

Задача решается численно методом конечных элементов (МКЭ). Создание конечно-элементной сетки осуществляется в программном комплексе Simcenter Femap. Каждый слой моделируется отдельным набором конечных элементов (КЭ). Затем модель импортируется в программный комплекс LS-DYNA (Livermore Software Technology Corp.), где задаются нагрузка и граничные условия.

В результате проведенного численного исследования определяется распределение полей напряжений и деформаций в монослоях панелей в различные моменты времени. Вычисляется распределение индекса разрушения по различным критериям разрушения применительно к ПКМ. Расчет проводится по критериям Puck, Hashin, Pugno-Evencen, Hoffman, LaRC (Langley Research Center). Считается, что разрушение наступает, когда индекс разрушения становится равным единице. Данные критерии соответствуют структурно-феноменологическому подходу при решении задач прочности ПКМ. Они выводятся на основе анализа и статистического обобщения данных, полученных экспериментальным путем. Их преимуществом является относительная простота. Более точным решением задачи прочности ПКМ был бы структурный метод с анализом микроструктуры материала конструкции, дающий возможность моделировать прогрессирующее разрушение материала, момент зарождения и развития трещины, усталостные и динамические разрушения.

Приводится сравнение полученных результатов для панелей с различными вариантами исполнения сотового заполнителя и обшивок, а также сравнение результатов для панелей с дефектами и аналогичными неповрежденными панелями. Проводится параметрический анализ.

*Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-49-00133, выданного Московскому авиационному институту.*

УДК 536.24

## **МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ МОДИФИЦИРОВАННЫХ КОМПОЗИТОВ С ВИСКЕРИЗОВАННЫМИ ВОЛОКНАМИ**

*Л. Н. РАБИНСКИЙ, Д. С. ШАВЕЛКИН*

*Московский авиационный институт (НИИ), Российская Федерация*

Моделирование композиционных материалов (КМ) содержит фундаментальную проблему, так как в макромасштабе они считаются однородными континуумами, а в микромасштабе – существенно неоднородными, т. е. компоненты или фазы композита различаются по свойствам и между ними существует явная граница раздела (интерфейс или межфазной слой особенно в полимерной матрице). В связи с этим эффективные свойства КМ в целом зависят от характеристик фаз композитов (их свойств, объемного содержания, формы, размера, распределения и ориентации), состояния интерфейса или межфазного слоя, а также внутренних взаимодействий (когезионных и адгезионных эффектов). Кроме того, параметры обработки в производстве также влияют как на свойства отдельных фаз, так и на эффективные свойства композитов. Таким образом, для определения макроскопических свойств КМ важную роль играет микромеханика.

Микромеханика – область механики материалов, в которой дается анализ композитных или гетерогенных материалов на уровне отдельных компонентов, составляющих эти материалы. Учитывая свойства материалов компонентов композитов, как уже упоминалось ранее, одной из важных целей микромеханики материалов является моделирование деформации и характеристик КМ, эта задача определяется как осреднение или гомогенизация. Преимущество гомогенизации заключается в том, что поведение гетерогенных материалов может быть определено без обращения к испытанию потому, что такое испытание может быть весьма дорогим. Кроме того, результаты экспериментов представляют собой так или иначе макромасштабные данные. Тем не менее конкретная теория микромеханики должна быть проверена путем сравнения с экспериментальными данными. Вторая основная задача микромеханики – это локализация, которая направлена на оценку локальных полей (напряжения и деформаций) в фазах под действием макроскопической нагрузки. Такое знание особенно важно для описания повреждения материала.

Осреднение Фойхта и Рейсса являются самыми простыми методами при определении свойств КМ (двухфазных и многофазных), хотя и эти методы первоначально были созданы для изучения

характеристик поликристаллов. Осреднения по Фойхту и Рейссу являются решениями для композита, который подвергнут постоянной деформации и постоянному напряжению, соответственно.

**Осреднение по границам.** По Рикардию А., при приближении эффективных свойств композитов существуют два подхода: прямая оценка и оценка границ. Исторически осреднения Фойхта и Рейсса были первыми моделями, позволяющими строго оценить верхнюю и нижнюю границы эффективных свойств соответственно. Однако польза такого подхода всё же оказалась весьма ограниченной, поскольку этот подход дает хорошие результаты только для композитов, свойства фаз которых близки. Для случая пустот, имеющих нулевой модуль упругости, данные оценки дают тривиальные результаты, т. е. верхняя оценка для модуля соответствует материалу без пустот, а нижняя – материалу, потерявшему несущую способность с нулевым модулем. Для абсолютно жестких включений, что является типичным для композитов, данные оценки настолько далеки от свойств типичных композитов, что они не имеют практического значения, особенно при низкой объемной доле включений.

Было доказано, что наилучшими возможными границами свойств гетерогенной двухфазной среды для макроскопически изотропной среды, которые не могут быть далее улучшены для произвольного статистического распределения фаз без уточнения формы включений, являются границы Хашина – Штрикмана. Данные границы отличаются от указанных ранее границ Фойхта и Рейсса тем, что границы Хашина – Штрикмана включили переменные поля допустимых напряжений и деформаций. С другой стороны, вполне приемлемые уточненные возможные границы для свойств двухфазной среды, имеющей макроскопически трансверсально-изотропную среду, были найдены Хашином и Хиллом.

**Метод Эшелби.** Два основных результата теории упругости, применяющиеся для анализа гетерогенных твердых сред, были получены Эшелби. Эшелби рассматривал единичное включение, находящееся внутри неограниченной матрицы (рисунок 1). Рассматриваемое включение является эллипсоидом. Таким образом, любыми взаимодействиями между включениями пренебрегают. Поле деформаций (напряжений) на бесконечности считается однородным. Данная аппроксимация является вполне удовлетворительной, по крайней мере для малых концентраций включений. Как было показано Эшелби, дополнительное поле деформаций (напряжений), создаваемое включением, зависит от характерного размера и формы включения и расстояния между включениями. Кроме того, Эшелби показал, что поле деформаций (напряжений) внутри эллипсоидального включения в однородно нагруженном теле также является однородным.

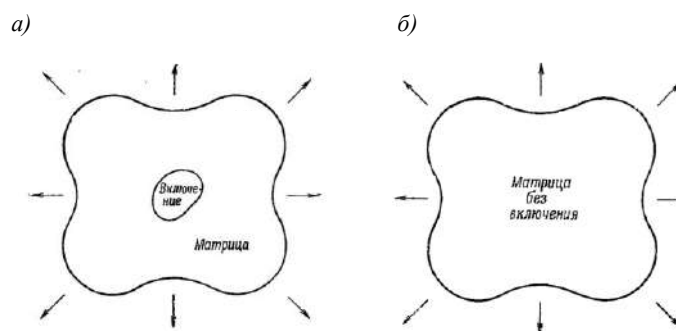


Рисунок 1 – Изолированное включение в среде (матрице) (а), и среда без включения – матрица (б).

Эшелби построил формулу, основанную на энергетическом методе для анализа гетерогенных твердых сред. Формула, выведенная Эшелби для вычисления энергии деформирования между средами с включением и без включения, преобразует обычное интегрирование по объему в интегрирование по поверхности частного вида. Как было показано Кристенсеном, для случая изолированного включения с малой концентрацией получено точное решение с помощью уравнений теории упругости и формулы Эшелби. Для сферических и цилиндрических включений получаемые решения совпадают с решениями, основанными на матрице Эшелби хотя и процедура, использующая формулу Эшелби, не учитывает во включении однородное поле деформаций (напряжений).