической возгонкой, частично сжигается в топке печи, частично конденсируется в системе «мокрой» очистки.

Ключевые слова: схема, давление, модель, горячепрессованный брикет, качество, напряжения, плотность, прочность, структура, пресс-форма, пуансон, матрица, подвижная, силы, трение, износ, инструмент

Для цитирования: Литвинко, А. А. Технология горячего брикетирования отходов черных металлов в пресс-формах с подвижной матрицей / А. А. Литвинко // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 5. С. 367–375. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-367-375>

Hot Briquetting Technology for Ferrous Metal Waste in Molds with Movable Matrix

A. A. Litvinko¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper describes the technology of hot briquetting of structurally heterogeneous metalworking waste in molds with a movable matrix, which differs from known analogues in the possibility of improving the quality of briquettes with a minimum number of preparatory operations. The aim of the work is to improve the process of hot briquetting. The tasks to be solved are to develop a technological scheme and a physical and mathematical model of the process, reduce the forces of contact friction and tool wear, and optimize the energy-power parameters according to the criteria for the density and strength of briquettes. The technological scheme of briquetting is represented by a mold with a movable matrix, in which compressed air is used as an elastic support. During the briquetting process, the matrix and the pressed metal move in the same direction. The lateral friction force is active, directed towards the briquetting force. As a result, the force and work of briquetting, mold wear are reduced, and the briquette itself is of high quality – uniform in density and without internal defects.

Адрес для переписки

Литвинко Артем Анатольевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 22/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-91-91
nii_svarka@bntu.by

Address for correspondence

Litvinko Artyom A.
Belarusian National Technical University
22/2, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-91-91
nii_svarka@bntu.by

As a result of the numerical calculation of the model, the dependences of the stress state of the pressing and pressing pressure on the coordinates and density on the contact surfaces and in the depth of the material were obtained, which makes it possible to calculate the strength of the mold parts and select equipment for the briquetting process. The regularities of formation of the briquette structure are studied, the advantages of using the proposed technological scheme in comparison with briquetting in a fixed matrix are shown. The proposed technology eliminates the implementation of the preliminary operation of coolant removal by centrifugation or other known methods. Coolant is removed by thermal sublimation, partially burned in the furnace firebox, partially condensed in the “wet” cleaning system.

Keywords: scheme, pressure, model, hot-pressed briquette, quality, stress, density, strength, structure, mold, punch, matrix, movable, forces, friction, wear, tool

For citation: Litvinko A. A. (2023) Hot Briquetting Technology for Ferrous Metal Waste in Molds with Movable Matrix. *Science and Technique*. 22 (5), 367–375. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-367-375> (in Russian)

Введение

Получение качественных шихтовых материалов из отходов металлообработки – важнейшая составляющая ресурсного обеспечения металлургического производства [1–4]. К вторичным черным металлам относятся: стальная и чугунная стружка, колотая дробь, шлифовальные, опилочные и обкатные шламы, металлизированная пыль от обдирочных, наждачных и заточных станков, мелкофракционные отсеvy ферросплавов и др.

Широкое применение в практике переработки металлоотходов получил плавильный передел как наиболее универсальный метод. Рациональным и эффективным способом подготовки металлоотходов к переплаву является горячее брикетирование. Как было показано в работах [5–10], данный вид переработки применяется для получения качественных металлургических брикетов и композитов плотностью не менее 90 % плотности компактных чугунов и сталей, что, в принципе, эквивалентно превращению дисперсных и загрязненных частиц металла в габаритный кусковой лом. В процессе плавки брикеты полностью погружены в расплав, не всплывают на поверхность металлической ванны и не окисляются. Технология горячего брикетирования предполагает полное и экологически безопасное удаление жидкой фазы в процессе нагрева шихты до температур неполной горячей деформации 700–850 °С. Данный температурный интервал оптимальный для черных металлов, минимизирующий окисление частиц, потери теплоты, силовые и энергетические затраты на производство брикетов [1].

Настоящая работа посвящена дальнейшему совершенствованию процесса брикетирования путем применения пресс-форм с подвижной матрицей, в которых процесс формования брикетной массы протекает при более однородном распределении плотности, что снижает трение и износ деталей пресс-формы, энергосиловые параметры

и обеспечивает значительное повышение плотности и прочности готовых брикетов.

Технологическая схема брикетирования

Технология горячего брикетирования включает следующие технологические операции:

1) дробление стальной стружки на фракции до 15 мм в валковом шредере, сепарирование стружки и шламов в галтовочных барабанах или на вибросите с целью удаления концевых отходов и других твердых предметов (резцов, болтов, гаек, брусков абразива и пр.), отмывку и «мокрую» магнитную сепарацию шлифовальных шламов, механический отжим металлических порошков шламов от водного раствора, дробление «сухих» шламовых брикетов в порошок;

2) приготовление шихты смешиванием компонентов в шнековом смесителе;

3) безокислительный нагрев шихты до температур неполной горячей деформации 700–850 °С в защитной атмосфере продуктов термической возгонки масляной компоненты смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ);

4) пиролиз углеводородных соединений с целью получения углеродного покрытия, предохраняющего металл от окисления на выходе из печи и выполняющего роль смазки в процессе горячего брикетирования;

5) сжигание масла, обладающего высокой теплотворной способностью, совместно с природным газом;

6) дожигание СО, очистку, рекуперацию теплоты и обезвреживание дымовых газов методом «мокрой» очистки в насадочном скруббере Вентури, сбор и утилизацию масляного конденсата, сажи и абразива;

7) засыпку шихты в приемный бункер брикетировочного пресса при минимальных потерях теплоты (не более 50 °С);

8) брикетирование шихты на гидравлическом прессе под давлением 470–500 МПа в пресс-форме с подвижной матрицей.

Технологическая схема брикетирования металлоотходов в подвижной матрице приведена на рис. 1. Процесс брикетирования заготовки 1 производится в жесткой цилиндрической матрице 2, запрессованной в поршень 3 пневмоцилиндра 4. Процесс брикетирования происходит, когда поршень 3 находится в своем исходном верхнем положении. При обратном холостом ходе пуансона 5 пневмосистема с помощью пуансона 6 возвращает матрицу в исходное верхнее положение. Брикет выталкивается из матрицы пуансоном 6. Далее цикл повторяется.

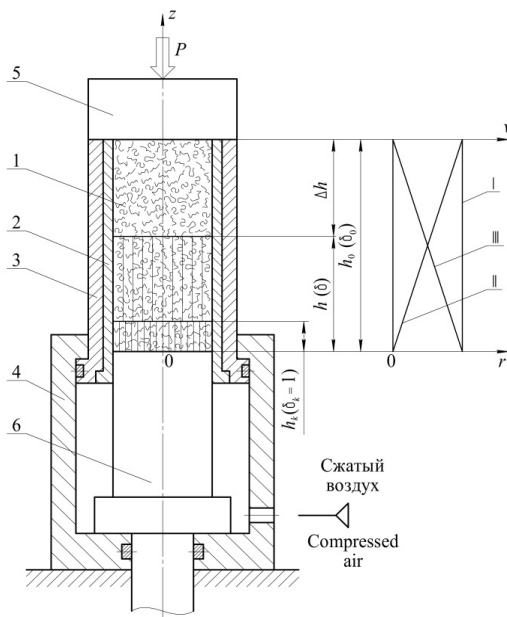


Рис. 1. Технологическая схема брикетирования дискретных материалов в подвижной матрице

Fig. 1. Technological scheme of briquetting of discrete materials in a movable matrix

На рис. 1 показаны графики скоростей перемещения: I – верхнего пуансона 5 и матрицы 2, II – частиц металла по высоте прессовки 1, III – матрицы 2 относительно прессовки 1. Скорость частиц металла по высоте прессовки уменьшается от максимального значения до нуля, т. е. матрица, движущаяся с постоянной скоростью, обгоняет прессуемый металл.

Силы бокового трения активны, направлены в сторону усилия прессования P . И только по периметру верхнего торца прессовки в верхних углах закрытого пространства матрицы металл «защемлен», движется со скоростью матрицы, скорость перемещения металла относительно матрицы, а, следовательно, и силы трения равны нулю. Направления векторов реактивных напряжений на боковой поверхности прессовки показаны на рис. 2.

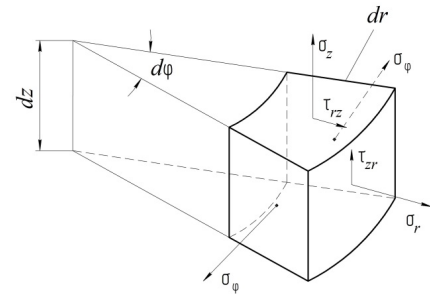


Рис. 2. Элементарный объем очага деформации с компонентами тензора напряжений дискретного материала, брикетируемого в подвижной матрице

Fig. 2. Elementary volume of the deformation focus with stress tensor components of a discrete material briquetted in a movable matrix

Результаты моделирования

Моделирование процесса брикетирования и математические расчеты, приведенные в работе [2], позволили установить оптимальные значения давления прессования и выявить закономерности, связанные с распределением напряжений и плотности на контактных поверхностях и в глубине материала. Полученная система уравнений позволяет производить расчет на прочность деталей пресс-формы и выбрать оборудование для осуществления процесса брикетирования:

$$p = \sigma + \tau = \frac{1}{\eta} \sqrt{\sigma_s^2 - 3\tau^2}; \quad (1)$$

$$\tau = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \sin \beta = k \sin \beta; \quad (2)$$

$$\xi = \varepsilon (\delta - \delta_0)^m; \quad (3)$$

$$\frac{3\xi^2}{\eta^2 + 3\xi^2} \ln \frac{\eta}{\eta + \sqrt{3}\xi \tan \beta} - \frac{\sqrt{3} [\eta^2 (1 + \xi) + 3\xi^2]}{\eta (\eta^2 + 3\xi^2)} \beta - \frac{\eta^2}{2(\eta^2 + 3\xi^2)} \ln (tg^2 \beta + 1) + \ln \sqrt{tg^2 \beta + 1} + \frac{z}{r} - \frac{h}{R} = 0, \quad (4)$$

где p – давление прессования; σ – нормальное осевое напряжение; τ – касательное напряжение; σ_s – предел текучести материала; $k = \sigma_s / \sqrt{3}$ – константа пластичности; $\eta = 1 - \xi$, ξ – коэффициент бокового давления; δ – относительная плотность прессовки; ε – относительное удлинение или сжатие; m – показатель степени уплотнения; β – угол пластического трения, определяемый из уравнения деформационного уплотнения (4); h – высота прессовки; z, r – независимые координаты.

Графики зависимостей, приведенные на рис. 3, 4, показывают, что с увеличением относительной плотности стальной и чугунной стружки общий уровень касательных напряжений по объему очага деформации снижается, в то время как нормальные напряжения и давление прессования непрерывно возрастают, что свидетельствует о непрерывной трансформации механической схемы уплотнения в схему всестороннего равномерного или гидростатического сжатия. Силы бокового контактного трения в подвижной матрице при незначительном относительном перемещении трущихся поверхностей ничтожно малы, что свидетельствует о более значимом и многократно превосходя-

щем влиянии величины нормальных напряжений на процесс уплотнения материала. Снижение величины касательных напряжений указывает на направление уплотнения материала в процессе брикетирования – от боковой поверхности матрицы к оси симметрии, при этом общий уровень касательных напряжений на периферии и у основания прессовки неизменно ниже, чем в центре и областях, прилегающих к прессующему пуансону. Соответственно для центральных областей брикета характерна некоторая остаточная пористость, которая по достижении среднего значения плотности 90–95 % практически не влияет на его эксплуатационные характеристики.

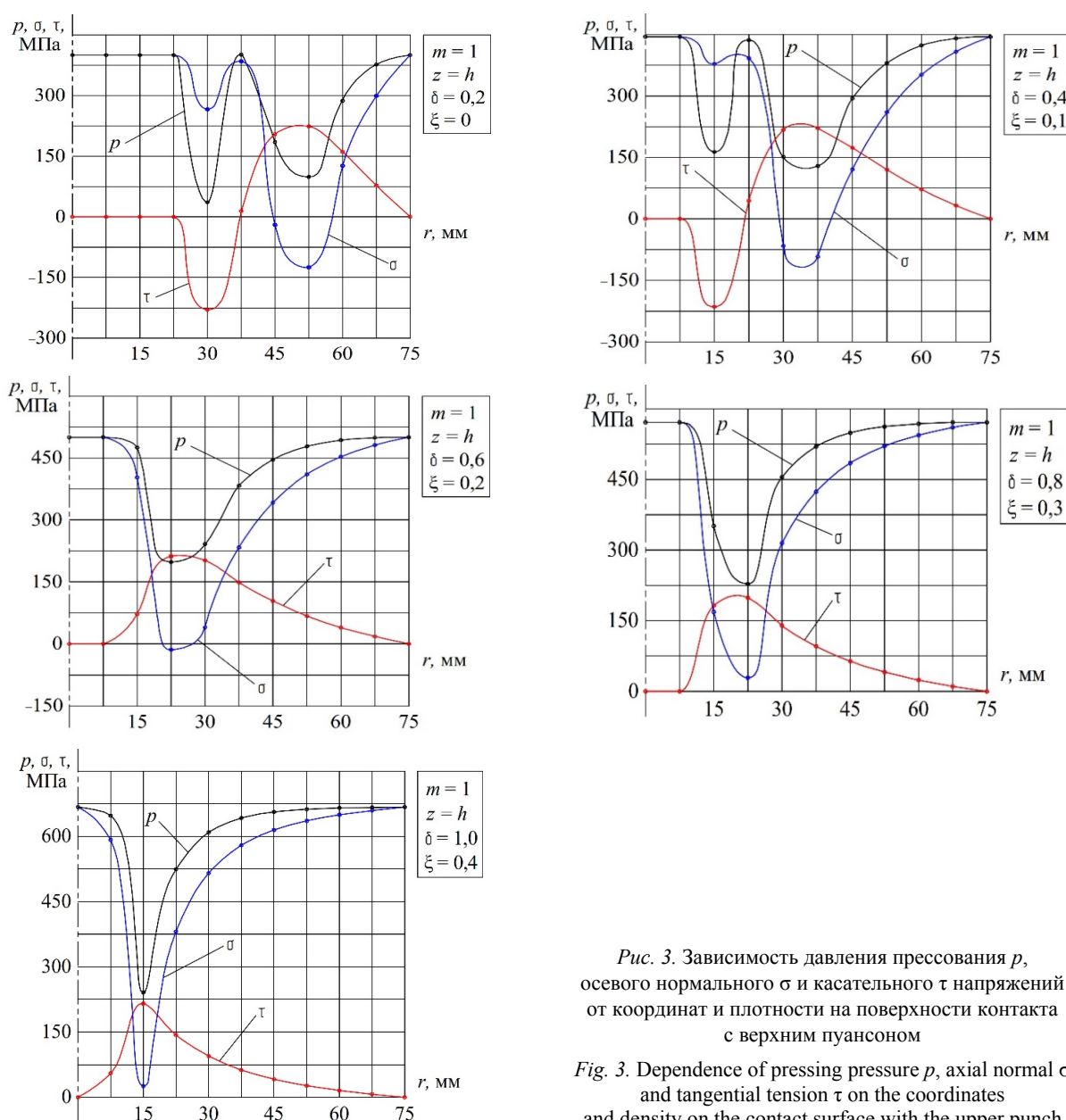


Рис. 3. Зависимость давления прессования p , осевого нормального σ и касательного τ напряжений от координат и плотности на поверхности контакта с верхним пуансоном

Fig. 3. Dependence of pressing pressure p , axial normal σ and tangential tension τ on the coordinates and density on the contact surface with the upper punch

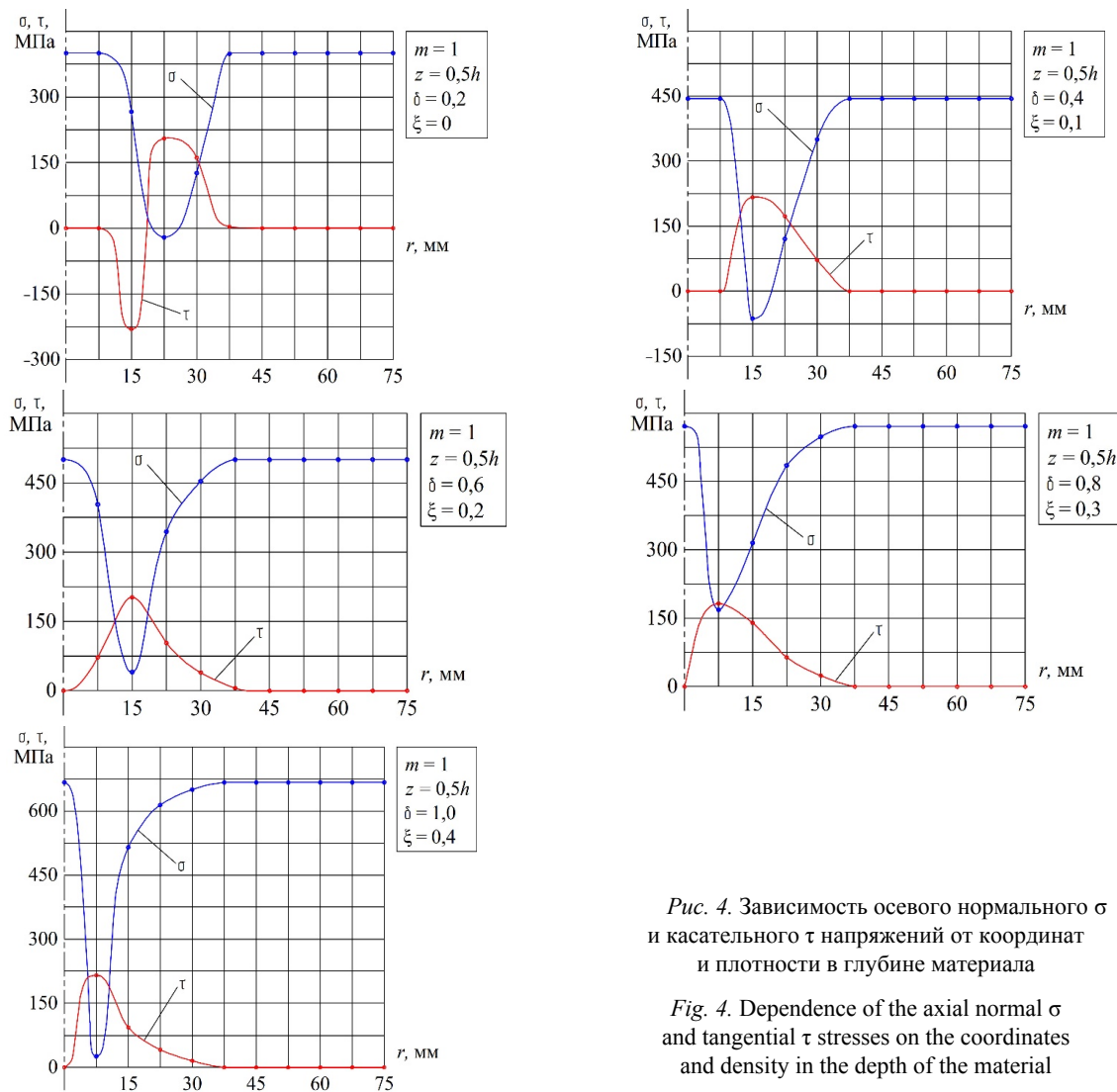


Рис. 4. Зависимость осевого нормального σ и касательного τ напряжений от координат и плотности в глубине материала

Fig. 4. Dependence of the axial normal σ and tangential τ stresses on the coordinates and density in the depth of the material

Результаты экспериментального исследования процесса брикетирования

Определение пористости брикетов проводили методом секущих. Для определения среднего размера пор проводили линии на изображении нетравленной поверхности. Затем подсчитывали размеры пор, попавших на линию, и их количество. Оценку среднего размера пор проводили по формуле

$$\bar{d} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}, \quad (5)$$

где $\bar{d}$ – средний размер пор; x_1 – размер поры под номером 1; x_n – то же под номером n ; n – суммарное количество пор.

Пористость определяли по формуле:

$$\Pi = \frac{\sum l}{\sum L}, \quad (6)$$

где $\sum l$ – суммарная длина пор; $\sum L$ – то же линий.

На рис. 5 показан шлиф брикета из чугуна СЧ25 в его меридиональном сечении с указанием исследуемых участков 1–15 для измерения объемной пористости. Брикет получен под давлением 470 МПа при температуре 800 °С.

В табл. 1 приведены значения объемной пористости по номерам участков среза горяче-прессованного брикета.

Среднее значение пористости составляет 8,5 %, причем пористость по краям брикета 8,3 %, ближе к центру 8,7 %. Соответственно плотность по краям брикета выше, чем в сере-

дине, что соответствует выводам теоретического анализа.



Рис. 5. Шлиф брикета из чугуновой стружки СЧ25 с указанием номеров исследуемых участков для измерения объемной пористости

Fig. 5. Cast iron chip briquette СЧ25 with indication of the numbers of the studied areas for measuring volumetric porosity

Таблица 1
Значения объемной пористости по номерам участков среза горячепрессованного брикета

Values of volumetric porosity by numbers of sections of the cut of the hot-pressed briquette

№ изображения	Пористость, об. %	№ изображения	Пористость, об. %
1	8,3	9	8,7
2	8,3	10	8,6
3	8,3	11	8,5
4	8,4	12	8,4
5	8,5	13	8,3
6	8,6	14	8,3
7	8,7	15	8,3
8	8,7		
Среднее значение пористости, %		8,5	

Таким образом, брикетирование стружки в подвижной матрице приводит к более равномерному распределению плотности по объему брикета и, в конечном итоге, к меньшему значению пористости по сравнению с пористостью 13,3 % брикета, изготовленного при тех же условиях в пресс-форме с неподвижной матрицей [1]. Этот эффект достигается благодаря тому, что в процессе брикетирования прессуемый металл перемещается вместе с матрицей и в направлении перемещения матрицы.

Непрерывный рост давления прессования с увеличением плотности прессовки, согласно уравнению (1), соответствует закону сжатия пористой массы в замкнутом объеме. Синусоидальный характер изменения давления в зависимости от координаты (радиуса) r прессовки обусловлен синусоидальной зависимостью (2) касательного напряжения τ от угла пластического трения β в окружности пластичности (рис. 6), представляющей собой геометрическую интерпретацию условия пластичности Губера–Мизе-

са (1) для металлических пористых материалов. У основания прессовки на поверхности контакта с нижним опорным пуансоном ($z = 0$) величина касательных напряжений не зависит от координаты r , давление по всей площади контакта распределено равномерно.

Давление прессования снижается на 20–25 % по сравнению с аналогичными условиями прессования в неподвижной матрице [1]. Порошковые добавки металлического или неметаллического происхождения заполняют пустоты между более крупными фракциями стружки и таким образом повышают начальную плотность прессовки и градиент роста давления по мере увеличения плотности.



Рис. 6. Окружность пластичности

Fig. 6. Circle of plasticity

Как следует из диаграмм прессования, представленных на рис. 7–9, характер деформационного уплотнения и в целом уровень сопротивления деформированию зависят от исходного состояния материала: чем больше начальная плотность и предел текучести металла, тем интенсивнее нарастает давление прессования; чем выше пластичность металла, тем больше боковое давление и интенсивнее рост осевого давления.

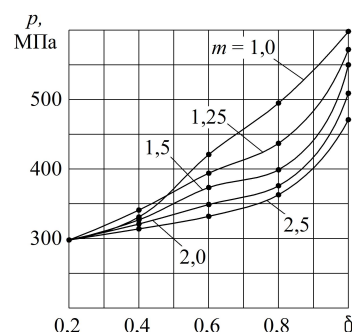


Рис. 7. Зависимость давления прессования от плотности и показателя степени уплотнения

Fig. 7. Dependence of pressing pressure on the density and the index of the degree of compaction

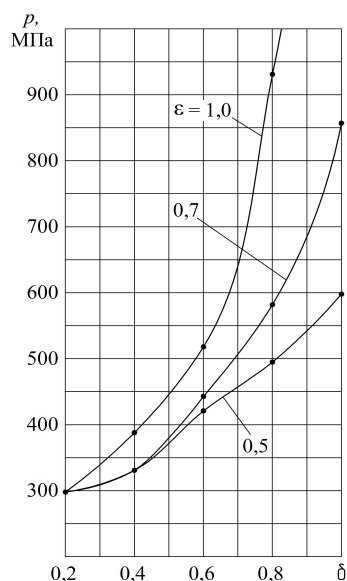


Рис. 8. Зависимость давления прессования от плотности и характеристики пластичности материала

Fig. 8. Dependence of pressing pressure on the density and plasticity characteristics of the material

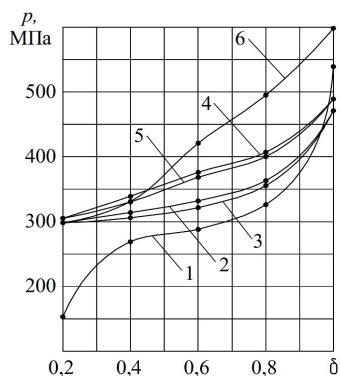


Рис. 9. Расчетные диаграммы прессования:

- 1 – стружка стали 45; 2 – то же стали ШХ15СГ;
3 – то же стали ШХ15СГ с порошком шлама (20 %);
4 – чугунная стружка СЧ25; 5 – стружка СЧ25
с добавкой кокса 3 %; 6 – ФМн78

Fig. 9. Calculated pressing diagrams:

- 1 – shavings of steel 45; 2 – shavings
of steel ШХ15СГ [ShKh15SG]; 3 – shavings
of steel ШХ15СГ [ShKh15SG] with slurry powder (20%);
4 – cast iron shavings СЧ25 [SCh25]; 5 – shavings СЧ25 [SCh25]
with the addition of coke 3 %; 6 – ФМн78 [FMn78]

Диаграмма прессования 1 пластичной среднеуглеродистой стали 45 обладает ярко выраженной площадкой текучести в отличие от малопластичных сталей ШХ15СГ, чугунной стружки СЧ25 и отсеков ферромарганца ФМн78. Появление в расчетной зависимости площадки текучести является следствием того, что на определенном этапе пластическое течение

металла происходит без существенного увеличения сопротивления деформированию. Математически это явление отображается условием пластичности, в которое входят прочностные и пластические характеристики металла и которое представляет собой функциональную зависимость напряженного состояния прессовки от степени деформационного уплотнения.

Характерной особенностью процесса брикетирования отходов черных металлов является большое различие величин бокового и осевого давлений прессования (рис. 10).

В отличие от жидкости, равномерно передающей давление во всех направлениях, в стружке на боковые стенки пресс-формы передается значительно меньшее давление, чем в направлении прессования. Причиной этому является наличие пористости деформируемого тела, которая в закрытой цилиндрической матрице приводит к преобладающему сжатию и пластическому течению металла в осевом направлении. Осевое давление при горячем брикетировании стальной токарной стружки в начале процесса в 27–32 раза больше бокового давления и в 2–3 раза – по окончании процесса. У чугунной стружки и ферросплавов это соотношение изменяется в пределах 13,6–2,2 раза.

Экспериментальное исследование в настоящей работе проводилось с целью проверки способности разработанной математической модели и соответственно созданного на ее основе метода расчета физически адекватно и точно отображать явления и закономерности процесса брикетирования в зависимости от схемы нагружения, свойств материала, температуры, давления и других технологических факторов. Наибольший интерес представляет оптимизация режимов брикетирования по критериям качества брикетов, износа инструмента, силовых и энергетических параметров. Основными критериями качества являются химический состав и плотность брикетов.

Установлено, что оптимальные значения давления прессования стружко-порошковых дисперсий черных металлов при температурах 700–850 °С изменяются в пределах 470–500 МПа, при этом среднее значение плотности брикета составляет 90–95 % плотности компактного материала того же химического состава. От плотности брикета зависят его прочность и способность противостоять воздействию окислительной среды в процессе плавки.

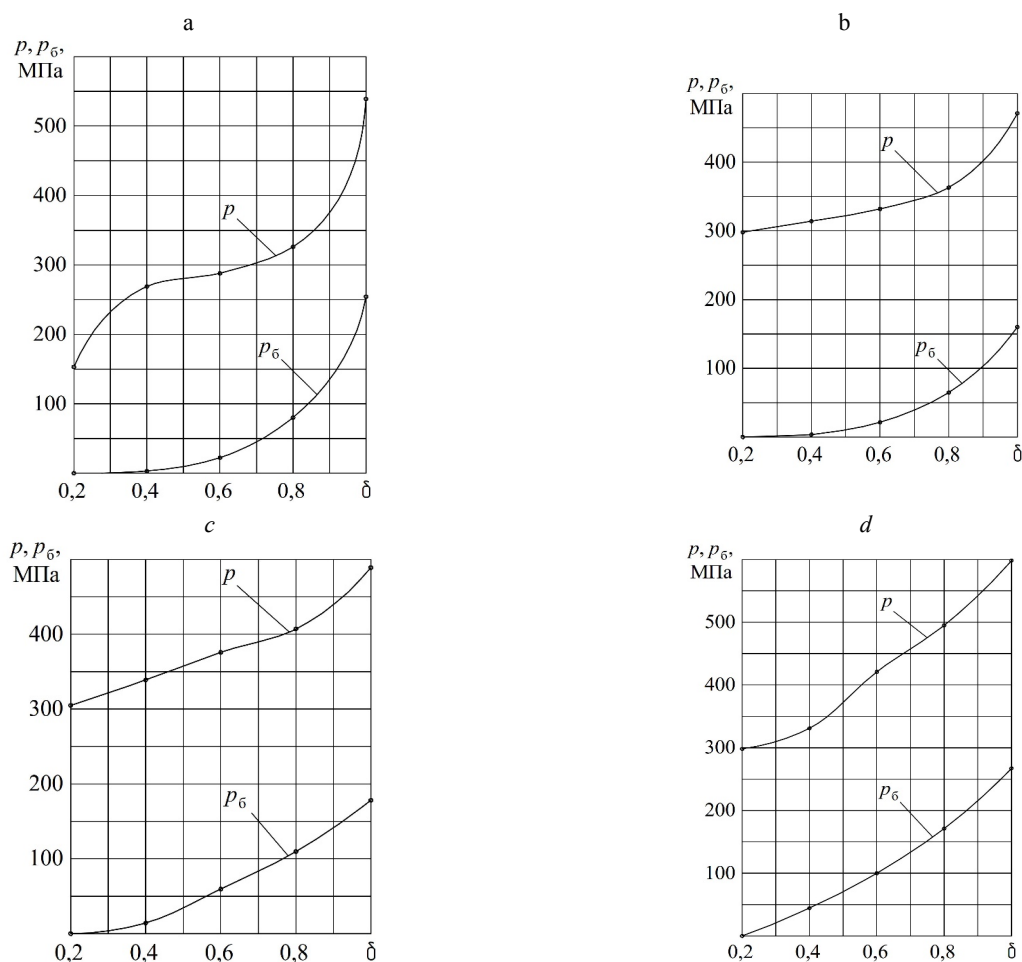


Рис. 10. Диаграммы осевого p и бокового p_6 давления прессования: а – стружка стали 45; б – то же ШХ15СГ; с – чугунная стружка СЧ25; д – отсев ферромарганца ФМн78

Fig. 10. Diagrams of axial p and lateral p_6 pressing pressure: а – shavings of steel 45; б – shavings of steel ШХ15СГ [ShKh15SG]; с – cast iron shavings СЧ25 [SCh25]; д – screening of ferromanganese ФМн78 [FMn78]

Горячепрессованные брикеты, полученные из отходов черных металлов по указанным режимам брикетирования, полностью очищены от масляных загрязнений и СОЖ, не разрушаются при транспортировке, перегрузках и сбрасывании с высоты до 4,8 м. В процессе плавки они полностью погружены в расплав и сверху защищены от окисления слоем шлака.

Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных, соответствующих оптимальным режимам брикетирования, показал, что при правильном и достоверном определении реологических характеристик материала σ_s , ϵ , m достигается высокая сходимость расчетных и экспериментальных данных. Погрешность при определении энергосиловых параметров не превышает 12 %.

Применение в конструкции пресс-формы пневмоцилиндра с требуемым для получения плотного брикета ходом поршня с запрессован-

ной в него матрицей и использование в качестве упругого элемента сжатого воздуха, выдавливаемого в пневмосистему, обеспечивают высокую эксплуатационную стойкость пресс-формы. Ход прессующего пуансона и матрицы устанавливается в зависимости от требуемой степени сжатия прессовки, он не ограничивается конструктивными особенностями пресс-формы и не зависит от термомеханической усталости упругого элемента.

В связи с тем, что направления перемещения матрицы и прессовки совпадают, их относительное перемещение как трущихся поверхностей, а, следовательно, и износ матрицы минимизируются. Прессующий пуансон не входит в матрицу и перемещается с ней с одной и той же скоростью. Исключается износ кромок пуансона с образованием «тянущего» заусенца на прессовке.

Опорный пуансон также находится в благоприятных условиях нагружения при незна-

чительном воздействии сил бокового трения. Зазор между ним и стенками матрицы выбирается минимальным, достаточным для выталкивания готового брикета. Проникание мелких металлических частиц стружки (порошка) в зазор между стенками матрицы и опорного пуансона завершается просыпанием порошка в подпоршневую полость пневмоцилиндра. Периодическая чистка подпоршневой полости производится автоматически при открытии декомпрессионного клапана. Порошок выдувается из подпоршневой полости сжатым воздухом.

ВЫВОДЫ

1. Подводя итоги сказанному, можно констатировать, что технология горячего брикетирования отходов черных металлов в подвижных матрицах в значительной степени превосходит известные аналоги по качеству брикетов, износу инструмента, силовым и энергетическим затратам.

2. В отличие от известных аналогов [1] в новой технологии проведение предварительной операции удаления СОЖ центрифугированием, термовибрационной очисткой и другими способами не требуется. СОЖ удаляется термической возгонкой, частично сжигается в топке печи, частично конденсируется в системе «мокрой» очистки.

3. Дробление стальной стружки на фракции до 15 мм необходимо для повышения ее сыпучести. От размера металлических частиц зависят насыпная плотность шихты и в конечном итоге плотность, размеры и масса готового брикета. Для чугунной стружки, мелкофракционных отсеков ферросплавов, отработанной стальной и чугунной дробы операция дробления не требуется. Весовые соотношения различных компонентов шихты устанавливаются, исходя из условий металлургического процесса плавки и заданного химического состава выплавляемого слитка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дьяконов, О. М. Комплексная переработка стружки и металлосодержащих шламов. Комплексная переработка стружки и металлосодержащих шламов / О. М. Дьяконов. Минск: Технология, 2012. 262 с.
2. Получение высококачественного металлургического сырья из отходов металлообрабатывающего производства / Е. И. Марукович [и др.] // Металлургия машиностроения. 2020. № 2. С. 31–39.
3. Дьяконов, О. М. Брикетирование структурно-неоднородных пористых материалов / О. М. Дьяконов // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2020.

Т. 65. № 2. С. 205–214. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-205-214>.

4. Дьяконов, О. М. Горячее прессование стружки и стружко-порошковых смесей / О. М. Дьяконов // Порошковая металлургия. 2010. Вып. 33. С. 25–35.
5. Дорофеев, Ю. Г. Использование брикетов из стружки для плавки металла / Ю. Г. Дорофеев, В. П. Матвеев, И. Н. Никитенко. М.: ГОСИНТИ, 1964. 61 с.
6. Дорофеев, Ю. Г. Получение брикетов из стружки и шлама / Ю. Г. Дорофеев [и др.] // Сталь. 1966. № 10. С. 964–967.
7. Дорофеев, Ю. Г. Динамическое горячее прессование пористых материалов / Ю. Г. Дорофеев. М.: Наука, 1968. 120 с.
8. Лурье, Л. А. Брикетирование в черной и цветной металлургии / Л. А. Лурье. М.: Metallurgizdat, 1963. 324 с.
9. Равич, Б. М. Брикетирование в цветной и черной металлургии / Б. М. Равич. М.: Металлургия, 1975. 229 с.
10. Проблемы получения и использования брикетированных металлоотходов / Н. А. Свидуневич [и др.] // Литье и металлургия. 2003. № 3. С. 110–112. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2003-3-110-112>.

Поступила 20.06.2023

Подписана в печать 22.08.2023

Опубликована онлайн 29.09.2023

REFERENCES

1. Dyakonov O. M. (2012) *Complex Processing of Chips and metal-containing sludge*. Minsk, Tekhnologiya Publ. 262 (in Russian).
2. Marukovich E. I., Panteleenko F. I., D'yakonov O. M., Litvinko A. A., Sereda V. Yu. (2020) Obtaining High-quality metallurgical Raw Materials from Wastes of Metal-processing Production. *Metallurgiya Mashinostroeniya = Metallurgy of Machinery Building*, (2), 31–39 (in Russian).
3. Dyakonov O. M. Briquetting of Structurally Inhomogeneous Porous Materials. *Vestsi Natsyynal'nai Akademii Navuk Belarusi. Seryya Fizika-Tekhnichnykh Navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical Series*, 2020, 65 (2), 205–214 <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-205-214> (in Russian).
4. Dyakonov O. M. (2010) Hot Pressing of Chips and Chip-powder Mixtures. *Poroshkovaya Metallurgiya = Powder Metallurgy*, (33), 25–35 (in Russian).
5. Dorofeev Yu. G., Matveev V. P., Nikitenko I. N. (1964) *Using Chip Briquettes for Melting Metal*. Moscow, Publishing House of State Research Institute of Scientific and Technical Information. 61 (in Russian).
6. Dorofeev Yu. G. [et al.] (1966) Obtaining Briquettes from Chips and Sludge. *Stal [Steel]*, (10), 964–967 (in Russian).
7. Dorofeev Yu. G. (1968) *Dynamic hot Pressing of Porous Materials*. Moscow, Nauka Publ. 120 (in Russian).
8. Lurie L. A. (1963) *Briquetting in Ferrous and Non-Ferrous Metallurgy*. Moscow, Metallurgizdat Publ. 324 (in Russian).
9. Ravich B. M. (1975) *Briquetting in Non-Ferrous and Ferrous Metallurgy*. Moscow, Metallurgiya Publ. 229 (in Russian).
10. Svidunovich N. A., Pisarenko L. Z., Kuis D. V., Bobrov J. P. (2003) Problems of Production and Using of Briquetted Metal Discard. *Litiya i Metallurgiya = Foundry Production and Metallurgy*, (3), 110–112. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2003-3-110-112> (in Russian).

Received: 20.06.2023

Accepted: 22.08.2023

Published online: 29.09.2023