

Экспериментальное и теоретическое исследование разрушения углей и расчет выхода пылевых частиц. II. Численное изучение разрушения угля на мезо- и макроуровнях

П.В. Макаров, А.А. Трубицын¹, Н.В. Трубицына¹, П.В. Кузнецов,
И.Ю. Смолин, Ю.П. Стефанов, С.П. Ворошилов¹

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, 634021, Россия

¹ Научный центр по безопасности работ в угольной промышленности ВостНИИ, Кемерово, 650002, Россия

Моделирование процессов деформации и разрушения угля выполнено на мезо- и макроуровнях. На мезоуровне численно исследован процесс разрушения мезообъема угля как композиционного материала, в котором явно учтены значимые структурные элементы, включая крупные поры. По известным физико-механическим параметрам компонентов получены усредненные параметры для заданного состава и пористости. На основе полученных усредненных характеристик рассмотрен процесс резания угля на макроуровне, с использованием определяющих соотношений, интегрально учитывающих внутреннее трение и дилатансию в деформируемом материале. Особенности напряженно-деформированного состояния вблизи кромки режущего инструмента воспроизводились при изучении поведения мезообъемов с целью оценки выхода пылевых частиц. Полученные данные о распределении пылевых частиц по размерам и массе хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Experimental and theoretical study of coal fracture and calculation of dust particle formation. II. Numerical investigation of coal fracture at the meso- and macrolevels

P.V. Makarov, A.A. Trubitsyn, N.V. Trubitsyna, P.V. Kuznetsov,
I. Yu. Smolin, Yu.P. Stefanov, and S.P. Voroshilov

The approach of physical mesomechanics is applied to the problem of coal fracture. The coal is regarded as a natural composite with a hierarchical inner structure. The applied problem of dust particle formation during cutting is considered. First, the features of the stress-strain state at cutting are determined at the macroscale in numerical calculations. The outcome is used for numerical modeling of fracture and dust particle formation at the mesolevel. A typical mesovolume containing 6 types of coal ingredients and pores of different sizes was taken for calculations. Computer simulations of mechanical behavior up to the failure of the mesovolume under different types of loading have been carried out. At the macroscale use of an elastic-plastic model with taking into account damage accumulation and dilatancy effects as well as explicit crack opening by a grid node splitting technique is made. At the mesoscale the elastic-plastic model with a combined fracture criterion is adopted. It has been shown that such an approach makes it possible to estimate quantitative parameters of dust particle formation of 2–100 μm size during the coal fracture.

1. Введение

Основной задачей численного моделирования являлось проведение расчетов на разных масштабных уровнях с целью описания особенностей разрушения углей на макро- и мезоуровнях и определения выхода пылевых частиц размерами от 2 до 100 мкм в ходе резания угля (например, стружковыми установками). С этой целью были проведены расчеты процесса резания угля на макроуровне, а также расчеты деформации и разрушения выбранного характерного объема на мезоуровне в разных условиях нагружения. По данным о составе углей и значениях физико-механических характеристик основных литотипов угля, составляющих характерный мезообъем, определены осредненные характеристики мак-

рочастиц угля. Эти осредненные данные использовались для моделирования процесса резания угля на макроуровне. Расчеты на макроуровне позволили определить наиболее деформированные области, в которых в основном происходит формирование мелких пылевых частиц, а также характерный для них вид напряженного состояния.

Расчеты на мезоуровне позволили непосредственно смоделировать характерные особенности разрушения мезообъемов угля при различных видах нагружения и образование частиц разных размеров в ходе разрушения. На основе данных таких расчетов построены графики распределения пылевых частиц по размерам. Зная из проведенных расчетов на макроуровне долю облас-

тей, дающих основную часть пылевых частиц, можно оценить выход пылевых частиц на тонну добытого угля.

Очень важными в этом подходе являются вопрос о характерных размерах представительного мезообъема, составе и свойствах составляющих уголь литотипов и выбор критериев разрушения. Этим аспектам посвящены работы [1, 2], данные которых были использованы при проведении расчетов. Все расчеты проводились в двумерной постановке для условий плоского деформированного состояния. Для проведения расчетов использовался конечно-разностный метод, общее описание которого можно найти в работе [3].

2. Численное изучение резания и образования пылевых частиц

Применительно к такому сложному природному композиту, как уголь, проявляющему как хрупкие свойства, так и неупругое поведение, задача резания существенно усложняется тем, что при резании угля формируются множественные трещины и осколки. Эти проблемы решались с использованием специально разработанных оригинальных алгоритмов численного моделирования, позволяющих осуществлять расчеты неупругого вязкопластического поведения и множественного разрушения с взаимодействием отдельных фрагментов [4–6].

Неупругая (квазипластическая) деформация описывалась с использованием модели Николаевского [7, 8], с учетом внутреннего трения и независимым соотношением для учета дилатансии материала, обусловленной накоплением повреждений меньшего масштаба.

Условие пластичности запишем в виде:

$$\alpha J_1/3 + J_2^{1/2} = Y, \quad (1)$$

где $J_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$; $J_2 = \frac{1}{2}(s_{ij}s_{ij})$, s_{ij} — компоненты девиатора напряжений; α — коэффициент внутреннего трения; Y — сдвиговая прочность материала или сцепление. Приращение пластической деформации определяется выражением:

$$\Delta \epsilon_{ij}^p = \left(s_{ij} + \frac{2}{3} \Lambda \left(Y - \frac{\alpha}{3} J_1 \right) \delta_{ij} \right) \lambda, \quad (2)$$

где Λ — коэффициент дилатансии; λ — параметр, который определяется в ходе пластической деформации из условия текучести. Объемная и сдвиговая части пластической деформации связаны соотношением $\dot{j}_1^p = 2\Lambda \dot{j}_2^{p1/2}$. При $\Lambda = \alpha$ имеем модель Друккера–Прагера, при $\Lambda = \alpha = 0$ — модель Прандтля–Рейса, с условием текучести Мизеса.

Условие разрушения, которое проверяется при $\sigma_n > 0$, запишем в виде:

$$\sigma_{\text{eff}} = \sigma_n(1-a) + \sigma_\tau a < \sigma^*(1-D_\epsilon), \quad (3)$$

где σ_n , σ_τ — соответственно нормальная и касательная составляющие вектора напряжений; $0 \leq a \leq 1$ — па-

раметр, определяющий вклад нормальных и касательных напряжений. Поврежденность D_ϵ определяется как

$$D_\epsilon = \beta \left(\frac{\int dI_1^F}{\epsilon^*} \right)^n, \quad (4)$$

где β , n — параметры; σ^* , ϵ^* — соответственно предельное значение напряжения и предельный уровень объемной пластической деформации.

Таким образом, для описания процесса разрушения угля используется комплексная модель. Согласно этой модели считается, что в ходе неупругой деформации происходит накопление повреждений, с которыми по смыслу связана объемная часть неупругой деформации (дилатансия). В результате накопления повреждений происходят снижение прочности и деградация материала, а раскрытие трещин имеет место при наличии и под действием растягивающих и сдвиговых напряжений. При выполнении локального условия разрушения макрообразцов, которое проверяется для всей расчетной области, осуществлялась процедура разделения узлов расчетной сетки [9, 10] и на вновь образованных границах задавались условия свободной поверхности. Это обеспечивает автоматический учет образования трещин и фрагментов в процессе деформирования во всей расчетной области. При этом образование и развитие трещин описываются явным образом. Использование такого способа описания позволяет учитывать и рассматривать образование трещин, проскальзывание их поверхностей, а также формирование осколков.

2.1. Задача о резании. Макроуровень

Расчеты проводились для скорости движения реза 2.5 м/с и толщины среза 11 см, что соответствует реальным условиям резания угля стругом. При формировании и отделении фрагментов толщиной около 1 см и меньше им сообщалась постоянная скорость движения, что имитировало отброс этих фрагментов по третьей оси координат. В дальнейшем поведение этих мелких осколков не рассматривалось.

Были изучены процессы макроэпического разрушения углей, обладающих различным сочетанием хрупких и вязкопластических свойств. В соответствии с этим рассмотрены различные варианты разрушения углей при резании: хрупкий, с формированием осколков размером около 1 см, и вязкие, с осколками большего размера (до десятков сантиметров), разделенными областями сильно поврежденного, раздробленного материала.

Был выполнен ряд расчетов для горизонтальной и вертикальной проекций, в которых варьировались функция накопления повреждений и критерий макроэпического разрушения. Наиболее характерные примеры приведены на рис. 1, 2.

Проведенные расчеты и разработанные алгоритмы позволяют рассчитать напряженно-деформированное состояние в различных областях резания материала на

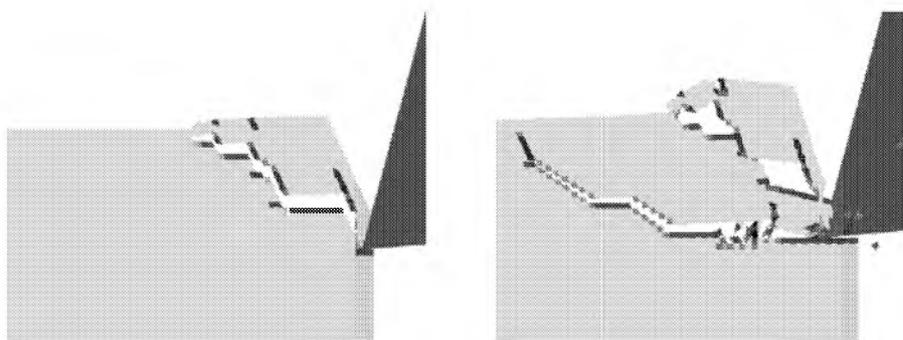


Рис. 1. Картина развития трещин и образования крупных кусков при резании угля

разных этапах процесса. Анализ полученных результатов показывает, что вблизи острия резца формируется зона максимально нагруженного и деформированного материала. Именно в ней образуется основная часть пыли. Напряженное состояние в этой зоне сложное и наиболее близко соответствует комбинации сжатия и сдвига.

2.2. Расчет деформации и разрушения характерного мезообъема в условиях сжатия и сдвига. Оценка фракционного состава пылевых частиц

Для определения фракционного состава пылевых частиц размером 2–100 мкм были проведены расчеты деформации и разрушения выбранного мезообъема угля в условиях нагружения, определенных из решения предыдущей задачи. Характерный размер мезообъема был определен по экспериментальным данным о блочной структуре угля [1] и составляет порядка 600 микрон. Карта внутренней структуры мезообъема угля и типичная картина его разрушения для схемы нагружения «сдвиг + сжатие» показаны на рис. 3. Для описания разрушения был применен комплексный критерий, учитывающий критические значения как растягивающего напряжения, так и накопленной неупругой деформации. Для каждого компонента мезоструктуры эти значения являются индивидуальными.

Были проведены расчеты разрушения выбранного мезообъема в разных условиях нагружения и с разной степенью подробности учета порового пространства.

Для полученных картин разрушения, соответствующих определенным условиям нагружения, были рассчитаны распределения фракционного состава. Однако поскольку расчеты процесса резания на макроуровне показали, что для областей, в которых в основном происходит образование пылевых частиц, характерно напряженное состояние «сжатие + сдвиг», то приведенные на рис. 3 результаты представляются наиболее интересными.

Анализируя картину разрушения мезообъема можно явно выделить образующиеся фрагменты разных размеров. Специальная компьютерная обработка такого изображения позволила рассчитать функцию распределения образующихся фрагментов по их размерам (рис. 4). Следует отметить, что использование расчетной сетки с шагом по пространству 1 мкм не позволяет достоверно определить количество фрагментов размером меньше 2 мкм. Верхняя граница размера фрагментов определяется размером выбранного мезообъема и характером нагружения.

Необходимо также отметить исключительную важность учета мелких пор в мезообъеме для описания его механического поведения. Данные исследований структуры углей показывают, что поровое пространство в угле является сложно иерархически организованным. Оно, несомненно, оказывает огромное влияние на механические характеристики на мезоуровне. Однако даже простейший учет пор разных размеров приводит к качественному изменению картин разрушения [2].

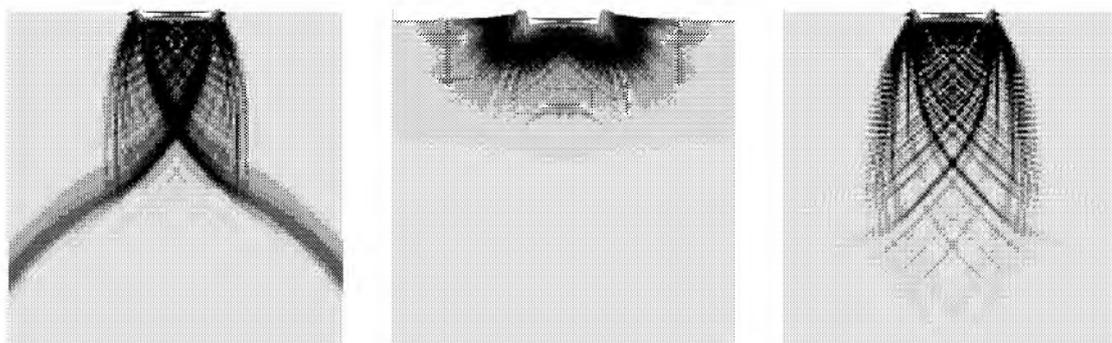


Рис. 2. Распределение деформаций в зависимости от параметров модели

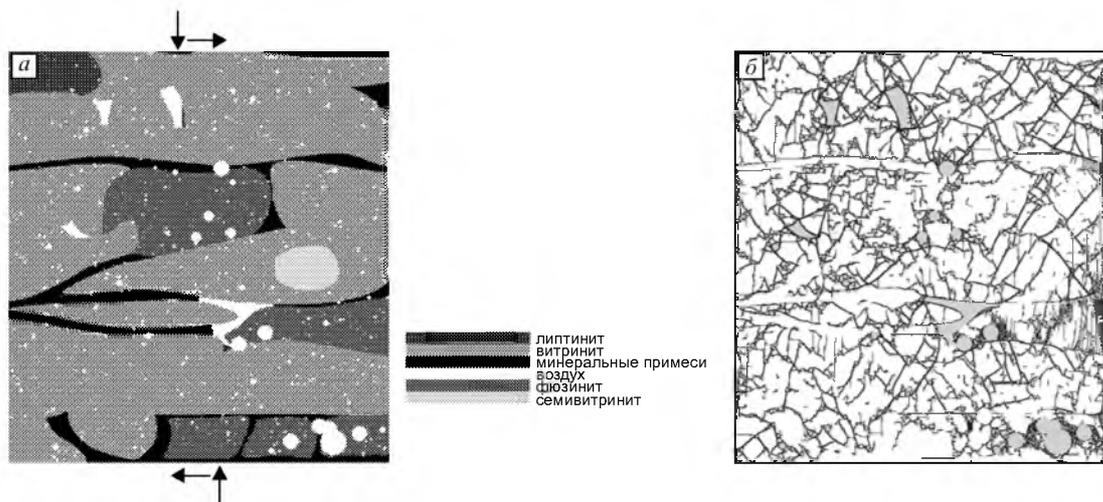


Рис. 3. Структура мезообъема и условия нагружения (а), картины разрушения пористого образца (б): общая деформация сдвига 0.385 %, общая деформация сжатия –0.770 %

3. Заключительные замечания

Процесс деформации и разрушения угля изучен на макро- и мезоуровнях. Уголь рассмотрен как сложный композиционный материал, для которого по заданным параметрам компонентов получены усредненные параметры, феноменологически учитывающие поврежденность среды, состав и пористость конкретного образца.

Выполнены расчеты процесса резания угля с различной реологией макроскопического отклика — от хрупкого поведения до вязкопластических свойств. В зависимости от реологии макрообразцов вблизи реза формируются различные системы трещин.

Определяющие уравнения, учитывающие внутреннее трение и дилатансию, позволяют описывать процессы локализации деформации и поврежденности, что существенно для оценки размеров фрагментов при различных способах нагружения. Расчет распределения пылевых частиц по размерам выполнен на мезоуровне с явным учетом всех значимых элементов угля данного состава и пористости.

Предлагаемая численная методика оказалась эффективной для решения прикладных задач разрушения угля и может быть успешно применена для различных геологических материалов.

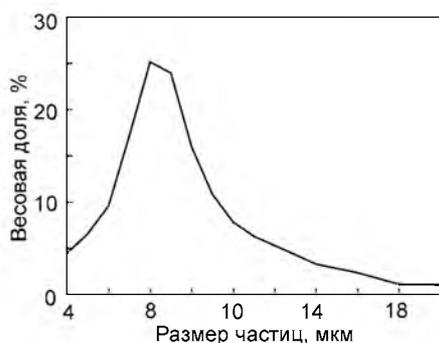


Рис. 4. Распределение фракционного состава, полученное на основе анализа картины разрушения на рис. 3(б)

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 02-05-65346), проекта 13.12 Программы фундаментальных исследований Президиума РАН, проекта 6.5.2 Программы специализированных отделений РАН.

Литература

1. *Адаптация методов мезомеханики к исследованию процессов деформации и разрушения угля* / Трубицын А.А., Макаров П.В., Черепанов О.И., Ворошилов С.П., Трубицын Н.В., Смолин И.Ю., Соболев В.В., Ворошилов Я.С., Киселев В.В., Грюнинг С. – Кемерово: Кузбасс-ЦОТ, 2002. – 116 с.
2. *Макаров П.В., Смолин И.Ю., Черепанов О.И., Трубицын Н.В., Ворошилов Я.С.* Упруго-вязкопластическая деформация и разрушение угля на мезоскопическом масштабном уровне // *Физ. мезомех.* – 2002. – Т. 5. – № 3. – С. 63–87.
3. *Уилкинс М.Л.* Расчет упругопластических течений // *Вычислительные методы в гидродинамике* / Под ред. Б. Олдера, С. Фернбаха, М. Ротенберга. – М.: Мир, 1967. – С. 212–263.
4. *Стефанов Ю.П.* Локализация деформации и разрушение в геоматериалах. Численное моделирование // *Физ. мезомех.* – 2002. – Т. 5. – № 5. – С. 107–118.
5. *Stefanov Yu.P.* Wave dynamics of cracks and multiple contact surface interaction // *J. Theor. and Appl. Frac. Mech.* – 2000. – V. 34/2. – P. 101–108.
6. *Smolin I.Yu., Makarov P.V., Stefanov Yu.P., Balokhonov R.R., Romanova V.A.* Numerical modelling of strain localization and spall fracture in mesovolumes of polycrystalline materials under shock wave loading // *Proceedings of International Conference «Shock Waves in Condensed Matter»*, St.-Petersburg, 1–6 September, 2002. – St.-Petersburg, 2002. – P. 157–159.
7. *Николаевский В.Н.* Механические свойства грунтов и теория пластичности // *Механика твердых деформируемых тел*. Т. 6. Итоги науки и техники. – М.: ВИНТИ АН СССР, 1972. – С. 5–85.
8. *Гарагаш И.А., Николаевский В.Н.* Неассоциированные законы течения и локализации пластической деформации // *Успехи механики.* – 1989. – Т. 12. – № 1. – С. 131–183.
9. *Chen Y.M., Willkins M.L.* Stress analysis of crack problems: a three-dimensional, time-dependent computer program // *Int. J. Fracture.* – 1976. – 12(4). – P. 607–617.
10. *Немирович-Данченко М.М.* Модель гипопругой хрупкой среды: применение к расчету деформирования и разрушения горных пород // *Физ. мезомех.* – 1998. – Т. 1. – № 2. – С. 107–114.