ударно-вибрационным методом ПМ. При этом установлены: универсальные свойства указанных материалов в рамках моделей хаотических систем, упорядоченная самоорганизация фрактальных дислокационных структур, области устойчивости мультифрактальных множеств среды, связь инвариантных комплексов механических свойств с фрактальной размерностью структуры зоны предразрушения.

2. Показана реализация детерминированного хаоса при самоорганизации мезоструктур в процессе деформации и разрушения изделий из ПМ.

3. На примере анализа ПМ, изготовленных из 29 марок стали, установлено, что использование концепции базовых множеств позволяет тестировать конструкционные материалы на устойчивость структуры, как в процессе прессования ПМ ударно-вибрационным методом, так и при наличии в них трещины.

4. Проведенный анализ показывает перспективность развития фрактальной мезомеханики ПМ с учетом закономерностей нелинейных динамических систем, а также для уточнения существующих (рабочих) моделей структуро- и формообразования материалов (в т.ч. ПМ), принятых в современном материаловедении.

Список литературы: 1. *Хакен Г.* Синергетика. Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. – М.: Мир, 1985. – 411с. **2.** *Mandelbrot B.B.* The fractal geometry of nature. – San Francisco: Freeman, 1982. **3.** *Панин В.Е., Гриняев Ю.В., Данилов В.И. и др.* Структурные уровни пластической деформации и разрушения. – Новосибирск: Наука, 1990. – 258с. **4.** Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов /Под ред. В.Е. Панина. – Новосибирск: Наука, 1995. – Т. 1. – 298с., Т. 2. – 320с. **5.** *Vstovsky G.V.* Transform information: A symmetry breaking measure// Found. Phys. –1997. – V. 27. – No. 10. – P. 1413-1444. **6.** *Курдюмов С.П., Князева Е.Н.* Синергетическое видение мира: режимы с обострением // Сб. «Самоорганизация и наука». – М., 1994. – С. 162-186. **7.** *Ахромеев Т.О., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г., Самарский А.А.* Нестационарные структуры и диффузионный хаос. – М.: Наука, 1992. **8.** *Bak R., Tang C., Weisenfeld K.* Self-organized criticality // Phys. Rev. A. – 1988. – V. 1. – No. 1. - P. 364-374. **9.** *Feigenbaum M.J.* Universal behavior in nonlinear systems // Science. – 1980. – V. 1. – No. 1. – P. 4-27. **10.** *Федер Е.* Фракталы. – М.: Мир, 1991. – 260с. **11.** *Иванова В.С.* Синергетика. Прочность и разрушение металлических материалов. – М.: Наука, 1992. – 157 с. **12.** *Ivanova V.S.* Synergetics. Strength and fracture of metallic materials. – Cambridge: Cambridge International Science Publishing, 1998. – 288p. **13.** *Иванова В.С.* О связи структуры со свойствами в критических точках // Сб. „Институту металлургии им. А.А. Байкова – 60 лет”. – М.: Элиз, 1998. – С. 412-429. **14.** *Шевелев И.М., Марутаев Н.А., Шмелев И.П.* Золотое сечение. Три взгляда на природу гармонии. – М.: Стройиздат, 1990. – 543с. **15.** *Бовенко В.Н.* Теория акустической эмиссии в деформированных кристаллах // Прогноз землетрясений. – 1983. – Т. 14. – С. 70-91. **16.** *Голубев О.Н.* Биоструктуры как фрактальное отображение квазикристаллической геометрии // Сознание и физическая реальность. – 1996. – Т. 1. - № 1-2. – С. 85. **17.** *Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин Н., Оксогоев А.А.* Синергетика и фракталы в материаловедении. – М.: Наука, 1994. – 383с. **18.** *Иванова В.С., Кузеев И.Р., Закирничная М.М.* Синергетика и фракталы. Универсальность механического поведения материалов. – Уфа: УГНТУ, 1998. – 366с. **19.** *Kubin L.P., Lepinoux J.* The dynamic organization of dislocation structures // Proc. 8th Int. Conf. “Strength of metals and alloys” (ICSMA8), 22-26 Aug., 1988, Tampere. – Oxford, 1989. – Vol. 1. – P. 36. **20.** *Балохонов Р.Р.* Численное моделирование процесса деформации на мезоуровне и построение кривых течения поликристаллических материалов. Автореф. дис. …канд. физ.-мат. наук. – Томск, 1999. **21.** *Панин С.В.* Исследование пластической деформации и разрушения поликристаллических материалов на основе алюминия методами технического зрения. Автореф. дис. … канд. техн. наук. – Томск, 1997. **22.** *Kuznetsov P.V., Panin V.E., Panin S.V.* Deformation mechanisms of duralumin at the mesoscale level and stages of fractal dimension // Abstracts of V Int. Conf. “Computer-aided design of advanced materials and technologies”, August 4-6, 1997, Baikal Lake, Russia. – Tomsk: ISPMS SB RAS. – P. 63-64. **23.** *Уэбман И.* Упругое поведение фрактальных структур. Фракталы в физике / Под ред. Л. Пьетронеро и Э. Тозатти. – М.: Наука, 1988. – 672с. **24.** *Баланкин А.С.* Упругие свойства фракталов, эффект поперечных деформаций и динамика свободного разрушения твердых тел // Докл. АН СССР. – 1991. – Т. 319. - № 5. – С. 1098-1101. **25.** *Halsey T.C., Jensen M.H., Kadanoff L.P., Procaccia I., Shrailtlan B.I.* Fractal measures and their singularities: The characterization of strange sets // Phys. Rev. A. – 1986. – V. 33. – No. 2. – P. 1141-1151. **26.** *Sih G.C.* The strain energy density concept and criterion // The Proc. of the Aeronautical Soc. of India (Special issue on fracture mechanics). – 1985. – V. 37. – No. 1. – P. 43-60.

Поступила в редколлегию 16.09.06.

УДК 662.741.3.022: 621.979: 539.218

А.Н. НЕСТЕРОВ, аспирант, ***М.А ОСТАПЕНКО***, канд. техн. наук,
Донецкий национальный технический университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИЛОВЫХ НАГРУЗОК ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ ПРОТАЛКИВАЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ СЫПУЧИХ И ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПЕЧАХ ПОЛУКОКСОВАНИЯ И КОКСОВАНИЯ

Стаття присвячена визначенню силових навантажень при пересуванні сипких та зернистих матеріалів у печах напівкоксування і коксування. Розглянуті та експериментально перевірені дві формули для розрахунку середнього напруження на поверхні контакту устрою для пересування. Показана умова, при виконанні якої доцільно використання формулу, яка отримана з прийняттям гіпотези плоских перетинів і адекватно описує експериментальні дані. Пропонується використання узагальненого геометричного критерію подібності при моделюванні силових навантажень. Розглянуті методики розрахунку силових навантажень при різних значеннях узагальненого геометричного критерію подібності.

The article was devoted to determination of the power loading at the movement of friable and grainy materials in the stoves of semicoking and coking. Are considered and experimentally tested two formulas for computation of middle tension on the surface of contact of the mode for the movement. A condition, at implementation of which expediently the use the formula which was got with acceptance of hypothesis of the flat crossing and adequately described experimental data, was shown. The use of the generalized geometrical criterion of similarity at the design of the power loading is offered. Considered methods of computation of the power loading at different values of the generalized geometrical criterion of similarity.

Несмотря на то, что перемещение проталкивающим устройством сыпучих и зернистых материалов широко и длительное время используется в печах различной конструкции для полукоксования и коксования углей [1-3], вопросы моделирования силовых нагрузок этих устройств разработаны недостаточно. Отсутствуют научно-обоснованные методики расчета усилия выталкивания кокса, что не позволяет использовать результаты, полученные на печах малой емкости, при проектировании новых коксовых батарей с печами большой емкости. Это связано, прежде всего, с отсутствием геометрического подобия различных камер коксования.

Рассмотрим задачу определения силовых нагрузок при перемещении проталкивающим устройством сыпучих и зернистых материалов в объеме, ограниченном стенками и имеющем постоянное поперечное сечение.

При этом можно выделить две стадии:

1. Уплотнение первичного объема материала.
2. Перемещение уплотненной монолитной массы.

Начало перемещения уплотненной массы соответствует состоянию, когда среднее напряжение в сечении наиболее удаленном от проталкивающего устройства достигнет величины напряжения подпора - σ_o (рис. 1).

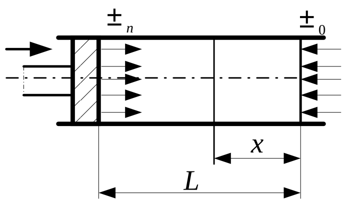

Рис.1. К определению силовых нагрузок проталкивающего устройства.

Ранее [4, 5] было показано, что решение такой задачи в статической одномерной постановке имеет различный вид:

При принятии гипотезы плоских сечений –

$$\pm_x = \pm_o \exp\left(\copyright f \frac{\Pi}{S} x \right); \qquad (1)$$

Без принятия гипотезы плоских сечений –

$$\pm_x = \pm_o \frac{1 - 0{,}5\copyright f \dfrac{\Pi}{S} L \cos\left(\dfrac{®}{L} x \right)}{1 - 0{,}5\copyright f \dfrac{\Pi}{S} L}, \qquad (2)$$

где $\pm_o, \pm_x$ – средние нормальные напряжения в поперечных сечениях, расположенных, соответственно, на расстоянии *L* и *(L-x)* от проталкивающего устройства;

k, f - соответственно, коэффициенты бокового давления и внешнего трения перемещаемого материала;

П, S – соответственно, периметр и площадь поперечного сечения рабочего объема.

При *x=L* приходим к формулам для определения среднего напряжения на поверхности контакта рабочего органа проталкивающего устройства и перемещаемого материала

$$\pm_n = \pm_o \exp\left(\copyright f \frac{\Pi}{S} L \right); \qquad (3)$$

$$\pm_n = \pm_o \frac{1 + 0{,}5\copyright f \dfrac{\Pi}{S} L}{1 - 0{,}5\copyright f \dfrac{\Pi}{S} L}. \qquad (4)$$

Проведена экспериментальная проверка (Рис. 2.) формул (3) и (4) на лабораторной установке при уплотнении и перемещении угольной шихты с влажностью 9% и размером частиц 0 – 2 мм.

Комплексный коэффициент *kf* для исследуемого материала определялся по установленной нами экспериментальной формуле

$$kf = 0{,}114 + 0{,}02\pm \qquad (5)$$

и при расчетах в исследуемом диапазоне напряжений 0,1 – 0,5 МПа принимался равным среднему значению 0,12.

Анализ данных, приведенных на рисунке 2 показывает, что экспериментальные и рассчитанные по формулам (3) и (4) результаты различаются не более чем на 5 % при $\Pi L/S \leq 4$.

При увеличении величины *ПL/S* различие экспериментальных и расчетных результатов увеличивается, причем формула (4) адекватно описывает экспериментальные данные во всем диапазоне принятых значений *ПL/S*.

Таким образом, при выполнении условия

$$\Pi L/S \leq 4 \qquad (6)$$

для дальнейшего анализа и расчетов можно использовать как формулу (3) так и формулу (4). При этом выбор зависит от удобства математических преобразований и возможности получения конечного результата без использования численных методов.

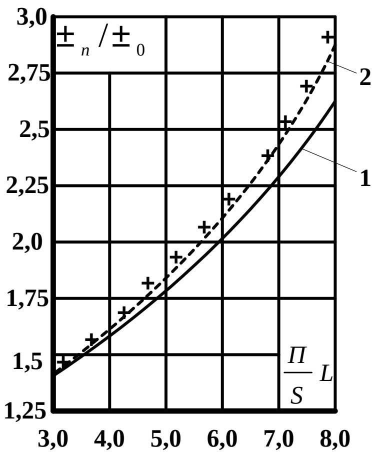

Рис. 2. Зависимость $\pm_n/\pm_0 = Ф(ПL/S)$.

1, 2 – расчет, соответственно, по формулам (3) и (4);

+ – экспериментальные данные.

При $ПL/S > 4$ необходимо использовать более точную формулу (4).

При использовании формул (3) и (4) возникают затруднения, связанные с тем, что длина L, перемещаемой массы материала, зависит от σ_o, начальной длины загрузки L_o, а также от величин k, f, $П$ и S, то есть является неизвестной величиной.

В связи с этим, преобразуем формулу (3). Заметим, что

$$L=L_o{}^\circ{}_o/{}^\circ, \tag{7}$$

где L_o – начальная длина порции перемещаемого материала;

$^\circ{}_o$ – начальная объемная плотность перемещаемого материала;

$^\circ$ - плотность уплотненной массы перемещаемого материала.

Заметим также, что

$$^\circ = \frac{1}{L}\int_0^L {}^\circ{}_x dx, \tag{8}$$

где ρ_x - средняя объемная плотность перемещаемого материала в сечении, расположенном на расстоянии $(L\text{-}x)$ от проталкивающего устройства.

Объемная плотность материала от напряжения может быть выражена формулой [6]

$$^\circ{}_x = \sim \pm_x \;, \tag{9}$$

где ~ и - коэффициенты, которые определяются по данным компрессионных испытаний.

Интегрируя выражение (8) с учетом зависимостей (1), (7) и (9) и решая, полученное после интегрирования выражение, относительно °, находим формулу для определения средней плотности перемещаемой массы материала, которая может быть также использована при расчетах и моделирования устройств для уплотнения силикатных и тугоплавких неметаллических материалов.

$$^\circ = \; ©f\,\frac{П}{S}L_0{}^\circ{}_0 \Big/ \ln\left(1+\; ©f\,\frac{П}{S}L_0{}^\circ{}_0/(\sim\pm_0)\;\right). \tag{10}$$

С учетом зависимостей (7) и (10) формула (3) преобразуется к виду

$$\pm_n = \pm_0\left[1+\frac{©fП\;L_0{}^\circ{}_0/S}{\sim\pm_0}\right]^{\frac{1}{}}. \tag{11}$$

При отсутствии противодавления, то есть при $\sigma_0 = 0$ и формула (11) принимает вид

$$\pm_n = \left[\frac{kf^\circ{}_0}{\sim}\frac{П}{S}L_0\right]^{\frac{1}{}}. \tag{12}$$

Формулы (11) и (12) устанавливают зависимость величины среднего нормального напряжения на поверхности контакта проталкивающего устройства и материала $-\pm_n$ от среднего напряжения противодавления – σ_0, физико-механических свойств перемещаемого материала – k, f, α, β и ρ_0 и конструктивных параметров рабочего объема печи, представленных в виде безразмерного выражения $ПL_0/S$.

Из формул (11) и (12) видно, что если при прочих равных условиях

$$\left(\frac{П}{S}L_0\right)_н = \left(\frac{П}{S}L_0\right)_м, \text{ то } (\pm_n)_н = (\pm_n)_м. \tag{13}$$

Индекс «м» относится к модели, а индекс «н» - к промышленному объекту. Равенства (13) выражают условие обобщенного геометрического подобия конструктивных параметров и силовых нагрузок, возникающих при перемещении проталкивающим устройством углеродосодержащих материалов в печах полукоксования и коксования.

Безразмерное выражение $ПL_0S$ является обобщенным геометрическим критерием подобия, который может быть использован при моделировании силовых нагрузок при прессовании силикатных и тугоплавких неметаллических материалов в условиях отсутствия геометрического подобия модели и натурного объекта.

Предлагается следующая методика использования обобщенного геометрического критерия подобия:

1. Уточняются размеры, форма и конечная средняя плотность промышленного изделия $°_н$.

2. По формуле $L_0 = °L / °_0$ рассчитывается начальная высота (длина) материала, загружаемого в матрицу при прессовании промышленного изделия.

3. Определяется величина $(ПL_0/S)_н$ промышленного изделия.

4. Проводятся компрессионные испытания материала на лабораторной матрице (модели) при выполнении условия $(ПL_0S)_м = (ПL_0S)_н$ и строится график (компрессионная кривая) зависимости плотности материала от напряжения.

5. По компрессионной кривой определяется напряжение, соответствующее плотности промышленного изделия.

6. Определяется усилие прессования промышленного изделия.

Преобразуем условие (6) таким образом, чтобы в него входило выражение $ПL_0/S$. Для этого подставим в условие (6) выражения (7) и (10) и решим неравенство относительно $ПL_0/S$.

$$\frac{П}{S} L_0 \leq \sim ±_0 \ \left[\exp\left(4\ ©f\right)-1\right]/\left(\ ©f°_0\right). \qquad (14)$$

При выполнении условия (14) формулы (11) и (12) рекомендуются для использования при определении силовых нагрузок при перемещении проталкивающим устройством сыпучих и зернистых материалов.

Пример: Угольная шихта влажностью 9% проталкивается в горизонтальной камере, которая имеет высоту 1м, ширину 0,1 м. Первоначальная длина проталкиваемой массы 0,2 м, насыпная плотность ρ = 650 кг/м^3, $\sigma_о$ = 0,2 Мпа, $kf = 0,12$. По результатам компрессионных испытаний найдено, что для используемого материала α =960 кг/м^3, β = 0,069.

$$ПL_0/S = 2(1+0,1)*0,2/(1*0,1) = 4,4.$$

$$\sim ±_0 \ \left[\exp\left(4\ ©f\right)-1\right]/\left(\ ©f°_0\right) =$$

$$= 960*0,2^{0,069}*[\exp(4*0,069*0,119) – 1]/(0,069*0,119*650) = 5,4.$$

Условие (14) выполняется и, следовательно, формула (11) может быть использована.

На основании вышеизложенного предлагается следующая методика расчета по формуле (11) силовых нагрузок проталкивающего устройства:

1. Проводятся экспериментальные исследования для определения физико-механических характеристик перемещаемого материала (насыпная плотность - $°_0$, комплексный коэффициент *kf*.

2. Проводятся компрессионные испытания перемещаемого материала и определяются коэффициенты ~ и уравнения, описывающего результаты компрессионных испытаний.

3. Рассчитываются периметр и площадь поперечного сечения рабочего объема, в котором осуществляется перемещение материала.

4. Рассчитывается обобщенный геометрический критерий подобия – $ПL_0/S$.

5. Уточняется величина напряжения противодавления перемещению материала- $±_0$.

6. По формуле (11) рассчитывается среднее нормальное напряжение на поверхности контакта проталкивающего устройства и материала. Расчет по формуле (11) проводится методом последовательного приближения с корректировкой величины комплексного коэффициента на каждом шаге расчета.

7. Определяется максимальное усилие проталкивания F по формуле

$$F = ±_n S .$$

В том случае, когда условие (6), а, следовательно, и условие (14) не выполняются, последующий анализ и расчеты необходимо проводить с использованием более точных формул (2) и (4), полученных без принятия гипотезы плоских сечений.

С целью разработки методики расчетов с использованием формул (2) и (4) подставим в формулу (8) выражения (9) и (2).

Заметим, что $°L = °_0 L_0$.

После преобразований получаем следующее интегральное уравнение, которое решается численными методами относительно L

$$^{\circ}{}_0 L_0 = \int_0^L \sim \left[\pm_0 \frac{1-0{,}5kf\,\dfrac{\Pi}{S}L\cos\left(\dfrac{\circledR}{L}x\right)}{1-0{,}5kf\,\dfrac{\Pi}{S}L} \right] dx\,. \qquad (15)$$

Расчет силовых нагрузок с использованием формулы (4) и интегрального уравнения (15) проводится методом последовательного приближения в следующей последовательности:

1. При заданном значении напряжения подпора $-\pm_0$ определяется величина комплексного коэффициента *kf*.

2. Проводится решение численными методами интегрального уравнения (15) и определяется длина перемещаемой массы материала – *L*.

3. По формуле (4) определяется величина среднего нормального напряжения, действующего на поверхности контакта проталкивающего устройства и материала.

4. Определяется среднелогарифмическая величина нормального напряжения, действующего вдоль оси перемещаемого материала.

5. Уточняется величина комплексного коэффициента *kf* и т.д. Расчет продолжается до тех пор, пока различие смежных величин $\pm_n$ не будет превышать 3-5%.

Список литературы: **1.** *Непомнящий И.Л.* Коксовые машины, их конструкция и расчет. – М.:Металлургиздат, 1963. – 388с. **2.** *Комолов В.Г., Макаров Г.Н.* Новые машины и оборудование для производства кокса. М.: Металлургия, 1987. – 144с. **3.** *Ткачев В.С., Остапенко М.А.* Оборудование коксохимических заводов. – М.: Металлургия, 1983. – 360с. **4.** *Остапенко М.А., Зборщик М.П., Нестеров А.Н.* Влияние физико-механических, конструктивных и силовых факторов на прессование твердых дисперсных материалов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Международный сборник научных трудов. Выпуск 17. – Донецк: Донецкий государственный технический университет. – 2001. – С. 153 – 157. **5.** *Остапенко М.А., Нестеров А.Н.* Распределение напряжений при прессовании порошковых и сыпучих материалов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Международный сборник научных трудов. Выпуск 22. – Донецк: Донецкий государственный технический университет. – 2002. – С. 23 – 27. ***6.*** *Веретельник С.П., Зыков Д.Д., Карпов В.С.* Исследование уплотнения твердого топлива в процессах термической переработки // Химия твердого топлива. – 1978. -№5. – С.129 – 136.

Поступила в редколлегию 16.09.06.

УДК 693.52

А.Н. БАРАНОВ, проф., докт. техн. наук, ***А.И. МОРОЗОВ***,
Украинская инженерно-педагогическая академия

ВЛИЯНИЕ АССОРТИМЕНТА МЕЛЮЩИХ ТЕЛ В МЕЛЬНИЦАХ БАРАБАННОГО ТИПА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ ИЗМЕЛЬЧАЕМОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ПОМОЛЕ

Розглянуто питання контакту куль, що мелють, і часток матеріалу, що подрібнюють в кульових млинах, з позицій теорії удару. Розроблено модель оцінки напруг, що виникають у частках матеріалу при ударі куль. Розроблена модель дозволяє оптимізувати розмір і швидкість куль, що мелють, у процесі помелу матеріалу у кульових млинах.

The questions of the contact of the milling solids and particles of the material which reduced in ball-mills of the blow theory position are considered. The model of the strains estimation which appears in the particles of the material under the balls blow is designed. The designed model allows to optimizing the size and the velocity of the passage in the process of the material grinding in the ball-mills.

Введение. В большинстве случаев использование твердых материалов в гетерогенных и твердофазных реакциях без их предварительного измельчения невозможно. Поскольку очень многие применяемые промышленностью материалы в обычных условиях находятся в твердом состоянии, измельчение является одной из основных операций их переработки. Наиболее распространенным способом получения твердых тел в дисперсном состоянии является механическое измельчение. Измельчение применяют в таких отраслях промышленности, как горнорудная, цементная, стекольная, пищевая. В производстве металлокерамики, ферритовых изделий, твердых топлив для реактивных двигателей, взрывчатых веществ, ядерных тепловыделяющих элементов, лекарственных порошков, ядов и др. В зависимости от природы материала и характера использования к измельчению предъявляют разнообразные, но, чаще всего, вполне конкретные требования по характеру измельчения.

Состояние вопроса. Способов механического измельчения, т. е. способов разрушения твердых тел на все более мелкие частицы путем создания в них разрушающих напряжений, как и машин, предназначенные для этой цели, используется большое количество. При создании мельниц учитываются дисперсность, которую необходимо получить, размеры исходного материала, его механические свойства (твердость, пластичность, прочность), возможная степень загрязнения материала продуктами износа мельницы и мелющих тел и ряд других показателей.

Обычно разрушение материала производится путем механического воздействия на него мелющих тел или кусков того же материала. Элементарные акты разрушения осуществляются созданием в частицах предельных напряжений сдвига путем сдавливания, удара или среза. Трубные мельницы с мелющими телами являются наиболее распространенным типом измельчителей.