

УДК 622.781

МОДЕЛЬ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО АГЛОМЕРАТА

Рябчиков М.Ю., к.т.н., доцент кафедры автоматизированных систем управления (mr_mgn@mail.ru)

Гребенникова В.В., старший преподаватель кафедры автоматизированных систем управления (greb1981@mail.ru)

Рябчикова Е.С., к.т.н., старший преподаватель кафедры автоматизированных систем управления (mika.elena@mail.ru)

Богданов Н.В., магистрант кафедры автоматизированных систем управления (engelwelt89@mail.ru)

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
(455000, Россия, Магнитогорск, пр. Ленина, 38)

Аннотация. Рассмотрены особенности современных испытаний металлургического агломерата на прочность, их недостатки, связанные с проблемами комплексной оптимизации аглодоменного производства, требующими применения моделей разрушения агломерата. Дан обзор теорий перемещения расплава при спекании и особенностей формирования структуры агломерационного спека, а также предложена модель разрушения металлургического агломерата, основанная на комбинированном использовании модели напряженного состояния твердого включения в матрице и модели разрушения на основе закона Риттингера. Определены нагрузки, действующие на куски агломерата в испытательном барабане, и предложен способ адаптации модели разрушения агломерата с использованием данных о гранулометрических характеристиках продуктов испытаний. При адаптации предложено использовать вероятностные распределения параметров модели разрушения. Получены зависимости этих параметров от основности агломерата, содержания углерода в шихте и крупности известняка.

Ключевые слова: качество металлургического агломерата, модель разрушения агломерата, холодная механическая прочность, прочность на истирание, оптимизация управления аглодоменным производством.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-3-159-166

В настоящее время многие крупные металлургические предприятия ставят перед собой цели, связанные с решением задач комплексной оптимизации аглодоменного или даже аглококсодоменного производства. Например, на ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» запланирован ряд работ, направленных на решение подобной задачи, включающий подготовку информационных потоков, алгоритмического и программного обеспечения для реализации упреждающего модельного управления аглококсодоменным производством. Необходимость подобных разработок связана с непостоянством сырьевой базы предприятия, потребностью гибкого решения задач стратегического планирования при управлении производством.

Качество производимого предприятием агломерата во многом определяет эффективность доменного процесса и является связующим понятием, позволяющим решать задачи комплексной оптимизации аглодоменного производства. К параметрам оценки качества относят восстановимость, холодную механическую прочность и прочность после восстановления. Непостоянство сырьевой базы может приводить к значимым колебаниям данных параметров даже при постоянных значениях основности шихты, расхода и параметрах топлива.

Организация управления качеством агломерата требует решения двух основных проблем. Во-первых,

требуется разработка системы расчета необходимых плановых затрат топлива и прогнозируемой производительности агломашин при заданных параметрах шихты и ограничениях на качество агломерата. Во-вторых, нужна система оперативного управления дозированием топлива, поддерживающая качественные характеристики агломерата на заданном уровне в условиях поставки материалов с усреднительного склада и, тем самым, позволяющая обеспечить соответствие технологического процесса предварительно спрогнозированным плановым показателям. Решение рассмотренных задач возможно при наличии моделей агломерационного процесса [1], дополненных статистическими моделями качества металлургического агломерата [2, 3].

Статистические модели качества агломерата позволяют прогнозировать значения параметров качества в форме индексов *TI*, *RI*, *RDI*, определяемых требованиями стандарта ISO и ГОСТ. В то же время, в полной мере неясно, каким образом подобные оценки могут быть интегрированы с моделями доменного процесса [4, 5]. Как правило, при решении подобных задач ограничиваются усредненным влиянием показателя на общую эффективность доменного процесса. Список таких эффектов представляют в форме таблиц отклонения показателей процесса от базового режима [6]. Например известно, что уменьшение содержания фракции 5 – 0 мм

в железорудной шихте на 1 % приводит к уменьшению расхода кокса в доменном процессе на 0,5 % и росту производительности доменных печей на 1 %.

Одним из способов уточнения эффектов, связанных с изменением холодной механической прочности агломерата, является использование моделей разрушения, адаптируемых по результатам испытаний агломерата на прочность в испытательном барабане.

Нагрузки на агломерат в испытательном барабане (ГОСТ 15137-77)

Под механической прочностью агломерата понимают его способность сопротивляться разрушающим усилиям (сжатию и удару) при транспортировке, загрузке и движении в доменной печи. На металлургических предприятиях агломерат на прочность испытывают согласно ГОСТ 15137-77 в барабане диаметром 1000 мм и длиной 500 мм с приваренными внутри двумя полками высотой 50 мм. Специально отобранную пробу агломерата крупностью 5 – 40 мм и массой 15 кг загружают в барабан, который затем совершает 200 оборотов со скоростью 25 об/мин. Показателем холодной механической прочности является отношение массы фракции 5 – 0 мм (6,3 – 0 мм согласно ISO) к массе исходной пробы, выраженное в процентах.

Движение кусков агломерата в испытательном барабане определяется скоростью вращения барабана, коэффициентом трения кусков с полочками, размерами кусков. Численное моделирование траекторий движения кусков в барабане (рис. 1) показало относительно слабое влияние последних двух факторов. Полученное среднее значение скорости, при которой происходит удар, составляет $\vartheta_0 = 4,15$ м/с.

Куски агломерата испытывают динамическую нагрузку в виде кратковременных ударов при падении с полочек барабана. При реальном ударе макроскопических тел происходит деформация соударяющихся тел и распространение по ним упругих волн, передающих взаимодействие от сталкивающихся границ по всему телу. Согласно работе [7], время удара можно оценить из выражения

$$\Delta t = \frac{2L}{C_p}, C_p = \sqrt{\frac{K + (4/3)G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}}, \quad (1)$$

где Δt – продолжительность удара, с; C_p – скорость распространения упругой продольной волны; $2L$ – характерный размер куса агломерата с учетом распространения волны в прямом и обратном направлении; K – модуль объемного сжатия; G – модуль сдвига; E – модуль Юнга, Па; ν – коэффициент Пуассона; ρ – плотность вещества, кг/м³.

Согласно данным работы [8], где выполнено исследование физико-механических свойств минеральных фаз аглоспексов, полученных из концентратов железных

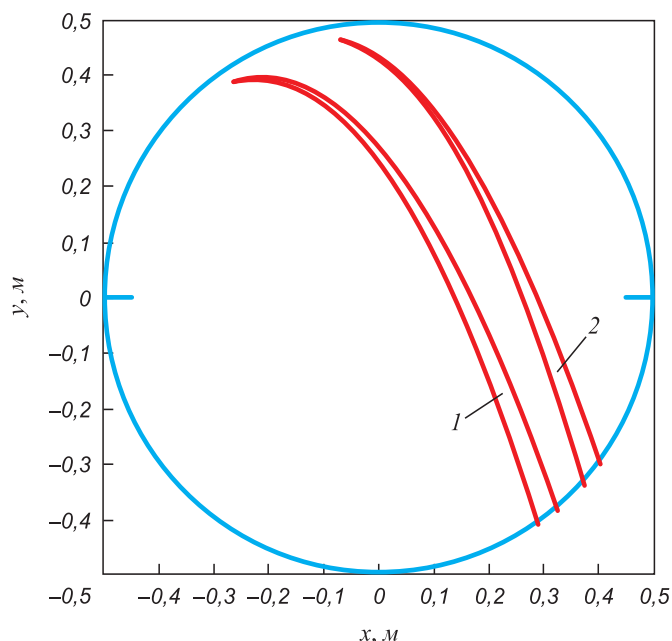


Рис. 1. Траектории движения кусков агломерата различного размера при падении в испытательном барабане:

1 – при коэффициенте трения 0,1 (скорости удара 4,13 – 4,17 м/с);
2 – при коэффициенте трения 0,8 (скорости удара 4,09 – 4,15 м/с);
x, y – координаты относительно центра барабана, м

Fig. 1. Movement patterns for sinter lumps of various size upon falling in a test drum:

1 – at the friction coefficient of 0.1 (impact velocity of 4.13 – 4.17 m/s);
2 – at the friction coefficient of 0.8 (impact velocity of 4.09 – 4.15 m/s);
x, y – coordinates relative to the drum center, m

руд разных месторождений, модуль Юнга принят на минимальном уровне $E = 150$ ГПа. Объемная плотность агломерата, определяемая внешним объемом твердого образца, без учета присутствующих в нем пустот (открытых и закрытых пор, трещин и щелей) принята на уровне 3500 кг/м³. Среднее значение коэффициента Пуассона $\nu = 0,15$ [9].

Считаем, что происходит неупругий удар, тогда из закона сохранения энергии находим силу, действующую на кусок агломерата:

$$F = ma_t = m \frac{\Delta \vartheta}{\Delta t} = \rho V \frac{\vartheta_0 - 0}{\Delta t} = \rho V \frac{\vartheta_0}{\Delta t}, \quad (2)$$

где m – масса куса агломерата; V – объем куса агломерата, м³; a_t – ускорение торможения, м/с².

Для перехода от размера кусков агломерата к их массе и расчету давления, связанного с ударом, необходимо задаться формой кусков, что требует в общем случае принятия допущений. Исходя из результатов скелетизации и морфологической обработки изображений агломерата (рис. 2) в работе [10] формой принят додекаэдр (пять сторон у грани).

Считая, что сила удара F воздействует на грань, определим нагрузку (давление) Q , которую испытывает кусок при ударе:

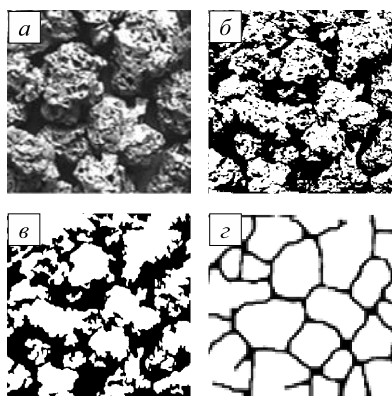


Рис. 2. Этапы обработки изображения насыщенного слоя агломерата: *a* – исходное изображение; *b* – бинарное изображение; *в* – результат бинарной рекурсивной фильтрации; *г* – результат скелетизации и морфологической обработки [6]

Fig. 2. Sinter filling layer, stages of image processing: *a* – initial image; *b* – binary image; *в* – result of binary recursive filtering; *г* – result of thinning operation and morphological processing [6]

$$Q = \frac{F}{S_{\text{гр}}}; S_{\text{гр}} = \frac{3l^2 \sqrt{5(5+2\sqrt{5})}}{12}; l = \sqrt[3]{\frac{4V}{15+7\sqrt{5}}}, \quad (3)$$

где V – объем куска, м^3 ; l – длина ребра, м ; $S_{\text{гр}}$ – площадь грани, м^2 .

Таким образом, принятые допущения позволяют решать задачи адаптации моделей разрушения по результатам испытаний в барабане.

Описание процессов формирования агломерационного спека

Известно, что результат разрушения руд и агломерата во многом определяется их структурными характеристиками [8]. Закономерности разрушения агломерата изучены меньше, чем металлов и других твердых тел.

Согласно работе [11], шихту можно представить как совокупность примыкающих друг к другу элементарных ячеек размером максимум до 2 см. Неокомкованная мелкая часть шихты (0 – 2 мм), включая часть частиц топлива, располагается в зазорах между комочками шихты размером от 12 до 2 мм. Закристаллизовавшийся агломерационный спек представляет собой структуру, состоящую из уплотненных объемов железорудного материала размером от 5 до 25 мм, соединенных друг с другом перегородками небольшой толщины. Такие уплотненные объемы чередуются с порами размером 5 – 10 мм. В работе [12] такая блочная макроструктура спека объяснена точечным расположением частиц топлива в шихте – очаги горения частиц топлива удалены друг от друга на расстояние от 5 до 10 – 15 мм.

Известны различные теории перемещения расплава при спекании. Согласно Е.Ф. Вегману, образующийся вокруг горящей частицы топлива расплав натекает

на нее и постепенно заполняет пространство, которое занимала эта частица. После полного выгорания на ее месте образуется блок. Согласно рассмотренной в работе [11] теории В.И. Коротича считается, что процессам, идущим в высокотемпературной зоне спекаемого материала, предшествует период, в котором появляются железистые расплавы при температурах 1100 – 1200 °С. Наиболее интенсивно все эти процессы идут в поровом пространстве между комочками шихты. По этим порам-каналам с большой скоростью движется газовый поток, обеспечивающий горение топливных частиц. Первые порции расплава появляются вблизи горящих частиц коксика, имеющих температуру на поверхности выше 1600 °С. Образовавшийся расплав удаляется от частиц топлива, втягиваясь капиллярными силами в поры еще не расплавившейся шихты.

На среднестатистический характер макроструктуры спека оказывают влияние такие факторы, как содержание топлива в шихте, крупность частиц топлива, гранулометрический состав шихты, основность шихты, влияющая на вязкость и динамику перемещения расплава. В зависимости от сочетания этих факторов возможно получение различных по макроструктуре железорудных агломератов.

Агломераты с мелкопористой губчатой структурой получаются при спекании шихт из концентратов с небольшим размером кусков. При спекании образуется большое количество равномерно распределенных очагов горения коксика. Для соединения комочков в этих условиях не требуется большого количества расплава, и процесс ведется при минимальном содержании углерода в шихте, который составляет 2,5 – 3,5 %. Основным связующим элементом в структуре спека является манжета агломерационного расплава, защемленная между соседними элементами шихты (комочками, образованными вокруг кусков возврата).

Блочная крупнопористая структура образуется при использовании шихт из железорудных компонентов с эквивалентным диаметром комочков до 10 – 12 мм. Для достижения полного сплавления крупных комочков шихты требуется более продолжительное воздействие высоких температур, что требует применения более крупных частиц коксика (1,5 – 3,0 мм), а также большего расхода топлива (до 5,0 – 5,5 %). Это приводит к образованию значительного количества расплава, который сплавляется с зародышем комочка в единое целое.

Монолитная структура образуется при высоких расходах твердого топлива в шихте, а также при ее высокой основности. Для такого типа структуры характерны сильно оплавленные участки рудного материала [4].

Общий принцип формирования блочной структуры агломерационного спека иллюстрирует рис. 3. Исходя из приведенного обзора, можно сделать заключение, что прочность агломерата мелкопористой структуры определяется прочностью манжеты агломерационного расплава. В таком случае элемент разрушаемой струк-

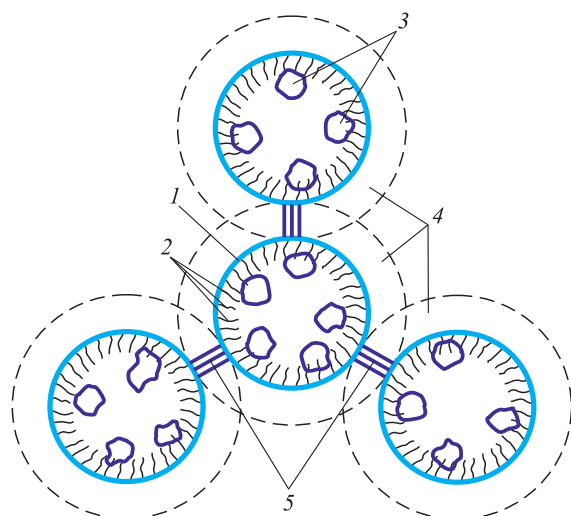


Рис. 3. Общий принцип формирования блочной структуры агломерационного спека:

1 – окомкованный кусок шихты; 2 – накатанная часть; 3 – окомкованные частицы топлива; 4 – область манжеты (пространство стяжек и пор); 5 – условные стяжки

Fig. 3. Sinter cake block structure, general concept of formation: 1 – pelletized lump of charge material; 2 – distributed portion; 3 – pelletized particles of fuel; 4 – clamping area (area of constrictions and pores); 5 – conventional constrictions

туры может быть представлен как тело с твердым включением, которым является кусок возврата, упрочненный расплавом окомкованной шихты, вокруг которого расположена манжета агломерационного расплава, имеющая более низкую прочность вследствие неоднородной структуры и наличия пор. При переходе к крупнопористой и монолитной структуре можно предположить, что роль твердого включения могут также выполнять крупные области застывшего расплава.

Одним из наиболее распространенных механизмов образования зародышевых трещин общепризнан дислокационный механизм. Схема модели для случая сжимающих нагрузок, приложенных к внешней поверхности, приведена на рис. 4.

На рис. 4 рассмотрен случай разрушения с формированием одноосного напряженного состояния. Приведенную модель можно обобщить на случай гидростатического давления – аналог включения одного минерала в другой, испытывающего всестороннее давление со стороны окружающих его зерен других минералов. Радиальные и угловые составляющие нормальных напряжений в матрице σ_{rr} , $\sigma_{\theta\theta}$ являются функцией множества параметров. Аналитическое решение задачи предложено в работе [8]. Значения σ_{rr}^r , $\sigma_{\theta\theta}^r$ на границе срастания при гидростатическом давлении могут быть найдены из выражений:

$$\begin{aligned}\sigma_{rr}^r &= -P \frac{3E_B(1-\nu_M)}{E_B(1+\nu_M) + 2E_M(1-2\nu_B)}; \\ \sigma_{\theta\theta}^r &= -P \frac{3E_B\nu_M - 3E_M(1-2\nu_B)}{E_B(1+\nu_M) + 2E_M(1-2\nu_B)}.\end{aligned}\quad (4)$$

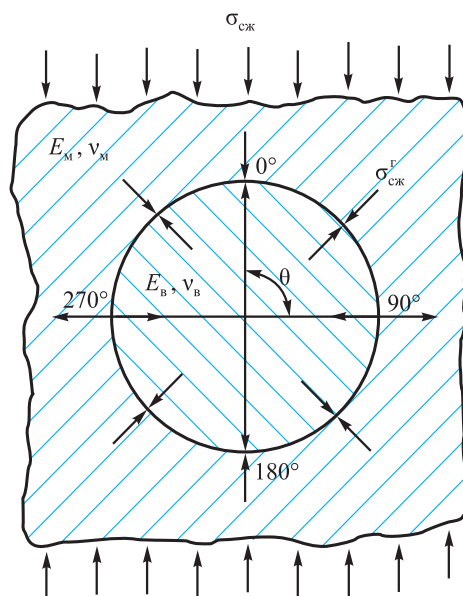


Рис. 4. Модель напряженного состояния твердого включения в матрице:

E_B, E_M, ν_M, ν_B – модуль упругости и коэффициент Пуассона включения и матрицы; $\sigma_{сж}$ – величина приложенного напряжения; $\sigma_{сж}^r$ – величина напряжения на границе срастания [5]

Fig. 4. Model of hard inclusion tension in the matrix:

E_i, E_m, ν_m, ν_i – modulus of elasticity and Poisson's ratio for inclusion and matrix; σ_{compr} – applied tension; $\sigma_{сж}^r$ – tension at the intergrowth boundary [5]

Авторами показано, что характер разрушения руд со структурами подобного типа будет определяться соотношением прочности вмещающей среды и включения. Частный случай решения разобран в работе [13] на примере задачи деформирования руды с жесткими включениями в условиях сжатия. Рассмотрена одномерная задача о деформировании упругого шара с внешним радиусом b с абсолютно жестким сферическим включением радиуса a в центре шара под действием равномерного давления Q на внешней поверхности шара. Разрушение происходит при достижении максимальным касательным напряжением $\tau = |\sigma_{\max} - \sigma_{\min}|/2$ предельного значения $\sigma_c/2$, где σ_{\max} и σ_{\min} – максимальное и минимальное значение главного напряжения, а σ_c – прочность на одноосное сжатие. Максимальное касательное напряжение на расстоянии r от центра шара равно

$$\tau = \frac{Q}{2} \frac{3(1-2\nu_M) \frac{a^3}{r^3}}{(1+\nu_M) + 2(1-2\nu_M) \frac{a^3}{b^3}}, \quad (a \leq r \leq b). \quad (5)$$

Наибольшая величина максимального касательного напряжения достигается на контакте руды с жестким включением, т. е. разрушение начинается на внутренней границе шара. Поскольку в процессе деформирования руды напряжения не превышают величины прочности руды на сжатие σ_c , то в случае равенства

сжимающей гидростатической нагрузки Q прочности на сжатие, разрушение начинается изнутри на контакте жесткого включения с рудой ($r = a$).

Рассмотренный способ позволяет выполнить моделирование разрушения манжеты, однако при приближении размеров кусков к размерам жесткого включения $2a$, модель (5) не позволяет оценить ход дальнейшего разрушения. Учитывая максимальные размеры $2a = 10 - 12$ мм и требования ГОСТ по оценке долей менее 5 и 6,3 мм, необходимо моделирование дальнейшего разрушения и образования мелочи.

Для описания разрушения частиц размером менее $2a$ используем математическую модель разрушения, основанную на законе Риттингера, рассмотренную в работе [14]. Согласно этому закону, расход энергии U на измельчение породы пропорционален вновь образованной поверхности с площадью S_n и не зависит от формы механизма измельчения и величины энергии удара:

$$U = KS_n = K \left(\frac{1}{d_{cp}} - \frac{1}{D_{cp}} \right) n = Kn \left(\frac{\gamma - 1}{D_{cp}} \right), \quad d_{cp} = \frac{D_{cp}}{\gamma}, \quad (6)$$

где K – коэффициент пропорциональности или показатель удельной поверхностной энергоемкости разрушения; D_{cp} и d_{cp} – средние диаметры кусков породы до и после дробления соответственно; n – количество кусков породы; γ – кратность дробления.

Примем, что разрушение происходит при $\tau > \sigma'_c$, где $\sigma'_c = \sigma_c/b$; b – внешний радиус куса; σ_c – параметр адаптации модели, не зависящий от размера куса. Тогда, учитывая, что разрушение происходит при малых значениях $a \approx 0$ в точке $r = a$, получим условие разрушения:

$$\frac{Q}{2} \frac{3(1 - 2v_m)}{1 + v_m} > \frac{\sigma_c}{b} \quad \text{или} \quad \tau' > \sigma_c, \quad \text{где} \\ \tau' = b \frac{Q}{2} \frac{3(1 - 2v_m)}{1 + v_m}. \quad (7)$$

Для практического использования рассмотренной модели требуется разработка способа ее адаптации и настройки в соответствии с результатами, полученными при тестировании агломерата на прочность в барабане.

Адаптация модели разрушения и полученные результаты

Сопоставление результатов расчетов по уравнениям (5), (7) с экспериментальными данными затруднено случайным характером величин σ_m (прочность манжеты на одноосное сжатие) и σ_c для различных кусков агломерата. Поэтому параметрами адаптации модели разрушения приняты нормальные распределения $N(M(\sigma_m), S^2(\sigma_m))$ и $N(M(\sigma_c), S^2(\sigma_c))$, а также параметр a . Для расчета стабильного гранулометрического

состава агломерата после испытаний выполняли моделирование разрушения 20 тыс. кусков агломерата.

Модель разрушения настраивалась по данным работы [15]. Использовались сведения по шестидесяти трем гранулометрическим составам агломератов из руд различных месторождений и разного фракционного состава. Для каждого случая удалось подобрать параметры, обеспечивающие соответствие расчетной плотности распределения размеров кусков экспериментальным данным. На рис. 5 приведен пример расчетной функции плотности распределения.

На рис. 6 приведены зависимости M , S , a от содержания углерода в шихте для агломератов различной основности из оленегорского концентрата, высокогорской магнетитовой аглоруды и соколовской руды, позволяющие отметить ряд общих тенденций, связанных с расходом топлива.

С ростом содержания углерода математическое ожидание $M(\sigma_m)$ увеличивается, т. е. прочность манжеты растет, что, однако, сопровождается ростом дисперсии прочности $S^2(\sigma_m)$.

Следует отметить высокую степень соответствия полученных зависимостей для параметров a , $M(\sigma_c)$, $S(\sigma_c)$, характеризующих прочность твердых включений, окруженных манжетой. Можно предположить, что с ростом содержания углерода роль расплава в формировании таких центров растет, что приводит к уменьшению разброса значений $M(\sigma_c)$ различных агломератов. Это также может являться причиной стабилизации среднего размера твердых включений a наряду с большим оплавлением кусков агломерируемых окомкованных материалов.

Настройка моделей по представленным в работе [15] производственным данным, полученным при достаточном расходе топлива (высокая степень постоянства индекса механической прочности TI), показало наличие ряда тенденций, связанных с основностью агломерата (рис. 7).

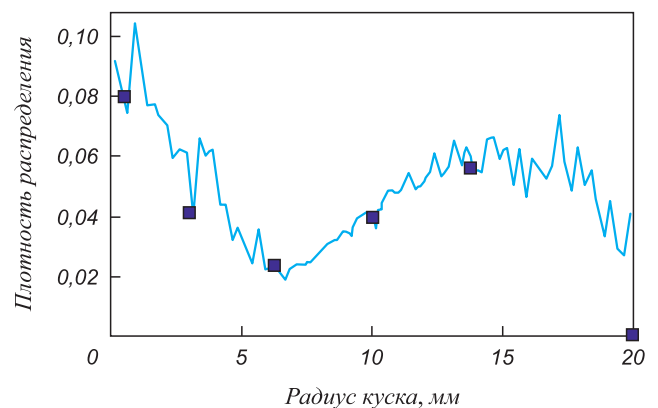


Рис. 5. Пример расчетной функции плотности распределения радиусов кусков после моделирования разрушения агломерата (точками показаны экспериментальные данные)

Fig. 5. Distribution density of lump radii after sinter fracture simulation, example of calculated function (points denote experimental data)

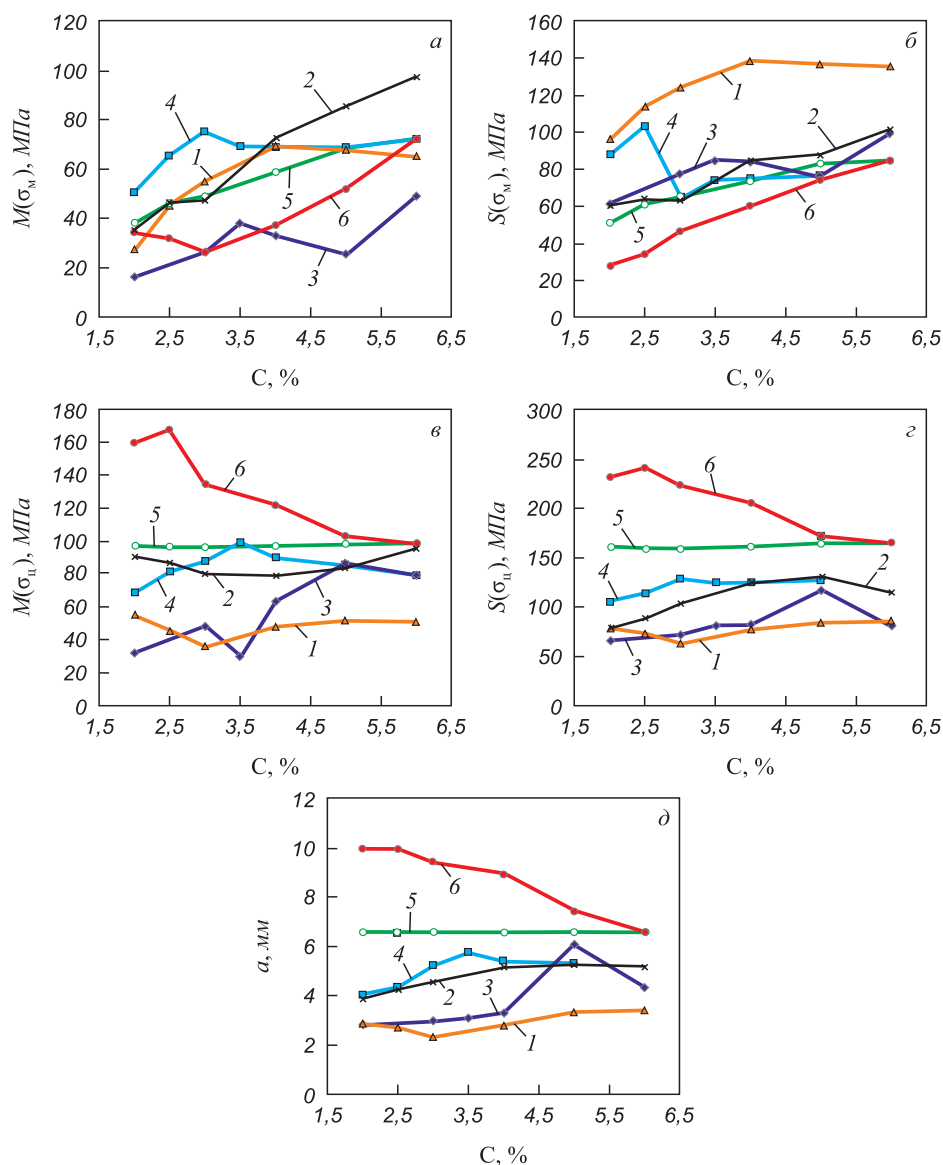


Рис. 6. Зависимости настроек модели разрушения от содержания углерода топлива в шихте:
1, 2 – высокогорская магнетитовая аглоруда при основности 0,1 и 1,2 соответственно; 3, 4 – оленегорский концентрат при основности 0,3 и 0,75 соответственно; 5, 6 – соколовская руда при основности 0,1 и 1,2 соответственно

Fig. 6. Dependences of fracture model adjustments from fuel carbon content in charge material:
1, 2 – magnetite sintering ore from Vysokogorskii mining and processing works with basicity of 0.1 and 1.2 respectively; 3, 4 – concentrate from Olenegorskii mining and processing works, with basicity of 0.3 and 0.75 respectively; 5, 6 – ore from Sokolovskii mining and processing works with basicity of 0.1 and 1.2 respectively

С ростом основности в диапазоне 0,1 – 1,2 происходит увеличение средней прочности включений, а также стабилизация прочности манжеты.

В таблице приведены результаты настройки модели при различном размере частиц известняка в шихте.

Из таблицы видно, что при большем размере частиц известняка увеличивается размер и прочность твердого центра, но существенно снижается прочность манжеты, что приводит к снижению индекса холодной механической прочности.

Выводы. Из полученных в ходе настройки модели результатов следует, что прочность агломерата определяется совокупностью параметров, описывающих как

средние значения прочности манжеты и включений, так и их разброс. При этом одному и тому же индексу холодной механической прочности TI могут соответствовать различные комбинации значений параметров адаптации, что свидетельствует о том, что барабанные индексы прочности как параметры стабилизации качества агломерата могут не гарантировать стабилизацию показателей доменного процесса при значимом изменении рудной базы металлургического предприятия.

Для настройки модели разрушения в таком случае требуются данные о гранулометрическом составе агломерата до и после испытаний в барабане. Адаптация модели по заданному индексу TI может быть выполне-

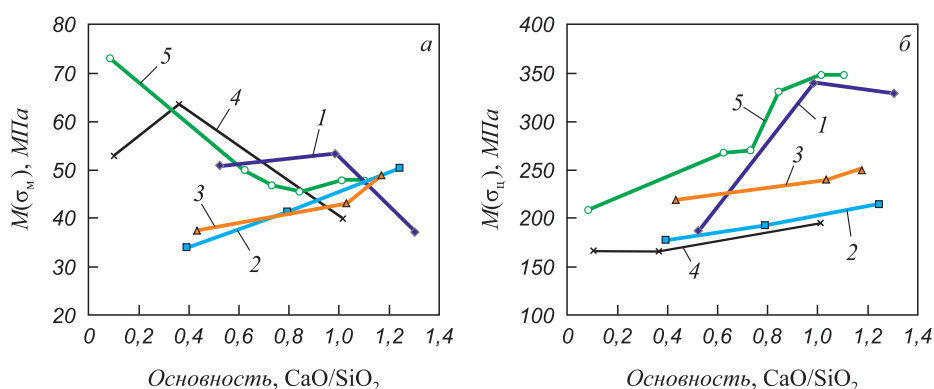


Рис. 7. Зависимости настроек модели разрушения от основности, полученные по производственным данным при достаточном расходе топлива: 1 – ПАО «Северсталь»; 2 – ЕВРАЗ НТМК; 3 – ОАО «Высокогорский горно-обогатительный комбинат»; 4 – ЗАО «Макеевский металлургический завод»; 5 – ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог»

Fig. 7. Dependences of fracture model adjustments from basicity parameters based on production data, at sufficient fuel consumption: 1 – PJSC Severstal; 2 – “EVRAZ NTMK”; 3 – OJSC “Vysokogorskii GOK”; 4 – CJSC “Makeevskii Metallurgical Plant”; 5 – PJSC “ArcelorMittal Krivoi Rog”

Влияние крупности известняка на параметры модели разрушения

Influence of limestone lump size on fracture model parameters

Крупность известняка, мм	a , мм	$M(\sigma_m)$, МПа	$S(\sigma_m)$, МПа	$M(\sigma_{ц})$, МПа	$S(\sigma_{ц})$, МПа	TI , %
3	14	12,9	32,2	264,8	309,3	62,65
1	8	56,4	45,0	167,3	187,5	68,87

на при наличии данных об общих тенденциях и взаимосвязях между параметрами адаптации для рассматриваемых условий агломерационного процесса.

Основным достоинством предложенных моделей является возможность их последующего использования в составе моделей транспортировки агломерата, а также в доменном процессе с целью решения задач комплексной оптимизации аглодоменного производства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Рябчиков М.Ю., Гребенникова В.В. Комплекс моделей автоматизированной системы интеллектуальной поддержки управления качеством металлургического агломерата // Автоматизированные технологии и производство. 2015. № 2 (8). С. 4 – 8.
- Ryabchikov M. Y., Grebennikova V. V. Simulation of the combined effect of production factors on metallurgical sinter mechanical strength // Metallurgist. 2013. Vol. 57. No. 3/4. P. 274 – 283.
- Рябчиков М.Ю., Гребенникова В.В., Рябчикова Е.С. Контроль качества металлургического агломерата с использованием модели восстановимости // Сталь. 2014. № 2. С. 4 – 8.
- Дмитриев А.Н., Витькина Г.Ю., Чесноков Ю.А. Создание методических основ анализа влияния качественных характеристик железорудного сырья и кокса на технико-экономические показатели доменного процесса: Сб. тр. «Физическая химия и технология в металлургии». – Екатеринбург: Имет УрО РАН, 2015. С. 309 – 314.
- Перминов А.И. Повышение эффективности доменной плавки на основе рационального выбора состава шихты: Дис. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2008. – 153 с.
- Товаровский И.Г. Нормативная оценка влияния параметров доменной плавки на расход кокса и производительность // Сталь. 2014. № 5. С. 4 – 11.
- Сивухин Д.В. Общий курс физики: Учеб. пособие для вузов. – М.: Физматлит, Изд-во МФТИ, 2005. – 560 с.
- Хопунов Э.А. Селективное разрушение минерального и техногенного сырья (в обогащении и металлургии). – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2013. – 429 с.
- Гольдштейн Р.В., Городцов В.А., Лисовенко Д.С. Акустическая механика кристаллических материалов // Известия РАН. Механика твердого тела. 2010. № 4. С. 43 – 62.
- Ершов Е.В. Методы, модели и алгоритмы управления технологическим процессом производства агломерата на основе оптико-электронного контроля его качества: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Курск: ГОУ ВПО КурскГТУ, 2009. – 36 с.
- Коротич В.И., Фролов Ю.А., Бездежский Г.Н. Агломерация рудных материалов. – Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2003. – 400 с.
- Вегман Е.Ф., Похвиснев А.Н., Шаров С.И. и др. Исследование текстуры железорудного агломерата // Сталь. 1969. № 10. С. 873 – 877.
- Болтенгаген И.Л., Власов В.Н., Клишин В.И. Расчет параметров валкового пресса для дробления кимберлитовой руды // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2003. № 3. С. 61 – 72.
- Дырда В.И., Калашников В.А., Хмель И.В., Калганков Е.В. Кинетика измельчения минерального сырья в шаровых мельницах с резиновой футеровкой // Геотехнічна механіка. 2013. № 108. С. 89 – 96.
- Базилевич С.В., Вегман Е.Ф. Агломерация. – М.: Металлургия, 1967. – 368 с.

Поступила 12 октября 2015 г.

FRACTURE MODEL OF METALLURGICAL SINTER

**M.Yu. Ryabchikov, V.V. Grebennikova, E.S. Ryabchikova,
N.V. Bogdanov**

**Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov,
Magnitogorsk, Russia)**

Abstract. The paper covers specific features of up-to-date test methods for metallurgical sinter strength, deficiencies of these methods, related to issues of overall improvement of sintering and blast-furnace production processes requiring application of sinter fracture models. Theories of liquid melt migration upon sintering as well as features of sinter cake formation are reviewed; a model of metallurgical sinter fracture is suggested as well, which is based on combined use of the model for hard inclusion tension in the matrix along with the fracture model based on Rittinger's law. Forces applied to sinter lumps in a test drum are determined and a method for adjustment of the sinter fracture model is suggested with use of granulometric properties of products under testing. It is suggested to use probability distribution of fracture model parameters for the purpose of adjustment. Dependences of these parameters from sinter basicity, carbon content in the charge material and limestone lump size are determined.

Keywords: quality of metallurgic sinter; sinter fracture model; cold mechanical strength; abrasion resistance; improvement of control over sintering and blast-furnace production.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-3-159-166

REFERENCES

1. Ryabchikov M.Yu., Grebennikova V.V. Set of models for automated intelligent assistance system for quality control of metallurgical sinter. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva*. 2015, no. 2(8), pp. 4–8. (In Russ.).
2. Ryabchikov M. Y., Grebennikova V. V. Simulation of the combined effect of production factors on metallurgical sinter mechanical strength. *Metallurgist*. 2013, vol. 57, no. 3/4, pp. 274–283.
3. Ryabchikov M.Yu., Grebennikova V.V., Ryabchikova E.S. Control of metallurgical sinter quality using reducibility model. *Stal'*. 2014, no. 2, pp. 4–8. (In Russ.).
4. Dmitriev A.N., Vit'kina G.Yu., Chesnokov Yu.A. Development of methodological basis for analysis of iron-ore raw material and coke quality influence on technical and economic performance of blast-furnace melting process. In: *Fizicheskaya khimiya i tekhnologiya v metallurgii. Sbornik trudov, posvyashchennyi 60-letiyu IMET UrO RAN* [Physical chemistry and technology of metallurgy. Coll. of works dedicated to the 60th anniversary of IMET UB RAS]. Ekaterinburg, 2015, pp. 309–314. (In Russ.).
5. Perminov A.I. *Povyshenie effektivnosti domennoi plavki na osnove ratsional'nogo vybora sostava shikhty: dis. ... kand. tekhn. nauk.* [Improvement of blast-furnace melting productivity based on reasonable selection of charge material composition. Cand. Tech. Sci. Diss.]. Ekaterinburg, 2008, 153 p. (In Russ.).
6. Tovarovskii I.G. Influence of blast-furnace parameters on coke consumption and productivity. *Steel in Translation*. 2014, vol. 44, no. 5, pp. 350–358.
7. Sivukhin D.V. *Obshchii kurs fiziki: ucheb. posobie dlya vuzov* [General physics course: manual for universities]. Moscow: Fizmatlit: Izd-vo MFTI, 2005, 560 p. (In Russ.).
8. Khopunov E.A. *Selektivnoe razrushenie mineral'nogo i tekhnogen-nogo syr'ya (v obogashchenii i metallurgii)* [Selective fracture of mineral and industrial raw material (in terms of concentration and metallurgy)]. Ekaterinburg: OOO "UIPTs", 2013, 429 p. (In Russ.).
9. Gol'dshtein R.V., Gorodtsov V.A., Lisovenko D.S. Acoustic mechanics of crystalline materials. *Izvestiya RAN, MTT*. 2010, no. 4, pp. 43–62. (In Russ.).
10. Ershov E.V. *Metody, modeli i algoritmy upravleniya tekhnologicheskimi protsessami proizvodstva aglomerata na osnove optiko-elektronnogo kontrolya ego kachestva: avtoref. diss.: dok. tekhn. nauk.* [Methods, models and procedures of sinter production process control based on electro-optical inspection of its quality. Extended Abstract of Dr. Sci. Diss.]. Kursk: GOU VPO KurskGTU, 2009, 36 p. (In Russ.).
11. Korotich V.I., Frolov Yu.A., Bezdezhskii G.N. *Agglomeratsiya rudnykh materialov* [Sintering of ore materials]. Ekaterinburg: GOU VPO "UGTU-UPI", 2003, 400 p. (In Russ.).
12. Pokhvisnev A.N., Sharov S.I., Vegman E.F. Investigation of iron-ore sinter texture. *Stal'*. 1969, no. 10, pp. 873–877. (In Russ.).
13. Boltengagen I.L., Vlasov V.N., Klishin V.I. Calculation of roller-press parameters for kimberlite ore crushing. *Journal of Mining Science*. 2003, vol. 39, no. 3, pp. 260–270.
14. Dyrda V.I., Kalashnikov V.A., Khmel' I.V., Kalgankov E.V. Kinetics of crushing of mineral raw materials in rubber-lining ball mills. *Geotekhnicheskaya mekhanika*. 2013, no. 108, pp. 89–96. (In Russ.).
15. Bazilevich S.V., Vegman E.F. *Agglomeratsiya* [Sintering]. Moscow: Metallurgiya. 1967, 368 p. (In Russ.).

Information about the authors:

M.Yu. Ryabchikov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Automated Control Systems (mr_mgn@mail.ru)

V.V. Grebennikova, Senior Lecturer of the Chair of Automated Control Systems (greb1981@mail.ru)

E.S. Ryabchikova, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair of Automated Control Systems (mika.elena@mail.ru)

N.V. Bogdanov, MA Student (engelwelt89@mail.ru)

Received October 12, 2015