

ИССЛЕДОВАНИЕ КРОМОЧНОГО ЭФФЕКТА В СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТАХ

М.А. Евтушенко, Ю.В. Скворцов

Самарский университет, Самара, Россия

Обоснование. Изделия из композитов благодаря своим уникальным свойствам успешно применяются в различных отраслях, в частности, в ракетно-космической технике. В большинстве случаев они имеют слоистую структуру. Для таких композитов характерна высокая прочность в плоскости слоев и низкая межслоевая прочность. Однако для тонкостенных конструкций межслоевые напряжения пренебрежимо малы по сравнению с основными напряжениями, возникающими в слоях. Существенное увеличение межслоевых напряжений вблизи свободных кромок принято называть кромочным эффектом.

Цель — исследование возможностей применения универсальной программы ANSYS, реализующей метод конечных элементов, для оценки концентрации напряжений вблизи свободных кромок слоистых композитов.

Методы. В большинство работ, посвященных кромочному эффекту, для проверки точности предлагаемых методов решается простейшая задача Pipes-Pagano, в которой рассматривается прямоугольная четырехслойная композитная пластина конечной ширины со свободными боковыми кромками, находящаяся под действием однородной осевой деформации, как показано на рисунке.

В программе ANSYS для моделирования тонкостенных композитных конструкций предназначен элемент многослойной оболочки SHELL181, в основе которого лежит кинематическая гипотеза Миндлина–Рейсснера, учитывающая в первом приближении деформации поперечного сдвига. Этот элемент дает возможность рассчитывать межслоевые касательные напряжения путем интегрирования уравнений равновесия трехмерной теории упругости. Однако он не позволяет исследовать концентрацию данных напряжений вблизи свободных кромок. Таким образом, здесь требуется полная трехмерная постановка с использованием объемных конечных элементов, например SOLID185.

В результате вычислительного эксперимента установлено, что для точного нахождения межслоевых касательных и нормальных напряжений следует задавать несколько объемных элементов по толщине каждого слоя, что требует весьма густую сетку и, как следствие, огромных вычислительных затрат. Избежать этого помогает применение глобально-локального анализа, который предполагает нанесение данных крупной (грубой) конечно-элементной сетки на мелкую (подробную) сетку отдельной области конструкции для нахождения более точных результатов в ней. В программе ANSYS такой подход реализован с помощью методики подмоделирования, позволяющей, например, сопрягать оболочку с трехмерным телом.

При решении задачи Pipes – Pagano в программе ANSYS сначала, на первом этапе, строится грубая оболочечная модель прямоугольной пластины с использованием элементов SHELL181. Затем, на втором этапе, создается объемная подмодель с размерами $h \times 2h \times h$, размещенная в середине длины пластины вблизи свободного края. Ее разбивка осуществляется конечными элементами SOLID185. При этом в качестве

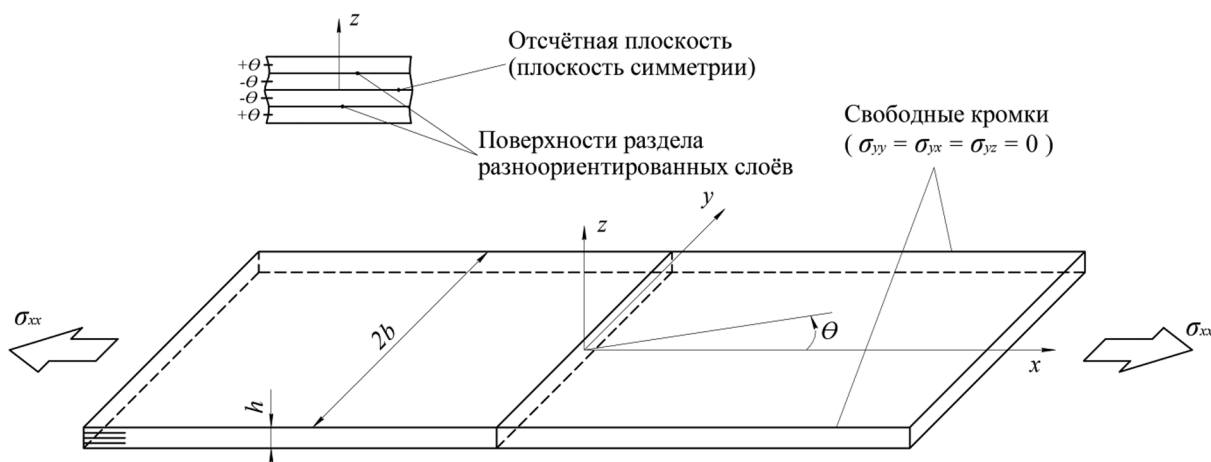


Рис. Постановка задачи

граничных условий задаются перемещения, вычисленные на границах вырезки с использованием грубой модели.

Результаты. Результаты решения задачи Pipes – Pagano при помощи программы ANSYS с использованием технологии подмоделирования оболочки к трехмерному телу хорошо согласуются с результатами других авторов. Однако данный подход благодаря своей универсальности позволяет исследовать концентрацию межслоевых напряжений в любых реальных элементах композитных конструкций ракетно-космической техники при наличии в них каких-либо свободных кромок.

Выводы. Следует отметить, что кромочный эффект может приводить к преждевременному выходу из строя композитных конструкций. Можно ожидать, что такие высокие межслоевые напряжения вблизи свободного края вызовут расслоение композита, в частности при усталостных нагрузках. Анализ межслоевых напряжений должен быть завершён исследованием возникновения расслоения и его роста, возможно, с использованием инструментов механики разрушения.

Ключевые слова: слоистые композиты; кромочный эффект; межслоевые напряжения; метод конечных элементов; глобально-локальный анализ; подмоделирование.

Сведения об авторах:

Максим Андреевич Евтушенко — студент, группа 1137-150403D, институт авиационной и ракетно-космической техники, Самарский университет, Самара, Россия. E-mail: m.evtushenko.a@yandex.ru

Юрий Васильевич Скворцов — научный руководитель, кандидат технических наук, доцент кафедры космического машиностроения, Самарский университет, Самара, Россия. E-mail: yu.v.skvortsov@gmail.com