

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-4-279-288>

УДК 621.77.014

Исследование влияния схемы и режимов прессования стальной и чугунной стружки на энергосиловые параметры процесса брикетирования

Докт. техн. наук, проф. О. М. Дьяконов¹⁾, инж. А. А. Литвинко¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. В работе приведены результаты экспериментального исследования процесса горячего брикетирования мелкофракционных отходов черных металлов в пресс-форме с подвижной матрицей. Установлено, что для достижения требуемого значения плотности готовых брикетов 90–95 % (один из основных критериев качества современного металлургического производства) в температурном диапазоне нагрева шихты 700–850 °С давление прессования достигает значений 470–500 МПа. Применение пресс-форм с подвижной матрицей обеспечивает снижение давления и усилия прессования пластичных низко- и среднеуглеродистых сталей до 45 %, высокоуглеродистых малопластичных и труднодеформируемых – до 35 %, чугунов – до 25 %. Удельная работа деформации (энергетические затраты) при нагреве отходов черных металлов до температур неполной горячей деформации снижается в 2,3–2,5 раза. По сравнению с брикетированием в неподвижной матрице при тех же температурах удельная работа деформации снижается на 15–20 %. Процесс деформационного уплотнения дискретного пористого тела протекает при минимальном воздействии сил бокового контактного трения, так как фронт уплотнения (уплотненный слой стружки) перемещается совместно с матрицей в одном и том же направлении при минимальном относительном сдвиге поверхностей трения. Характер деформационного уплотнения и уровень сопротивления деформированию зависят от исходного состояния материала: чем выше пластичность металла, тем интенсивнее увеличивается плотность прессовки; чем больше начальная плотность и предел текучести, тем большее давление прессования необходимо приложить для достижения одного и того же значения плотности. Мелкофракционные 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.

Ключевые слова: прессование, горячее брикетирование, пресс-форма, подвижная матрица, отходы, черные металлы, трение, температура, давление, усилие, работа деформации

Для цитирования: Дьяконов, О. М. Исследование влияния схемы и режимов прессования стальной и чугунной стружки на энергосиловые параметры процесса брикетирования / О. М. Дьяконов, А. А. Литвинко // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 4. С. 279–288. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-4-279-288>

Research of the Influence of the Scheme and Modes of Pressing Steel and Cast Iron Chips on the Energy-Power Parameters of the Briquetting Process

О. М. Dyakonov¹⁾, А. А. Litvinko¹⁾

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

Abstract. The paper presents the results of an experimental study of the process of hot briquetting of fine-grained ferrous metal waste in a mold with a movable matrix. It has been established that in order to achieve the required density of finished

Адрес для переписки

Дьяконов Олег Михайлович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 22/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: + 375 17 293-91-91
deaconco@mail.ru

Address for correspondence

Dyakonov Oleg Mikhaylovich
Belarusian National Technical University
22/2, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: + 375 17 293-91-91
deaconco@mail.ru

briquettes of 90–95 % (one of the main quality criteria for modern metallurgical production), in the temperature range of heating the charge of 700–850 °C, the pressing pressure reaches values of 470–500 MPa. The use of molds with a movable matrix ensures reduction in pressure and pressing force of ductile low- and medium-carbon steels up to 45 %, high-carbon, low ductility and difficult to deform - up to 35 %, cast iron – up to 25 %. The specific work of deformation (energy costs) when heating waste ferrous metals to temperatures of incomplete hot deformation is reduced by 2.3–2.5 times. Compared to briquetting in a fixed matrix at the same temperatures, the specific work of deformation is reduced by 15–20 %. The process of deformation compaction of a discrete porous body occurs with minimal impact of lateral contact friction forces, since the compaction front (compacted chip layer) moves together with the matrix in the same direction with minimal relative displacement of the friction surfaces. The nature of deformation compaction and the level of resistance to deformation depend on the initial state of the material: the higher the plasticity of the metal, the more intense the compaction density increases; the higher the initial density and yield strength, the greater the pressing pressure must be applied to achieve the same density value. Fine additives of metallic or non-metallic origin fill the voids between larger fractions of chips and thus increase the initial compaction density and the pressure gradient as density increases.

Keywords: pressing, hot briquetting, mold, movable matrix, waste, ferrous metals, friction, temperature, pressure, force, work of deformation

For citation: Dyakonov O. M., Litvinko A. A. (2024) Research of the Influence of the Scheme and Modes of Pressing Steel and Cast Iron Chips on the Energy-Power Parameters of the Briquetting Process. *Science and Technique*. 23 (4), 279–288. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-4-279-288> (in Russian)

Введение

Определение энергозатрат и усилия прессования стружки черных металлов является одним из ключевых вопросов, возникающих при выборе технологии и оборудования для осуществления процесса брикетирования. Как было показано в работах [1, 2], наиболее оптимальным является применение пресс-форм с подвижной матрицей, обеспечивающей снижение энергосиловых параметров, износа инструмента и повышение качества брикетов. Известные исследования процесса брикетирования стальной и чугунной стружки [3–10] проведены в пресс-формах с неподвижной матрицей, недостатком которых являются большие величины сил бокового контактного трения, которые приводят к повышению энергосиловых параметров и износу рабочих деталей пресс-формы.

Цель настоящего исследования состоит в определении влияния схемы и режимов прессования стружки на энергосиловые параметры процесса брикетирования, оптимизации режимов брикетирования, создание пресс-формы, обеспечивающей снижение износа ее рабочих деталей.

Сравнительный анализ и выбор схемы нагружения

На рис. 1 показаны схемы нагружения прессовки 3 в пресс-формах с неподвижной

и подвижной матрицей 2. Погонная нагрузка, действующая со стороны неподвижной матрицы на прессовку, направлена вверх, т. е. препятствует процессу прессования (рис. 1а), а со стороны подвижной матрицы – вниз, т. е. способствует процессу прессования (рис. 1б). И в том, и в другом случае сила бокового контактного трения $F_{тр}$ направлена вверх. Таким образом, прессующий пуансон пресс-формы преодолевает силу сопротивления деформированию со стороны прессовки и силу бокового контактного трения.

Брикетирование стружки отличается большим ходом подвижных частей пресса и пресс-формы. Объем столба стружки уменьшается в 5–8 раз, в связи с этим снижение величины и работы сил трения является чрезвычайно важным направлением совершенствования данной технологии. Фронт уплотнения стружки распространяется от подвижного пуансона к неподвижному по закону волны сжатия. В пресс-форме с неподвижной матрицей уплотненный слой стружки перемещается вместе с прессующим пуансоном при максимально возможном сдвиге контактирующих с матрицей поверхностей и соответственно максимальной силой трения. Частицы металла проникают в зазор между матрицей 2 и пуансоном 1, что приводит к затуплению кромок пуансона и образованию клиновидного тянущего заусенца на прессовке.

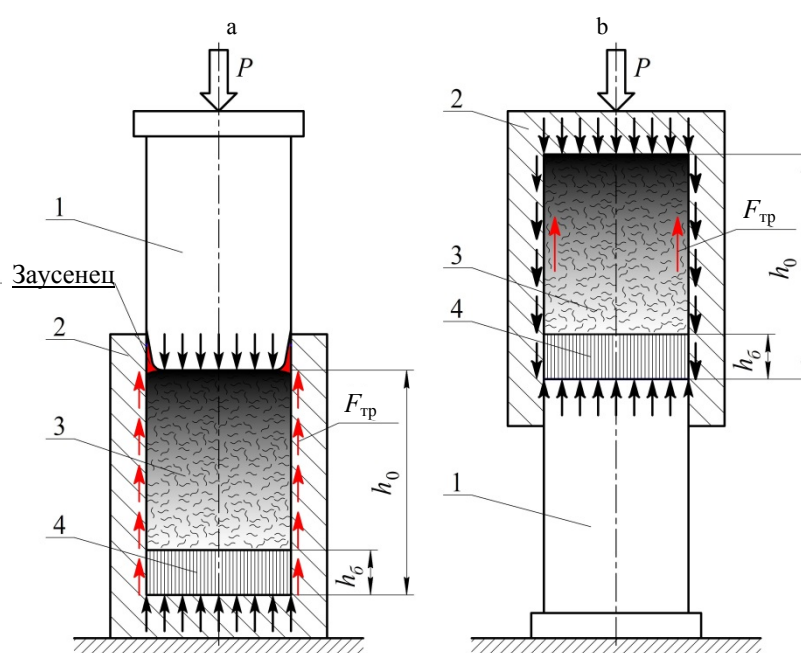


Рис. 1. Схемы прессования стружки черных металлов в пресс-форме: а – с неподвижной матрицей; б – с подвижной матрицей

Fig. 1. Schemes for pressing ferrous metal chips in mold: a – a fixed matrix; b – with a movable matrix

Увеличение заусенца в конечном итоге приводит к заклиниванию пресс-формы, вплоть до отрыва пуансона от штока пресса по их резьбовому соединению. В пресс-форме с подвижной матрицей уплотненный слой перемещается вместе с матрицей при минимальном относительном сдвиге поверхностей контактного трения и минимальном значении сил трения. Энергосиловые параметры процесса брикетирования и износ деталей пресс-формы сведены к минимуму.

Оборудование и инструмент для проведения экспериментального исследования

Опытная установка для исследования процесса горячего брикетирования была создана на базе гидравлического пресса Д2434В усилием 2500 кН. Пресс оборудован электроконтактным манометром (ЭКМ-ДМ2005фСг1Ех) для измерения давления масла в главном гидроцилиндре и остановки пресса по достижении заданного давления, механической линейкой со стрелкой на ползуне для измерения хода ползуна, а также нижним гидравлическим выталкивателем усилием 600 кН.

Нагрев образцов стружки и других отходов металлообработки осуществляли в камерной муфельной печи СНОЛ-1,6.2,5.1/11-И2М (до 1100 °С, керамика, 4 л) в стальных мерных стаканах, обеспечивающих засыпку горячей шихты в пресс-форму с заданной температурой и в требуемом объеме. В процессе нагрева в ограниченном пространстве камеры печи создавалась защитная углеводородная атмосфера в результате термической возгонки масляной компоненты СОЖ.

Практически для всех материалов, выбранных для проведения экспериментального исследования, температурный интервал нагрева составлял 700–850 °С. Нагрев осуществляли до полного удаления из шихты жидкой фазы. В результате адсорбции пироуглерода на поверхности частиц толщина покрытия составляла 0,5–0,7 мм. Углеродное покрытие помимо защитных функций выполняло роль смазки в процессе горячего прессования. Требуемую величину давления прессования и конечную плотность брикета определяли по результатам механических испытаний брикетов на прочность.

Пресс-форма для проведения испытаний устанавливалась на столе пресса с привязкой нижнего опорного пуансона к гидравлическому выталкивателю. Внешний вид пресс-формы показан на рис. 2, чертеж пресс-формы – на рис. 3.



Рис. 2. Внешний вид пресс-формы горячего брикетирования с подвижной матрицей
Fig. 2. Appearance of a hot briquetting mold with a movable matrix

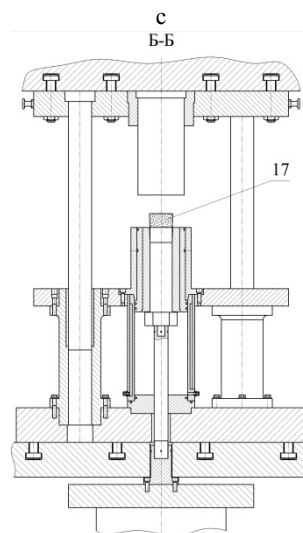
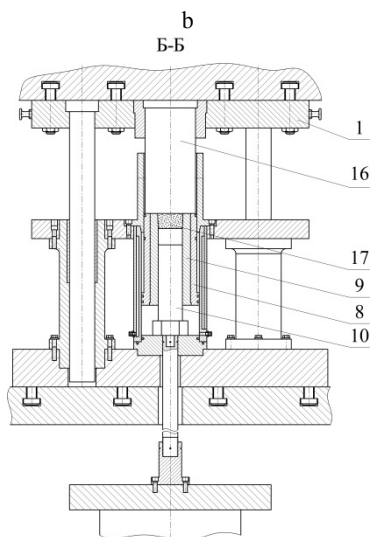
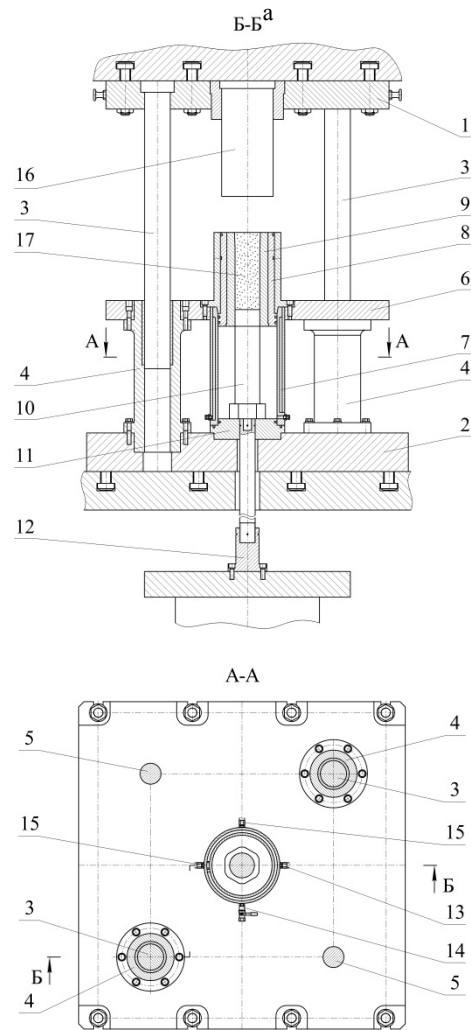


Рис. 3. Пресс-форма горячего брикетирования: а – в исходном положении; б – в момент окончания процесса брикетирования; с – в момент выталкивания брикета из матрицы

Fig. 3. Hot briquetting mold: a – in the initial position; b – at the end of the briquetting process; c – at the moment when the briquette is ejected from the matrix

Пресс-форма (рис. 3а) состоит из верхней подвижной 1 и нижней опорной 2 плит с двумя направляющими колонками 3, пропущенными в направляющие втулки 4. На втулках 4 и стойках 5 установлен стол 6. В центре по оси симметрии плит 1, 2 и стола установлен пневмоцилиндр 7 с поршнем 8. В поршень запрессована матрица 9. В отверстие матрицы входит выталкивающий пуансон 10, опирающийся своим фланцем на цилиндрическую опору 11, при этом хвостовик пуансона 10 связан резьбовым соединением с гидравлическим выталкивателем 12.

Подпоршневая полость пневмоцилиндра сообщена с пневмосистемой компрессорной установки посредством штуцера 13. Для сброса давления воздуха при наладочных работах и необходимости очистки пресс-формы от просыпаний металлического порошка служит декомпрессионный клапан 14.

К верхней плите 1 прикреплен прессующий пуансон 16, диаметр которого немногим меньше диаметра поршня, но значительно больше диаметра отверстия матрицы.

Пресс-форма работает следующим образом. При сообщении подпоршневой полости пневмоцилиндра с пневмосистемой компрессорной установки поршень 8, а вместе с ним и матрица 9, поднимаются вверх до упора под давлением 0,4–0,6 МПа (рис. 3а). Металлическая стружка 17, нагретая до температуры 700–850 °С, загружается в открытую полость матрицы 9, заполняя ее в полном объеме. При рабочем ходе ползуна пресса пуансон 16 совершает мягкую стыковку с опирающимся на пневмоопору поршнем. Под давлением пуансона 16 (470–500 МПа) формирующая полость матрицы уменьшается в объеме, происходит процесс прессования стружки 17 (рис. 3б). Схема нагружения соответствует схеме одностороннего прессования – прессовка находится в состоянии всестороннего неравномерного сжатия.

По окончании процесса прессования (рис. 3б) ползун пресса вместе с верхней плитой 1 и пуансоном 16 отводится в исходное верхнее положение. Одновременно брикет 17 выталкивается из матрицы пуансоном 10 (рис. 3с). Для снижения усилия выталкивания боковая поверхность матрицы 9 выполнена с уклоном 3°.

Поршень 8 поднимается в исходное положение фланцем пуансона 10 и давлением сжатого воздуха. При опускании пуансона 10 в исходное положение поршень 8 удерживается в верхнем положении давлением сжатого воздуха (рис. 3а). Таким образом рабочий цикл работы пресса и пресс-формы завершается.

Характерной особенностью работы пресс-формы, в отличие от известных аналогов [3], является совместное перемещение пуансона 16 и матрицы с одной и той же скоростью вплоть до получения плотного брикета 17. Пуансон 16 запирает формирующую полость матрицы 9, но не входит в нее, поэтому исключается износ кромок пуансона 16 с образованием клиновидного заусенца на прессовке.

Минимизируется износ матрицы, которая перемещается в том же направлении, что и прессуемый металл, совместное перемещение происходит при минимальном относительном сдвиге трущихся поверхностей. Неподвижный опорный пуансон 10 также находится в благоприятных условиях нагружения под воздействием сил нормального давления и незначительном воздействии сил бокового трения. Зазор между ним и стенками матрицы 9 выбирается минимальным, достаточным для выталкивания готового брикета 17. Проникание мелких металлических частиц в зазор между стенками матрицы 9 и пуансона 10 завершается просыпанием порошка в подпоршневую полость пневмоцилиндра 7. Периодическая чистка пресс-формы производится автоматически при открытии декомпрессионного клапана 14. Порошок выдувается из подпоршневой полости сжатым воздухом.

Ход прессующего пуансона и матрицы устанавливается в зависимости от требуемой степени сжатия прессовки. Благодаря применению пневмосистемы он не ограничивается конструктивными особенностями пресс-формы и не зависит от термомеханической усталости упругого элемента. Применение пневмоцилиндра с требуемым для получения плотного брикета ходом подвижных частей и использование в качестве упругого элемента сжатого воздуха, выдавливаемого в пневмосистему, обеспечивают высокую эксплуатационную стойкость пресс-формы.

Пресс-форма оборудована системами внутреннего и внешнего охлаждения. В процессе прессования матрица заперта прессовкой и верхним пуансоном, поэтому сжатый воздух не имеет возможности выхода из подпоршневой полости. Однако при обратном холостом ходе пуансона при выталкивании брикета холодный воздух устремляется в зазор между опорным пуансоном и боковой стенкой матрицы, продувая и охлаждая формирующую полость изнутри. Нагретый воздух (~70 °С) выходит в атмосферу.

Внешнее охлаждение обеспечивается водяной рубашкой в корпусе пневмоцилиндра 7. Вода циркулирует в системе посредством впускного и выпускного штуцеров 15.

Результаты экспериментального исследования

На рис. 4–9 представлены экспериментальные диаграммы прессования, полученные методом поэтапного деформирования исследуемых материалов в пресс-форме с подвижной

матрицей. Диаграммы представляют собой зависимости усилия деформирования P от рабочего хода прессующего пуансона (путь деформирования) Δh . Исходные данные для проведения экспериментального исследования: диаметр отверстия матрицы (брикета) 60 мм; высота засыпки в пресс-форму 150 мм; плотность брикета – не менее 90 % плотности компактного материала того же химсостава при отсутствии СОЖ. Технические условия и режимы брикетирования приведены в табл. 1, где ρ_0 – плотность засыпки материала в пресс-форму; T – температура нагрева; p_{max} – максимальное давление прессования, при котором достигается заданная плотность брикета $\rho_{бр}$; m – масса брикета; A – работа деформации; W – удельная работа деформации ($W = A/m$). Давление прессования определяется как отношение усилия к площади отверстия формирующей полости матрицы, работа деформации – как площадь силовой эпюры прессования. Удельная работа деформации равна работе, отнесенной к единице массы брикета.

Таблица 1

Режимы брикетирования и техническая характеристика металлургических брикетов
Briquetting modes and technical characteristics of metallurgical briquettes

Материал (стружка)	ρ_0 , кг/м ³	T , °С	p_{max} , МПа	Размеры брикета, мм		$\rho_{бр}$, кг/м ³	m , кг	W , кДж/кг
				d	h			
Стружка стали 45 (-20 мм)	900	700	470	60	19,3	7000	0,382	157
Стружка стали 45 (-20 мм)	900	20	650	60	24,6	5500	0,382	392,5
Стружка стали ШХ15СГ (-20 мм)	900	750	480	60	19,3	7000	0,382	199
Чугунная стружка СЧ25 (-10 мм)	1300	800	470	60	30	6500	0,551	172
Чугунная стружка СЧ25 (-10 мм)	1300	20	636	60	40	4800	0,551	396
Отсев ферромарганца ФМн78 (-10 мм)	2945	850	500	60	70	6300	1,25	71

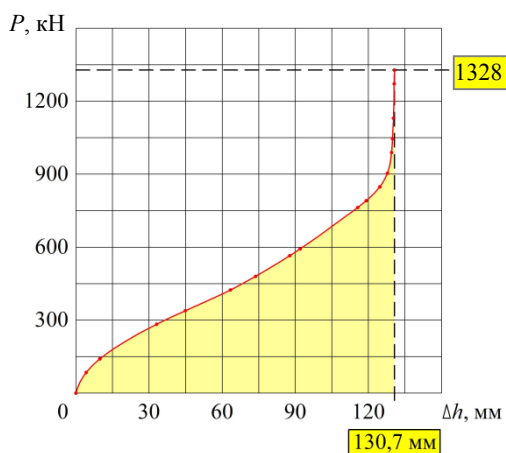


Рис. 4. Диаграмма горячего прессования стружки стали 45

Fig. 4. Hot pressing diagram of steel chips 45

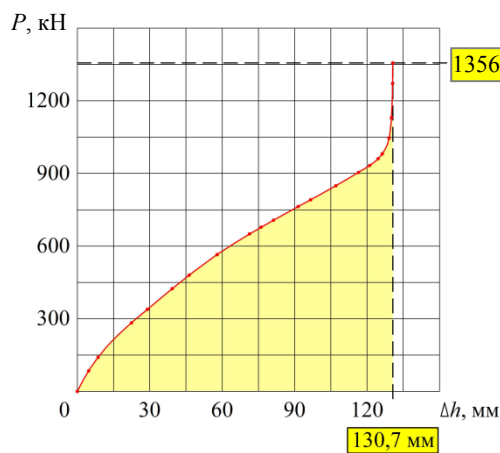


Рис. 5. Диаграмма горячего прессования стружки стали ШХ15СГ

Fig. 5. Hot pressing diagram of steel chips ШХ15СГ [ShKh15SG]

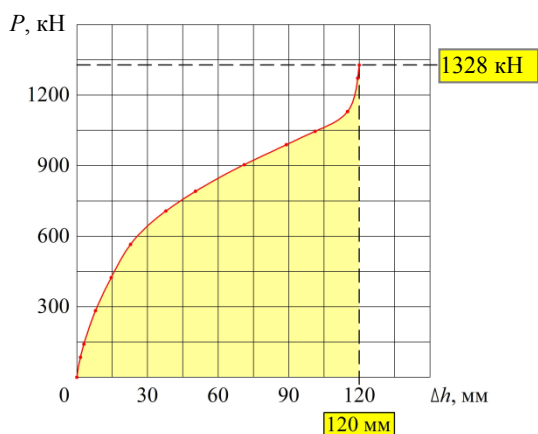


Рис. 6. Диаграмма горячего прессования чугуной стружки СЧ25

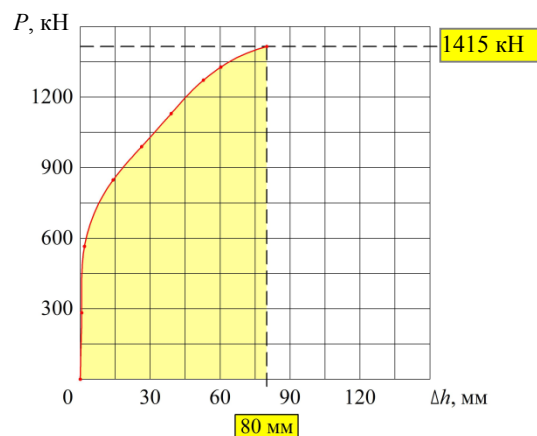
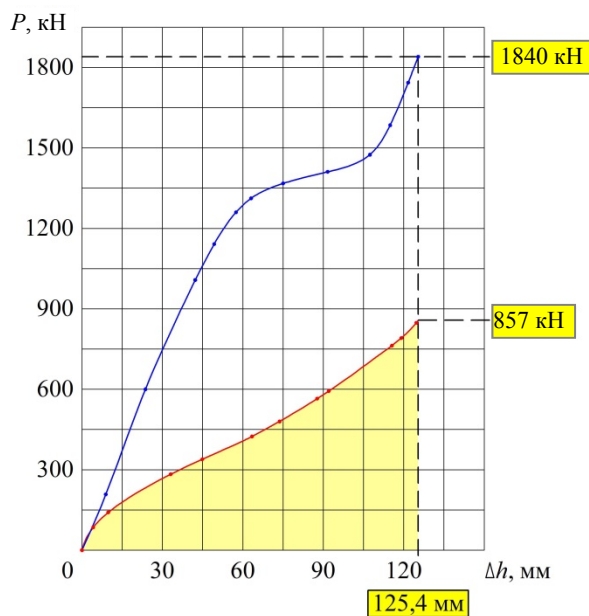


Рис. 7. Диаграмма горячего прессования отсева ферромарганца ФМн78

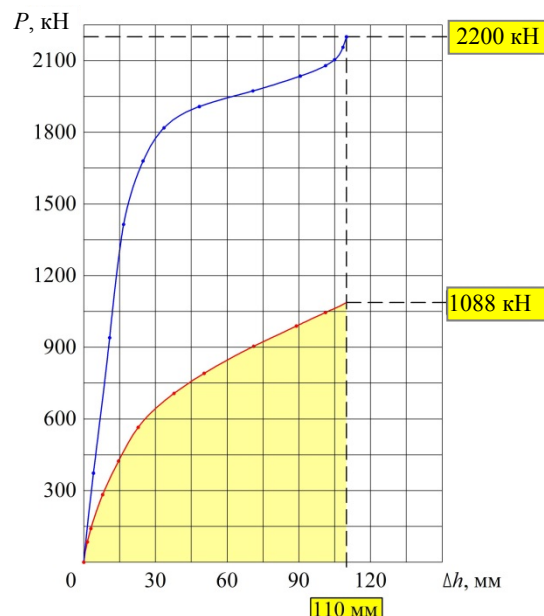
Fig. 6. Hot pressing diagram of cast iron shavings СЧ25 [SCh25] Fig. 7. Hot pressing diagram of ferromanganese ФМн78 [FMn78] screening



— холодное прессование; — горячее прессование

Рис. 8. Диаграмма холодного прессования стружки стали 45

Fig. 8. Cold pressing diagram of steel chips 45



— холодное прессование; — горячее прессование

Рис. 9. Диаграмма холодного прессования чугуной стружки СЧ25

Fig. 9. Cold pressing diagram of cast iron chips СЧ25 [SCh25]

Анализ диаграмм показывает, что на первоначальном этапе нагружения наблюдается рост усилия прессования за счет структурного уплотнения материала и его упругого сжатия. Далее происходят фрагментация хрупких частиц и заполнение пустот, что сопровождается некоторым снижением градиента роста усилия на непродолжительном отрезке рабочего хода прессующего пуансона. После этого наступает

этап пластической деформации тела, сопровождаемый резким ростом усилия деформирования. Для материалов с небольшой плотностью засыпки в пресс-форму путь деформирования увеличивается, процесс прессования становится более продолжительным. С повышением прочностных характеристик материала и снижением пластических при совершении одной и той же работы деформации (равенство

площадей силовых эпюр прессования и всех прочих условий деформации) путь деформирования уменьшается, а величина усилия по окончании процесса возрастает. Для стружки черных металлов при горячей деформации по сравнению с холодной удельная работа снижается в 2,3–2,5 раза (рис. 8, 9).

Кривые уплотнения, производные от диаграмм прессования, приведены на рис. 10.

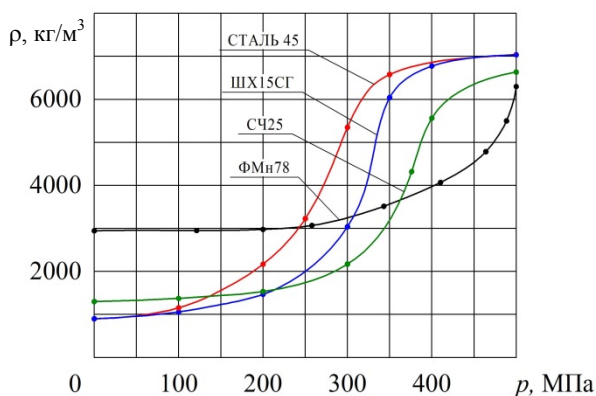


Рис. 10. Кривые уплотнения исследуемых материалов
Fig. 10. Compaction curves of the studied materials

Из графиков видно, что характер деформационного уплотнения и уровень сопротивления деформированию зависят от исходного состояния материала: чем выше пластичность металла (сталь 45), тем интенсивнее увеличивается плотность прессовки; чем больше начальная плотность и предел текучести (сталь ШХ15СГ, чугун СЧ25, ферромарганец ФМн78), тем большее давление прессования необходимо приложить для достижения одного и того же значения плотности. Мелкофракционные 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. Для достижения требуемого значения плотности готовых брикетов 90–95 % из стружки черных металлов (один из основных критериев качества современного металлургического производства) в температурном диапазоне нагрева шихты

700–850 °С давление прессования достигает значений 470–500 МПа.

У стружки пластичных сталей на определенном этапе увеличение плотности происходит без существенного повышения давления прессования. Появление на расчетных диаграммах площадки текучести математически объясняется самой структурой уравнения (условия) пластичности [1], в состав которого входит показатель пластичности ϵ (относительное сжатие), причем чем больше этот показатель, тем более выраженной и протяженной становится площадка текучести. Так, диаграмма прессования стружки пластичной среднеуглеродистой стали 45 обладает ярко выраженной площадкой текучести в отличие от стружки малопластичных стали ШХ15СГ, чугуна СЧ25 и ферромарганца ФМн78.

Сравнительный анализ экспериментальных диаграмм прессования стружки в прессформах с подвижной и неподвижной матрицей (рис. 11, 12) наглядно демонстрирует преимущества применения подвижной матрицы. Снижение давления и усилия деформирования стружки пластичных низко- и среднеуглеродистых сталей доходит до 45 %; высокоуглеродистых малопластичных и труднодеформируемых – до 35 %; чугунной стружки – до 25 %. По сравнению с брикетированием в неподвижной матрице [3, 4] удельная работа деформации снижается на 15–20 %.

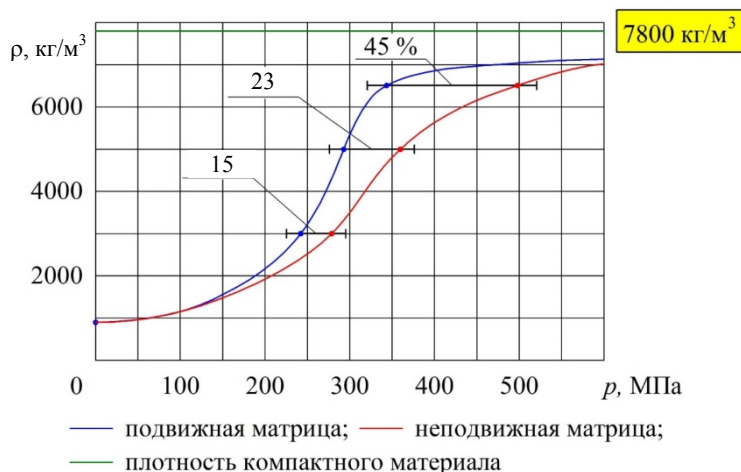


Рис. 11. Кривые уплотнения стружки стали 45 в подвижной и неподвижной матрицах

Fig. 11. Chip compaction curves of steel 45 in movable and fixed matrices

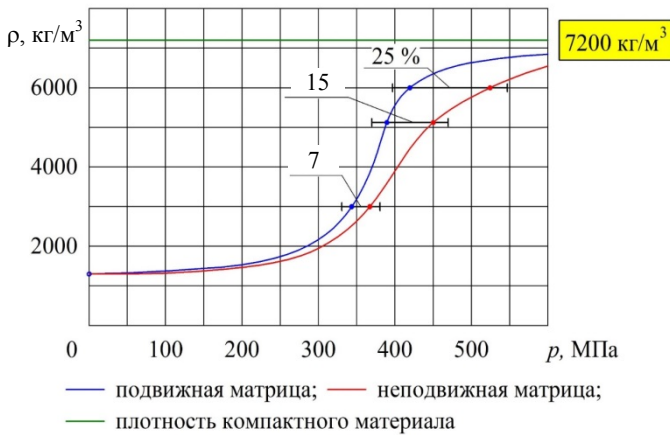


Рис. 12. Кривые уплотнения чугунной стружки СЧ25 в подвижной и неподвижной матрицах

Fig. 12. Compaction curves of cast iron chips СЧ25 in movable and fixed matrices

Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных

На рис. 13, 14 представлены экспериментальные и расчетные зависимости плотности прессовки от давления прессования для стальной и чугунной стружки.

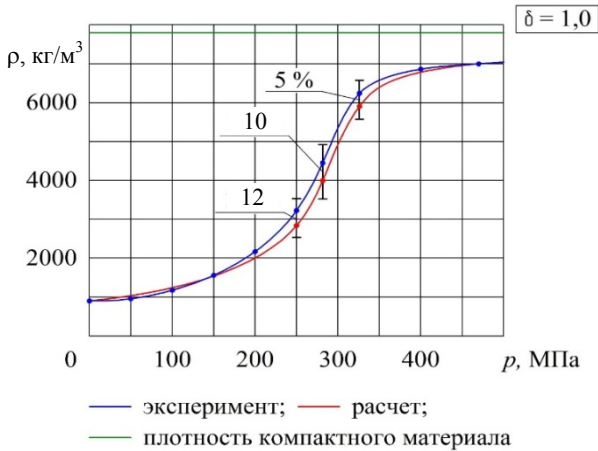


Рис. 13. Экспериментальные и расчетные зависимости плотности прессовки от давления прессования стружки стали 45

Fig. 13. Experimental and calculated dependences of compaction density on compaction pressure of steel chips 45

Основой для построения графиков расчетным путем являются уравнения физико-математической модели [1]. Из графиков видно, что погрешность расчетов не превышает 12 %.

Таким образом доказано, что уравнения разработанной физико-математической модели процесса деформационного уплотнения дискретных металлических материалов, применяемые совместно с экспериментально-анали-

тическим методом определения структурно-реологических характеристик материалов, позволяют достигнуть высокой сходимости расчетных и экспериментальных данных. Универсальность модели заключается в том, что эти же уравнения и характеристики для тех же материалов при всех прочих равных условиях можно использовать при расчетах процессов брикетирования в пресс-формах других размеров и другой геометрической формы.

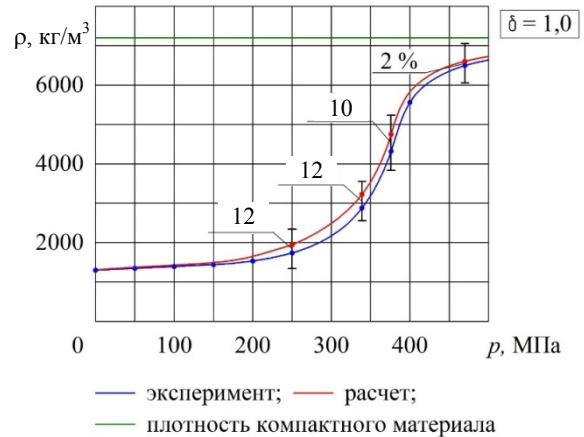


Рис. 14. Экспериментальные и расчетные зависимости плотности прессовки от давления прессования чугунной стружки СЧ25

Fig. 14. Experimental and calculated dependences of compaction density on compaction pressure of cast iron chips СЧ25

ВЫВОДЫ

1. В результате проведенного экспериментального исследования процесса горячего брикетирования стальной и чугунной стружки в пресс-форме с подвижной матрицей установлено, что для достижения требуемого значения плотности готовых брикетов 90–95 % (один из основных критериев качества современного металлургического производства) в температурном диапазоне нагрева шихты 700–850 °С давление прессования достигает значений 470–500 МПа.

2. Характер деформационного уплотнения и уровень сопротивления деформированию зависят от исходного состояния материала: чем выше пластичность металла, тем интенсивнее увеличивается плотность прессовки; чем больше начальная плотность и предел текучести, тем большее давление прессования необходимо приложить для достижения одного и того же значения плотности. Мелкофракционные 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.

3. У стружки пластичных сталей на определенном этапе увеличение плотности происходит без существенного повышения давления прессования. Появление на расчетных диаграммах площадки текучести математически объясняется самой структурой уравнения (условия) пластичности, в состав которого входит показатель пластичности ε (относительное сжатие), причем чем больше этот показатель, тем более выраженной и протяженной становится площадка текучести.

4. Применение пресс-форм с подвижной матрицей в процессах брикетирования дискретных отходов металлообработки обеспечивает снижение давления и усилия прессования пластичных низко- и среднеуглеродистых сталей до 45 %; высокоуглеродистых малопластичных и труднодеформируемых – до 35; чугунов – до 25 %. Удельная работа деформации (энергетические затраты) при нагреве отходов черных металлов до температур неполной горячей деформации 700 – 850 °С снижается в 2,3–2,5 раза. По сравнению с брикетированием в неподвижной матрице при одних и тех же условиях удельная работа деформации снижается на 15–20 %.

5. Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных показал, что погрешность расчетов не превышает 12 %. Таким образом доказано, что уравнения разработанной физико-математической модели процесса деформационного уплотнения дискретных металлических материалов, применяемые совместно с экспериментально-аналитическим методом определения структурно-реологических характеристик материалов, позволяют достигнуть высокой сходимости расчетных и экспериментальных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дьяконов, О. М. Задача осесимметричного прессования дискретных металлических материалов / О. М. Дьяконов, А. А. Литвинко // Наука и техника. 2024. Т. 23, № 1. С. 21–32. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-1-21-32>.
2. 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. 368–375. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-367-375>.
3. Дорофеев, Ю. Г. Динамическое горячее прессование пористых материалов / Ю. Г. Дорофеев. М.: Наука, 1968. 120 с.
4. Рудевский, С. Г. Исследование и внедрение процесса статического горячего прессования стружки черных

металлов. Изучение структуры и свойств полученных материалов: дис. ... канд. техн. наук / С. Г. Рудевский. Новочеркасск, 1973. 199 с.

5. Дьяконов, О. М. Комплексная переработка стружки и металлосодержащих шламов / О. М. Дьяконов. Минск: Технология, 2012. 262 с.
6. Дьяконов, О. М. Горячее прессование стружки и стружко-порошковых смесей / О. М. Дьяконов // Порошковая металлургия. Минск, 2010. Вып. 33. С. 25–35.
7. Равич, Б. М. Брикетирование в цветной и черной металлургии / Б. М. Равич. М.: Металлургия, 1975. 229 с.
8. Fawcett, R. A. The Recycling of Cast Iron Borings and Steel Swarf / R. A. Fawcett // Conservation & Recycling. 1978. Vol. 2, No 3–4. P. 205–210. [https://doi.org/10.1016/0361-3658\(78\)90013-9](https://doi.org/10.1016/0361-3658(78)90013-9).
9. Schulz, A. C. The Recycling of Metallic Incinerator and Machine Shop Waste for Remelting by Foundries and Steel Mills / A. C. Schulz // Conservation & Recycling. 1981. Vol. 4, No 3. P. 153–159. [https://doi.org/10.1016/0361-3658\(81\)90019-9](https://doi.org/10.1016/0361-3658(81)90019-9).
10. Свидуневич, Н. А. Проблемы получения и использования брикетированных металлоотходов / Н. А. Свидуневич [и др.] // Литье и металлургия. 2003. № 3. С. 110–112.

Поступила 08.04.2024

Подписана к печати 10.06.2024

Опубликована онлайн 31.07.2024

REFERENCES

1. Dyakonov O. M., Litvinko A. A. (2024) Axisymmetric Pressing Problem of Discrete Metal Materials. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 23(1), 21–32. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-1-21-32> (in Russian).
2. Litvinko A. A. (2023) Hot Briquetting Technology for Ferrous Metal Waste in Molds with Movable Matrix. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 22 (5), 368–375 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-367-375>.
3. Dorofeev Yu. G. (1968) *Dynamic Hot Pressing of Porous Materials*. Moscow, Nauka Publ. 120 (in Russian).
4. Rudevsky S. G. (1973) *Research and Implementation of the Process of Static Hot Pressing of Ferrous Metal Chips. Study of the Structure and Properties of the Obtained Materials* [Dissertation]. Novocheerkassk. 199 (in Russian).
5. Dyakonov O. M. (2012) *Complex Processing of Chips and Metal-Containing Sludge*. Minsk, Tekhnologiya Publ. 262 (in Russian).
6. Dyakonov O. M. (2010) Hot pressing of Chips and Chip-powder Mixtures. *Poroshkovaya Metallurgiya* [Powder Metallurgy]. Minsk, Iss. 33, 25–35 (in Russian).
7. Ravich B. M. (1975) *Briquetting in Non-Ferrous and Ferrous Metallurgy*. Moscow, Metallurgiya Publ. 229 (in Russian).
8. Fawcett R. A. (1978) The Recycling of Cast Iron Borings and Steel Swarf. *Conservation & Recycling*, 2 (3–4), 205–210. [https://doi.org/10.1016/0361-3658\(78\)90013-9](https://doi.org/10.1016/0361-3658(78)90013-9).
9. Schulz A. C. (1981) The Recycling of Metallic Incinerator and Machine Shop Waste for Remelting by Foundries and Steel Mills. *Conservation & Recycling*, 4 (3), 153–159. [https://doi.org/10.1016/0361-3658\(81\)90019-9](https://doi.org/10.1016/0361-3658(81)90019-9).
10. Svidunovich N. A. (2003) Problems of Obtaining and using Briquetted Metal Waste. *Litiyo i Metallurgiya = Foundry Production and Metallurgy*, (3), 110–112 (in Russian).

Received: 08.04.2024

Accepted: 10.06.2024

Published online: 31.07.2024