

УДК 622.788:669.168

## МЕХАНИЗМ МИГРАЦИИ МЕЛКОЙ ФРАКЦИИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ БРИКЕТОВ ЭКСТРУЗИИ (БРЭКСОВ)

© Бижанов Айтбер Махачевич<sup>1</sup>; Курунов Иван Филиппович<sup>2</sup>, д-р техн. наук, проф.;

Ивонин Дмитрий Валерьевич<sup>3</sup>, канд. физ.-мат. наук

<sup>1</sup> J.C.Steele & Sons, Inc. USA, Statesville, NC. E-mail: abizhanov@jcsteele.com

<sup>2</sup> ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат». Россия, г. Липецк

<sup>3</sup> Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН. Россия, Москва

Статья поступила 27.05.2013 г.

На основе гидродинамического подхода предложено объяснение явления миграции мелкой фракции на поверхность брэксов в процессах экструзионного окускования. Изученное явление может оказывать заметное влияние на упрочнение приповерхностных зон брэкса.

**Ключевые слова:** брикет экструзии (брэкс); жесткая вакуумная экструзия; мелкая фракция; гидродинамическая модель.

Технология жесткой вакуумной экструзии компании J.C.Steele & Sons, Inc. успешно применяется для производства брикетов экструзии (брэкс), эффективно используемых в составе шихты доменных и ферросплавных печей [1, 2].

Одним из отличительных свойств брэксов является высокая степень однородности их фазового состава, обеспечиваемая применением шнековой транспортировки и формования гомогенной смеси на всех стадиях технологического процесса – от питателя равномерной подачи до экструдера.

Вместе с тем в зависимости от гранулометрии и содержания исходных компонентов шихтовой смеси в процессе ее экструзионного окускования могут происходить явления структурообразования, приводящие к неоднородному распределению частиц разного размера по радиусу брэкса. В частности, может наблюдаться выдавливание мелкой фракции шихтовой смеси на его поверхность.

Такие явления иллюстрируются фотографиями брэксов, изготовленных из смеси углеродсодержащего материала и мелочи строительных материалов (рис. 1, слева). Хорошо видно, что углеродсодержащая часть смеси образовала внешний слой брэкса. На правом фото изображен коксовый брэкс, связанный эпоксидной смолой, мельчайшие частички которой выдавлены в процессе экструзионного окускования.

Можно предположить, что наличие поверхностного слоя, состоящего из мелких коллоидных частиц и отличающегося более низкими значениями коэффициента теплопроводности, будет способствовать более раннему образованию металлической корочки брэкса, что является важным этапом упрочнения брикетов при их восстановлении [3].

Выдавливание мелкой фракции может также приводить к образованию приповерхностных слоев, обогащенных цементным связующим с соответствующим эффектом их армирования. Такое явление будет предметом дополнительных исследований.

Для того чтобы объяснить это явление, рассмотрим феноменологию процесса экструзии. На рис. 2 показан пример образования ламинатных слоев, возникающих в процессе формовки ма-

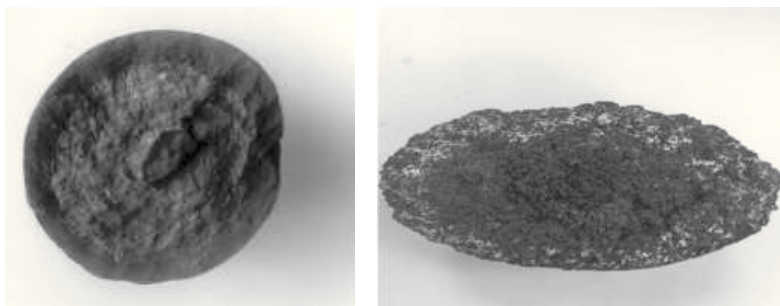


Рис. 1. Брэксы со слоем мелкой фракции на поверхности: слева – поверхностный слой угля и мелкая фракция строительных материалов; справа – коксовый брэкс с эпоксидной смолой в качестве связующего

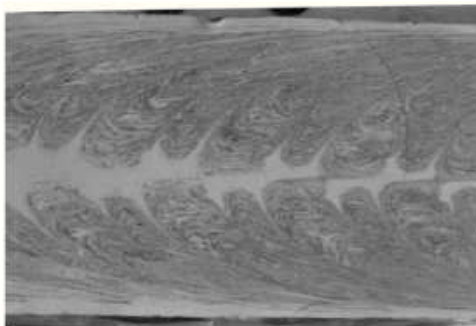


Рис. 2. Визуализация процесса формирования ламинатных слоев [4]

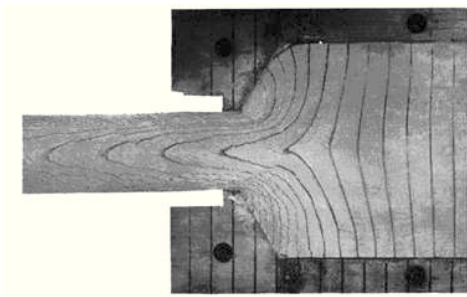


Рис. 3. Слои проскальзывания, формирующиеся в пластичном материале [4]

териала [4]. Хорошо видны изолинии движения частиц. Центральная часть среза, по-видимому, формируется в результате схода материала с лопаток шнека, у стенок наблюдается их значительное уплотнение. Видимый поперечный размер изолиний у стенок намного меньше, чем в центральной части. Кроме этого, поток материала у стенок имеет гораздо более упорядоченный и однородный вид в отличие от центральной части, где присутствуют как продольно направленные, так и поперечно направленные изолинии. Ближе к центральной части виден периодический ряд вихреобразных «лепестков», которые образуются в результате схода керамической массы с периодически расположенных лопаток шнека.

На рис. 3 представлен другой пример – выдавливание пластичного материала через щель. В этом случае отсутствует влияние шнека (лопаток и его центральной части). По этой причине центральная часть потока имеет более регулярный характер, без завихрений и «лепестков». Изолинии течения напоминают течение Пуазейля, которое возникает в трубах, щелях и каналах, и хорошо теоретически описано для случая движения Ньютоновской жидкости [5].

На основе анализа рис. 2 и 3 можно сделать следующие выводы. Пластический материал, ко-

торый находится вблизи стенок формы, гораздо дольше находится в форме под воздействием формовочного давления. Видимо, это является одним из определяющих факторов, влияющих на формирование более плотных слоев материала у стенок формы. Соотношение плотности центра и периферии брэксов должно в значительной мере определяться соотношением времени прохождения материалом центральной и периферийной частей формовочной насадки. Это соотношение определяется профилем течения, который в свою очередь зависит от вязкости материала. В свою очередь, вязкость является переменной величиной вследствие изменяющегося распределения фракций шихтовой смеси при производстве брэксов. Определение вязкости материала (или используемая для нее теоретическая модель) является ключевым параметром для проведения дальнейших вычислений.

На рис. 4 показана структура пластичного материала [6]. Частицы материала имеют вытянутую конфигурацию. На их поверхности адсорбируется тонкая пленка воды (порядка нескольких нанометров [7]) – «связанная» вода, а часть свободного пространства между частицами заполняется так называемой «свободной» (поскольку она может самостоятельно перемещаться) водой. Остальное пространство заполнено воздухом, который образует поры и может свободно перемещаться по ним, если поры связаны друг с другом.

Воздух также может адсорбироваться поверхностью материала. В результате ухудшается его смачивание. Известно [8], что воздух, адсорбированный поверхностью частиц пластичного материала в виде полимолекулярных слоев, удерживаемых ван-дер-ваальсовыми силами, замедляет

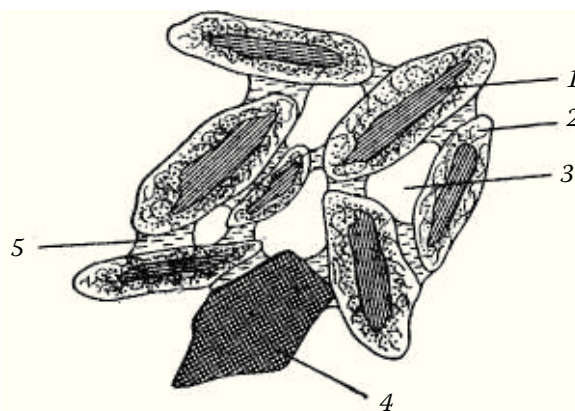


Рис. 4. Структура массы: 1 – частицы пластичного материала; 2 – связанная вода; 3 – пора; 4 – инертный материал; 5 – свободная вода [6]

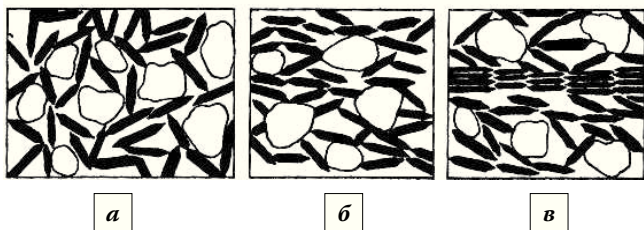


Рис. 5. Схема образования дефектов структуры:

*a* – первоначальное строение массы; *б* – упорядочение пластинчатых частиц; *в* – образование плоскостей скольжения [6]

смачивание их водой, препятствует равномерному уплотнению массы, способствует повышению упругих деформаций при пластическом формовании, образуя расслоения, а также микротрещины, выявляемые при сушке и обжиге изделий. Заполняя поры, воздух также препятствует проникновению в них влаги, разъединяет частицы массы, действуя как отошитель.

При вакуумировании, имеющем место в процессах жесткой и пластической экструзии [2, 4], воздух удаляется из пор. Вследствие этого поры 3 (см. рис. 4) должны уменьшиться в размере. Поскольку частицы шихты имеют продолговатую форму, то только при их сближении в варианте, изображенном на рис. 5, *в* [6], может быть достигнуто уменьшение размера пор. Таким образом, при вакуумировании массы для производства брэксов в ней должно происходить упорядочивание частиц шихтовой смеси.

Для понимания процессов, происходящих при движении смеси крупных и мелких частиц, предлагается первоначально рассмотреть такое движение с точки зрения упрощенной гидродинамической модели движения крупных частиц в жидкости. Последняя модель хорошо разработана для сепарации частиц в системах пылеочистки и т.п. (например, в работе [9]). При применении гидродинамической модели мы делаем упрощение, согласно которому более мелкая фаза заменяется жидкостью. В действительности поведение твердой мелкой фазы отличается от поведения жидкости главным образом потому, что твердая фаза трудно деформируема и не может перетекать так легко, как жидкость, а также легко обтекать препятствия. Необходимо учитывать влияние формы частиц и т.д. Однако для общего понимания принципов движения частиц сырца и сил, влияющих на частицы, а также для их предварительной оценки применение такого упрощения допустимо.

При движении сырца в головке мундштука формируется профиль течения (см. рис. 4), напо-

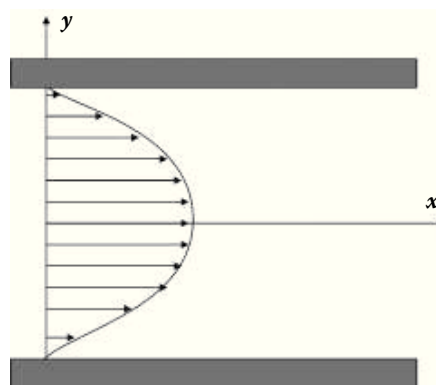


Рис. 6. Профиль течений Пуазейля

минающий профиль Пуазейля для течения воды в трубах (рис. 6). Характерной особенностью таких профилей является большой градиент скорости течения у стенки и нулевой ее градиент в центре (трубы).

При движении частиц конечных размеров в градиентном течении в обычной (ньютоновской среде) возникает подъемная сила аналогично возникновению подъемной силы, действующей на крыло самолета. Последняя образуется из-за разности давлений в потоке под плоскостью крыла самолета и над ней ([5] и рис. 7). Согласно закону Бернулли, вдоль линии тока идеальной жидкости сохраняется давление, равное сумме гидростатического и динамического давлений (так называемый «интеграл Бернулли») [5]

$$p + \frac{\rho u^2}{2} = const. \quad (1)$$

Поскольку снизу крыла воздух движется медленнее (см. рис. 7), то гидростатическое давление должно быть больше, чтобы сохранить постоянным интеграл Бернулли (1). Сверху крыла – наоборот. Для частицы, находящейся в потоке с

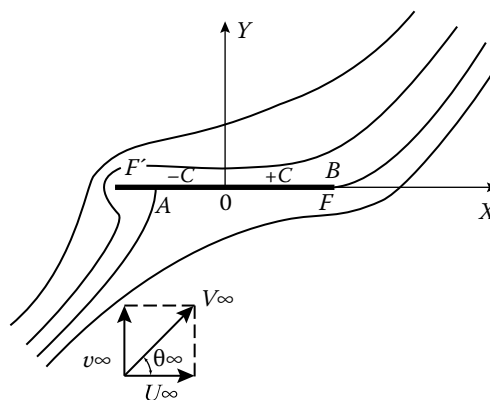


Рис. 7. Обтекание пластины [5]

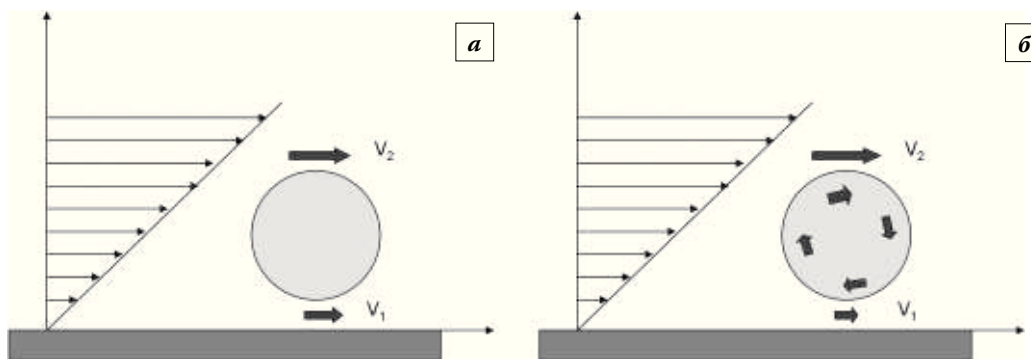


Рис. 8. Обтекание частицы потоком у стенки (а) и вращение частицы потоком (б)

градиентом скорости (рис. 8, а), возникает аналогичная ситуация – давление снизу частицы будет больше, чем сверху. При этом частица может быть приведена во вращение градиентом скорости. Тогда дополнительно возникает подъемный «эффект Магнуса», который имеет место при обтекании потоком вращающейся частицы (рис. 8, б).

Согласно теореме Жуковского, подъемная сила определяется плотностью потока  $\rho$ , циркуляцией скорости вокруг частицы  $J$  и скоростью набегающего потока  $u$  (считаем, что поток имеет горизонтальную компоненту скорости  $u$ , а вертикальная  $v = 0$ ) [5]:

$$F_{Magnus} = \rho Ju. \tag{2}$$

Циркуляция потока вокруг частицы при ее вращении в потоке определяется выражением

$$J = \frac{\pi r^2}{2} r \frac{du}{dy}, \tag{3}$$

где  $\pi r^2$  – миделевое сечение частицы,  $r$  – линейный размер частицы,  $du/dy$  – градиент скорости потока (ось  $Y$  направлена вертикально вверх, рис. 8). В результате подъемная сила Магнуса пропорциональна кубу размера круглой частицы, скорости набегающего потока и градиенту скорости потока [9]

$$F_{Magnus} \sim \rho \frac{\pi r^3}{2} u \frac{du}{dy}. \tag{4}$$

В действительности необходимо учесть, что частица увлекается потоком и имеет горизонтальную скорость  $U$  (т.е. относительную скорость  $u-U$ ). Поэтому окончательно имеем

$$F_{Magnus} = \rho \frac{\pi r^3}{2} (u - U) \frac{du}{dy}. \tag{5}$$

Как видно из формулы (5), величина подъемной силы больше для более крупных частиц. Сила также возрастает с ростом градиента скорости.

Последний достигает максимального значения у стенки и равен нулю в центре потока. Поэтому наибольшие смещения крупных частиц к центру потока будут наблюдаться около стенки и меньшие вдали от стенки. За счет этого и должен формироваться профиль неравномерного распределения частиц: крупные – в центре, мелкие – у стенки.

При медленном движении частицы относительно «жидкости» (в нашем случае относительно мелкой фазы) возникает сила сопротивления Стокса [5]

$$F_{Stokes,x} = 6\pi\mu r(u-U), \tag{6}$$

где  $\mu$  – вязкость жидкости (аналог силы трения мелких частиц о крупные),  $(u-U)$  – относительная горизонтальная скорость движения частицы относительно потока.

Аналогично в вертикальном направлении сила Стокса имеет компоненту  $F_{Stokes,y}$

$$F_{Stokes,x} = 6\pi\mu rV, \tag{7}$$

где  $V$  – вертикальная скорость движения частицы. Из баланса подъемной силы Магнуса и вязкой силы сопротивления Стокса  $F_{Magnus} = F_{Stokes,y}$  получаем формулу для оценки скорости поперечного (вертикального) перемещения частицы

$$V = \frac{\rho}{12\mu} (u - U) \frac{du}{dy} r^2. \tag{8}$$

Из этой формулы видно, что скорость смещения пропорциональна квадрату размера частицы.

Теперь можно провести качественную оценку относительных смещений больших и малых частиц. Можно сказать, что в формуле (8) разность  $(u-U)$  характеризует скорость малых частиц относительно больших. Градиент скорости потока  $du/dy$  одинаков и для малых, и для больших частиц. Для примера возьмем частицы «large» и «small», размеры которых отличаются в три раза ( $r_{large} = 3r_{small}$ ). Поскольку  $V \approx r^2$  и все остальные множители равны, то поперечные скорости боль-



ших и малых частиц будут отличаться в девять раз

$$V_{large} = -\frac{r_{large}^2}{r_{small}^2} V_{small} = -9V_{small}. \quad (9)$$

Знак «минус» возникает из-за разнонаправленного движения больших и малых частиц согласно формуле (8). По сути, можно считать, что малые частицы остаются на месте, а большие выдавливаются к центру потока. Скорости относительного поперечного движения частиц пропорциональны квадрату отношения размеров этих частиц.

**Заключение.** В работе продемонстрированы возможности использования гидродинамического подхода для моделирования миграции мелких фракций на поверхность брэксов. Показано, что в рамках предлагаемого гидродинамического подхода с использованием частиц двух разных размеров можно успешно объяснить это явление. Для получения конкретных количественных величин необходимо дальнейшее развитие предлагаемой модели. В частности, в модель необходимо будет ввести корректный учет поверхностных сил трения, а также учесть влияние формы частиц и конкретное распределение частиц по размерам.

#### Библиографический список

1. Далмиа Й.К., Курунов И.Ф., Стил Р.Б., Бижанов А.М. Производство и проплавка в доменной печи брикетов нового поколения // *Металлург*. 2012. № 3. С. 39–41.
2. Курунов И.Ф., Бижанов А.М. Жесткая вакуумная экструзия Steele –перспективный способ окускования металлургического сырья и отходов // *Бюл. НТИЭИ: Черная металлургия*. 2012. № 4. С. 46–49.
3. Курунов И.Ф., Малышева Т.Я., Большакова О.Г. Исследование фазового состава железорудных брикетов с целью оценки их поведения в доменной печи // *Металлург*. 2007. № 10. С. 41–46.
4. *Extrusion in Ceramics*. Frank Händle (Ed.). Springer, 2007. 468 p.
5. Лойцянский Л.Г. *Механика жидкости и газа*. М.: Наука, 1973. 847 с.
6. Французова И.Г. *Общая технология производства фарфоровых и фаянсовых изделий бытового назначения*. М.: Высшая школа, 1991. 192 с.
7. Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М. *Поверхностные силы*. М.: Наука, 1985. 400 с.
8. Мороз И.И. *Технология строительной керамики*. М.: Эколит, 2011. 384 с.
9. Соболев А.А., Мельников П.А., Тютюнник А.О. Движение частиц в воздушном потоке // *Вектор науки ТГУ*. № 3(17), 2011. С. 82–86.

## MECHANISM FOR MIGRATION OF FINE FRACTION AT BRIQUETTES EXTRUSION PRODUCTION (BREX)

© Bizhanov A.M.; Kurunov I.F., Dr Sc. (Eng.), prof.;  
Ivonin D.V., Cand. Sc. (Phys.-Math.)

The fine fraction migration to the brex surface at briquettes extrusion production was successfully qualitatively explained in the framework of a simple hydrodynamic model. The studied phenomenon can influence significantly the strengthening of the brex near-surface zones.

**Keywords:** extrusion briquette (brex); stiff vacuum extrusion; fine fraction; hydrodynamic model.