

УДК 621.777.06.004.083.133

Баюл К.В., Худяков А.Ю., Ващенко С.В., Солодкая Н.А.

РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОЙ КАЛИБРОВКИ БАНДАЖЕЙ ВАЛКОВЫХ ПРЕССОВ

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины, г. Днепр

Показана актуальность и пути формирования научно-обоснованного метода определения рациональной калибровки валков брикетных прессов на основе анализа связей между параметрами калибровки бандажей и характеристиками процесса брикетирования. Предложены критерии оценки и выбора рациональной калибровки бандажей валковых прессов, обеспечивающей заданную величину уплотнения шихты, максимальную равномерность распределения напряжений, остаточных упругих деформаций и плотности в брикете, при минимальных значениях энергосиловых параметров, заданной производительности и максимальной продолжительности эксплуатации бандажей пресса. Принятые критерии позволяют сформулировать гипотезу выбора рациональной калибровки бандажей валковых прессов. Данная гипотеза предполагает комплексный анализ влияния конфигурации формующих элементов на совокупность энергосиловых и технологических параметров брикетирования на различных стадиях эксплуатации бандажей. Критерии и гипотеза выбора рациональной калибровки бандажей валковых прессов сформулированы впервые и будут использованы при создании комплексного расчетно-аналитического метода определения рациональных параметров формующих элементов бандажей валковых брикетных прессов. В дальнейшем, при получении новых результатов теоретических и экспериментальных исследований, предложенные критерии и гипотеза могут быть трансформированы и дополнены.

Ключевые слова: валковый пресс, брикетирование, калибровка, формующие элементы.

Постановка проблемы

В валковых прессах формирование брикетов происходит в формующих элементах сложной криволинейной конфигурации, выполненных на рабочих поверхностях бандажей. Получение брикетов, которые соответствуют требованиям, предъявляемым к металлургическому сырью (форма, размер, плотность и прочность), в значительной степени определяются калибровкой рабочих поверхностей валков. Формующие элементы, кроме диаметров, ширины валков и зазора между прессующими поверхностями, являются основной составляющей калибровки бандажей валкового пресса.

Опираясь на практический и теоретический опыт исследования процесса брикетирования и прокатки порошковых сред, принята следующая система понятий калибровки бандажей валковых брикетных прессов.

Формующий элемент – область межвалкового пространства, ограниченная двумя ячейка-

ми или ячейкой и ручьем (для зубчато-желобчатых формующих элементов), включающая зазор между валками в их рабочем положении, замыкание формующего элемента происходит вблизи линии, соединяющей центры валков.

Ячейка – углубление заданной формы и размеров на рабочей поверхности валка.

Желоб – кольцевой вырез заданной формы и размеров на рабочей поверхности валка.

По расположению осей симметрии различают формующие элементы: 1) с полной симметрией, имеющие две оси симметрии – вертикальную и горизонтальную; 2) с неполной или одноосной симметрией, имеющие одну ось симметрии; 3) асимметричные.

По способу замыкания формующие элементы делятся на: 1) открытого типа: разъем находится в пределах контура формующего элемента, к такому типу относятся линзовидные и подушкообразные формующие элементы [1–2] с полной симметрией, образуемые смыканием

двух полуформ; 2) закрытого типа: разъем находится за пределами контура формирующего элемента, к такому типу относятся зубчато-желобчатые формирующие элементы [1–2].

Калибровка бандажей валковых прессов – геометрические соотношения и размеры формирующих элементов с учетом радиуса рабочих поверхностей валков, обеспечивающие получение брикетов с заданными характеристиками.

Анализ последних исследований показывает, что в настоящее время в мировой практике отсутствует комплексный системный подход и четко сформированные критерии оценки калибровки бандажей валковых брикетных прессов.

Поэтому актуальным является формирование научно-обоснованного метода определения рациональной калибровки валков брикетных прессов на основе анализа связей между геометрическими параметрами формирующих элементов и характеристиками процесса брикетирования с учетом влияния физико-механических свойств шихты, величины износа формирующих элементов, упругого последствия в брикетах и т.д. Создание комплексного системного подхода к установлению оптимальной калибровки бандажей валковых прессов позволит при разработке и проектировании пресса учесть совокупное влияние следующих факторов:

- требований, предъявляемых к продукции (форма, размеры, плотность, прочность и др.);
- физико-механических характеристик шихты и энергосиловых параметров брикетирования;
- износа рабочих поверхностей валков;
- упругого последствия в брикетах и т.д.

В результате выполнения специалистами Института черной металлургии работ [1–8], посвященных исследованию влияния конфигурации формирующих элементов валковых прессов на параметры брикетирования, в том числе на разных стадиях эксплуатации валков, накоплен объем знаний, который позволяет подойти к решению задачи создания комплексного системного подхода к определению рациональных параметров калибровки бандажей.

Для создания такого комплексного подхода и метода необходимо:

- обосновать критерии выбора рациональной калибровки бандажей валковых прессов, которая обеспечивает получение брикетов с необходимыми характеристиками и благоприятные условия работы прессового оборудования – силовой режим и длительную эксплуатацию (при рациональных энергосиловых параметрах прессы и длительной эксплуатации бандажей валков);

- исследовать взаимосвязи между параметрами калибровки бандажей и характеристиками процесса брикетирования с учетом влияния физико-механических свойств шихты, величины износа формирующих элементов, упругого последствия в брикетах и т.д.;

- разработать структурную схему и алгоритм интеллектуальной системы для определения рациональной калибровки валков пресса.

Для формирования критериев, которые позволят разработать систему совместного анализа влияния различных факторов на эффективность калибровки бандажей валковых прессов, выделены основные характеристики процесса брикетирования и работы прессового оборудования, на которые оказывает влияние калибровка:

- технологические режимы брикетирования;
- качество брикетов;
- энергосиловые характеристики процесса;
- производительность;
- ресурс эксплуатации бандажей.

Цель исследования

Целью исследования является формирование критериев выбора рациональной калибровки бандажей валковых прессов, которые в дальнейшем будут рассматриваться совместно в составе комплексного системного подхода к выбору рациональной калибровки бандажей валковых брикетных прессов.

Изложение основного материала исследований

Качество брикетов в значительной степени зависит от величины уплотнения брикетируемого материала. Из всех возможных типов калибровки рациональным будет являться тот, который позволит достигать максимально возможной ($K_{y_{max}}$) или заданной оптимальной ($K_{y_{opt}}$) величины коэффициента уплотнения K_y шихты:

$$K_{y_i} \rightarrow K_{y_{max}} \text{ или } K_{y_i} \rightarrow K_{y_{opt}}. \quad (1)$$

Основными характеристиками, по которым можно судить о качестве брикетов еще на стадии их формирования являются величина и распределение напряжений, коэффициента уплотнения и плотности. Кривизна контуров формирующих элементов обуславливает сложное напряженно-деформированное состояние шихты в процессе ее уплотнения, характеризующее наличием интенсивных сдвиговых деформаций. Значительная неравномерность характеристик уплотнения (напряжение и плотность), вызванная влиянием геометрических параметров формиру-

ших элементов и упругим расширением после снятия нагрузки, может привести не только к разуплотнению брикетов, снижению прочности, но и к возникновению различного рода дефектов в виде трещин и расслоений [8]. Поэтому для оценки степени влияния калибровки на показатели уплотнения и качество брикетов предложено ввести понятие коэффициентов неравномерности и степени неравномерности характеристик уплотнения в брикете.

Коэффициенты неравномерности напряжений η_σ , уплотнения η_{Ky} и плотности η_{ρ_1} показывают, во сколько раз отличается максимальное значение исследуемого показателя от его средней величины на рассматриваемом участке, и определяются выражениями:

$$\eta_\sigma = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{sr}}; \eta_{Ky} = \frac{Ky_{\max}}{K_{sr}}; \eta_{\rho_1} = \frac{\rho_{1.\max}}{\rho_{1.sr}}, \quad (2)$$

где σ_{\max} , Ky_{\max} , $\rho_{1.\max}$ – максимальные значения напряжений σ_i , коэффициента уплотнения Ky_i и плотности $\rho_{1.i}$ с учетом упругого расширения вдоль рассматриваемого направления в сечении брикета.

Средние значения σ_{sr} , Ky_{sr} , $\rho_{1.sr}$ напряжений σ_i , коэффициента уплотнения Ky_i и плотности $\rho_{1.i}$ с учетом упругого расширения вдоль рассматриваемого направления в сечении брикета определяются выражениями:

$$\sigma_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i}{n}; Ky_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^n Ky_i}{n}; \rho_{1.sr} = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_{1.i}}{n}, \quad (3)$$

где n – количество точек вдоль анализируемого направления в сечении брикета – определяется путем численного эксперимента для обеспечения заданной степени точности определения оцениваемых критериев. При идеализированных условиях прессования мелкофракционного материала предполагается отсутствие потерь давления прессования из-за межчастичного трения и трения на контакте с прессующим инструментом распределение характеристик уплотнения будет равномерным, то есть коэффициенты η_σ , η_{Ky} и η_{ρ_1} будут равны 1. В реальных процессах уплотнения мелкофракционных материалов всегда присутствует неравномерность распределения характеристик уплотнения σ_i , Ky_i , ρ_i , вызванная сложным напряженно-деформированным состоянием, которое обусловлено конфигурацией прессующего инструмента, условиями его взаимодействия с уплотня-

емым материалом, межчастичным трением и др. Поэтому значения предлагаемых коэффициентов η_σ , η_{Ky} и η_{ρ_1} всегда будут больше единицы. По мере увеличения значения данных коэффициентов растет неравномерность вдоль рассматриваемого направления в анализируемом формующем элементе. Использование одного типа показателей для оценки неравномерности исследуемых показателей не всегда может давать корректные результаты, поэтому предложена еще одна группа показателей, которые позволяют провести дополнительную оценку равномерности уплотнения брикетируемой шихты. В качестве таких дополнительных показателей предложено использовать степень неравномерности напряжений δ_σ , коэффициента уплотнения δ_{Ky} и плотности δ_{ρ_1} , которая будет определяться согласно следующим выражениям:

$$\delta_\sigma = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{\sigma_{srv}}; \delta_{Ky} = \frac{Ky_{\max} - Ky_{\min}}{K_{srv}};$$

$$\delta_{\rho_1} = \frac{\rho_{1.\max} - \rho_{1.\min}}{\rho_{1.srv}}, \quad (4)$$

где σ_{\min} , Ky_{\min} , $\rho_{1.\min}$ – минимальные значения напряжений σ_i , коэффициента уплотнения Ky_i и плотности $\rho_{1.i}$ с учетом упругого расширения вдоль рассматриваемого направления в сечении брикета; σ_{srv} , Ky_{srv} , $\rho_{1.srv}$ – средневзвешенные значения напряжений σ_i , коэффициента уплотнения Ky_i и плотности $\rho_{1.i}$ с учетом упругого расширения вдоль рассматриваемого направления в сечении брикета, определяемые по выражениям:

$$\sigma_{srv} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_{\sigma.i} \cdot \sigma_i}{\omega_{\sigma.i}}; Ky_{srv} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_{Ky.i} \cdot Ky_i}{\omega_{Ky.i}};$$

$$\rho_{1.srv} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_{\rho_1.i} \cdot \rho_{1.i}}{\omega_{\rho_1.i}}, \quad (5)$$

где $\omega_{\sigma.i}$, $\omega_{Ky.i}$, $\omega_{\rho_1.i}$ – вещественный вес напряжений σ_i , коэффициента уплотнения Ky_i и плотности $\rho_{1.i}$ с учетом упругого расширения вдоль рассматриваемого направления в сечении брикета.

В выражениях (5) дискретность n определяется правилами аналогичными для выраже-

ний (3). Критерием оценки рациональности калибровки при использовании выражений (2) и (4) является минимальная степень неравномерности анализируемых показателей. Это условие можно записать в следующем виде:

$$\eta_{\sigma}, \eta_{K_y}, \eta_{\rho_1} \rightarrow 1; \quad \delta_{\sigma}, \delta_{K_y}, \delta_{\rho_1} \rightarrow 0. \quad (6)$$

Совместное использование при анализе рациональности калибровки критериев (5) и (6) позволит определить эффективность каждого из них.

Сложная геометрия прессующих поверхностей валков приводит к неравномерному соотношению радиальных и окружных составляющих давления прессования вдоль поверхностей валков. В свою очередь, неравномерное распределение составляющих давления прессования вдоль контуров формующих элементов оказывает влияние на значения энергосиловых параметров – усилие P_i и момент M_i прессования. Следовательно, при использовании различных типов калибровки заданная величина уплотнения шихты будет достигаться при различных значениях энергосиловых параметров, что доказано в ряде работ [1–3]. Исходя из этого, в качестве критерия рациональности калибровки по энергосиловым параметрам предлагается принять минимальное значение усилия P_i и момента прессования M_i . Согласно данному критерию наиболее оптимальными из рассматриваемых типоразмеров формующих элементов будет являться тот, для которого при достижении заданной величины уплотнения шихты значения энергосиловых параметров будут минимальными:

$$P_i, M_i \rightarrow P_{\min}, M_{\min}. \quad (7)$$

Конфигурация формующих элементов оказывает влияние на производительность Q . Учитывая это, предлагается принять критерий оценки, согласно которому наиболее предпочтительной является та калибровка, которая обеспечивает максимальную (Q_{\max}) или заданную оптимальную (Q_{opt}) величину производительности Q_i при достижении заданной величины уплотнения брикетированной шихты:

$$Q_i \rightarrow Q_{\max} \quad \text{или} \quad Q_i \rightarrow Q_{opt}. \quad (8)$$

Немаловажным показателем эффективности конструктивного исполнения бандажей является длительность их эксплуатации. Несомненно, интенсивность износа бандажей определяется, прежде всего, условиями взаимодействия

уплотняемой шихты с рабочими поверхностями валков и определяющее значение здесь имеют соотношения твердости частиц уплотняемого материала и материала валков. Тем не менее, теоретические расчеты [5–6] и практический опыт показывают, что в зависимости от конфигурации и размеров формующих элементов максимальная степень износа бандажей, при которой возможно производство брикетов с заданной степенью уплотнения различна. Поэтому в качестве критерия эффективности калибровки, характеризующего ресурс эксплуатации бандажей, принята величина максимально допустимого износа формующих элементов δ_{\max} . Согласно этому критерию наиболее эффективной конфигурацией формующих элементов является та, которая обеспечивает максимальный период эксплуатации при соблюдении условия получения брикетов требуемого качества:

$$\delta_{\max} \rightarrow \max \delta_{\max}. \quad (9)$$

Таким образом, предложены критерии выбора рациональной калибровки бандажей валковых прессов:

1. Максимальная или оптимальная величина уплотнения.
2. Максимальная равномерность уплотнения.
3. Минимальные энергосиловые характеристики.
4. Максимальная или заданная производительности.
5. Максимальная продолжительность эксплуатации бандажей.

Принятые критерии позволяют сформулировать гипотезу выбора рациональной калибровки бандажей валковых прессов. Для заданных условий брикетирования среди возможных вариантов калибровки, рациональным является тот, который обеспечивает заданную величину уплотнения шихты, максимальную равномерность распределения напряжений, остаточных упругих деформаций и плотности в брикете, при минимальных значениях энергосиловых параметров, заданной производительности и максимальной продолжительности эксплуатации бандажей пресса. Данная гипотеза предполагает комплексный анализ влияния конфигурации формующих элементов на совокупность энергосиловых и технологических параметров брикетирования на различных стадиях эксплуатации бандажей.

Выводы

Критерии (1)–(9) и гипотеза выбора рации-

ональной калибровки бандажей валковых прессов сформулированы впервые и будут использованы при создании комплексного расчетно-аналитического метода определения рациональных параметров формирующих элементов бандажей валковых брикетных прессов. В дальнейшем, при получении новых результатов теоретических и экспериментальных исследований, предложенные критерии и гипотеза могут быть трансформированы и дополнены.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Носков В.А. Создание и внедрение прессового оборудования для брикетирования мелкофракционных металлургических отходов: Дис... д-ра техн. наук: 05.05.08. – Днепропетровск: Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины, 2001. – 318 с.
2. Баюл К.В. Разработка параметров формирующих элементов валковых прессов для брикетирования мелкофракционных металлургических отходов: 05.05.08. – Дис... канд. техн. наук: Днепропетровск: НМетАУ, 2008. – 173 с.
3. Bayul K.V. Effect of the geometrical parameters of roll press forming elements on the briquetting process: analytical study // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – July 2012. – Vol.51. – Issue 3-4. – P.157-164.
4. Баюл К.В., Петренко В.И., Маймур Б.Н. Выбор концепции и методов исследования влияния износа бандажей валковых прессов на технологические и энергосиловые параметры процесса брикетирования // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Днепропетровськ: ІЧМ НАН України, 2011. – Вип. 24. – С. 241-246.
5. Баюл К.В., Петренко В.И. Метод оценки износа бандажей валковых прессов на различных стадиях их эксплуатации // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Днепропетровськ: ІЧМ НАН України. – 2012. – Вип. 26. – С. 270-281.
6. Баюл К.В., Петренко В.И. Метод оценки влияния износа бандажей валковых прессов на технологические и энергосиловые параметры брикетирования // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Днепропетровськ: ІЧМ НАН України. – 2013. – Вип. 27. – С. 266-274.
7. Баюл К.В., Петренко В.И. Разработка экспертной системы принятия оптимальных решений, обеспечивающих увеличение ресурса эксплуатации бандажей валковых прессов // Системні технології. – Днепропетровськ, 2013. – Вип. 2 (85). – С. 3-11.
8. Исследование влияния конфигурации формирующих элементов и параметров уплотнения на упругое последствие в брикетах Отчет о научно-исследовательской работе Т0.011.15 (заключительный) / Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины; рук. Баюл К.В.; исполн.: Ващенко С.В., Худяков А.Ю., Солодкая Н.А., Про-

кудина Э.Б. – Днепропетровск, 2015. – 66 с. – № госрегистрации 0115U001067.

Поступила в редакцию 10.10.2016

Рецензент: д.т.н, с.н.с. Муравьева И.Г.

РОЗРОБКА КРИТЕРІЇВ ВИБОРУ РАЦІОНАЛЬНОГО КАЛІБРУВАННЯ БАНДАЖІВ ВАЛКОВИХ ПРЕСІВ

Баюл К.В., Худяков О.Ю., Ващенко С.В., Солодка Н.О.

Показано актуальність і шляхи формування науково-обґрунтованого методу визначення раціонального калібрування валків брикетних пресів на основі аналізу зв'язків між параметрами калібрування бандажів і характеристиками процесу брикетування. Запропоновано критерії оцінки та вибору раціонального калібрування бандажів валкових пресів, що забезпечує задану величину ущільнення шихти, максимальну рівномірність розподілу напружень, залишкових пружних деформацій і щільності в брикеті, при мінімальних значеннях енергосилових параметрів, заданої продуктивності і максимальної тривалості експлуатації бандажів преса. Прийняті критерії дозволяють сформулювати гіпотезу вибору раціональної калібровки бандажів валкових пресів. Дана гіпотеза передбачає комплексний аналіз впливу конфігурації формируючих елементів на сукупність енергосилових та технологічних параметрів брикетування на різних стадіях експлуатації бандажів. Критерії та гіпотеза вибору раціональної калібровки бандажів валкових пресів сформульовано вперше та буде використано при створенні комплексного розрахунково-аналітичного методу визначення раціональних параметрів формируючих елементів бандажів валкових брикетних пресів. У подальшому, при отриманні нових результатів теоретичних та експериментальних досліджень запропоновані критерії та гіпотеза можуть бути трансформовані та доповнені.

Ключові слова: валковий прес, брикетування, калібрування, формиуючі елементи.

DEVELOPMENT OF CRITERIA FOR SELECTION RATIONAL CALIBRATION OF BRIQUETTING RINGS OF ROLLER PRESSES

Baiul K.V., Khudyakov A.Yu., Vaschenko S.V., Solodkaya N.A.

The relevance and ways of forming a scientifically grounded method for determining the rational calibration of rolls of briquette presses are shown on the basis of analysis of the relationships between the parameters of bandage calibration and the characteristics of the briquetting process. The criteria for evaluating and selecting rational calibration of pressing rings of roller press providing a specified value for the compacting of charge, the maximum uniformity of stress distribution, residual elastic deformations and density in a briquette, with minimum values of energy-strength parameters, a given productivity and maximum operating life of the pressing rings are proposed. The accepted criteria allow to formulate a hypothesis of a rational bandages calibration choice of roller presses. This hypothesis presupposes a comprehensive analysis of forming elements configuration influence on the aggregate of energy and technological parameters of briquetting at various stages of operation of bandages. The criteria and the hypothesis of choosing a rational calibration of banding presses for roller presses are formulated for the first time and will be used to create a comprehensive calculation and analysis method for determining the rational parameters of the forming elements of the bandages of briquette presses. Later, when new results of theoretical and experimental studies are received, the proposed criteria and hypothesis can be transformed and supplemented.

Keywords: roller press, briquetting, calibration, forming elements.