

УДК 622.788.32

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАЛКОВОГО ПРЕССОВАНИЯ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА УПЛОТНЯЕМЫЙ МАТЕРИАЛ

Логинов Ю.Н., д.т.н., профессор кафедры «Обработка металлов давлением» (j.n.loginov@urfu.ru)

Бабайлов Н.А., к.т.н., доцент кафедры «Обработка металлов давлением»

Первухина Д.Н., аспирант кафедры «Обработка металлов давлением»

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

Аннотация. Исследование относится к области подготовки рудных и нерудных компонентов шихтовых материалов, а также техногенных отходов, для проведения пирометаллургических процессов. В работе предложено усовершенствование конструкции валкового брикетировочного пресса, предназначенного для уплотнения сыпучих материалов, используемых в качестве сырья для пирометаллургических процессов. Один из валков предлагается изготавливать с ячейками, второй – с гладкой поверхностью, что позволяет резко снизить расходы на изготовление инструмента. Выполнено физическое моделирование процесса с использованием установки оригинальной конструкции при изменении конфигурации ячеек в двух вариантах: радиальной и треугольной формы. Физическое моделирование показало, что в предлагаемой схеме целесообразно использовать ячейки радиального профиля, что приводит к достижению больших объемных деформаций сжимаемого материала.

Ключевые слова: валковое брикетирование, объемные деформации, физическое моделирование, уплотнение сыпучей среды, форма ячеек.

Брикетирование является наиболее дешевым и компактным способом окучивания различных кусковых и пылевидных материалов [1, 2]. Наиболее производительным является способ брикетирования на валковых прессах [3]. Существующее описание брикетирования обычно затрагивает вопросы определения энергосиловых параметров процесса [4, 5], но не касается вопросов оценки напряженно-деформированного состояния брикета, в том числе распределения объемных деформаций, определяющих прочностные свойства.

Валковый брикетировочный пресс представляет собой прокатный стан особой конструкции, одной из особенностей которого является наличие на рабочих валках ячеек. Ячейки заполняются брикетируемым материалом, при вращении валков материал уплотняется с получением брикетов.

В отличие от прокатки деформация сыпучей среды осуществляется дискретно, каждый брикет формируется при переменном действии напряжений, однако при формировании следующего по ходу деформации брикета ситуация повторяется. При многорядном расположении на валке пресса ячеек на процесс накладывается влияние соседних ячеек, а взаимное расположение рядов друг относительно друга влияет на равномерность загрузки привода [6]. Значимое влияние на показатели работы брикетировочного оборудования и на свойства самих брикетов оказывает их форма и размеры. Объемные деформации порошковой среды при изготовлении брикета симметричной формы описаны в работе [7]. В противовес этому можно высказать концепцию, в соответствии с которой брикет должен иметь несимметричную форму.

Цель работы состоит в обосновании нового технического решения: применения несимметричной схемы уплотнения брикетов на валковом прессе и выбор варианта конфигурации рабочих ячеек.

Несимметричность схемы формоизменения уплотняемого материала может быть двух видов: по ходу уплотнения брикета (передний и задний торцы) и в поперечном сечении брикета. Первый вариант достигается применением несимметрично выполненных ячеек. Второй вариант изображен на рис. 1, а, где показано, что сыпучая среда 1 размещена между валками 2, снабженными ячейками 3. Валки вращаются в направлении, обозначенном черными стрелками. За счет уплотнения сыпучей среды ячейками на выходе из очага деформации получаются брикеты 4 симметричной формы.

На рис. 1, б правый валок 5 выполнен с гладкой поверхностью, что позволяет получать брикеты несимметричной формы 6. Каждая из схем имеет достоинства и недостатки.

- Схема с получением симметричного брикета позволяет вовлекать в очаг деформации большее количество материала, поэтому производительность такого процесса окажется выше.
- Валковые прессы с такой схемой, в отличие от прокатных станов, требуют применения механизма совмещения ячеек, в противном случае не удастся получить брикет правильной формы. Даже настроенные прессы по мере работы из-за деформаций и износа механизма совмещения ячеек перестают производить брикеты правильной формы.

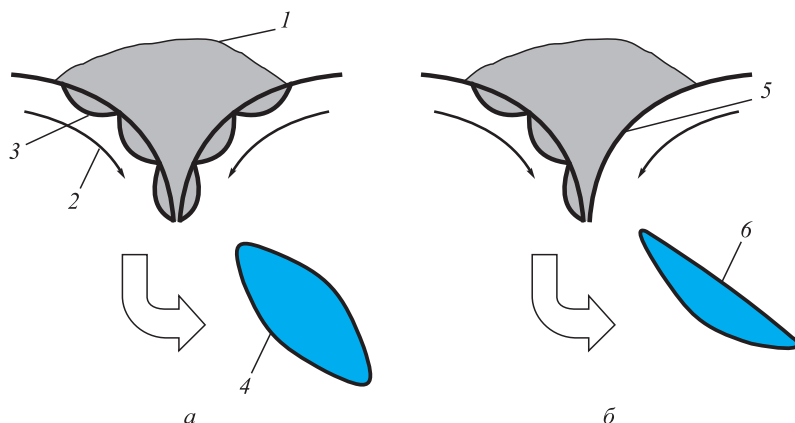


Рис. 1. Схема симметричного валкового прессования (а) и несимметричного валкового прессования (б):
1 – сыпучая среда; 2 – валок с ячейками; 3 – образующая ячейки; 4 – симметричный брикет (увеличено); 5 – гладкий валок;
6 – несимметричный брикет (увеличено)

Fig. 1. Scheme of symmetric roller pressing (a) and unsymmetrical roller pressing (b):
1 – granular medium; 2 – roll with cells; 3 – forming of the cell; 4 – symmetrical briquette (increased); 5 – smooth roll;
6 – unsymmetrical briquette (increased)

- Стоимость изготовления валков в немалой степени зависит от стоимости изготовления ячеек, либо вставок, их формирующих. Естественно, что изготовление одного из валков с гладкой поверхностью резко снижает стоимость инструмента.

Таким образом, применение валковых прессов, формирующих несимметричные брикеты, может оказаться экономически оправданным.

Моделирование процесса уплотнения брикета осуществляли на установке, изображенной на рис. 2. В зазор между секторами 1, снабженными вставками 2, подается сыпучий материал. Препятствием для его вытекания за пределы очага деформации служит поверхность станины 3 и экран 12, закрепленный при помощи соединения 13 к станине. Вращение ходового винта 6 в гайке 7 приводит к поступательному перемещению траверсы 8 при предохранении ее от вращения направляющими 9. Перемещение траверсы 8 вызывает перемещение тяг 4 и 5, которые приводят во вращение сектора 1 на осях 10. Угловую настройку секторов производят с помощью рукояток 11. Винты 14 удерживают тяги 4 и 5. При вращении секторов 1 стенки ячейки сближаются, уплотняя сыпучий материал. Этот процесс можно отслеживать через прозрачный экран 12. В опытах применяли сектора с радиусом кривизны 175 мм.

Модификацией опыта является использование не сыпучей среды, а пластически деформируемой, представителем которой является пластилин. Этот прием впервые описан в работе [10]. Он заключается в том, что пластилин размещается слоем толщиной 16 мм в ячейках выше линии А–А, соединяющей оси вращения секторов 1. В заданной точке слоя изготавливается отверстие диаметром 8,5 мм. После каждого шага углового перемещения, равного 5°, измеряются параметры отверстия после деформации. Рассчитываются площадь отверстия до деформации S_0 и площадь отверстия после

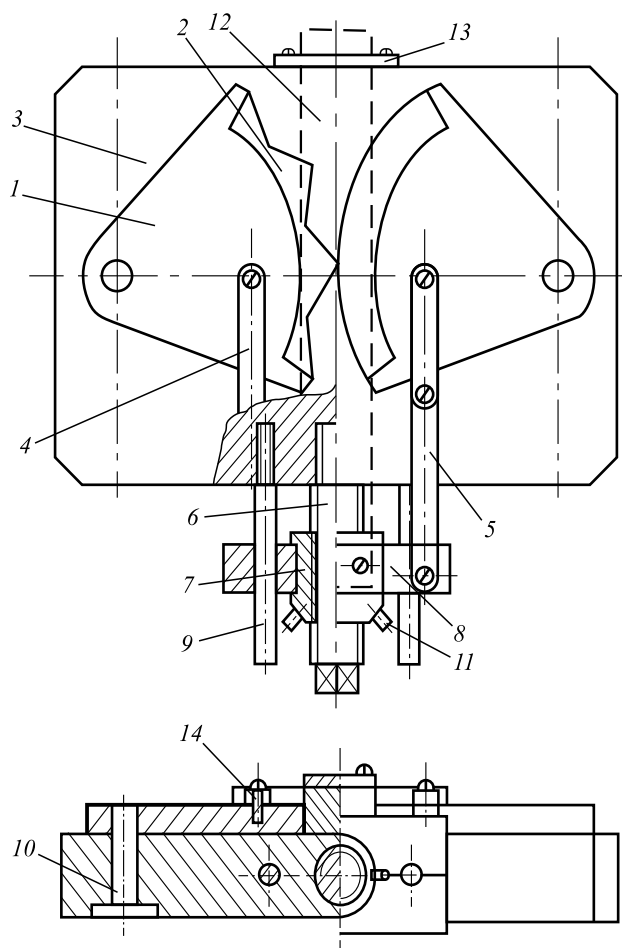


Рис. 2. Схема моделирующей установки:
1 – секторы; 2 – вставки с контуром ячеек; 3 – станина; 4, 5 – тяги;
6 – ходовой винт; 7 – гайка; 8 – траверса; 9 – направляющие;
10 – оси; 11 – рукоятки; 12 – экран; 13 – соединения; 14 – винт

Fig. 2. Scheme of the modeling device:
1 – sectors; 2 – insert with loop of cells; 3 – bed; 4, 5 – tractions;
6 – spindle; 7 – nut; 8 – traverse; 9 – guides; 10 – axis; 11 – handles;
12 – screen; 13 – connections; 14 – screw

деформации S_j . После измерений поверхность разглаживается, восстанавливается отверстие, поворачивается сектор на следующий угол 5° и цикл измерений повторяется. В базовых опытах длина ячейки l составляла 75 мм, глубина ячейки $h = 20$ мм (соотношение между ними равно 3,75).

Были использованы два варианта исполнения формообразующей поверхности: радиального и треугольного профиля. Треугольный профиль в промышленном исполнении получается путем сверления и это удешевляет процесс изготовления ячеек. Наличие радиуса кривизны при формировании рабочей поверхности при изготовлении обходится дороже, но в практике брикетирования позволяет создать больший объем ячейки, что приводит к повышению производительности.

Выполненное в материале отверстие характеризовало объем поры V_q , размещенной в межвалковом пространстве, в котором формируется один брикет объемом V_p . Объем поры, отнесенный к объему брикета, будем считать характеристикой пористости: $Q = V_q/V_b$. Для

плоской деформации эту же характеристику можно записать через соотношение соответствующих площадей: $Q = S_q/S_b$. Измерения осуществляли последовательным выполнением отверстий в деформируемом материале с присвоением номера i , соответствующего определенным координатам расположения отверстия. Индекс j ($j = 1, 2 \dots 6$) соответствовал номеру шага процесса, т. е. повороту вала на каждые 5° .

Тогда изменение пористости при рассмотрении последовательных шагов деформации $\Delta Q_{ij} = \Delta S_{ij}$.

В дальнейшем производили оценку изменения пористости или плотности материала относительной безразмерной величиной – параметром приращения объемной деформации $\Delta S_{ij}/S_0 = (S_0 - S_{ij})/S_0$. Результаты измерения опытных значений этого показателя по приведенной выше методике и при использовании ячейки радиального профиля показаны на рис. 3 в виде линий равного уровня. Видно, что наибольшее приращение плотности брикета наступает в первой и второй фазах поворота вала (рис. 3, а, б), причем это уплотнение локализовано в верхней части. Наклон линий равного

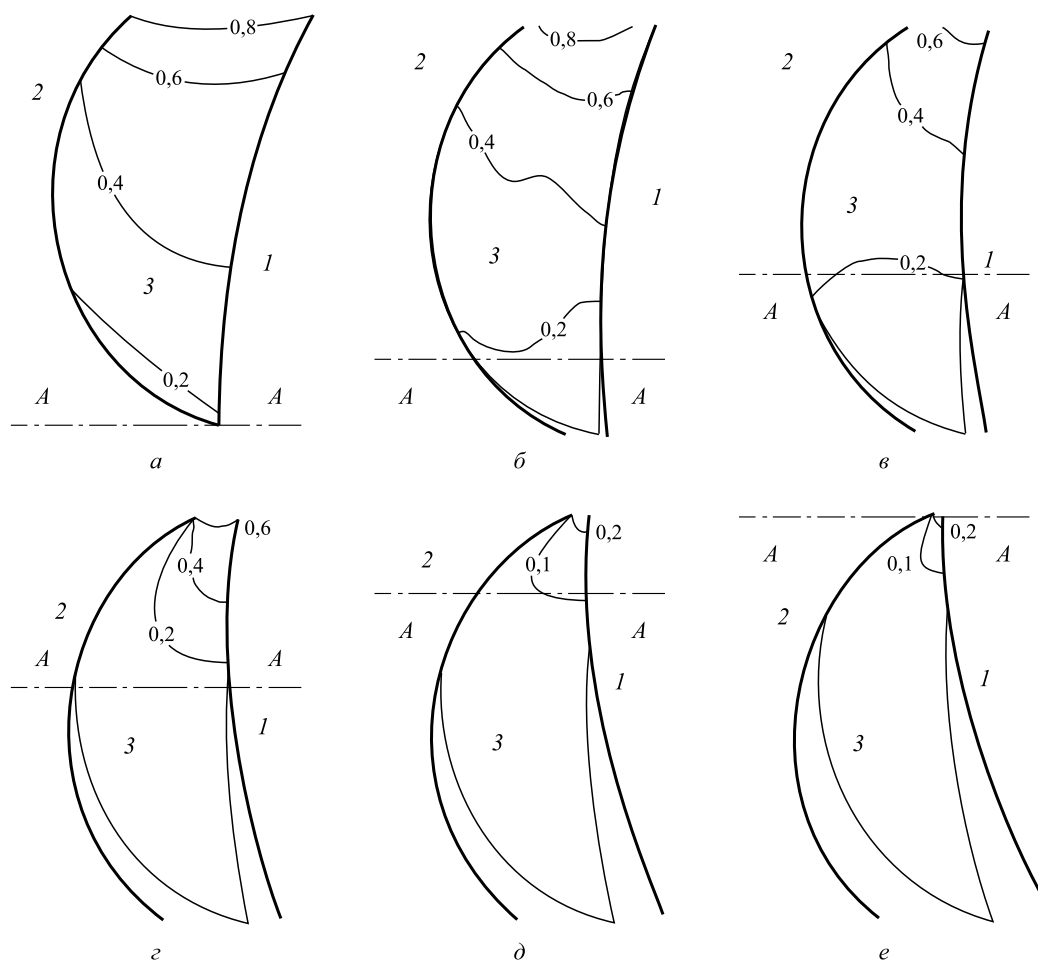


Рис. 3. Распределение приращений объемных деформаций при формировании несимметричного брикета 3 поверхностью ячейки радиального профиля 2 и гладкого вала 1 при последовательности а, б, в, г, д, е поворота вала с шагом 5° ; А – А – положение линии, соединяющей центры валков

Fig. 3. The distribution of volume strain increments in the formation of asymmetric briquette cell 3 by the radial profile 2 surface and a smooth roll 1 at the sequence а, б, в, г, д, е of roll rotation in increments of 5° ; А – А – position of the line connecting the centers of the rolls

уровня свидетельствует о том, что наибольшие объемные деформации характерны для слоев, прилежащих к поверхности гладкого вала.

Результаты моделирования уплотняющего действия валков при использовании ячейки треугольного профиля показаны на рис. 4.

Сопоставление вида изолиний (рис. 3, 4) показывает, что в случае применения ячейки треугольного профиля линии менее изогнуты, особенно это видно в фазе процесса, изображенного на рис. 3, *з* и 4, *з*. Это свидетельствует о том, что при применении ячеек треугольного профиля достигается более однородное поле приращений объемных деформаций, при этом брикет должен характеризоваться более однородным распределением плотности.

Как видно из диаграммы, большие значения уплотнения получает зона брикета, расположенная в верхней части ячейки. Это объясняется тем, что на эту зону действует нагнетающая сторона профиля ячейки. Оппозитная сторона ячейки создает меньший эффект уплотнения, так как условия захвата здесь оказываются

хуже, чем для нагнетающей стороны ячейки. Этот факт отмечался в работе [6] применительно к ячейкам симметричного исполнения.

Для сравнительной оценки общего эффекта уплотнения в двух вариантах проведения процесса выполнен расчет по шагам j ($j = 1, 2 \dots 6$) средних по объему выборки n приращений деформаций по формуле

$$\Delta_j = \frac{\Delta S_j}{S_0} = \frac{1}{n} \sum_i^n \frac{\Delta S_{ij}}{S_0}.$$

Результаты этих расчетов приведены на рис. 5.

Из рис. 5 следует, что объемные деформации в ячейке треугольного профиля имеют меньшие значения, чем в ячейке радиального профиля, что объясняется большим объемом захватываемого первоначально материала. Сопоставление величин $\Delta_j = \Delta S_j / S_0$ по ходу процесса показывает, что при убывании самого фактора по номерам нагружений, в процентном отношении разница значений двух вариантов выполнения ячейки нарастает: на шаге 5 ячейка треугольного профиля созда-

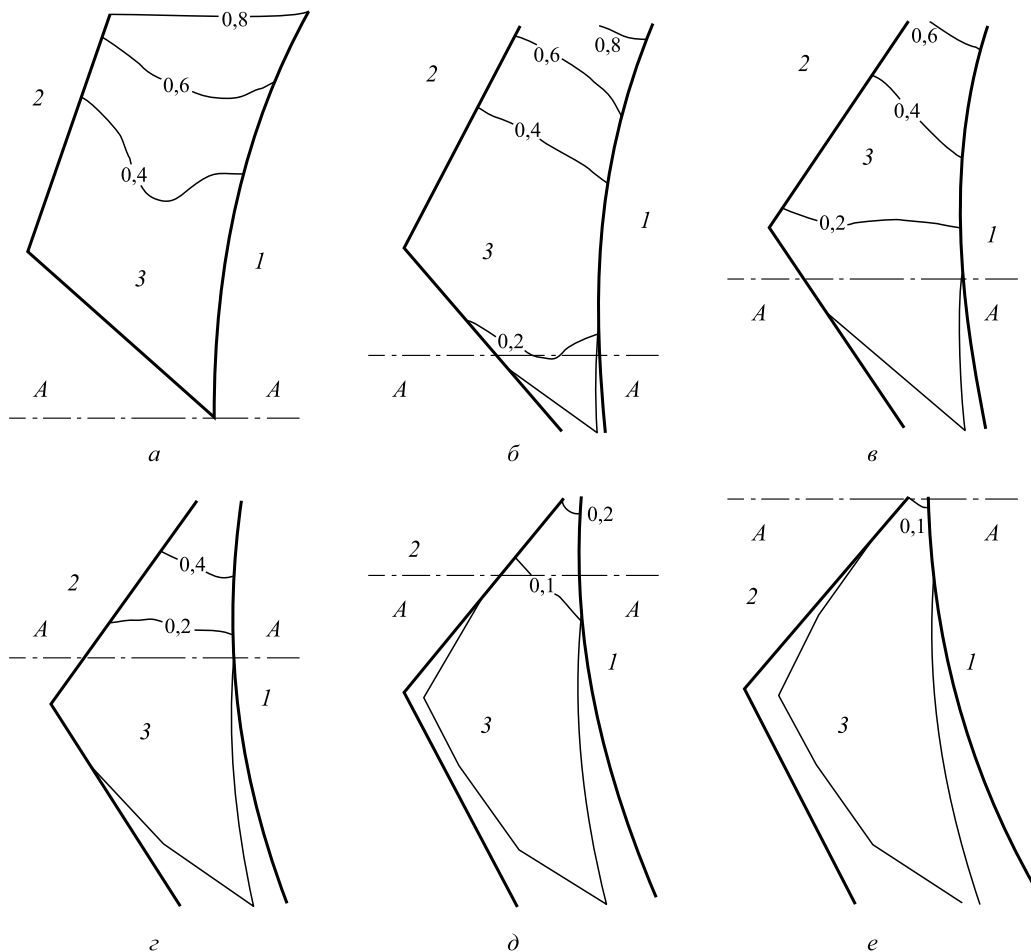


Рис. 4. Распределение приращений объемных деформаций при формировании несимметричного брикета 3 поверхностью ячейки треугольного профиля 2 и гладкого вала 1 при последовательности *а, б, в, г, д, е* поворота вала с шагом 5°; *А – А* – положение линии, соединяющей центры валков

Fig. 4. The distribution of volume strain increments in the formation of asymmetric briquette cell 3 by the triangular profile 2 surface and a smooth roll 1 at the sequence *a, б, в, г, д, е* of roll rotation in increments of 5°; *A – A* – position of the line connecting the centers of the rolls

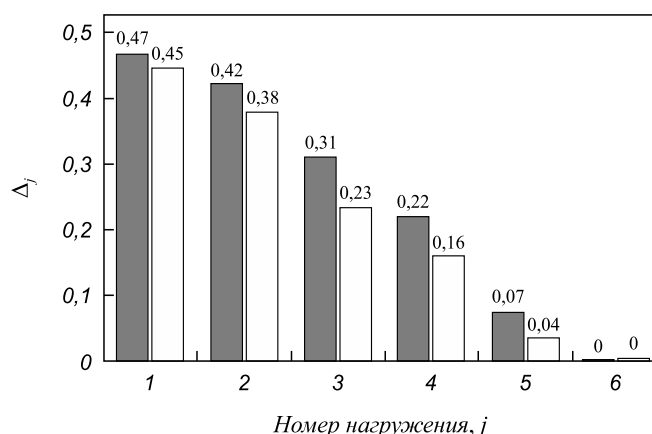


Рис. 5. Средние значения приращений объемных деформаций в течение шести этапов нагружения для ячейки радиального профиля (■) и треугольного профиля (□)

Fig. 5. The average values of the increments of volume strain for 6 stages of loading for cell of radial (■) and triangular profiles (□)

ет эффект уплотнения примерно в два раза меньший, чем ячейка радиального профиля.

Следует отметить, что несимметричные схемы деформации вращающимся инструментом являются предметом постоянных обсуждений и новых разработок в области прокатки как сплошных сред [8], так и порошковых материалов [9, 10]. Отсутствие симметрии нагружения позволяет создать дополнительный уровень касательных напряжений, что вызывает еще одни деформации сдвига, позволяющие более интенсивно уплотнять сыпучие среды.

Выводы. Предложено усовершенствование конструкции валкового брикетизирующего пресса: один из валков предлагается выполнять с ячейками, второй –

с гладкой поверхностью, что позволяет снизить расходы на изготовление инструмента. Выполненное моделирование показало, что в этом случае целесообразно использовать ячейки радиального профиля, что приводит к достижению больших объемных деформаций сжимаемого материала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Равич Б.М. Брикетирование в цветной и черной металлургии. – М.: Металлургия, 1975. – 232 с.
2. El-Hussiny N.A., Shalabi M.E.H. A self-reduced intermediate product from iron and steel plants waste materials using a briquetting process // Powder Technology. 2011. Vol. 205. P. 217 – 223.
3. Loginov Y.N., Bourkine S.P., Babailov N.A. Cinematics and volume deformations during roll-press briquetting // Journal of Materials Processing Technology. 2001. Vol. 118. No. 1 – 3. P. 151 – 157.
4. Елишевич А. Т. Брикетирование полезных ископаемых. – М.: Недра, 1989. – 300 с.
5. Притыкин Д. П. Механическое оборудование для подготовки шихтовых материалов. Ч. 1. Механическое оборудование заводов цветной металлургии. – М.: Металлургия, 1988. – 392 с.
6. Механика валкового брикетирования сыпучих материалов / Ю.Н. Логинов, С.П. Буркин, Н.А. Бабайлов, Л.И. Полянский. – Екатеринбург: АМБ, 2011. – 304 с.
7. Логинов Ю.Н., Буркин С.П., Бабайлов Н.А. Влияние формы инструмента на граничные условия и уплотнение при валковом брикетировании // Сталь. 2000. № 9. С. 87 – 91.
8. Kim W.J., Lee K.E., Choi S.-H. Mechanical properties and microstructure of ultra fine-grained copper prepared by a high-speed-ratio differential speed rolling // Materials Science and Engineering A. 2009. Vol. 506. P. 71 – 79.
9. Пат. US2001001670 США. МПК B30B11/16; B30B11/00. Briquet forming machine and feeder system therefore / Krishanth Kenneth, Marsalka Joseph; publ. 24.05.2001.
10. Пат. US4249878 США. МПК B30B11/16. Briquetting press / Komarek Karl R; publ. 10.02.1981.

Поступила 13 декабря 2014 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA – FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 3, pp. 186–191.

PHYSICAL MODELING OF ROLL PRESSING AT ASYMMETRIC EFFECT ON THE SEALING MATERIAL

Loginov Yu.N., Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Metal Forming” (j.n.loginov@urfu.ru)

Babailov N.A., Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metal Forming”

Pervukhina D.N., Postgraduate of the Chair “Metal Forming”

Ural Federal University named after the first President of Russia
B. N. Yeltsin (19, Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russia)

Abstract. The study relates to the preparation of metallic and non-metallic components of blended materials and industrial wastes, for pyrometallurgical processes. The design improvement for roll briquetting press was proposed for compaction of granular materials used as raw materials for pyrometallurgical processes. One of the rolls was invited to perform with cells, and the second – with a smooth surface that can dramatically reduce the cost of manufacturing the tool. The authors have implemented physical modeling of the process using the

installation of the original design when changing the configuration of the cells in two versions: radial and triangular in shape. Physical modeling has shown that in the proposed scheme of the implementation process it is advisable to use cell of radial profile, which leads to the achievement of large volumetric deformations of compressible material.

Keywords: roller briquetting, volumetric strain, physical modeling, compaction of granular media, the shape of the cells.

REFERENCES

1. Ravich B.M. *Briketirovanie v tsvetnoi i chernoi metallurgii* [Briquetting in ferrous and nonferrous metallurgy]. Moscow: Metallurgiya. 1975. 232 p. (In Russ.).
2. El-Hussiny N.A., Shalabi M.E.H. A self-reduced intermediate product from iron and steel plants waste materials using a briquetting process. *Powder Technology*. 2011, vol. 205, pp. 217–223.
3. Loginov Y.N., Bourkine S.P., Babailov N.A. Cinematics and volume deformations during roll-press briquetting. *Journal*

- of *Materials Processing Technology*. 2001, vol. 118, no. 1–3, pp. 151–157.
4. Elishevich A.T. *Briketirovanie poleznykh iskopaemykh* [Briquetting of minerals]. Moscow: Nedra, 1989. 300 p. (In Russ.).
 5. Pritykin D.P. *Mekhanicheskoe oborudovanie dlya podgotovki shikhtovykh materialov* [Mechanical equipment for the preparation of charge materials]. Part. 1. *Mekhanicheskoe oborudovanie zavodov tsvetnoi metallurgii* [Mechanical equipment for nonferrous metallurgical plants]. Moscow: Metallurgiya, 1988. 392 p. (In Russ.).
 6. Loginov Yu.N., Burkin S.P., Babailov N.A., Polyanskii L.I. *Mekhanika valkovogo briketirovaniya sypuchikh materialov* [Mechanics of roll briquetting of loose materials]. Ekaterinburg: AMB. 2011. 304 p. (In Russ.).
 7. Loginov Yu.N., Burkin S.P., Babailov N.A. Influence of the tool shape on the boundary conditions and seal at roller briquetting. *Stal'*. 2000, no. 9, pp. 87–91. (In Russ.).
 8. Kim W.J., Lee K.E., Choi S.-H. Mechanical properties and microstructure of ultra fine-grained copper prepared by a high-speed-ratio differential speed rolling. *Materials Science and Engineering A*. 2009, vol. 506, pp. 71–79.
 9. Krismanth Kenneth, Marsalka Joseph. *Briquet forming machine and feeder system therefore*. Patent no. US2001001670 SShA, MPK B30B11/16; B30B11/00. Publ. 05.24.2001.
 10. Komarek Karl R. *Briquetting press*. Patent no. US4249878 SShA, MPK B30B11/16. Publ. 02.10.1981.

Received December 13, 2014