

УДК 539.411.4

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО-АРМИРОВАННОГО КОМПОЗИТА

И.Ю. Ошева

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

Рассмотрено численное моделирование эксперимента на сжатие призматического образца из пространственно-армированного композиционного материала крупноячейковой структуры. Для описания напряженного состояния материала применяется структурно-феноменологический подход. Проанализировано влияние на напряженное состояние трения между контактирующими поверхностями призматического элемента и нагружающей плиты, а также положения армирующего каркаса элемента относительно его граней.

Ключевые слова: пространственно-армированные композиционные материалы, структурно-феноменологический подход, эксперимент на сжатие, численное моделирование

NUMERICAL ANALYSIS OF THE STRESS STATE OF SPECIMENS MADE OF THREE-DIMENSIONAL REINFORCED COMPOSITE

I.Yu. Osheva

Perm State National Research Polytechnical University, Perm, Russia

Numerical simulation of a compression test of the prismatic specimen made of three-dimensional reinforced composite with large-cell structure is considered. The structural-phenomenological approach is used to describe the stress state of the material. An analysis is carried out to study the effect of friction between the contacting surfaces of the prismatic element and the loading plate and the influence of the position of the reinforcing frame of the element with respect to its edges on the stress state of specimens.

Key words: three-dimensional reinforced composite, structural-phenomenological approach, compression test, numerical simulation

1. Введение

Обладая уникальными прочностными свойствами при нормальных и повышенных температурах, изделия из пространственно-армированных композиционных материалов (ПАКМ) с керамическими матрицами (элементы высокотемпературных печей, пресс-формы горячего прессования и другие) находят все большее распространение в различных областях промышленности.

Для контроля качества заготовок изделий проводят механические испытания их материалов на различные виды нагрузки. Свойства материалов устанавливаются на стандартных образцах, вырезаемых из технологических припусков заготовок. При этом механические свойства, полученные на образцах одной партии, могут сильно отличаться друг от друга.

В большинстве работ, посвященных численному определению механических свойств образцов из ПАКМ, эксперименты моделируются на однородных образцах с эффективными свойствами, эквивалентных неоднородным, или на ячейках периодичности [1–4], что не позволяет оценить взаимосвязь множества различных параметров и получаемых свойств. В работе [5] изучено влияние условий нагружения и нагружающего приспособления на прочностные свойства образца при сжатии, при этом

образец и нагружающее приспособление рассматриваются как единая конструкция. Выявлена существенная зависимость напряженно-деформированного состояния (НДС) от коэффициента трения между опорными поверхностями образца и испытательной машины и предложен метод снижения влияния трения [6], приводящий к более стабильным и более высоким значениям отыскиваемых в эксперименте характеристик прочности.

Другим фактором, воздействующим на НДС рассматриваемых крупнозернистых образцов и, соответственно, на их свойства, является случайное положение армирующего каркаса относительно граней вырезаемого образца. Оценить это экспериментально не представляется возможным, поэтому для ПАКМ необходимо детальное моделирование компонент образцов (каркаса, матрицы, их взаиморасположения).

2. Постановка эксперимента на сжатие

Одним из распространенных методов определения механических свойств материала (например, предела прочности) является испытание на сжатие. Эксперименты на сжатие образца крупнозернистой структуры из ПАКМ проводятся на испытательной машине, снабженной двумя плоскопараллельными площадками (плитами), причем одна из них самоустанавливающаяся. Машина обеспечивает сжатие образца с заданной постоянной скоростью перемещения активного захвата. Образец устанавливается на опорные плиты машины так, чтобы его продольная ось совпадала с направлением действия нагрузки, а торцовые поверхности были параллельны опорным поверхностям плит.

В данной статье представлено два варианта методики испытаний: «стандартная» и «модифицированная». Варианты отличаются тем, что в «модифицированном» эксперименте используется не обычный образец (как в «стандартном» случае), а образец с торцами, которые вставляются в стальную обойму, а затем заливаются мягким сплавом (например, сплавом Вуда).

Как показано в [5], для «стандартной» методики характерна высокая чувствительность к трению, возникающему на поверхности контакта образца и плит испытательной машины. В «модифицированном» эксперименте влияние этого трения выражено не так заметно [6]. Эти выводы сделаны на основе анализа НДС образца с фиксированным положением армирующего каркаса. Далее представлены результаты испытаний на сжатие с различным положением армирующего каркаса относительно граней образца, полученные с использованием описанных методик.

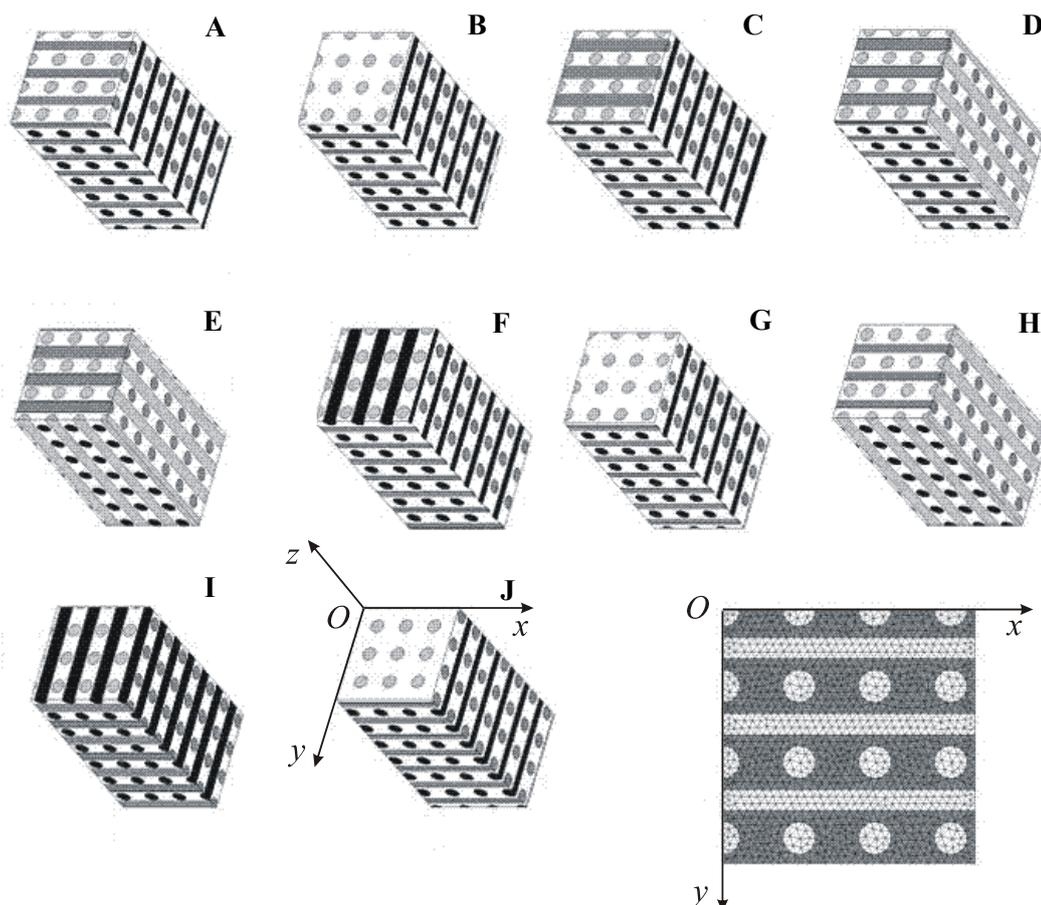
Краевая задача, соответствующая эксперименту, решается в упругой постановке. В общем виде она записывается для анизотропных материалов и содержит уравнения равновесия, геометрические соотношения Коши для малых деформаций и обобщенный закон Гука. Для экономии вычислительных ресурсов рассматриваются фрагменты, равные одной восьмой модели, выделенные координатными плоскостями.

Уравнения краевой задачи дополняются следующими граничными условиями: на всех точках опорной поверхности нагружающей плиты задается перемещение; на контактирующих поверхностях образца (или образца в обойме) и плиты формулируются контактные граничные условия с учетом сухого трения по закону Кулона с коэффициентом трения f ; на плоскостях разреза моделей выполняется условие симметрии; между поверхностями армирующих нитей, матрицы, сплава и обоймы имеет место идеальный контакт; остальные поверхности являются свободными от напряжений.

3. Образцы для испытаний

Пространственно-армированный композиционный материал состоит из армирующего каркаса и матрицы. Армирующий каркас получается переплетением трех

семейств прямолинейных нитей, причем каждое семейство образует с двумя другими прямой угол. Нити представляют собой прямые круговые цилиндры. Матрица заполняет каркас полностью, без пор. Образцы вырезают из припуска заготовки таким образом, чтобы грани были строго параллельны армирующему каркасу. Материал матрицы является линейно-упругим, макроскопически изотропным, материал армирующих нитей — линейно-упругим, трансверсально-изотропным. Ниже на рисунке представлены фрагменты моделей рассчитываемых образцов (вид на опорную и свободные поверхности). Координатная ось Oz совпадает с продольной осью образца; координатная плоскость xOy располагается на опорной поверхности.



Модели образцов А–J и пример конечно-элементной сетки

4. Результаты

Поля напряжений и деформаций образцов из ПАКМ определялись методом конечных элементов, реализованным в пакете ANSYS 11.0. Для дискретизации задачи использовались трехмерные элементы с квадратичной аппроксимацией перемещений SOLID 92 для образца и SOLID 95 для плиты, а также трехмерные TARGE 170 и CONTA 174 для моделирования контактного взаимодействия типа «поверхность с поверхностью». При моделировании экспериментов среднее количество элементов в образце составляло: 350798 — для «стандартного» эксперимента (486813 узлов); 354895 — для «модифицированного» эксперимента (495227 узлов); конечно-элементная модель плиты нагружающей машины имела 512 элементов (2673 узлов). В случае учета контактного взаимодействия образца с опорной плитой среднее количество элементов модели (включая контактные элементы) равнялось: 379886 — для «стандартного» эксперимента (489678 узлов); 443850 — для «модифицированного» эксперимента (588048 узлов).

Оценка качества конечно-элементной сетки осуществлялась с помощью встроенного в пакет ANSYS механизма оценки энергетической ошибки [7]. Для построенных сеток нормы ошибки не превышали 15%, то есть полученные результаты обладают достаточно высокой степенью точности.

Влияние трения на контактирующих поверхностях образца и плиты машины изучалось по возникающему в образцах НДС, которое рассчитывалось для двух коэффициентов трения f : 0,3 и 0,6.

Натурные эксперименты показывают, что процессы разрушения образцов начинаются в матрице. Предполагается, что матрица разрушается от сдвиговых напряжений, поэтому в качестве критерия прочности образца использовался критерий максимальных главных касательных напряжений. Выявление начальных очагов разрушения материала проводилось на основе структурно-феноменологического подхода [8], поэтому касательные напряжения в матрице рассматривались как усредненные по представительному объему [5, 6]. Их значения в матрицах всех образцов представлены в таблице.

Таблица. Максимальные осредненные главные касательные напряжения в матрицах образцов

Образец	Осредненные касательные напряжения в матрице, МПа			
	«Стандартный» эксперимент		«Модифицированный» эксперимент	
	$f = 0,3$	$f = 0,6$	$f = 0,3$	$f = 0,6$
A	86,0936	113,1988	69,6751	70,9481
B	77,7429	96,1843	71,8334	73,2653
C	86,3380	104,2902	70,4491	71,6974
D	100,9899	94,3336	66,5663	67,8372
E	101,3633	90,7910	54,9088	55,4846
F	87,1734	110,4494	68,4272	69,8378
G	77,1300	100,0986	69,1585	70,8055
H	79,7434	100,3322	59,5737	58,1536
I	61,9798	63,5689	54,0569	55,2769
J	62,1779	96,7204	53,0645	55,4656
Среднее значение	82,0732	96,9968	63,7714	64,8772

Как видно из таблицы, при проведении эксперимента по «стандартной» методике различие напряжений и, соответственно, пределов прочности материала достигает 24% (образцы D, I, J, $f = 0,3$) и 34% (образец I, $f = 0,6$) по сравнению со средним значением. Разница между максимальными и минимальными значениями напряжений может составлять до 38% (образец E, $f = 0,3$) и 44% (образец A, $f = 0,6$). Практически для всех образцов (за исключением D, E и I) с ростом коэффициента трения наблюдается увеличение осредненных касательных напряжений (образец J, разница достигает 56%). Для «модифицированной» методики влияние трения на прочность образцов незначительно (до 5%). Напряжения превышают среднее значение не более чем на 17%. Также следует отметить существенное снижение напряжений по сравнению с напряжениями, наблюдаемыми в образцах, не заключенных в обойму с мягким сплавом при испытаниях по «стандартной» методике: до 33% по средним значениям и до 46% для значений напряжений отдельных образцов.

5. Заключение

Проведено компьютерное моделирование процесса сжатия призматического образца из пространственно-армированного композиционного материала с учетом структуры материала. В работе рассмотрено влияние на напряженное состояние при сжатии трения между опорными поверхностями призматического образца

и нагружающим приспособлением, а также положения армирующего каркаса относительно граней образца. Показано, что влияние это существенно и приводит к разбросу свойств образцов. Установлено, что заключение торцов образцов из ПАКМ в обойму с мягким сплавом приводит к снижению и более стабильному уровню значений напряжений при нагружении сжатием.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №10-08-96062-р_Урал_а) и Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (Госконтракт 16.740.11.0508).

Литература

1. *Ташкинов А.А., Шавиуков В.Е.* Тепловое расширение однонаправленных и пространственных ортогонально армированных волокнистых композитов // *Механика композиционных материалов и конструкций.* – 2003. – Т. 9, № 2. – С. 133-141.
2. *Tanzawa Y., Watanabe N., Ishikawa T.* FEM simulation of a modified DCB test for 3-D orthogonal interlocked fabric composites // *Composites Science and Technology.* – 2001. – V. 61, N. 8. – P. 1097-1107.
3. *Zako M., Uetsuji Y., Kurashiki T.* Finite element analysis of damaged woven fabric composite materials // *Composites Science and Technology.* – 2003. – V. 63, N. 3-4. – P. 507-516.
4. *Kuo C.-M.* Elastic bending behavior of solid orthogonal woven 3-D carbon-carbon composite beams // *Composites Science and Technology.* – 2008. – V. 68, N. 3-4. – P. 666-672.
5. *Ошева И.Ю., Ташкинов А.А., Шавиуков В.Е.* Краевые эффекты при испытании призматического образца композиционного материала крупноячеистой структуры на сжатие // *Механика композиционных материалов и конструкций.* – 2011. – Т. 17, № 4. – С. 493-508.
6. *Ошева И.Ю., Шавиуков В.Е.* Компьютерное моделирование сжатия образца из крупноячеистого пространственно-армированного композита, заключенного в обойму для устранения влияния краевых эффектов // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки.* – 2011. – Вып. 3(24). – С. 176-180.
7. ANSYS 11.0 Documentation. – <http://www.kxcad.net/ansys/ANSYS/ansyshelp/ansys.set.html> (дата обращения: 15.03.2011).
8. *Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А.* Механика деформирования и разрушения структурно-неоднородных тел. – М.: Наука, 1984. – 115 с.

Поступила в редакцию 25.11.11