

В.А. Носков, К.В. Баюл

ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО–ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕЛКОФРАКЦИОННЫХ ШИХТ ПРИ ИХ БРИКЕТИРОВАНИИ

Приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований напряженно–деформированного состояния мелкофракционных шихт в замкнутом объеме стальной цилиндрической прессформы при их уплотнении пуансонами с различной конфигурацией рабочей поверхности. Описаны результаты теоретических исследований напряженно–деформированного состояния мелкофракционных шихт при их уплотнении в очаге деформации валкового пресса.

В современной практике брикетирования сыпучих мелкофракционных отходов горно–металлургического комплекса широкое применение находят различные модификации валковых прессов. В роли прессующего инструмента в прессах данного типа выступают валки с формующими элементами выполненными на их рабочей поверхности.

При расчете силовых, технологических и конструктивных параметров прессового оборудования основополагающим является установление функциональной зависимости между давлением прессования и величиной уплотнения материала.

В Институте черной металлургии (ИЧМ) для определения данной зависимости выполняют экспериментальные исследования на лабораторной установке, которая позволяет осуществить процесс уплотнения мелкофракционной шихты в стальной цилиндрической прессформе пуансонами с плоскими торцами [1]. Параметры процесса при этом регистрируются на диаграммной ленте в координатах «давление прессования–усадка». Полученные при этом зависимости после обработки представляются графически в виде кривых прессования и в виде аналитических выражений, описывающих взаимосвязь $p=F(Ky)$, где p – давление прессования, Ky – коэффициент уплотнения, представляющий собой отношение плотности шихты в брикете $\rho_{бр}$ к насыпной плотности шихты $\rho_{нас}$.

Схема напряженно–деформированного состояния шихты при брикетировании в формующих элементах валкового пресса отличается от схемы напряженно–деформированного состояния при ее уплотнении в матричном канале прессформы пуансонами с плоскими торцами. Было сделано предположение, что, данное отличие обусловлено влиянием конфигурации рабочей поверхности прессующего инструмента на схему нагружения. С целью подтверждения выдвинутого предположения выполнены экспериментальные исследования, целью которых ставилось определить степень влияния конфигурации рабочей поверхности прессующего инструмента на параметры уплотнения мелкофракционных шихт. Исследования проводились на лабораторной установке смонтированной на базе испытательной гидравлической машины ЦД–10.

В качестве исходных материалов для приготовления шихт были выбраны коксовая мелочь, прокатная окалина, отсеvy ферромарганца которые являются отходами горно–металлургических предприятий. Связующими материалами в шихтах являлись лигносульфонат технический (ЛСТ) и органическое связующее (ОС). Фракционный состав исследуемых материалов и параметры исследуемых шихт представлены в табл. 1, 2. Прессование брикетов производили в стальной цилиндрической прессформе с диаметром матричного канала 30 мм. В качестве прессующего инструмента использовали стальные цилиндрические пуансоны с четырьмя различными конфигурациями рабочих поверхностей, три из которых соответствовали конфигурациям формирующих элементов, выполненных на рабочих поверхностях бандажей валковых прессов конструкции ИЧМ.

Таблица 1. Фракционный состав исходных материалов

Материал	Содержание фракции,%масс			
	-3...+2мм	-2...+1мм	-1...+0,5мм	-0,5мм
Коксовая мелочь	–	34,8	8,2	57
Прокатная окалина	–	49,3	17,4	33
Отсевы ферромарганца	17,81	31,3	10,93	39,96

Таблица 2. Состав и параметры исследуемых шихт.

Исходный материал	Влажность исходного материала, %масс	Связующее	Состав шихты	Влажность шихты,	Насыпная плотность шихты, г/см ³
Коксовая мелочь	7,0	ЛСТ	90%Коксовой мелочи+10%ЛСТ	12,5	0,55
Прокатная окалина	0,25	ЛСТ	95%Прокатной окалины+5%ЛСТ	1,3	1,85
Отсевы ферромарганца	0	ОС	96,5%Отсевов ферромарганца+3,5%ОС	5,5	2,06

Брикеты имели форму цилиндра, пельменеобразную и двояковыпуклой линзы. На основе экспериментальных данных построены кривые уплотнения для исследуемых шихт и конфигураций рабочей поверхности прессинструмента (рис.2). В результате установлено, что для достижения одинаковых величин уплотнения шихты в пуансонах с различными конфигурациями рабочих поверхностей необходимо приложить различные по величине давления прессования. Это явление вызвано изменением напряженно–деформированного состояния шихты обусловленного влиянием конфигурации рабочей поверхности прессующего инструмента.

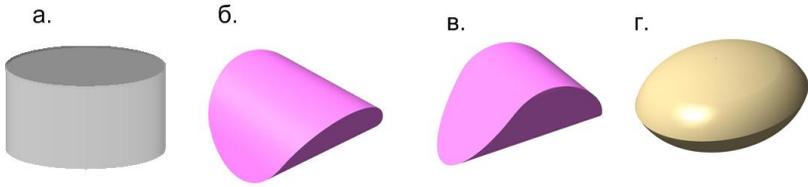


Рис.1. Различные формы брикетов: а. цилиндрическая; б, в – пельменеобразная; г – линзовидная.

С целью теоретического обоснования влияния конфигурации формирующих элементов на параметры уплотнения мелкофракционных шихт выполнены теоретические исследования.

Выполнен анализ напряженно–деформированного состояния бесконечно малого элемента, выделенного из шихты, находящейся под давлением в пресс-форме.

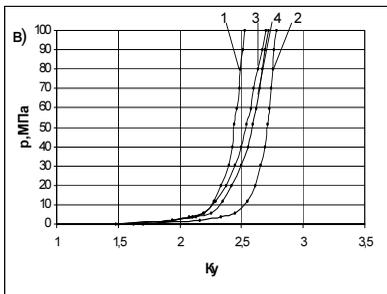
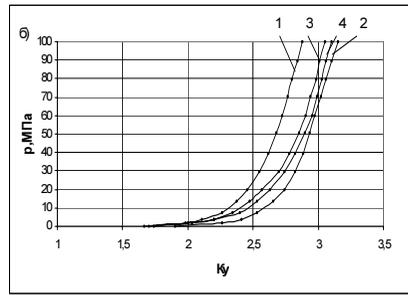
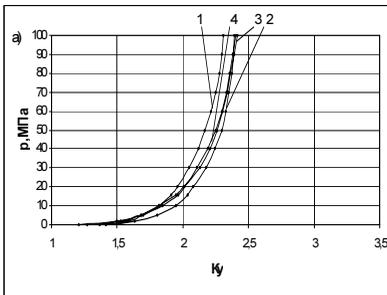


Рис.2. Зависимость уплотнения (K_u) от давления прессования p для исследуемых шихт:

а.) 95%Прокатной окалины+5%ЛСТ

б.) 90%Коксовой мелочи +10%ЛСТ

в.) 96,5% FeMn+3,5%OC в пуансонах с конфигурацией рабочей поверхности: 1–плоской; 2–линзовидной; 3–«зубчато–желобчатой» симметричной; 4–«зубчато–желобчатой» несимметричной

Условие передачи давления в шихте выглядит следующим образом:

$$\sigma_z = \sigma_x = \xi \sigma_y \quad (1), \text{ где } \sigma_x, \sigma_y, \sigma_z \text{ – нормальные напряжения (направление действия } \sigma_y \text{ совпадает с направлением приложенного внешнего давления } p); \xi \text{ – коэффициент бокового давления.}$$

Принималось допущение о том, что коэффициент бокового давления ξ постоянен, так как для большинства материалов в диапазоне рабочих давлений прессования (до 100 МПа) его величина изменяется незначительно.

Связь между напряжениями и деформацией устанавливается на основе экспериментальных кривых прессования и выражается следующей аналитической зависимостью:

$$K_y = b \sqrt{\frac{\sigma}{a}}, \quad (2)$$

где σ – напряжения при линейной деформации; a, b – параметры, характеризующие сопротивление шихты сжатию;

При решении поставленной задачи приняты допущения о том, что шихта является однородным изотропным сжимаемым телом, а прессинструмент абсолютно жесткий. С целью упрощения решения рассматривалась плоская задача.

Для построения общего решения рассмотрена задача о прессовании в бесконечном клине, составлены уравнения равновесия в полярных координатах для случая плоского напряженно-деформированного состояния. В решении применены преобразования с использованием функции напряжений Эри [2], а также преобразования Меллина [3]. В результате были получены выражения для компонентов напряжений $\sigma_{\vartheta}, \tau_{r\vartheta}$ в полярных координатах:

$$\sigma_{\vartheta} = \frac{p}{2} \frac{\cos\left(\sqrt{\frac{1-\xi}{2}}(\psi - 2\vartheta)\right)}{\cos\left(\sqrt{\frac{1-\xi}{2}}\psi\right)} + pJ_{\vartheta}, \quad (3)$$

$$\tau_{r\vartheta} = -\frac{p}{2} \sqrt{\frac{1-\xi}{2}} \frac{\sin\left(\sqrt{\frac{1-\xi}{2}}(\psi - 2\vartheta)\right)}{\cos\left(\sqrt{\frac{1-\xi}{2}}\psi\right)} + pJ_{r\vartheta},$$

где p – давление прессования; ψ – угол наклона прессующей поверхности относительно горизонтали; ϑ – полярный угол; ρ – полярный радиус.

$$J_{\vartheta} = \frac{1}{2\pi i} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{l_n}{r}\right)^{i\sigma} \frac{\cos(\bar{\lambda}(\vartheta - \psi/2))}{m \cos(\bar{\lambda}\psi/2)} dm,$$

$$J_{r\vartheta} = \frac{1}{2\pi i} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{l_n}{r}\right)^{i\sigma} \sqrt{\frac{1-(1-im)\xi}{2-im}} \frac{\sin(\bar{\lambda}(\vartheta - \psi/2))}{m \cos(\bar{\lambda}\psi/2)} dm,$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{(2-im)(1-(1-im)\xi)},$$

l_n – геометрический параметр приложения нагрузки в клиновидной области;
 m – параметр интегрирования.

Считая, что центры полярной и декартовой систем координат совпадают, после некоторых преобразований имеем:

$$\sigma_y(x_1, y_1) = \sigma_{\vartheta}(r, \vartheta)(\xi \sin^2 \vartheta + \cos^2 \vartheta) + \tau_{r\vartheta}(r, \vartheta) \sin(2\vartheta), \quad (4)$$

здесь σ_{ϑ} и $\sigma_{r\vartheta}$ вычисляются по выражениям (3).

Переход от полярных координат к декартовым осуществляется с помощью стандартных математических преобразований.

Принимая допущение допущения о том, что слои шихты в брикете параллельные рассматриваемой плоскости, не оказывают влияния друг на друга, получено выражение для определения величины коэффициента уплотнения брикета:

$$K_y = \frac{\int_R^R dz \frac{\sqrt{R^2 - z^2} f_1(x, z)}{\int_R^R dx \frac{f_2(x, z)}{\sqrt{R^2 - z^2}}} dy}{\int_R^R dz \frac{\sqrt{R^2 - z^2} f_1(x, z)}{\int_R^R dx \frac{f_2(x, z)}{\sqrt{R^2 - z^2}}} \frac{f_1(x, z) + f_2(x, z)}{f_1'(x, z)}, y}, \quad (5)$$

где R – радиус канала прессформы; $f_1(x, z)$ и $f_2(x, z)$ – функции, описывающие конфигурации рабочих поверхностей верхнего и нижнего пуансонов.

Для вычисления K_y по выражению (5) необходимо выразить функцию f в виде аналитической зависимости, характеризующей сопротивление шихты сжатию, полученной на основе экспериментальных данных.

Полученные аналитические выражения позволили выполнить расчет параметров уплотнения шихт приведенного выше состава при их уплотнении в цилиндрической прессформе пуансонами с рабочими поверхностями принятых конфигураций.

На основе результатов расчетов получены и построены зависимости между p и K_y , характеризующие сопротивление шихты деформации, и выполнена сравнительная оценка их сходимости с результатами экспериментальных исследований. На рис.3 приведена наглядная картина распределения коэффициента уплотнения и контактных напряжений по брикету для шихты 90% коксовой мелочи +10% ЛСТ.

Уплотнения мелкофракционной шихты в прессформе и в очаге деформации валкового пресса отличаются, прежде всего, схемами напряженно-деформированного состояния.

Рассмотрим схему напряженно-деформированного состояния шихты в валковом прессе (рис.4). На схеме приведен случай деформирования шихты в валках с зубчато-желобчатой конфигурацией формирующих элементов. При такой конфигурации брикет формируется в пространстве между ячейками, разделенными между

собой выступами в виде зубьев на одном валке и поверхностью в виде кольцевого желоба на другом валке, при их встречном вращении. В случае, когда калибровка валков симметрична, то есть формирующие элементы обоих валков имеют одинаковую конфигурацию, в виде полуформ, расчетная схема несколько изменится, но принцип ее построения и решение задачи останутся аналогичными.

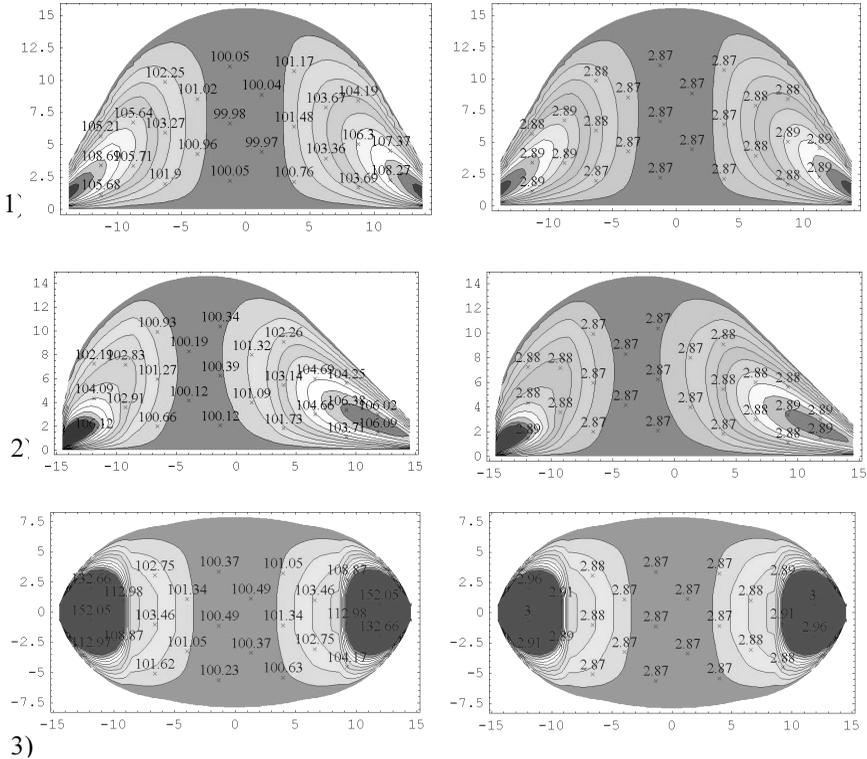


Рис.3. Графическое отображение результатов расчета параметров уплотнения шихты: а) характера распределения напряжений по сечению брикета; б) характера распределения коэффициента уплотнения по сечению брикета; для различных конфигураций рабочей поверхности пуансонов: 1) – «зубчато-желобчатой» симметричной; 2) – «зубчато-желобчатой» несимметричной; 3) – лизовидной.

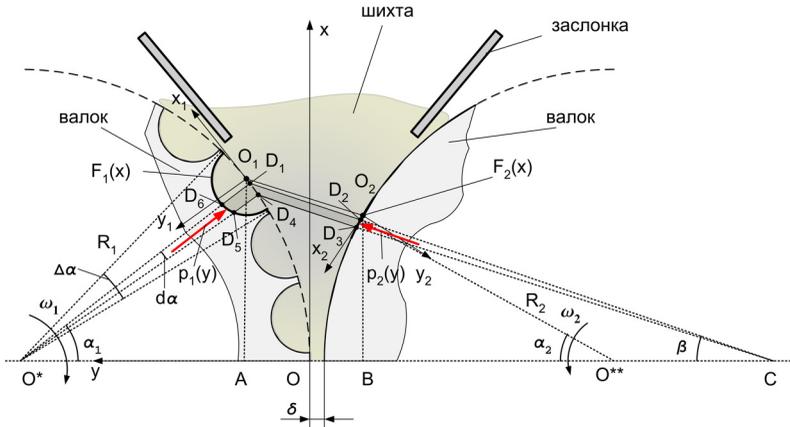


Рис.4. К определению параметров уплотнения мелкофракционной шихты в очаге деформации валкового пресса

Одним из важнейших технологических параметров, который характеризует получение брикета с заданными свойствами, является коэффициент уплотнения

$$Ky = \frac{\rho_{бр}}{\rho_{нас}}. \quad (6)$$

Поэтому, задаваясь необходимым из технологических условий коэффициентом уплотнения брикета Ky , определяем угол прессования из выражения

$$\alpha_{np} = \arccos \left(\frac{2S_{\phi 1} - (2S_{\phi 1} + |\delta(R_1 - R_2)d\alpha|)Ky + (R_1^2 - R_2^2)d\alpha}{(R_1 - R_2)(\delta + R_1 + R_2)d\alpha} \right). \quad (7)$$

где $S_{\phi 1}$ – площадь формирующего элемента.

В последнем выражении в качестве $d\alpha$ необходимо взять $\Delta\alpha$.

Задавая коэффициент уплотнения брикета, и определяя угол прессования, надо следить, чтобы этот угол не превышал предельного угла прессования, который определяет максимально возможное уплотнение брикета при данном диаметре валков и зависит от физико-механических свойств шихты. Выражения для определения условий захвата шихты валками и граничного угла прессования приведены в работе [4].

Была решена вспомогательная задача об уплотнении шихты в тонкой полосе толщиной Δx и начальной длиной y_0 .

Принимая общий усредненный коэффициент уплотнения полосы Ky известным, можно определить величину давления прессования p с использовани-

ем экспериментально установленной зависимости между давлением прессования и величиной уплотнения [5]:

$$p_0 = aKy^b, \quad (8)$$

где a и b – коэффициенты, характеризующие физико-механические свойства шихты.

Выражение для определения нормальных напряжений в любом сечении полосы примет вид

$$p(y) = \sigma_n(y) = a \left(\frac{y_0}{y} \right)^b \exp \left(-2f_2 \xi \frac{y_0 - y}{\Delta x} \right). \quad (9)$$

Касательные напряжения определяются исходя из условий внутреннего трения

$$p_t(y) = p(y) \xi f_2, \quad (10)$$

где f_2 – коэффициент внутреннего трения.

Коэффициент уплотнения в любом сечении полосы определяется выражением

$$Ky(y) = a'p(y)^{b'}, \quad (11)$$

где $a' = \frac{1}{a}$, $b' = \frac{1}{b}$.

Выражения (9), (10), (11) соответствуют случаю одностороннего уплотнения шихты. В очаге деформации валкового пресса происходит процесс двустороннего сжатия шихты. Поэтому исходную криволинейную полосу $D_1D_2D_3D_4D_5D_6$ условно разделим на два равных отрезка вдоль линии $D_6D_1D_2$. К каждому из которых, с учетом изменения систем координат могут быть применены выражения (9), (10), (11), что позволит полностью определить напряженно-деформированное состояние шихты при ее уплотнении в очаге деформации валкового пресса.

На основе полученных аналитических выражений выполнен расчет параметров уплотнения мелкофракционной шихты в очаге деформации валкового пресса, состоящей из 90% коксовой мелочи (фр.–3мм) и 10% лигносульфоната технического. Геометрические параметры валков соответствовали одному из конструктивных исполнений валкового пресса конструкции ИЧМ. Радиусы валков по вершинам зубьев принимались равными 342,5мм, величина зазора между валками – 1,5мм. Геометрические параметры формирующего элемента представлены на рис.3. Угол прессования $\alpha_{пр}$ принимался равным 17°.

При определении картины распределения напряжений в брикете существует незначительное число точек с достаточно высокими значениями напряжений. Принималось допущение, что в этих точках значения напряжений равны значению давления прессования, соответствующего началь-

ному этапу максимального уплотнения шихты, которое определяется из экспериментальных кривых прессования.

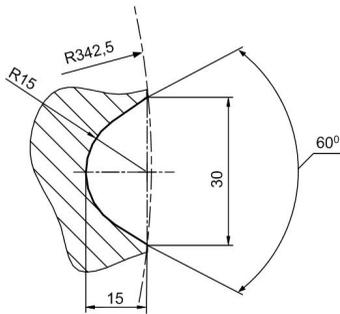


Рис.6. Формующий элемент

На рис.7. представлены результаты расчета параметров уплотнения исследуемой шихты, который позволяет составить наглядное представление о распределении внутренних напряжений $\sigma_r(y)$ в шихте, давлений прессования на границе шихты с рабочей поверхностью и характере распределения коэффициента уплотнения K_u на разных стадиях формирования брикета. Коэффициент уплотнения шихты в начальный момент прессования равен единице и на рис.7.б такие параметры соответствуют слоям шихты расположенным над верхней границей очага деформации. Из рис.7. видно, что наибольшие величины напряжений $\sigma_r(y)$, давлений прессования и коэффициента уплотнения K_u сосредоточены у вершин зубьев формующих элементов, что обусловлено геометрией очага деформации.

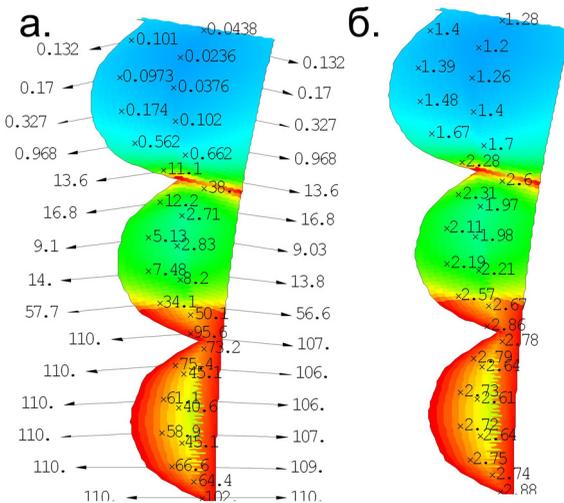


Рис.7. Графическое отображение результатов расчета параметров уплотнения шихты 90% коксовой мелочи (фр.-3) +10% лигносульфоната технического: а.) распределение внутренних нормальных напряжений $p(y)$ радиальных составляющих давления прессования $p_0(y)$ действующего на границе шихты с формующими элементами (указано стрелками), МПа; б.) распределение коэффициента уплотнения $K_u = \rho_{бр} / \rho_{нас}$

Следует отметить, что данные исследования являются развитием ранее созданных в ИЧМ научно-методических основ определения энергосиловых, технологических и конструктивных параметров прессового оборудования для брикетирования сыпучих мелкофракционных отходов горно-металлургического комплекса.

Принятая расчетная схема очага деформации валкового пресса позволяет учесть влияние геометрии формующих элементов на напряженно-

деформированное состояние уплотняемого материала и как следствие на энергосиловые параметры процесса брикетирования. Полученные в работе аналитические выражения позволяют расчетным путем, не прибегая к трудоемким экспериментам, определить параметры уплотнения и напряженно-деформированного состояния мелкофракционных материалов и шихт в очаге деформации валкового пресса и прогнозировать их изменение при изменении конфигурации формирующих элементов.

1. *Лабораторная установка для изучения процесса горячего прессования* / З.И.Некрасов, В.В.Меркулов, В.А.Носков и др. // Порошковая металлургия. – 1975. – №12. – С.91 – 92.
2. *Филин А.Б.* Прикладная механика твердого деформируемого тела: В 2т. – М.: Наука. – Т. 1. 1975. – 832 с.
3. *Снеддон И. Н., Бери Д. С.* Классическая теория упругости. М.– 1961.– 220 с.
4. *Носков В.А.* Механизм формирования очага деформации при брикетировании мелкофракционных шихт в валковых прессах // Металлургическая и горно-рудная промышленность. – 1998. – № 2. – С.137–139.
5. *Исследование физико-механических свойств мелкофракционных промышленных отходов, определяющих их поведение при брикетировании* / В.А.Носков, В.И.Петренко, Б.Н.Маймур и др. // Металлургическая и горно-рудная промышленность. – 1998. – № 4. – С.104–107.

Статья рекомендована к печати д.т.н., проф. С.М.Жучковым