

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЕ МОДЕЛИ СЛОИСТОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Владимир Александрович КРАВЦОВ родился в 1985 г. в городе Москве. Аспирант МАИ. Основные научные интересы — в области проектирования конструкции самолетов. E-mail: vakravtsov@yandex.ru

Vladimir A. KRAVTSOV, was born in 1985, in Moscow. He is a Postgraduate Student at the MAI. His major research interests lie in the the field of aircraft units design. E-mail: vakravtsov@yandex.ru

В статье описаны существующие типы конечно-элементных моделей композиционного материала и представлена разработанная конечно-элементная модель композиционного материала, которая позволяет повысить точность анализа композиционных изделий в нерегулярных зонах.

Some existing types of composite material units models for calculation with Finite Element Method are described. The developed model for increase accuracy of units analysis made of composite materials in irregular zones is presented.

Ключевые слова: композиционный материал, анализ, параметры, модель.

Key words: composite material, analysis, parameters, model.

Изделия из волокнистых композиционных материалов (КМ) создавались еще в 70-х годах XX века, но только сегодня разработка изделий из КМ начала входить в обыденную конструкторскую практику. Одной из причин столь медленного распространения использования КМ в конструкциях является значительно более сложное по сравнению с металлами нагружение материала на микроуровне, что не позволяет сформировать универсальные методы достоверного анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) проектируемого изделия. Проектирование каждого ответственного изделия из КМ сопровождается целым комплексом натуральных экспериментов для определения оптимальных параметров изделия [1, 2].

В связи с интенсивным развитием вычислительной техники и соответствующего программного обеспечения возможности исследования статических и динамических механических характеристик изделий существенно расширились [3]. Сегодня в мире существуют и продолжают совершенствоваться программные комплексы, использующие методы конечных элементов (МКЭ) для анализа изделия, и применение этих программных комплексов уже стало неотъемлемой частью конструкторской практики.

Для анализа изделия МКЭ строится конечно-элементная модель. Построение достоверной конечно-элементной модели, применимой в конструкторской практике при проектировании изделий,

является одной из важнейших задач, решение которой может значительно сократить комплекс натурных экспериментов. Соответственно снизится конечная стоимость опытно-конструкторских работ и расширится применимость КМ в конструкторской практике, возрастет качество изделий.

Типичные конечно-элементные модели композиционного материала

В течение последних лет опубликовано значительное количество работ по применению МКЭ при исследовании конструкций. Некоторые из этих работ посвящены непосредственно разработке численных методов анализа конструкций из КМ с упругопластическими свойствами. Предложен ряд конечноэлементных моделей материала. Предложенные модели делятся на два принципиальных типа:

— макромодель, использующая усредненные характеристики КМ без учета его структуры;

— микромодель, в которой композит делится на матрицу и армирующий материал, сформирована структура материала (в частности, переплетение нитей для ткани) и рассматривается влияние структуры на механические характеристики КМ.

Макромодель относительно проста в формировании и требует для реализации только паспортных характеристик КМ. Существующие программные комплексы (ANSYS, NASTRAN, ABAQUS и т.п.) содержат специальные инструменты моделирования КМ [4], и в предлагаемых инструментах использу-

ются как раз макромодели материала. Сегодня предложенные средства поддерживают большой набор теорий прочности для анализа НДС изделий из КМ и активно используются для первичного анализа конструкции. Однако, позволяя достоверно определить НДС регулярных зон изделия, для нерегулярных зон применение макромодели часто дает результаты, значительно отличающиеся от результатов натуральных экспериментов.

Причина расхождения результатов натуральных экспериментов и результатов расчета макромодели — неоднородность структуры КМ даже в рамках одного слоя, связанная с неравномерным распределением материала наполнителя. В средней части слоя КМ объемная плотность наполнителя выше средней плотности наполнителя в слое, тогда как на границе слоев материал-наполнитель отсутствует.

На рис. 1 показано характерное распределение модуля упругости E по толщине слоистого КМ с сонаправленными слоями. Соответственно распределяются напряжения и деформации в материале.

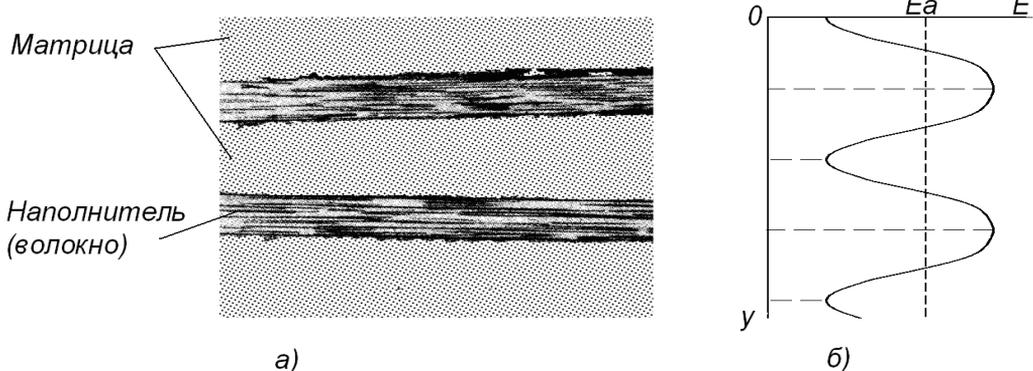


Рис. 1. Микроструктура волокнистого КМ:

а — фотография среза волокнистого композита вдоль волокон поперек слоев;
б — распределение модуля упругости по толщине материала

На рис. 1, *б* отмечена паспортная величина E_a , используемая при расчетах макромодели.

Макромодель использует усредненные характеристики композиционного слоя (значение E_a на рис. 1), предполагая их постоянными по толщине слоя. Также в макромоделях не всегда возможны анализ НДС материалов, теряющих монолитность в процессе нагружения, и использование параметров пластичности материалов.

Очевидно, что для более достоверного результата изделия из КМ должны исследоваться на основе более детализованных конечно-элементных моделей, учитывающих сложную структуру и многокомпонентность КМ.

Наилучшее соответствие распределения механических характеристик в реальном материале и в

конечно-элементной модели может быть получено при использовании микромоделей КМ. Однако микромодель композиционного материала очень трудоемка в построении и требует наличия характеристик материалов, совокупность которых образует композит. Получение этих характеристик представляет собой отдельную и довольно трудоемкую задачу. Все это существенно препятствует как разработке микромоделей КМ для анализа изделий МКЭ, так и ее применению в конструкторской практике. На рис. 2 приведен пример микромоделей одного слоя КМ на основе стеклоткани для анализа МКЭ [5].

Можно утверждать, что микромодель в конструкторской практике мало применима, но при необходимости учета температурных влияний на напряжения внутри материала микромодель является наиболее точным вариантом представления КМ [5]. При этом требуются термомеханические характеристики материалов наполнителя и матрицы и учет остаточных напряжений в сформированном материале (первый шаг нагружения — остывание от

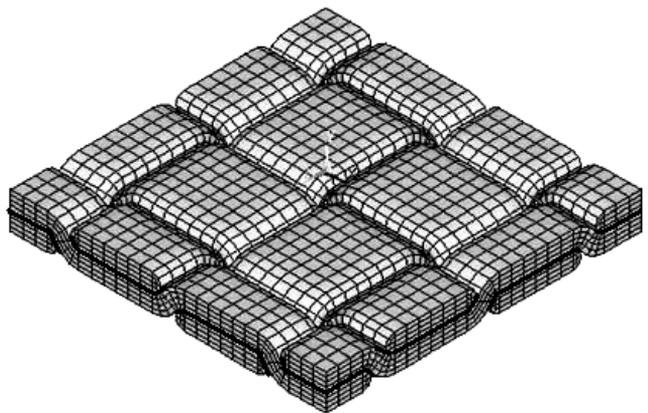


Рис. 2. Фрагмент одного слоя стеклоткани. Микромодель для анализа МКЭ (материал матрицы не показан)

температуры формования до эксплуатационной температуры).

Развитая конечно-элементная модель КМ

Рассмотрение структуры слоистого композита показывает, что в слоистом КМ в сопряжении соседних слоев существует зона материала без наполнителя, толщина которой в зависимости от КМ составляет 10—30% толщины композиционного слоя. Это позволяет разделить структуру композиционного слоя на две части, одна из которых — материал матрицы без наполнителя. Автором статьи была рассмотрена развитая модель слоистого КМ, в которой между слоями основного материала введен дополнительный слой материала матрицы (далее слой КМ назван основным слоем). За расчетные механические характеристики основного композиционного слоя приняты паспортные характеристики композиционного материала, приведенные (пересчитанные) в соответствие с параметрами дополнительного слоя матрицы. Такой подход позволяет более точно задать распределение механических характеристик внутри КМ (рис. 3).

Относительная толщина слоя матрицы зависит от материала и может быть определена или подобрана по результатам испытаний.

В построении конечно-элементной модели слой материала матрицы представляется как изотропный материал с упругопластическими свойствами. В модели может быть задана зависимость «напряжения-деформации» для материала матрицы. Представление в модели основного слоя зависит от вида материала наполнителя. Для стеклопластика и углепластика это ортотропный материал с упругими свойствами, для органопластика это может быть материал с упругопластическими свойствами.

Моделирование потери монолитности КМ в процессе нагружения [6, 7] потребовало отдельного решения. Например, углепластики в процессе нагружения могут терять монолитность, поэтому в модели между основными слоями КМ и слоями матрицы были применены специальные контактные элементы, имитирующие расслоение при достижении определенных напряжений. Для стеклопластиков и многих органопластиков гипотеза сплошности сохраняется вплоть до разрушения — материал можно считать сплошным на всех стадиях нагружения, и введения дополнительных контактных элементов не требуется.

В задаче моделирования композита была выбрана аппроксимация материалов 8-узловым объем-

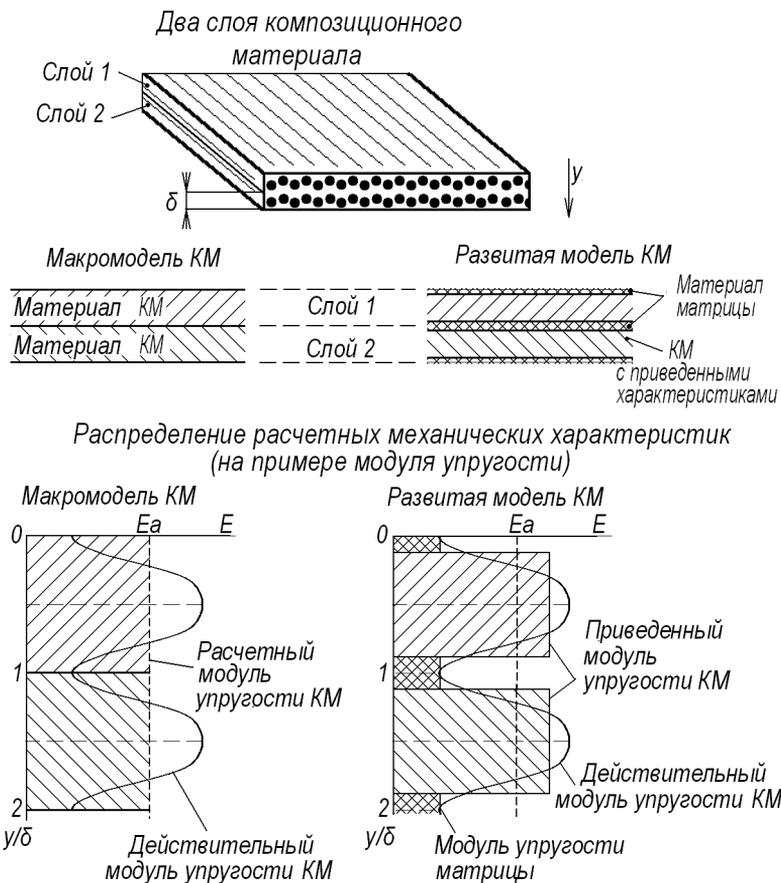


Рис. 3. Применимые в конструкторской практике модели КМ для анализа композиционных изделий МКЭ на примере двух соседних сонаправленных слоев

ным элементом с линейной базисной функцией при достаточной дискретизации модели.

Большинство параметров конечно-элементной модели определяются индивидуально для каждого материала. Для реализации развитой конечно-элементной модели КМ необходимы паспортные характеристики КМ и характеристики материала матрицы. В ряде случаев требуются зависимости «напряжение—деформация» для материалов матрицы и для материалов каждого слоя КМ. В соответствии с этими характеристиками могут быть определены и рассчитаны параметры конечно-элементной модели.

Применение развитой конечно-элементной модели КМ

На сегодняшний день существует ряд государственных и отраслевых стандартов, определяющих список паспортных характеристик из КМ и перечень образцов для получения этих характеристик. Испытания этих образцов проводятся обязательно для каждого нового материала. Однако определение параметров матрицы не задано стандартными испытаниями, поэтому сегодня для применения развитых моделей при анализе МКЭ требуются дополнительные испытания. За рамками комплекса стандартных испытаний это представляет ряд технических и организационных сложностей и сильно ограничивает применение развитых конечно-элементных моделей в конструкторской практике.

Минимальными трудоемкостью и требованиями к наличию характеристик материала обладает типовая макро модель КМ, и во многих случаях ее применение дает удовлетворительные результаты. Описанная здесь развитая конечно-элементная модель предназначена для более точного моделирования НДС нерегулярных зон и представлена как способ преодоления несоответствия результатов анализа типовой макро модели с результатами натурных экспериментов. Также развитая модель при определении НДС композиционного изделия позволяет учитывать параметры пластичности матрицы при упругом наполнителе.

Применение развитой конечно-элементной модели на первой стадии должно включать в себя построение и расчет конечно-элементных моделей стандартных образцов, использовавшихся для определения характеристик материала. Требуется получение соответствия результатов натурных испытаний стандартных простых образцов и результатов расчетов конечно-элементных моделей этих образцов. Параметризованная таким образом конечно-элементная модель КМ применима для анализа НДС сложных изделий из этого материала, что позволит повысить качество изделий и сократить комплекс натурных испытаний сложных образцов.

Библиографический список

1. *Сараев Л.А.* Прогнозирование макроскопических пластических свойств многокомпонентных композиционных материалов. — Самара: Изд-во «Самарский университет», 2000.
2. *Васильев В.В.* Механика конструкций из композиционных материалов. — М.: Машиностроение, 1988.
3. *Клебанов Я.М., Давыдов А.Н.* Методика расчета напряженно-деформированного состояния композиционных материалов. — Самара: Изд-во «Самарский университет», 2003.
4. *Слезкин Д.В.* Технологии виртуальной разработки конструкций из композиционных материалов: Обзорная статья технического эксперта MSC Software Corporation. MSC Software Corporation, 2009.
5. *Клебанов Я.М., Давыдов А.Н.* Методика расчета напряженно-деформированного состояния композиционных материалов // ANSYS Advantage. 2008.
6. Межслоевые эффекты в композиционных материалах / Пер. с англ. под ред. Н. Пэйгано. — М.: Мир, 1993.
7. *Черепанов Г.П.* Механика разрушения композиционных материалов. — М.: Физматлит, 1983.

Московский авиационный институт
Статья поступила в редакцию 19.11.2009