

УДК 621.778.32.003.12

К.В.Баюл, В.И.Петренко, Б.Н.Маймур, С.В.Вашенко, А.Ю.Худяков, Н.А.Солдкая**РАЗВИТИЕ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКОЙ БАЗЫ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФОРМУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА УПРУГОЕ ПОСЛЕДЕЙСТВИЕ В БРИКЕТАХ***Институт черной металлургии им. З.И.Некрасова НАН Украины*

Проведен анализ влияния упругого расширения на процесс формирования брикетов в валковом прессе. Установлены факторы, определяющие развитие остаточных упругих деформаций в брикетах. Сформулированы концепция и структура исследований влияния конфигурации формирующих элементов на упругое последствие в брикетах.

Ключевые слова: валковый пресс, брикеты, остаточные упругие деформации, структура исследований

Постановка задачи. В процессе выхода брикета из очага деформации происходит его всестороннее расширение, называемое упругим последствием. Это явление обусловлено развитием упругих деформаций – составляющих контактного взаимодействия частиц прессуемого материала. Механизм упругого последствия заключается в упругом восстановлении контактов частиц после снятия давления прессования [1]. Указанный процесс приводит к разуплотнению брикетов и оказывает негативное влияние на их качество. При значительном упругом расширении и неравномерности его распределения, обусловленной конфигурацией формирующих элементов, в брикетах, помимо уменьшения плотности, могут возникать нарушения целостности – трещины и расслоения. Развитие теоретических положений, объясняющих условия возникновения и механизм протекания этого явления, разработка экспериментально-аналитических методов объективной оценки его последствий имеют научное и практическое значение. Формирование количественных и качественных критериев оценки негативного воздействия упругого расширения на физико-механические и структурные характеристики брикетов, выбор рациональных способов минимизации последствий упругой разгрузки межчастичных контактов будут способствовать повышению эффективности разрабатываемых технологий и прессового оборудования для брикетирования мелкофракционных материалов.

Целью и задачей исследования является изучение факторов, определяющих развитие остаточных упругих деформаций в брикетах. Формирование концепции и структуры экспериментально-аналитических исследований влияния упругого расширения с учетом конфигурации формирующих элементов на свойства брикетов.

Изложение основных материалов. Выполненный анализ литературных источников позволяет оценить состояние научной базы,

необходимой для разработки методов прогнозирования влияния конфигурации формирующих элементов валковых прессов на величину и распределение остаточных упругих деформаций в брикетах, обеспечения качественных характеристик брикетов за счет снижения негативного воздействия упругого последействия.

Наибольший объем исследований явления упругого последействия выполнен в области прессования изделий из металлических порошков и керамических соединений [1-4]. Так, в работе [2] подробно описан процесс прессования мелкофракционных материалов в пресс-форме. Как показано авторами, при прессовании в цилиндрическом матричном канале упругое последействие проявляется дважды. Вначале, сразу после снятия давления, когда брикет еще находится в пресс-форме, матрица возвращается в исходное состояние и приобретает исходные размеры. Брикет при этом сжимается, его размеры по горизонтальным осям уменьшаются, а высота увеличивается, т.е. наблюдается осевое упругое последействие. Затем, в момент выхода брикета из полости пресс-формы, диаметр брикета увеличивается, при этом его высота остается практически неизменной. Такое увеличение размеров в горизонтальной плоскости называют радиальным упругим последействием. После извлечения брикета из пресс-формы с течением времени может происходить увеличение всех его размеров, но меньшее по сравнению с описанными процессами.

В настоящее время для цилиндрических прессовок используются понятия линейного и объемного упругого последействия (рис.1), значения которых рассчитываются по следующим формулам:

по высоте

$$\delta_h = \frac{(h_1 - h_0)}{h_0} \cdot 100\%, \quad (1)$$

диаметру

$$\delta_d = \frac{d_1 - d_0}{d_0} \cdot 100\%, \quad (2)$$

объему

$$\delta_V = \frac{V_1 - V_0}{V_0} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где, h_0 , d_0 и V_0 - высота, диаметр и объем брикета, находящегося в прессформе под действием давления прессования;

h_1 , d_1 и V_1 - высота, диаметр и объем брикета после снятия давления и/или извлечения из прессформы. Методы определения указанных величин описаны в ГОСТ 290012-91 [5].

Выполненные специалистами в области порошковой металлургии и производства керамических изделий исследования направлены на установление основных факторов, определяющих условия развития

процесса упругого последействия, определение степени и характера его воздействия на качественные характеристики брикетов. Особый интерес вызывают результаты экспериментальных исследований упругого последействия и связанных с ним процессов для условий прессования металлических порошков, приведенные в работе М.Ю. Бальшина [3]. На основе этих исследований предложены эмпирические расчетные формулы, устанавливающие связи между свойствами частиц металлических порошков и величиной упругого последействия.

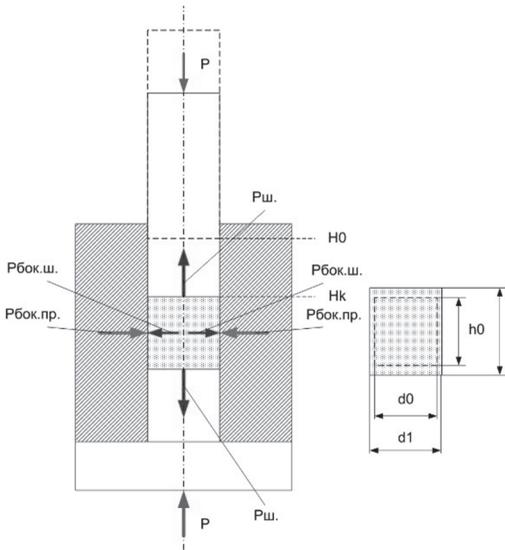


Рисунок 1 - Схема к определению величины упругого последействия брикета, полученного в цилиндрической пресс-форме.

P - усилие прессования; $P_{\text{бок.пр}}$ - боковая реакция пресс-формы; $P_{\text{ш}}$ - усилие сопротивления шихты сжатию; $P_{\text{ш}}$ - боковое усилие сопротивления шихты сжатию

С.С.Кипарисов и Г.А.Либенсон [4] на основании результатов экспериментов по прессованию медного, железного и оловянного порошков проанализировали изменение величины упругого последействия в прессовках по мере увеличения давления прессования. Указано, что негативное влияние на прочность, наличие дефектов в прессовках в большей степени проявляется для порошков хрупких и твердых материалов. Показано, что уменьшить вероятность возникновения дефектов в прессовках, вызванных остаточными упругими деформациями, можно правильным подбором типа и количества пластификатора.

В большинстве рассмотренных публикаций, как правило, на базе экспериментов анализировалось влияние отдельно выделенных факторов, к примеру, влажности, крупности частиц, давления прессования, на величину упругого последействия, параметры уплотнения материала и свойства готовой продукции. Целесообразность и достоверность этих исследований не вызывает сомнений, однако их практическое использование проблематично, так как большинство результатов было получено для ограниченной номенклатуры материалов и строгих граничных условий эксперимента.

Выполненный анализ литературных источников показывает, что в современной теории и практике уплотнения мелкофракционных и порошковых материалов исследования явления упругого последействия в основном направлены на решение разрозненных, зачастую не связанных между собой частных задач, ограниченных конкретными материалами и принятым диапазоном давлений. Литературные данные свидетельствуют о недостаточной изученности, противоречивости представлений о влиянии различных факторов на условия развития упругого последействия при прессовании. К настоящему времени не сформировано единых модельно-теоретических и эмпирических, подтвержденных экспериментами, методов оценки эффекта упругого последействия в изделиях, получаемых путем прессования мелкофракционных материалов.

Литературный поиск не обнаружил результативных попыток исследования влияния конфигурации формующих элементов валковых прессов на величину и распределение остаточных напряжений и деформаций в брикетах. В настоящее время практически отсутствуют работы, посвященные изучению влияния упругого последействия на качество брикетов, сформированных в валковых прессах. В некоторых источниках указывается, что для валковых прессов величина зоны упругого расширения составляет порядка $2...3^\circ$ дуги очага деформации [6]. Эти данные установлены на основе практического опыта и анализа параметров очага деформации в валковом прессе. Однако в литературе не представлены теоретически обоснованные объективные критерии и единые методы оценки, позволяющие для конкретной шихты и геометрических параметров очага деформации прогнозировать величину упругого расширения и условия возникновения трещин в брикетах. Выражения (1-2), справедливые для условий получения брикетов цилиндрической формы в замкнутом объеме прессформы, неприменимы для оценки величины упругого расширения брикетов сложной криволинейной конфигурации, полученных в валковом прессе. Уплотнение шихты в постепенно замыкающемся объеме формующих элементов характеризуется неравномерностью распределения напряжений и деформаций в уплотняемой шихте [7-10], что, в свою очередь, оказывает влияние на величину и распределение остаточных деформаций в брикетах.

Единственными исследователями, которые сделали попытку установления взаимосвязи растягивающих напряжений в шихте в процессе формирования брикетов с возможным образованием трещин, являются R.T.Dес и A.Zavaliangos [11, 12]. Исходя из сравнительного анализа расчетных полей распределения напряжений и результатов экспериментальных исследований авторами показано, что разница в величине напряжений $\geq 15\%$ между соседними слоями шихты в формируемом брикете может приводить к возникновению трещин. Авторы утверждают, что проведенные ими исследования требуют дальнейшего развития, так как они были выполнены для одного материала с одним

типом связующего и для четырех конфигураций формирующих элементов. Данные исследования не дают ответов на вопросы, в какой степени происходит разуплотнение брикетов под воздействием остаточных упругих деформаций и как взаимосвязаны величина упругого последействия, свойства шихты и конфигурация формирующих элементов.

Известен ряд работ, в которых приводятся результаты исследований, направленных на поиск путей уменьшения негативного влияния упругого последействия. Отмечается, что применение схем прессования, интенсифицирующих сдвиговые деформации, способствует образованию более тесных и прочных связей между частицами, что позволяет существенно снизить негативное влияние упругого последействия [13]. В этом плане работа [13] подтверждает правильность предположения о том, что, корректируя конфигурацию формирующих элементов и параметры очага деформации в валковом прессе, которые как раз и являются факторами, определяющими изменение параметров напряженно-деформированного состояния, а, именно, интенсивность сдвигов в уплотняемой шихте, можно минимизировать негативное влияние упругого последействия на качество брикетов.

Исходя из сказанного, целью дальнейших исследований является развитие научно-обоснованной методической базы для оценки влияния конфигурации формирующих элементов на величину и характер упругого последействия в брикетах, а также для определения рациональных параметров очага деформации валковых прессов, обеспечивающих снижение негативного действия растягивающих напряжений на качество продукции. Для достижения указанной цели в работе принята концепция, заключающаяся в экспериментально-аналитическом исследовании величины и характера упругого последействия в брикете на основе анализа напряженно-деформированного состояния на разных стадиях уплотнения, построения полей напряжения и соответствующих эпюр распределения упругого расширения и характеристик уплотнения для различных конфигураций формирующих элементов.

В ИЧМ ранее проведены исследования [14-17] влияния конфигурации формирующих элементов на энергосиловые и технологические параметры валковых прессов, характеристики брикетов – коэффициент уплотнения и плотность. Эти исследования показывают, что величина и распределение напряжений, развитие сдвиговых деформаций в брикетируемом материале обусловлены схемой очага деформации и сложной криволинейной конфигурацией поверхностей формирующих элементов. Показано, что, используя экспериментально установленные зависимости $p = f(Ky)$, характеризующие сопротивление сжатию брикетируемого материала, можно установить величину деформации (уплотнения) материала, соответствующую значениям полученных расчетным путем полей распределения напряжений. Исходя из сказанного, логично предположить, что каждому значению напряжений, в соответствии с полем их

распределения в брикете, будет соответствовать определенной величина упругого расширения после снятия давления прессования.

Принятая концепция и разработанные ранее методики определения величины уплотнения и полей распределения напряжений позволяют решить задачу создания нового расчетно-аналитического метода изучения и оценки влияния конфигурации, формующих элементов на упругое последствие в брикетах с учетом физико-механических свойств шихты. Структура поэтапного решения поставленной задачи включает следующие этапы:

Этап 1. Использование базы данных, которая включает:

- свойства брикетируемой шихты;
- давление прессования;
- конфигурацию формующего элемента.

Этап 2. Экспериментальные исследования, которые включают:

- определение сопротивления шихты сжатию $p = f(Ky)$;
- установление связи между напряжениями в шихте и упругим последствием $\delta = f(p)$;
- определение $p=f(Ky)$ и $\delta =f(p)$ для принятых конфигураций формующих элементов.

Этап 3. Расчетно-аналитические исследования, которые включают:

- анализ напряженно-деформированного состояния шихты и построение полей напряжений для заданного диапазона давления прессования;
- определение количественных и качественных критериев оценки влияния конфигурации на характеристики уплотнения с учетом упругого последствия;
- разработка экспериментально-аналитического метода прогнозирования параметров уплотнения шихт с учетом упругого последствия для различных конфигураций формующих элементов;
- сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных.

Этап 4. Практическая реализация разработанного метода, которая включает:

- определение рациональных параметров формующих элементов, обеспечивающих получение брикетов требуемой плотности с учетом упругого последствия;
- формирование принципиального подхода к моделированию формующих элементов, обеспечивающих снижение негативного воздействия упругого расширения брикетов на их качество;
- выбор перспективных направлений исследований влияния упругих деформаций на процесс уплотнения

мелкофракционных материалов с учетом свойств шихт и параметров очага деформации.

На начальном этапе исследований формируется база данных, включающая значения и характеристики основных факторов, которые оказывают влияние на упругое расширение брикетов, а также исходных данных, используемых для выполнения необходимых расчетов.

На основе проведенного анализа установлено, что основными факторами, оказывающими влияние на величину и распределение упругого последействия в брикете, являются физико-механические свойства шихты (упругие свойства частиц, влажность, тип и количество связующего), давление прессования и параметры формирующих элементов.

Для проведения исследований выбраны мелкофракционные материалы (фракция -3 мм) – бурый уголь, каолин и марганцевый концентрат. Данные материалы относятся к трем группам созданной в ИЧМ систематизации, объединяющим шихты по их способности к уплотнению [18]. Для выбранных материалов определяются физико-механические свойства (насыпная плотность, гранулометрический состав, влажность, значения коэффициентов внешнего, внутреннего трения и др.).

Помимо физико-механических свойств на упругое последействие, как уже говорилось, существенное влияние оказывает давление прессования, поэтому при проведении исследований выбирается диапазон давлений прессования, соответствующий рабочим режимам валковых прессов. В этом диапазоне задается дискретность изменения давления, обеспечивающая корректность экспериментов и теоретических расчетов.

Для установления сопротивления шихт сжатию, и упругого последействия при линейной деформации используются пуансоны с плоскими рабочими поверхностями. Экспериментально устанавливается зависимость, отражающая сопротивление шихты сжатию, представленная в графическом виде и описанная аналитическим выражением степенного типа $p = a \cdot Ky^b$, где a и b - коэффициенты, отражающие совокупность физико-механических свойств шихты, оказывающих влияния на ее способность уплотняться под воздействием давления прессования. Знание данных величин позволяет с использованием имеющихся моделей и программ установить величины и распределение напряжений и уплотнения в брикете, что является одним из необходимых условий решения поставленных задач.

Выбор конфигурации формирующих элементов для проведения исследований в значительной степени определяет напряженно-деформированное состояние шихты при ее уплотнении, характеризуемое полем распределения напряжений. Для экспериментальных и теоретических исследований выбраны наиболее распространенные формирующие элементы, позволяющие получать брикеты «пельменеобразной» и «линзовидной» конфигураций (рис. 2).

Для принятых шихт и выбранных конфигураций формирующих элементов формируется массив экспериментальных данных, на основе которого расчетно-аналитическим путем формируются количественные и качественные критерии оценки величины и распределения упругого последействия, плотности в брикетах с учетом их разуплотнения под действием растягивающих напряжений для различных конфигураций формирующих элементов с учетом физико-механических свойств шихты.

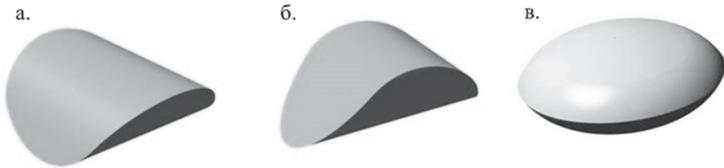


Рисунок 2 – Формы брикетов:

а), б) «пельменеобразная» симметричная и несимметричная; в) «линзовидная»

Используя предложенную в работе концепцию, выполняется анализ влияния геометрических параметров прессующих поверхностей на величину и распределение по сечению брикета упругого последействия, коэффициента уплотнения и плотности для принятых шихт. На основе выполненных экспериментальных и расчетно-аналитических исследований разрабатывается метод прогнозирования упругого последействия при использовании формирующих элементов различной конфигурации и размеров, оценки его негативного влияния на характеристики брикетов, выбора рациональных параметров калибровки, обеспечивающих достижение необходимой плотности брикетов с учетом упругого последействия.

Оценка корректности предложенного метода проводится путем сравнительного анализа экспериментальных и расчетных данных по определению параметров уплотнения и упругого расширения брикетов для принятых шихт и конфигураций формирующих элементов. Для этого на прессующих поверхностях в пресс-форме лабораторной установки воспроизводится конфигурация исследуемых формирующих элементов.

На основании результатов исследований разрабатывается структура алгоритма и рекомендации по установлению рациональных геометрических параметров и режимов брикетирования, позволяющих снизить негативное влияние остаточных упругих деформаций на качество брикетов. Создаваемый метод может быть использован для моделирования новых эффективных формирующих элементов с учетом физико-механических характеристик шихт и технологических режимов брикетирования.

В практическом плане создание предлагаемого в работе метода, алгоритма его реализации, расширение экспериментальных данных о

влиянии свойств шихт на упругое последствие, позволит сформировать базу знаний, которая станет одной из составляющих комплексного подхода к выбору рациональных параметров, формирующих элементов с учетом требований к брикетам и условиям устойчивой работы прессового оборудования.

Выводы. Выполненный в работе анализ исследований упругого последствия в процессах прессования мелкофракционных материалов позволил выделить основные факторы оказывающие влияние на развитие остаточных упругих деформаций в брикетах и сформулировать концепцию и структуру дальнейших исследований, в которых будет учтено влияние конфигурации формирующих элементов валковых прессов на развитие данного явления в брикетах.

1. *Жданович Г.М.* Теория прессования металлических порошков. – М.: Металлургия, 1969. – 64с.
2. *Нарва В.К., Панов В.С.* Функциональные порошковые наноматериалы: учебно-методический комплекс: в 4 т.: Т.2. – М.: РХТУ им. Д.И.Менделеева, 2010. – 148 с.
3. *Бальшин М.Ю.* Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна. – М.: Металлургия, 1972. – 336с.
4. *Китарисов С.С., Либенсон Г.А.* Порошковая металлургия: Учебник для техникумов – 3-е изд. перераб. / М. Металлургия, 1991. – 432с.
5. *ГОСТ 29012-91* "Порошковая металлургия. Метод определения изменения размеров прессовок после снятия давления прессования и во время спекания" Код: ГОСТ 29012-91 Статус: Действующий. Дата принятия: 01.07.1992 г.
6. *Носков В.А.* Создание и внедрение прессового оборудования для брикетирования мелкофракционных металлургических отходов: Дис. д-ра техн. наук: 05.05.08 / НАН Украины; Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова. - Днепропетровск, 2001. - 318л. - Библиогр.: л.288-304.
7. *Носков В.А.* Механизм формирования очага деформации при брикетировании мелкофракционных шихт в валковых прессах. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1998. – №2. – С.137-139.
8. *Носков В.А., Баюл К.В.* Обзор исследований процесса брикетирования мелкофракционных материалов в валковых прессах. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. научн. трудов ИЧМ НАН Украины. Вып. 11. – Днепропетровск. – 2005. – С. 289–293.
9. *Носков В. А., Баюл К.В., Харун И.В.* Исследование уплотнения и напряженно-деформированного состояния мелкофракционных шихт в валковом прессе / В. А. Носков, // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2006. – №4. – С. 142-146.
10. *Носков В. А., Баюл К.В.* Исследование напряженного состояния и характера износа бандажей брикетировочных валковых прессов. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2007. – №1. – С.78–82.
11. *Powder processing in the roller press – theory and practice* by Dr. Roman T. Dec, Prof. Antonios Zavaliangos (Powder Handling & Processing, Vogel Transtech Publications 0934 71514, 1/2007, pp 23-28)

12. *Optimizing of roller press forming cavity profile using finite element simulation by Dr. Roman T. Dec, Prof. Antonios Zavaliangos (XXIV International Mineral Processing Congress, Beijing, China, Proceedings, Vol. 3, September 24-28, 2008, pp. 3175-3181) ISBN 978-7-03-02271-9.*
13. Витязь П. А. Деформация конденсата при формовании и активное спекание сферических порошков при получении пористых материалов / [П.А.Витязь, В.Н.Ковалевский, А.В.Ковалевская и др.]/ *Литье металлургия.* – №2 (65). – 2012. – С.139-145.
14. Носков В.А. Исследование физико-механических свойств мелкофракционных промышленных отходов, определяющих их поведение при брикетировании / В.А.Носков, Б.Н.Маймур, В.И.Петренко, А.Т.Лебедь // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 1998. – С. 104-107.
15. Носков В. А., Петренко В.И. Аналитическое исследование распределения уплотнения брикета в формующих элементах валкового пресса. // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2000. – 1. – С. 95–98.
16. Баюл К. В. Аналитическое исследование влияния геометрических параметров формующих элементов валковых прессов на процесс брикетирования // *Порошковая металлургия* – 2012. – №3/4. – С.38-49.
17. *Разработка параметров формующих элементов валковых прессов для брикетирования мелкофракционных металлургических отходов [Текст] [Рукопись]: диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук / К.В.Баюл; научн. рук. В.А.Носков; НМетАУ. - Днепропетровск, 2008. - 173 с. - Библиогр.: с. 158-172. - (в пер.) На правах рукописи.*
18. *Ващенко С. В. Розвиток наукових основ виробництва сировини для металургійної галузі методом брикетування: Автореферат дис. на здобуття наук. ступеня кандидата технічних наук: Спец. 05.16.02 - Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів / С.В.Ващенко.-Дніпропетровськ: ІЧМ НАНУ, 2014.-25с.*

*Статья поступила в редакцию сборника 23.04.2017
и прошла внутреннее и внешнее рецензирование*

***К.В.Баюл, В.І.Петренко, Б.Н.Маймур, С.В.Ващенко, А.Ю.Худяков,
Н.А.Солодка***

Розвиток науково-методичної бази оцінки впливу параметрів формуючих елементів на пружну післядію в брикетах

Проведено аналіз впливу пружного розширення на процес формування брикетів. Встановлено фактори, що визначають розвиток залишкових пружних деформацій в брикетах. Сформульовані концепція і структура досліджень впливу конфігурації формуючих елементів на пружну післядію в брикетах.

Ключові слова: валковий прес, формуючі елементи, брикети, пружна післядія

K.V.Baiul, V.I.Petrenko, B.N.Maimur, S.V.Vashchenko, A.Y.Khudiakov, N.A.Solodkaia

The development of scientific and methodological basis for the evaluation how the parameters of the forming element influence the elastic aftereffect in briquettes

In this work, we analyze the influence of elastic expansion in the process of briquettes forming. The factors, that are determining the development of residual elastic strains in the briquettes, have been defined. The concept is formulated and the structure of studies is outlined in order to find out how the shape of the forming elements influences the elastic aftereffect in the briquettes.

Keywords: roll press, the forming elements, briquettes, elastic aftereffect