

## Влияние сложной геометрии границ раздела на характер деформирования угольного композита. Численное моделирование

Р.Р. Балохонов, В.А. Романова, П.В. Макаров, С.П. Ворошилов<sup>1</sup>

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

<sup>1</sup> НП «Кузбасский межотраслевой центр охраны труда», Кемерово, 650002, Россия

В работе на примере угольного композита численно проанализированы процессы деформирования в мезообъемах с изменяемой кривизной внутренних границ раздела. Показано, что концентрация как положительных, так и отрицательных напряжений в локальных областях угольного композита может превышать уровень приложенной нагрузки более чем в 2 раза. Проведены расчеты напряженно-деформированного состояния мезообъема угля для различных соотношений механических характеристик между компонентами, составляющими композицию. Установлено, что зависимость максимальных значений напряжений от соотношения упругих свойств имеет экспоненциальный характер.

## Effect of complex interface geometry on deformation of a coal composite. Numerical simulation

R.R. Balokhonov, V.A. Romanova, P.V. Makarov, and S.P. Voroshilov<sup>1</sup>

Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk, 634021, Russia

<sup>1</sup> Nonprofit Partnership "Kuzbass Center for Industrial Safety", Kemerovo, 650002, Russia

In the paper, by the example of a coal composite, we numerically analyze deformation processes in mesovolumes with the varying curvature of internal interfaces. It is shown that the concentration of both positive and negative stresses in local regions of the coal composite may exceed the level of applied load more than twice. The stress-strain state in coal mesovolumes is calculated for different relations of mechanical characteristics of composite constituents. The dependence of maximum stresses on the relation of elastic properties is found to have an exponential character.

### 1. Введение

Известно, что при деформации материалов с неоднородной внутренней структурой формируется сложное напряженно-деформированное состояние. В работах [1–3] на примерах двумерных и трехмерных расчетов для композитов на металлической основе показано, что даже при простом одноосном нагружении в мезообъеме композита возникают локальные области, в которых отличны от нуля все компоненты тензора напряжений. Более того, было установлено, что напряжения могут принимать большие положительные (растяжение) значения при приложении отрицательных (сжимающих) нагрузок. Это означает, что даже в условиях внешнего сжатия в композиционном материале могут возникать локальные области растяжения, величина

напряжений в которых, согласно проведенным расчетам для исследуемого типа структуры, имеет существенное значение, сравнимое с величиной сжимающих нагрузок. Данный вывод становится особенно важным применительно к материалам, для которых предел прочности на сжатие значительно превышает предел прочности на растяжение. Как правило, это хрупкие материалы и композиты на их основе.

Уголь как природный композит обладает данным свойством в ярко выраженной форме. Сжимающие нагрузки в угле (угольном пласте) могут возникать как за счет горного давления, так и за счет давления газов, заполняющих поровое пространство. В результате таких воздействий образуются локальные области повышенного давления, которые приводят к сложному напряжен-

ному состоянию в мезообъеме угольного композита. Определяющую роль при этом будут играть геометрия компонентов структуры и соотношение их физико-механических характеристик (модулей упругости, пределов прочности, плотностей).

Цель настоящей работы — проанализировать напряженно-деформированное состояние и характер разрушения угольного композита при явном учете формы, размеров и механических параметров составляющих компонентов в условиях внутреннего сжатия за счет давления газов, находящегося в поровом пространстве, а также провести количественную оценку величин концентрации напряжений в локальных областях композита.

## 2. Постановка задачи

Для расчетов напряженно-деформированного состояния исследуемых структур угля использовали общую систему уравнений механики сплошных сред, включающую законы сохранения массы, количества движения, соотношения для деформаций и определяющие уравнения, характеризующие среду. Оценку параметров напряженно-деформированного состояния будем проводить на упругой стадии нагружения. Динамическая задача решается как в постановке плоского деформированного состояния, так и для трехмерного случая [3]. Численное решение строится в переменных Лагранжа методом конечных разностей.

Модельная структура композита угля показана на рис. 1. Мезообъем представляет собой микрочастицу фюзинита округлой формы, которая располагается в более податливой породе — лейптините (рис. 1, а). Частица фюзинита содержит пору. Границы раздела «фюзинит – лейптинит» и «фюзинит – пора» произвольной формы характеризуются изменяемой кривизной. На рис. 1, б приведена пора в частице фюзинита, имеющей форму идеальной окружности. С целью исследования

Таблица 1

Механические свойства литотипов угля [4]

Литотип	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Объемный модуль упругости, ГПа	Модуль сдвига, ГПа
Фюзинит	1.4	383.3	39.66
Лейптинит	1.7	21.67	4.64
Витринит	1.25	33.33	7.14
Семивитринит	1.3	76.67	7.93

влияния кривизны границы раздела проводится сравнение результатов расчетов для разных структур.

Механические свойства компонентов структуры — литотипов угля — соответствуют экспериментально наблюдаемым и приведены в табл. 1.

В поровом пространстве задавалось избыточное давление ~200 атм. При численном моделировании давление в поре медленно наращивалось до заданной величины и поддерживалось на всем протяжении расчета.

Граничные условия моделируют стесненные условия, в которых находятся локальные объемы породы внутри пластов: на всех границах запрещены перемещения в направлении, перпендикулярном поверхности.

## 3. Результаты моделирования

Расчет среднего напряжения по мезообъемам исследуемых структур представлен на рис. 2. Хорошо видно, что распределение среднего напряжения для случая структуры с изменяемой кривизной имеет существенно неоднородный характер (рис. 2, а). Неоднородность напряжений наиболее ярко выражена в микрочастице фюзинита, где возникают локальные области как положительных (+), так и отрицательных (–) значений среднего напряжения, величина которых значительно превышает заданное значение в поре. Вся внутренняя область частицы фюзинита, окруженная порой, находится под

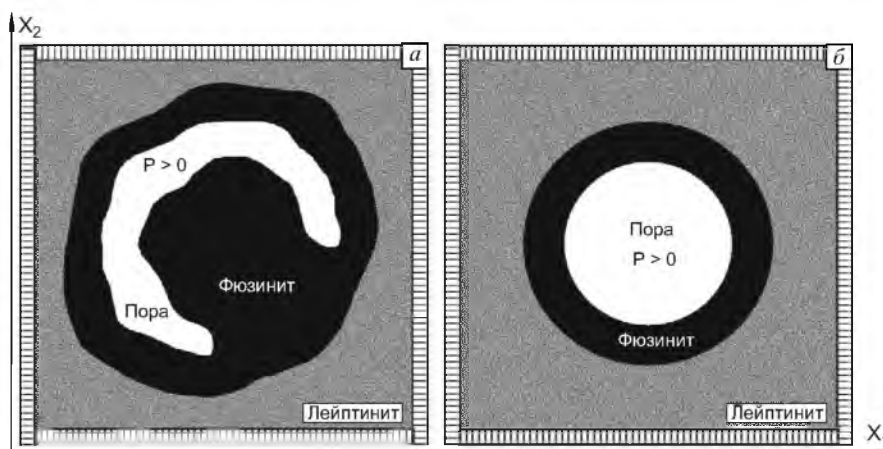


Рис. 1. Исходная структура композита: включение и пора с изменяющейся кривизной границ раздела (а); включение и пора идеальной формы с постоянной кривизной границ (б). Нормальные смещения на границах отсутствуют

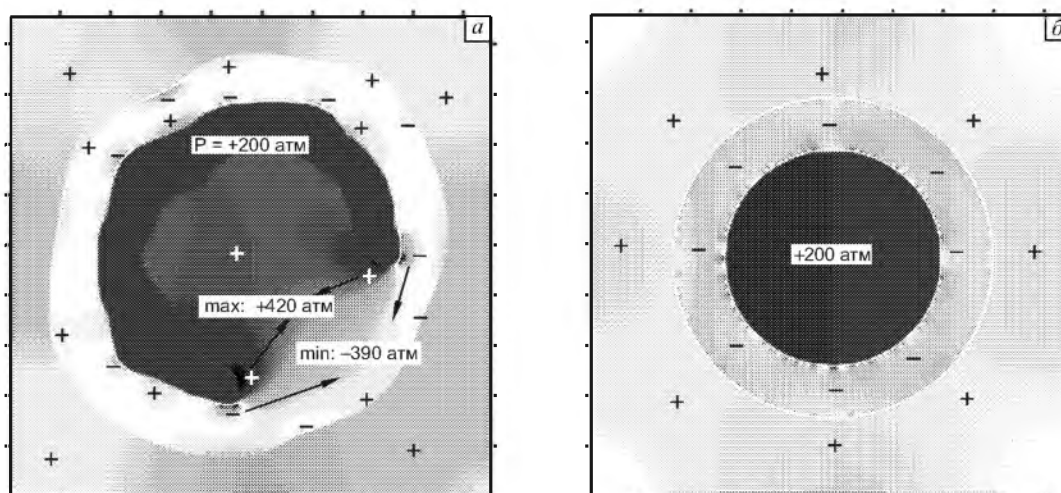


Рис. 2. Распределение давления в мезообъемах с изменяемой (а) и постоянной (б) кривизной границ раздела

действием положительного растягивающего давления. В то время как внешняя граница, отделяющая пору от лейптинита, испытывает переменные нагрузки, что связано с изменяемой кривизной структуры. Иными словами, благодаря наличию границ раздела различной кривизны между компонентами литотипов угля повышенное среднее напряжение в поре вызывает растяжение и сжатие локальных областей фюзинита, по абсолютной величине превосходящих величину этого среднего напряжения более чем в 2 раза (рис. 2, а). Области максимальных значений как положительных, так и отрицательных напряжений формируются вблизи концов поры, с внутренней и внешней стороны соответственно таким образом, что пора стремится «распрявиться», т.е. возникает эффект типа трубки Бурдона. Иная картина наблюдается для тестовой структуры с постоянной кривизной (идеальной окружности) (рис. 2, б): положительное значение среднего давления в поре вызывает в данном

случае равномерно распределенное всестороннее сжатие материала фюзинита. При этом за счет того, что лейптинит податливее фюзинита, кольцеобразная тонкостенная частица под действием внутреннего давления (в поре) испытывает максимальные нагрузки в тангенциальном направлении и сжимается (утоняется) в направлении радиальном, что вызывает растягивающие нагрузки в матрице — лейптините. Фактически подобное поведение соответствует поведению тонкостенной трубы под действием внутреннего давления.

На рис. 3 приведены распределения среднего напряжения на срезах трехмерной структуры, подобной той, которая представлена на рис. 1, а. Разница заключается в том, что частица фюзинита и пора вытянуты в третьем направлении на величины их внешних диаметров, представленных на рис. 1, а, 2, а. Значения растягивающих и сжимающих напряжений на внутреннем срезе оказались несколько ниже, чем в двумерном случае, за счет

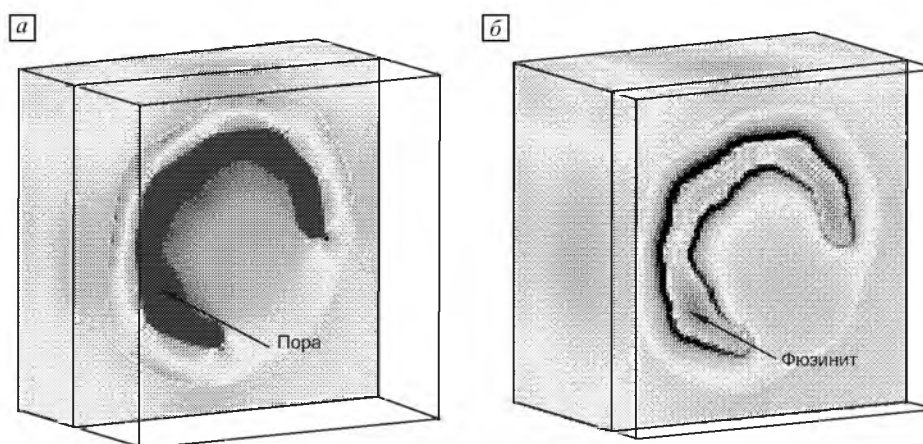


Рис. 3. Распределение давления в мезообъеме угля в различных сечениях при трехмерном моделировании

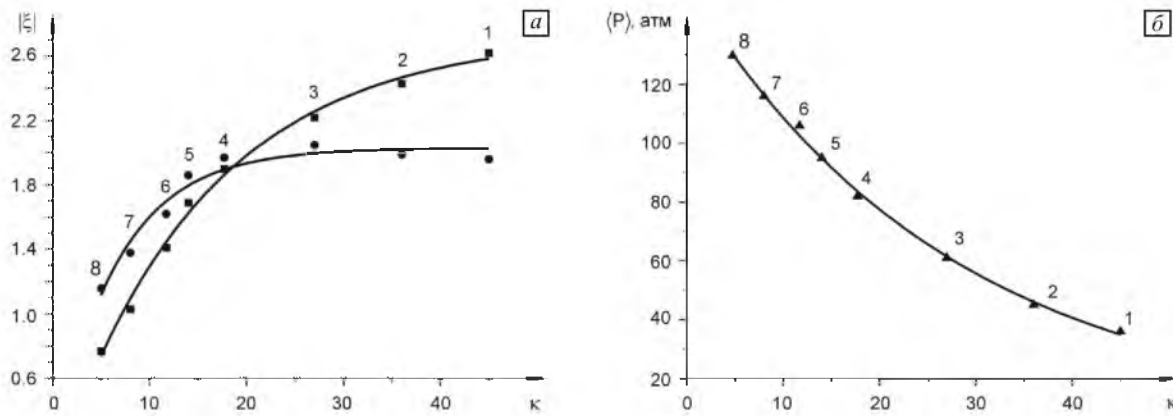


Рис. 4. Зависимость максимальных концентраций давления (а) и среднего давления (б) в фюзините от соотношения объемных модулей компонентов, составляющих композицию: 1, 2, 3, 5, 7— модельные материалы; 4 — лейптинит; 6 — витринит; 8 — семивитринит

деформирования материала в третьем направлении (рис. 3, а). Кроме того, максимальные значения давления в данном случае наблюдаются вдоль границы раздела «пора – фюзинит», которая отсутствует в двумерном приближении и расположена в плоскости, перпендикулярной третьей оси (рис. 3, б).

Величина локальных значений напряжений в местах концентрации зависит от соотношения механических характеристик компонентов структуры [1–3] — различных литотипов угля в рассматриваемом случае. В связи с этим была проведена серия расчетов, в которых варьировались свойства компонентов структуры. В дополнение к базовому расчету (рис. 1, а и 2, а), в качестве матрицы выступали другие литотипы угля — витринит и семивитринит, а также модельные материалы. Результаты моделирования представлены на рис. 4. Здесь  $\xi$  — отношение максимальных положительных (кружки) и минимальных отрицательных (квадраты) значений давления в фюзините к заданному давлению в поре;  $\kappa$  — отношение объемного модуля фюзинита к объемному модулю варьируемого материала;  $\langle P \rangle$  — среднее давление по области, занятой фюзинитом.

Установлено, что данные зависимости имеют экспоненциальный характер:

$$\xi = A + B \exp\left(-\frac{\kappa}{C}\right). \quad (1)$$

Соотношение (1) получено при проведении численных расчетов и требует экспериментального подтверждения.

Таблица 2

Параметры экспоненциального закона (1)

	A	B	C
$+P_{\max}$	2.73	-2.76	15.33
$-P_{\max}$	2.03	-1.94	6.59
$\langle P \rangle$	6.40	147.28	27.43

Константы A, B и C для формулы (1) представлены в табл. 2. Величины данных параметров могут быть связаны с определенной геометрией поры и частицы фюзинита, а также с характером нагружения.

Рисунок 4 показывает, что чем больше разница в механических характеристиках между составляющими компонентами структуры, тем выше концентрация как положительных, так и отрицательных давлений в материале фюзинита. При этом среднее по объему фюзинита значение давления падает. Связано это с тем, что отрицательные (сжимающие) нагрузки растут быстрее, чем положительные (растягивающие). При малых значениях  $\kappa$  максимальные значения отрицательного давления незначительны (рис. 4, а, вариант 8 «семивитринит – фюзинит»), а при  $\kappa$ , близком к 1, такие области вообще отсутствуют. При возрастании  $\kappa$  значения давления в областях растяжения и сжатия выравниваются (рис. 4, а, вариант 4 «лейптинит – фюзинит»). Если разница упругих модулей достаточно велика (рис. 4, а, вариант 1 «модельный материал – фюзинит»), то концентрация сжимающих нагрузок может в 1.5 раза превышать соответствующие значения в областях растяжения фюзинита, которые, в свою очередь, могут быть в 2 раза выше уровня приложенной растягивающей нагрузки под действием давления в поре.

#### 4. Заключительные замечания

Численное моделирование напряженного состояния угольного композита в условиях избыточного давления в порах показало, что определяющую роль в формировании областей растяжения и сжатия в мезообъемах угля играет геометрия (форма) составляющих компонентов и пор. Изменение знака среднего напряжения наблюдается в областях изменения кривизны поры или компонента. Проведена количественная оценка локальных значений напряжений для исследуемого типа струк-

туры. Установлено, что величина концентраций как растягивающих, так и сжимающих напряжений экспоненциально зависит от соотношения физико-механических характеристик составляющих компонент и может в 2 раза превышать величину приложенной нагрузки.

Вышеописанные факты возникновения высоких концентраций напряжений различного знака могут являться причиной преждевременного с макроскопической точки зрения разрушения угольного композита в условиях, когда внешние сжимающие напряжения не достигли величины прочности на сжатие.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 06-01-00592-а) и Российско-американской программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» (BRNE), проект № ТО-016-02.

## Литература

1. Балохонов Р.Р. Иерархическое моделирование неоднородной деформации и разрушения материалов композиционной структуры // Физ. мезомех. – 2005. – Т. 8. – № 3. – С. 107–128.
2. Балохонов Р.Р., Романова В.А. Эффект сложной геометрии границы раздела при иерархическом моделировании деформации и разрушения материалов с покрытиями // Сборник статей по материалам Первой международной конференции «Деформация и разрушение материалов – DFM2006» / Под ред. Ю.К. Ковнеристого. – М: Интерконтакт Наука, 2006. – С. 717–721.
3. Романова В.А., Балохонов Р.Р. Исследование напряженно-деформированного состояния в мезообъеме Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с учетом трехмерной внутренней структуры // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2005. – Т. 11. – № 1. – С. 61–77.
4. Трубицын А.А., Макаров П.В., Черепанов О.И., Ворошилов С.П., Трубицына Н.В., Смолин И.Ю., Соболев В.В., Ворошилов Я.С., Киселев В.В., Грюнинг С. Адаптация методов мезомеханики к исследованию процессов деформации и разрушения угля. – Кемерово: Кузбасс-ЦОТ, 2002. – 116 с.

Поступила в редакцию  
15.09.2006 г.