

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
НИИ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ И МЕХАНИКИ  
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
СОВЕТ МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ  
СОВРЕМЕННОЙ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД  
И НЕБЕСНОЙ МЕХАНИКИ  
(27–29 ноября 2013 г.)**

**III Всероссийская молодёжная научная конференция**

*Под редакцией М.Ю. Орлова*

Томск  
Издательский Дом Томского государственного университета  
2014

Проведенное численное моделирование нестационарного и периодического теплообмена открывает дополнительные возможности по детальному исследованию теплового баланса в аппаратах порошковой технологии, а также позволяет проводить оптимизацию температурного режима в движущейся высококонцентрированной гранулированной среде за счет выбора амплитуды, частоты, местоположения нагревательных приборов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 13-08-00372-А).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Механика* гранулированных сред: Теория быстрых движений: сб. статей; пер. с англ./ Сост. И.В. Широко. М.: Мир, 1985. 280 с.
2. Шваб А.В., Марценко М.С., Рыжих Ю.Н. Моделирование гидродинамики и процесса усреднения гранулированной среды в аппаратах порошковой технологии // Инж.-физ. журнал. 2011. Т. 84, №4. С. 676 – 681.
3. Nedderman R., Davies S. and Norton D. The Flow of Granular Materials Round Obstacles // Powder Technology. 1980. Vol. 25, № 2. P. 215-223.

## ЭВОЛЮЦИЯ УПРУГИХ СВОЙСТВ СТРУКТУРНО НЕОДНОРОДНОГО МАТЕРИАЛА В УСЛОВИЯХ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ

Ю.В. Советова, Ю.Н. Сидоренко

*Предложена методика учета влияния процесса накопления повреждений на упругие свойства нерегулярно армированного композита.*

## THE EVOLUTION OF THE ELASTIC PROPERTIES OF AN INHOMOGENEOUS MATERIAL IN THE CONDITIONS OF DAMAGE ACCUMULATION

Y.S. Sovetova, Yu.N. Sidorenko

*Proposed method of accounting for the effects of the damage accumulation process on the elastic properties of irregularly reinforced composite.*

В настоящее время при производстве самых разных изделий все более широкое применение находят композиционные материалы. Учитывая ограниченные возможности экспериментальных способов изучения композитов, особенно с точки зрения исследования процессов, развивающихся в малых объемах материала (например, зарождение микрповреждений), необходимая информация может быть получена методами компьютерного моделирования. В связи с этим сохраняет свою актуальность необходимость развития методов компьютерного моделирования композитов, способных обеспечить максимально полный учет всех факторов и процессов, оказывающих влияние на формирование их механических свойств.

Для повышения надежности прогнозирования прочностных характеристик композитов необходимо учитывать, по возможности, все процессы, развитие которых приводит в конечном счете к эволюции упругих свойств материала. Особенностью этих процессов является то, что они проявляются на разных масштабных уровнях композитов.

Одним из возможных способов решения указанных проблем при численном исследовании прочностных свойств хаотически армированных композитов является использование многоуровневых представлений при их моделировании. В данной

работе для описания свойств материалов и реализующихся в них процессов используются три масштабных уровня: уровень свойств компонентов, уровень локальных свойств и уровень эффективных свойств.

В рамках принятого в работе представления о масштабных уровнях композита ключевым является уровень локальных свойств, поскольку именно этот уровень обеспечивает взаимосвязь между процессами, протекающими на нижнем и верхнем уровнях материала. Для моделирования влияния процесса накопления повреждений в элементарных объемах на локальные механические свойства композита предлагается следующая расчетная методика, ориентированная на использование метода конечных элементов и подобных ему вычислительных методов [1].

Математическая модель композита для масштабного уровня локальных свойств строится в предположении справедливости теории малых деформаций. Состояние моделируемого объема при этом описывается системой уравнений, включающей в себя уравнения равновесия, уравнения Коши, уравнения состояния. В качестве количественной меры локальной поврежденности каждого компонента материала используется удельная величина поврежденного объема данного компонента в пределах локального объема (параметр повреждаемости). Для вычисления параметра повреждаемости используется соотношение

$$\Pi_k = \frac{V_k^*}{V_k},$$

где  $V_k$  – объем  $k$ -го компонента материала в составе объема,  $V_k^*$  – «разрушенный» объем  $k$ -го компонента. Для оценки состояния каждого из микрообъемов в составе моделируемого объема используется критерий прочности Цая-Ву:

$$F_{ij}\sigma_{ij} + F_{ijkl}\sigma_{ij}\sigma_{kl} \geq 1,$$

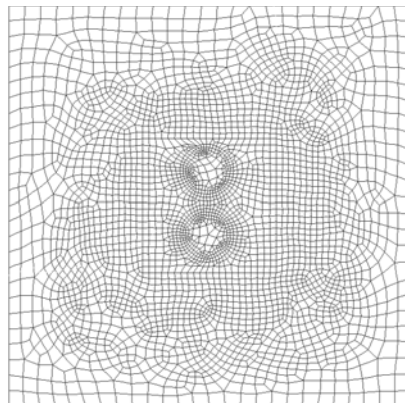
где  $\sigma_{ij}$  – компоненты тензора напряжений, коэффициенты  $F_{ij}$  и  $F_{ijkl}$  вычисляются по значениям пределов прочности компонентов материала при одноосном растяжении и сжатии, а также их сдвиговой прочности [2]. Параметр повреждаемости  $\Pi_k$  позволяет для каждого из компонентов рассчитать текущее значение модуля упругости компонента  $E_k$  с учетом повреждений, накопленных компонентом:

$$E_k = E_k^0(1 - \Pi_k),$$

где  $E_k^0$  – модуль упругости  $k$ -го компонента в отсутствие повреждений. Данный подход иллюстрируется на примере расчета напряженно-деформированного состояния модельного объема.

Расчетная схема объема соответствует трехфазной модели композита [3]. Задача решается методом конечных элементов в двумерной постановке для случая одноосного нагружения в вертикальном направлении. Конечно-элементная модель объема показана на рис. 2.

Рис. 2. Конечно-элементное представление модельного объема композита



На рис. 3 показано развитие кластеров повреждений в процессе возрастания продольной деформации объема. Видно, что зарождение кластеров происходит вблизи боковых границ включений, что качественно хорошо согласуется с известным решением задачи Кирша о распределении напряжений в окрестности единичного выреза в пластине при одноосном растяжении. По мере роста деформации происходит рост кластеров поврежденных объемов, что, в конечном счете, приводит к образованию соединительного кластера, показанного на рис. 3, в.

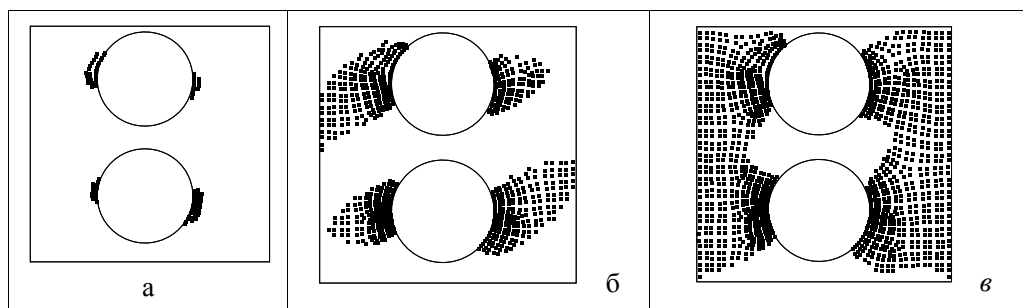


Рис. 3. Развитие кластеров повреждений в модельном объеме композита

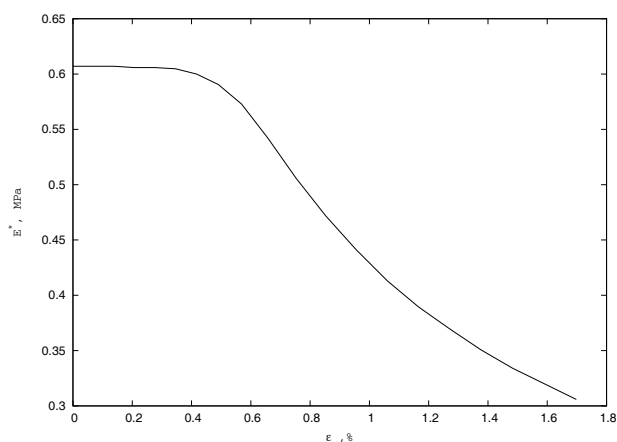


Рис. 4. Зависимость локального относительного модуля упругости от продольной деформации модельного объема

Накопление повреждений в объеме сопровождается падением его модуля упругости (локального значения модуля упругости композита) [4]. На рис. 4 показана зависимость относительного локального модуля упругости  $E_1^*$

$$E_1^* = \frac{E_1}{E_i},$$

где  $E_1$  – локальный модуль упругости;  $E_i$  – модуль упругости более жесткого компонента композита) от продольной деформации объема. Соотношение между модулями упругости матрицы и включений принято равным 25. Начальный участок полученной зависимости соответствует этапу деформирования, на котором в объеме нет признаков повреждения на низшем масштабном уровне. Далее, по мере возрастания количества поврежденных элементарных объемов, наблюдается снижение локального модуля упругости. Как показывает анализ полученных результатов, к моменту образования соединительного кластера (при продольной деформации объема 0,9%) локальный модуль упругости снижается примерно на 25% по отношению к начальному значению.

Таким образом, предложенная расчетная методика позволяет учесть влияние процесса накопления повреждений либо иных процессов, протекающих на низших масштабных уровнях композита, на формирование его эффективных механических свойств.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Победря Б.Е. Принципы вычислительной механики композитов // Механика композиционных материалов. 1996. №6. С. 729–746.
2. Механика композиционных материалов // под ред. Дж. Сендечки. Т. 2. М.: Мир, 1978. 566 с.
3. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. М.: Мир, 1992. 334 с.
4. Лейцин В.Н., Сидоренко Ю.Н. Оценка механических свойств многокомпонентных материалов стохастической структуры // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25, вып. 12. С. 89–94.

### СРАВНЕНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ПРИМЕРЕ РАСЧЕТА ФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

**В.Л. Гойко, М.Ю. Попп**

*Используются различные вычислительные комплексы для решения задачи взаимодействия ударной волны с преградой. Сравнивается эффективность данных комплексов при использовании параллельного алгоритма.*

### APPLICATION FOR CLOUD COMPUTING TO SOLVE THE PROBLEM OF SHOCK WAVE INTERACTION WITH EXPLOSION-PROOF CONSTRUCTIONS

**V.L. Goiko, M.U. Popp**

*Various computer systems are used to solve the problem of shock wave interaction with the barrier. The efficiency of these complexes is compared using a parallel algorithm.*

Вследствие повсеместного использования вычислительной техники бурно развивается направление численного моделирования. Для эффективного использования