

И. В. Магнитский, К. А. Пономарев,
А. Н. Миронихин, С. В. Ташилов

К ВОПРОСУ О ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ УПРУГИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ СХЕМЫ АРМИРОВАНИЯ

На основе численных расчетов ячеек композиционного материала структуры армирования 4DL определен представительный объем материала для состояния растяжения (сжатия), установлена степень влияния несовершенства формы поперечного сечения армирующего волокна. Расчетным путем и экспериментально на образцах мелкоячеистого материала нового поколения показано нарушение трансверсальной изотропии материалов со структурой армирования 4DL, приведены рекомендации по измерению линейных деформаций на образцах таких материалов.

E-mail: soleylju@gmail.com; Kirill.a.ponomarev@gmail.com

Ключевые слова: элементарная ячейка, композиционные материалы.

При проведении механических расчетов, в том числе численными методами, конструкций из композиционных материалов их, как правило, не рассматривают как сложную структуру, имеющую внутреннее строение, а заменяют сплошной средой с постоянными по объему эффективными свойствами, часто анизотропными. Эффективные свойства материала определяются в ходе испытаний образцов материалов, результаты которых обрабатываются с учетом представления о его однородности. Такой подход имеет то существенное преимущество перед рассмотрением композиционного материала как конструкции, что не требует специфических методов испытаний и пересчета свойств его компонентов. Точность расчетов при этом напрямую зависит от степени соответствия реального материала его однородной модели.

Среди пространственных схем армирования композитов наибольшее распространение получили схемы 3D и 4DL. В расчетах материалы со структурой 3D обычно заменяются моделью ортотропного тела, а 4DL — трансверсально изотропного тела [1, 2]. В качестве критерия прочности (работоспособности) материала при подобном подходе используются различные критерии вида

$$\Phi(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}) = 0, \quad (1)$$

в которые входят средние напряжения либо деформации и их комбинации. Характер разрушения материала при этом большой роли не играет.

Несмотря на широкое распространение описанных упрощений, они имеют важный недостаток: значения напряжений и деформаций,

получаемые в расчетах, являются средними по структурной ячейке композита и в реальном материале практически не реализуются. Формирование же критерия прочности в виде (1) в случае объемно-армированного композиционного материала требует большого числа сложных в исполнении экспериментов.

В противоположность описанному, микромеханический подход рассматривает композиционный материал как конструкцию, состоящую из матрицы и наполнителя, свойства которой определяются свойствами ее компонентов и их взаимодействием. Поскольку расчеты цельных конструкций с применением таких методов требуют либо значительных вычислительных мощностей, либо сложного математического аппарата, в настоящее время они мало распространены. Для упрощения задачи целесообразно проводить расчеты на одной отдельно взятой ячейке композиционного материала или на его так называемом представительном объеме, который представляет собой совокупность нескольких ячеек материала, ведущих себя при рассматриваемых нагружениях как массив самого композита (с заданной точностью).

Микромеханический подход полезен в ситуациях, когда температурные поля, поля напряжений и деформаций имеют большие градиенты и существенно меняются на характерном размере ячейки материала, что делает результаты расчета средних значений этих характеристик практически бесполезными: в случаях расчетов малых объемов материала, поведение которых при нагружении весьма отличается от усредненной модели; при формулировании критериев прочности (работоспособности), опирающихся на характер разрушения материала. Также рассмотрение композиционного материала как конструкции зачастую полезно для более глубокого понимания происходящих в нем при нагружении процессов.

В настоящей работе рассмотрен случай условного материала со структурой армирования 4DL, весьма распространенной в конструкциях РКТ, для которого определен представительный объем, рассчитаны эффективные значения модулей упругости при растяжении в различных направлениях, исследовано влияние на них формы поперечного сечения волокон наполнителя.

Постановка задачи. Для определения эффективных модулей упругости материала в различных направлениях исходя из упругих свойств его компонентов был использован метод конечных элементов. Расчеты проводились в среде Ansys Workbench.

Геометрическая модель элементарной ячейки представлена на рис. 1. Волокна наполнителя имеют поперечное сечение, представляющее собой многоугольник со скругленными углами; такая форма сечения, как следует из рис. 2, наблюдается в реальных материалах.

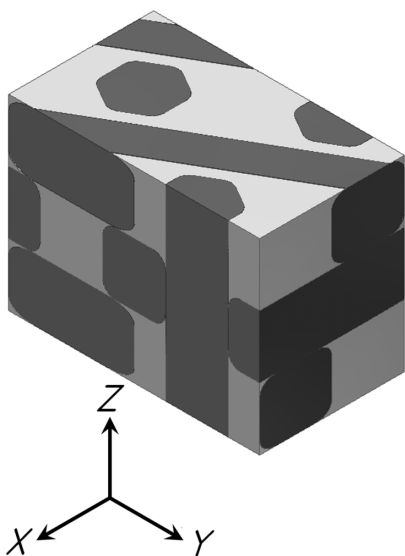


Рис. 1. Общий вид ячейки материала с армированием по схеме 4DL

Упругие свойства компонентов условного материала выбирались, исходя из характерных их значений, приводимых, например, в [3, 4]. Волокна считались трансверсально изотропными, матрица — полностью изотропной. Свойства волокон задавались в естественной их системе координат, в которой осью X является направление наибольшего измерения, а оси Y и Z равноценны.

Отметим, что модуль упругости волокон вдоль их наибольшего измерения для направлений армирования U (в плоскости XY) и Z был взят различным. Такое решение обусловлено тем, что данный параметр определяется прежде всего линейной плотностью волокон и практически не зависит от сечения, по которому распределены волокна. Таким образом, равной должна быть погонная жесткость волокон, что при различных площадях поперечного сечения приводит к различным значениям модуля упругости. Такой же подход был использован

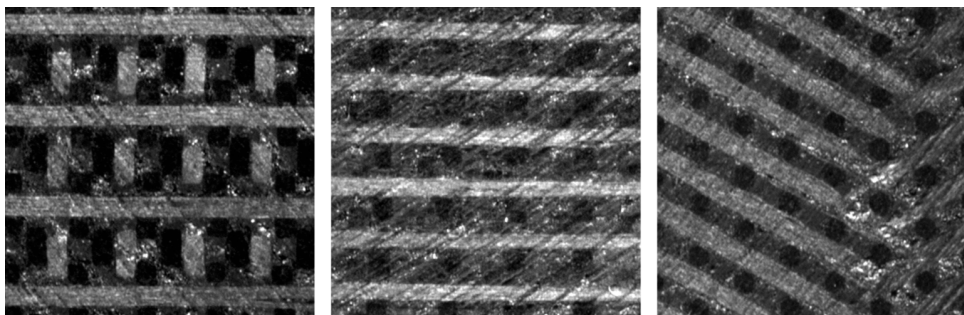


Рис. 2. Типичная форма поперечных сечений волокон в плоскостях YZ (слева), XZ (в середине) и XY (справа)

Переходным слоем между волокнами и матрицей пренебрегали ввиду малости его толщины по сравнению с поперечными размерами волокон.

Основная система координат, связанная с ячейкой, имеет ось Z , направленную вдоль оси симметрии материала и ось X , совпадающую с одним из направлений армирования в плоскости симметрии. Ось Y дополняет систему координат до правой.

В расчетах использовались объемы, составленные из ячеек, показанных на рис. 1. Размеры объемов характеризуются числом ячеек вдоль осей основной системы координат n_X , n_Y и n_Z .

при определении степени влияния формы сечения на модуль упругости материала.

Все связи между отдельными волокнами и матрицей в рассчитываемом объеме считались идеальными, что вполне соответствует действительности в условиях малых деформаций, не приводящих к разрушению материала.

Задача решалась в линейной постановке.

Характерный размер конечных элементов выбирался так, чтобы вдоль стороны поперечного сечения волокна размещалось не менее 6 элементов. В основном использовались элементы SOLID186 (двадцатиузловой элемент в форме параллелепипеда) и SOLID187 (десятиузловой элемент в форме тетраэдра) с преобладанием первых.

В качестве граничных условий использовались следующие. В одной из граней, перпендикулярных рассматриваемой оси T , задавались перемещения в направлении этой оси, в другой — опора без трения. В направлениях, нормальных T , упомянутые грани оставались свободными. Также свободными оставались грани, параллельные оси T . В качестве результатов определялись как поля напряжений и деформаций, так и суммарная реакция F в опоре A . Эффективный модуль упругости в направлении T вычисляли по формуле

$$E_T = \frac{Fa}{Sd}, \quad (2)$$

где a — длина объема в направлении T ; S — площадь поперечного сечения объема в направлении T ; d — задаваемое в качестве граничного условия смещение одной из граней, нормальных оси T .

Определение представительного объема материала. Для выбора представительного объема материала были проведены расчеты эффективного модуля материала по формуле (2) для объемов с разным числом ячеек вдоль основных осей n_X , n_Y и n_Z . Важным вопросом здесь является критерий представительности. Поскольку схема армирования 4DL применяется чаще всего для углерод-углеродных и углерод-керамических материалов, ориентироваться следует на характерные для них естественные разбросы упругих свойств. Таким образом, если при уменьшении любого из чисел ячеек n_X , n_Y и n_Z на единицу изменение рассчитанного модуля упругости на порядок меньше среднеквадратического отклонения (СКО) данного значения, полученного в экспериментах на указанных типах материалов, объем $n_X \times n_Y \times n_Z$ можно считать представительным. Следует заметить, что такой критерий не является обязательным, а лишь принят как наиболее рациональный с точки зрения авторов. Характерные СКО модулей упругости в направлении различных осей приведены в табл. 1.

Результаты расчетов показали, что эффективный модуль упругости в направлениях X и Z практически не зависит от выбранного

Типичные СКО значений модулей упругости

Направление	СКО, ГПа	Коэффициент вариации, %
X	5,8	15
Y	9,1	30
Z	4,4	9

объема материала. Наибольший разброс расчетных значений модуля упругости при этом не превышает 0,8% максимального значения, что гарантирует выполнение выбранного критерия представительности.

Совершенно другое поведение демонстрирует модуль упругости в направлении Y. Графики зависимостей расчетных значений модуля E_Y от чисел ячеек n_X , n_Y и n_Z приведены на рис. 3. Из рисунка следует, что представительным в нашем понимании можно считать объем $5 \times 4 \times 5$ ячеек. Заметим, что графики на рис. 3 иллюстрируют расчетные значения модуля упругости для $n_X = n_Z$. Дополнительные исследования показывают, что влияние на модуль упругости чисел ячеек n_X и n_Z практически одинаково.

Нарушение трансверсальной изотропии материала. На рис. 4 приведен график зависимости отношения модулей упругости $u = \frac{E_Y}{E_X}$ от общего числа ячеек. Видно, что значения модулей E_X и E_Y существенно различаются даже при весьма большом числе ячеек материала в объеме. Более того, учитывая характерные размеры поперечного сечения волокон современных материалов, из вида кривой можно сделать предположение, что анизотропия может проявляться и в реальных конструкциях. Немонотонность зависимости объясняется тем, что в расчетах использовались объемы с различными соотношениями чисел ячеек вдоль сторон.

Такие результаты подтверждаются и экспериментальными исследованиями упругих свойств материалов со структурой 4DL с характер-

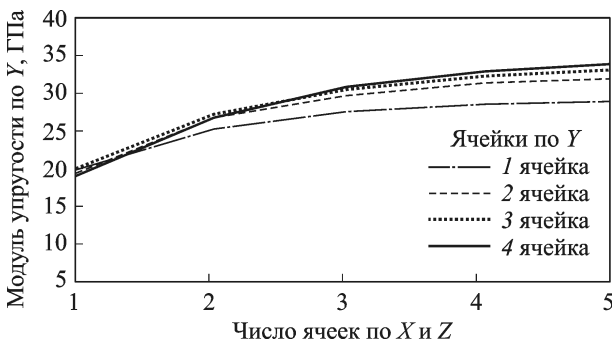


Рис. 3. Графики зависимостей расчетных значений модуля E_Y от чисел ячеек n_X и n_Z

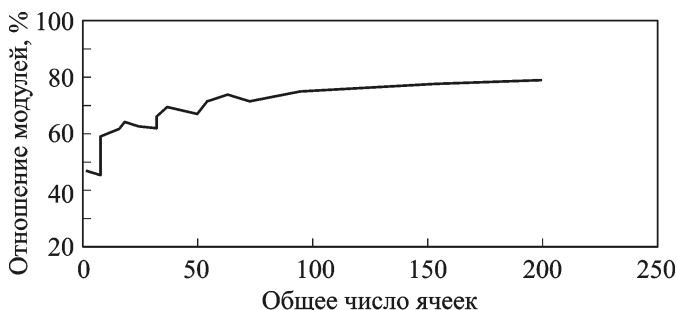


Рис. 4. Зависимость отношения модулей вдоль осей X и Y от числа ячеек в объеме

ными диаметрами волокон 0,5 и 0,7 мм. Результаты измерений модулей упругости в направлениях X и Y на таких материалах приведены в табл. 2. Из данных таблицы следует, что в материалах данного класса измеренные значения модулей упругости отличаются более чем на 25 %. Следует особо отметить, что измеренные на образцах с поперечными сечениями рабочей части 10×10 , 10×15 и 10×20 мм практически не отличались. Поскольку такие размеры рабочей части превышают определенный расчетным путем представительный объем материала, данный результат можно рассматривать как ожидаемый.

Таблица 2

Измеренные значения модулей упругости материалов

Направление	Модуль упругости, ГПа, при диаметре стержня	
	0,5 мм	0,7 мм
X	41,1	29,3
Y	29,8	22,0
Z	47,6	33,3

Ранее на материалах с большим размером ячейки были получены аналогичные результаты.

Для выяснения причины такого поведения материала рассмотрим задачу на одной ячейке. Деформированная форма ячейки приведена на рис. 5. Помимо растяжения ячейки в материале образуются также и деформации кручения, что приводит к падению жесткости в направлении оси Y . Менее выражено такие деформации присутствуют и в больших объемах. Так, деформированная форма представительного объема представлена на рис. 6, где ясно видны закручивания граничных ячеек. В достаточном удалении от границы объема деформации кручения уменьшаются, однако даже в срединных ячейках представительного объема не исчезают полностью. С помощью численного расчета можно оценить глубину затухания краевых эффектов в массе

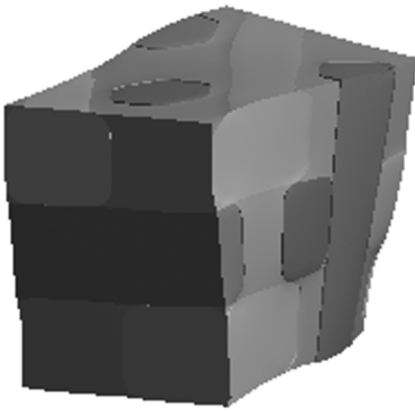


Рис. 5. Деформированная форма объема из одной ячейки

на характеристики вычисленного представительного объема существенно.

Также из приведенной на рис. 6 структуры поверхности материала под нагрузкой можно сделать вывод о проблематичности применения для измерения деформаций тензорезистивных датчиков, наклеенных на поверхность образцов. Неравномерность деформирования последней, наличие на ней существенных изгибов требует либо внесения поправок в расчет деформаций, либо некоторых специфических мероприятий по подготовке поверхности материала и тензодатчиков [6].

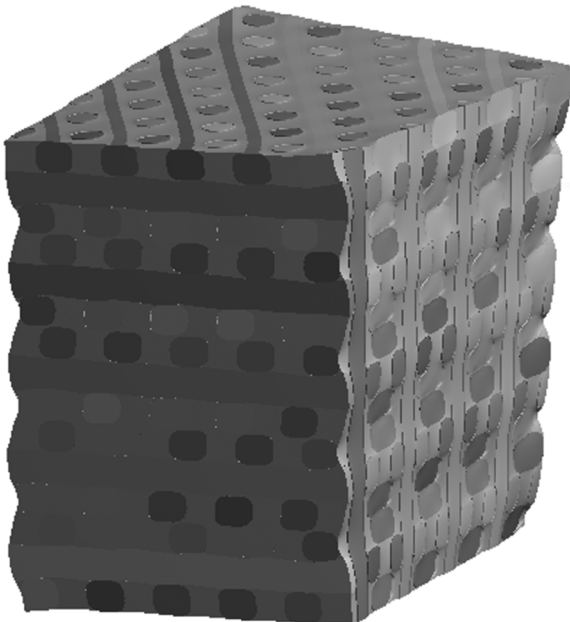


Рис. 6. Деформированная форма представительного объема

материала, приняв слоистую модель материала в направлении Z [5]. Полученный график зависимости образующихся на границах слоев сдвиговых напряжений от расстояния до кромки приведен на рис. 7. Как следует из этого рисунка, краевой эффект можно считать несущественным на глубине второй ячейки для толщины представительного объема. Таким образом, несмотря на значительное число рассматриваемых ячеек материала, влияние краевого эффекта



Рис. 7. Зависимость межслойных сдвиговых напряжений от расстояния до кромки материала для ячейек представительного объема

Представляется гораздо более целесообразным проводить измерения с помощью навесных экстензометров, позволяющих измерять удлинения образца между определенными поперечными сечениями образца. При наличии специальных канавок либо других дополнительных креплений для ножей экстензомера измеренные значения удлинения не будут зависеть от сложной деформированной формы поверхности материала.

Влияние формы поперечного сечения волокон наполнителя на жесткость материала. В реальном материале по технологическим причинам волокна не имеют кругового поперечного сечения (см. рис. 2), обычно рассматриваемого при моделировании. Вследствие уплотнения упаковки волокон они принимают форму призм со скругленными ребрами, четырехугольных у волокон в направлении U и шестиугольных в направлении Z . Радиус скругления r может даже в одной заготовке варьироваться в широких пределах. Безразмерный радиус $\rho = \frac{r}{b}$, где b — характерный диаметр поперечного сечения волокна, таким образом, может меняться в пределах от 0 до 0,5. Для оценки влияния ρ на эффективное значение модуля упругости были проведены расчеты на представительном объеме. Заметим, что задаваемый модуль упругости волокон в направлении наибольшего изменения изменялся в зависимости от их поперечного сечения из условия постоянства жесткостей.

Результаты расчетов показывают, что эффективный модуль упругости материала при растяжении практически не зависит от радиуса ρ . Таким образом, при моделировании данное значение можно выбирать из соображений удобства, например, при построении сетки. Тем не менее выбор крайних значений может приводить к искажению результатов по напряжениям и деформациям, связанным с формированием концентраторов напряжений либо точечных и линейных контактов между волокнами, которых в реальности не наблюдается. Исходя из сказанного, можно рекомендовать использовать при моделирова-

нии растяжения (сжатия) принимать значение радиуса ρ в интервале 0,2...0,3.

Выводы. Для композиционных материалов со схемой армирования 4DL для растяжения (сжатия) в направлениях осей X и Z удовлетворительные значения модуля упругости получаются даже при рассмотрении одной ячейки, а в направлении Y — 100 ячеек, сформированных в параллелепипед с числом ячеек вдоль осей $5 \times 4 \times 5$. При этом даже на представительном объеме наблюдается существенное отклонение от изотропии в плоскости XY , подтверждаемое экспериментально на образцах материалов с рабочей частью соответствующих размеров. Данное обстоятельство связано с наличием деформаций кручения в ячейках материала и существенным влиянием кромочного эффекта.

Трансверсально неизотропное поведение относительно небольших объемов материалов структуры армирования 4DL следует учитывать при расчете конструкций, имеющих элементы соответствующих размеров. Наиболее перспективным при этом представляется непосредственное моделирование поведения таких материалов путем прямого внедрения структуры в модель конструкции.

Существенное искривление боковых поверхностей объема при этом может приводить к серьезным погрешностям определения деформаций с помощью тензорезистивных датчиков, поэтому в экспериментах предпочтительнее использование навесных экстензометров.

Искажение круглой формы поперечного сечения волокон по технологическим причинам при условии сохранения их погонной жесткости не приводит к изменению эффективных модулей упругости материала при растяжении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. К о с т и к о в В. И., В а р е н к о в А. Н. Сверхвысокотемпературные композиционные материалы. – М.: Интермет Инжиниринг, 2003. – 560 с.
2. У г л е р о д-углеродные композиционные материалы: Справ. издание / Ю.Г. Бушуев, М.И. Персин, В.А. Соколов. – М.: Металлургия, 1994. – 128 с.
3. Щ у р и к А. Г. Искусственные углеродные материалы. – Пермь, 2009. – 342 с.
4. Ф и л к о в А. С. Углерод, межслоевые соединения и композиты на его основе. – М.: Акпект Пресс, 1997. – 718 с.
5. М е ж с л о й н ы е эффекты в композитных материалах: Пер. с англ. / Под ред. Н. Пэйгано. – М.: Мир, 1993. – 346 с.
6. К и н ц и с Т. Я., Р о з е А. В., Ж и г у н И. Г. Методы статических испытаний армированных пластиков: Справ. пособие. – Рига: Зинатне, 1972.

Статья поступила в редакцию 15.05.2012