Список литературы

1. CNT-infused carbon fiber materials and process therefor : pat. 12/714,381 US, Int. Cl. B05C 13/02, B82Y 30/00, U.S. Cl. 118/620, 118/500, 977/843 / Tushar K. Shah, Slade H. Gardner, Mark R. Alberding, Harry C. Malecky ; assignee Lockheed Martin Corporation, Bethesda, MD. – № 20110168089A1 ; filed 26.02.10 ; pub. 14.07.11 // Patent Application Publication. – 2011. – 11 p.

2. Кияшко, М. В. Получение наноструктурированных углеродных материалов на каталитических поверхностях CVD-методом. Экспериментальные результаты для реактора цилиндрической геометрии / М. В. Кияшко, П. С. Гринчук. – Минск, 2012. – 53 с. – (Препринт / НАН Беларуси, Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова ; № 3).

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ

Макаева Т.А., Журавков М.А.

БГУ, Минск, Беларусь, makaevata@yahoo.com

В настоящее время в большинстве случаев при решении задач из различных разделов и областей механики используются модели, в которых объект/тело рассматривается в приближении (квази)сплошной непрерывной средой, что подразумевает выполнение определенным образом усреднения по пространству свойств среды и параметров деформирования. В таких моделях учет наличия структурных неоднородностей разного масштабного уровня выполняется специальными методами и подходами, например введением специальных непрерывных функций, описывающих изменение физико-механических свойств тела [1]. Естественно, что ведение таких функций является достаточно условным, так как приведенные (эффективные, интегральные и т.п.) механические свойства областей в случае, например, значительных «резких» изменений свойств среды, могут значительно отличаться от соответствующих реальных значений. В то же время исследования последних лет убедительно показали, что при деформировании объектов сложного внутреннего строения существенную роль играют локальные деформации, обусловленные относительными перемещениями и деформациями его структурных составляющих. Очевидно, что структура/микроструктура среды существенным образом влияет на характер ее деформирования и напряжённое состояние (композиционные материалы, горные породы, мелкозернистые материалы, наноструктуры и т.д.). Так при разработке моделей разрушения геоматериалов, искусственных композитов необходимо принимать в расчет возможность образования блочной структуры, учитывать ее тип, соотношения размеров блоков и их ориентировку в пространстве, характер и тип деформирования как отдельных блоков, так и межблокового пространства.

Новые структуры в породных массивах могут формироваться и проявляться, например, при наступлении предельного состояния в породной толще [1, 2]. Деформирование такой среды в дальнейшем во многом определяется образовавшейся внутренней структурой. Например, блочная структура в массиве может образовываться таким образом, что сплошность массива при этом в целом сохраняется. В дальнейшем деформация такого объекта происходит за счет скольжения блоков друг относительно друга и, может быть, их поворотов. При возникновении блочной структуры сопротивление породного массива деформированию уменьшается, но, все же, остается конечным. Очевидно, что в этом новом состоянии массива связь между напряжениями и деформациями отлична от общепринятой в механике деформируемого твердого тела «классической» Следовательно, необходимы новые формы математической записи соотношений между компонентами НДС тела.

В данной работе рассмотрены возможные пути построения механико-математических моделей, описывающих НДС деформируемых твердых упругих сред с учетом их внутренней структуры. Построения выполнены в рамках механики сплошных сред для статических задач деформирования упругих тел.

Рассмотрим механико-математическую модель, описывающую поведение породных массивов блочной структуры. Области в породной толще, в которых формируется блочная структура и где, в общем случае, упругие соотношения между напряжениями и деформациями не выполняются, определяются на основе соответствующих предельных условий [2]. В выделенных областях строятся разрешающие системы уравнений, отличные от разрешающей системы уравнений для упругой задачи.

Построение механико-математических моделей, позволяющих изучать НДС массивов в зонах образования блочных структур, не является однозначной задачей и подходов к формированию таких моделей может быть достаточно много вследствие большого количества определяющих факторов и показателей, а так же принятых гипотез и допущений.

При моделировании деформаций блочной структуры можно выделить несколько классов задач. В данном случае *рассмотрим деформирование блочной структуры в целом как сплошной твердой деформируемой структуры с различными внутренними связями между элементами.* При этом для данной задачи элементами являются отдельные блоки, а связями – межблоковые промежутки.

Следует при этом отметить, что траектория нагружения системы блоков может быть зарегистрирована только на внешних, но не на внутренних межблочных границах.

Очевидно, что вариантов движения блоковой структуры и взаимодействия блоков в этой структуре может быть несколько. Наиболее естественным является, конечно, подход, при котором трение между блоками рассматривается в том виде, в каком оно есть на самом деле. Однако в этом случае возникает необходимость использования методов теории вероятностей, в связи с тем, что набор блоков содержит хотя и счетное, но огромное число элементов. Кроме того, вариантов формирования блоков тоже бесконечно много. Поэтому даже возможностей современной вычислительной техники недостаточно для решения задачи в такой постановке.

Считаем, что блоки намного «жестче», чем прослойки. Поэтому можно считать, что блочная структура вначале деформируется за счет деформации прослоек. Механическая модель элемента такой среды представляет собой подобие кубика Рубика – она состоит из связной совокупности жестких недеформируемых параллелепипедов с мягкими деформируемыми прокладками.

Математическая модель описанной структуры массива горных пород на стадии проявления блочной структуры (проявление линий скольжения) без нарушения сплошности массива в целом состоит из уравнений равновесия Коши, уравнений неразрывности, граничных условий и физических уравнений, определяющих связь между напряжениями и деформациями.

Соотношения, определяющие связь между напряжениями и деформациями для массива блочной структуры могут быть записаны в следующем виде [3]:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \lambda_1 \sigma_x \\ \varepsilon_y = \lambda_2 \sigma_y \\ \varepsilon_z = \lambda_3 \sigma_z \\ \varepsilon_{xy} = \lambda_4 \tau_{xy} \\ \varepsilon_{yz} = \lambda_5 \tau_{yz} \\ \varepsilon_{xz} = \lambda_6 \tau_{xz} \end{cases}, \qquad (1)$$

где $\lambda_i = \text{const}$ – податливости межблоковых прослойков.

Закон деформирования массива вида (1) отражает модель поведения массива горных пород в случае образования в нем блочной структуры для трехмерного случая. Этот закон справедлив при выполнении условий, когда влияние компонент напряжений на сдвиговые процессы по сравнению с нормальными нагрузками пренебрежимо мало.

Решение модельной задачи. В качестве иллюстрации рассмотрим решение модельной задачи исследования НДС конструкции в виде плиты, лежащей на жестком основании и сжимаемой по двум боковым граням равномерно распределенной нагрузкой (рис.1). В качестве физических соотношений, определяющих поведение среды, принимаются уравнения (1).

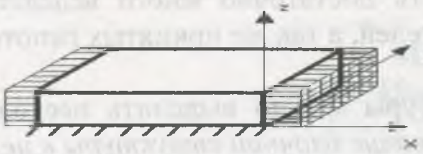

Рисунок 1 – Расчетная схема модельной задачи.

Разрешающая система уравнений модельной задачи МДТТ состоит из трех дифференциальных уравнений равновесия Коши, шести физических уравнений (1), шести соотношений сплошности между компонентами перемещений и компонентами деформаций и соответствующих граничных условий.

Решение системы разрешающих уравнений строилось численно. Расчеты выполнялись в специализированном программном пакете для решения дифференциальных уравнений FlexPDE.

Далее, в качестве примера получения конкретного решения, приведены некоторые результаты расчетов при следующих значениях исходных параметров: длина плиты – 5 м, ее ширина – 2 м, высота – 0.1 м.; интенсивность нагрузки, действующей на боковых гранях, F=10^6 Н/м^2; E (модуль Юнга)=$1.75\cdot10^9$ Н/м^2; ν (коэффициент Пуассона)=0,29; C_1 (коэффициент, обратный λ_1)=$E/2$; C_2 (коэффициент, обратный λ_2)=E; C_3 (коэффициент, обратный λ_3)=E; C_4 (коэффициент, обратный λ_4)=$2G$. Остальные коэффициенты λ_i определяются аналогичным образом. Здесь, как обычно, G=$E/(2\cdot(1+\nu))$ – модуль сдвига.

Отметим, что для данной численной модели в физических соотношениях (1) значение податливостей породы λ_2 и λ_3 в направлениях, перпендикулярных слоям, были приняты в два раза меньшими значению податливости массива вдоль направления слоев λ_1. Следует подчеркнуть, что далеко не всегда в лабораторных условиях удается определить упругие податливости λ_i массива с приемлемой точностью. Это обстоятельство приводит к необходимости комбинировать лабораторные, натурные и численные способы исследования.

Интересным, на наш взгляд, представляется сравнение полученного решения с решением подобной задачи, в которой в качестве физических уравнений, описывающих связь между компонентами напряженного и деформированного состояния, вместо соотношений (1) принят закон Гука.

Для модельной задачи в упругой постановке физико-механические характеристики материала были взяты следующие: F=10^6 Н/м^2; E=$1.75\cdot10^9$ Н/м^2; ν=0,29.

В работе приведены характерные результаты расчетов для двух рассмотренных модельных задач.

Выводы

В работе рассмотрены механико-математические модели, описывающие поведение деформируемых твердых сред с учетом их внутренней структуры. Модели построены в рамках механики сплошных сред для статических задач деформирования упругих тел. Существенным обстоятельством при этом является, что учет внутренней структуры среды не позволяет в качестве физических уравнений, описывающих поведение среды (связь между компонентами НДС), использовать закон Гука в стандартном виде. Получила развитие на пространственный случай модель, предложенная в [3] для двумерного случая, описывающая НДС массивов горных пород блочной структуры. Приводятся результаты выполненного, на основе предложенной модели, численного анализа НДС модельной конструкции (плиты) и сравнение полученных результатов с поведением конструкции, состояние которой описывается классической упругой моделью Гука. Рассмотренная в работе модель поведения массива позволяет учесть образование блочной структуры в первоначально сплошном массиве. Варьирование параметрами податливости λ_i позволяет рассматривать различные варианты формирования новой среды. Используя предложенную модель, описывающую поведение среды после образования в ней блочной структуры, и задавая различные значения параметров λ_i, можно выполнить модельные исследования и изучить поведение среды при различных качественных изменениях ее структуры.

Список литературы

1. Журавков М.А. Математическое моделирование деформационных процессов в твердых деформируемых средах (на примере задач механики горных пород и массивов). Мн.:БГУ, 2002. 456с.

2. Журавков М.А., Коновалов О.Л., Богдан С.И., Прохоров П.А., Круподеров А.В. Компьютерное моделирование в геомеханике / Под общ. ред. М.А. Журавкова. Мн. БГУ, 2008. 443 с.

3. Чаньшев А.И., Ефименко Л.Л. Математические модели блочных сред в задачах механики. Ч.1. Деформация слоистой среды // ФТПРПИ. № 3. 2003. С. 72-84.

НАНОКОМПОЗИТЫ НА СИЛИКАТНОЙ МАТРИЦЕ

Кудина Е.Ф.

Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси

Гомель, Беларусь, e-mail: kudina_mpri@tut.by

Разработка наноматериалов является приоритетным направлением развития науки и техники. Неуклонно растет интерес к нанодисперсным продуктам. Маркетинговые исследования показывают, что нанодисперсные порошки во всем мире пользуются большим спросом, производителей таких порошков мало, поэтому цены на них достаточно высоки. Рыночная цена 1 кг нанодисперсного никеля составляет ~6600 евро, меди – ~1200 евро [1]. Однако рынок наноматериалов стремительно развивается. Мировой рынок наноматериалов в 2000 г. составлял 492,5 млн. долларов, в 2005 г. – ~900,1 млн. долларов [2], в 2010 г. – ~11 млрд. долларов. По данным маркетинговой компании Research and Markets (США) мировой рынок нанотехнологий к 2013 г. достигнет 1,6 трлн. долларов. По прогнозным данным аналитического агентства LUX Research (США) «Глобальные рынки нанотехнологий» к 2015 г. объем продаж продукции с применением нанотехнологий вырастет до 2,9 трлн. долларов. Перспективы открываются огромные. При проведении исследований в области нанотехнологий и наноматериалов следует