

Программная реализация анализа прогрессирующего разрушения хрупкого композиционного материала

И.М. Курышев, А.Д. Худякова, Д.В. Сапронов
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Описана математическая модель прогрессирующего разрушения композиционного материала, в которой упругие свойства деградируют постепенно вследствие применения понижающих коэффициентов. Разработан программный код для ЭВМ на языке программирования фортран, реализующий данную модель. Код был интегрирован в расчетную среду Ansys APDL. Проведены расчеты испытаний образцов из композиционных материалов, которые сравнивались с данными испытаний. Сделаны выводы о возможностях применения данной программы.

Software implementation of the analysis of the progressive damage of a fragile composite material

I.M. Kuryshv, A.D. Hudyakova, D.V. Saprnov
BMSTU, Moscow, Russia

Mathematical model of the progressive damage of a composite material is described in which elastic properties degrade progressively due to using of loss coefficients. A program code that implements this model in the Fortran has been developed. The code was integrated into the Ansys APDL calculation environment. Calculations of tests of samples from composite materials were carried out and then they were compared with test data. Conclusions about the possibilities of using this program are made.

1. Введение

Композиционные материалы, применяемые в авиационной отрасли, ввиду особенностей структуры и состава для анализа их текущего напряженно-деформируемого состояния и прочностных свойств требуют специальных подходов, нетипичных для металлов и сплавов. В дополнение к этому методика расчета на прочность каких-либо изделий или конструкций из композитов должна включать в себя численное моделирование прогрессирующего разрушения.

2. Анализ прогрессирующего разрушения

В данной работе рассматривали прогрессирующее разрушение хрупкого ортотропного композиционного материала на примере керамоматричного композита C-SiC, а также углепластика. Для этого была выбрана математическая модель накопления повреждений на основе метода понижающих коэффициентов, разработанная для композиционных материалов. Понижающие коэффициенты для упругих характеристик материала определяют с использованием эквивалентных деформаций, вычисляемых на основе известных значений относительных деформаций в точке [1]. В качестве примера приводится формула для вычисления эквивалентной деформации растяжения волокна:

$$\delta_n^{eq} = L^c \sqrt{\langle \varepsilon_{11} \rangle^2 + \alpha \varepsilon_{12}^2 + \alpha \varepsilon_{13}^2}, \quad (1)$$

где δ_n^{eq} – эквивалентное перемещение, ε_{11} , ε_{12} , ε_{13} – относительные деформации, $\langle x \rangle = 0,5(|x| + x)$ – оператор Маколея, α – параметр учета влияния сдвиговых деформаций на продольные деформации волокна, L^c – характеристическая длина.

При этом учитывается направление деформаций для возможности описания растяжения или сжатия. Коэффициент разрушения принимает значения от 0 до 1, определяя тем самым степени разрушения материала и снижения характеристик. При накоплении повреждений упругие свойства деградируют не мгновенно, а постепенно, плавно разрушая композит. Коэффициент разрушения определяли с помощью зависимости

$$D = \frac{\delta_c(\delta - \delta_0)}{\delta(\delta_c - \delta_0)}, \quad (2)$$

где δ – текущее эквивалентное перемещение, δ_0 и δ_c – эквивалентные перемещения, задающие границы разрушения.

Хотя подход к описанию свойств композиционного материала феноменологический, тем не менее формулы позволяют выделить снижение характеристик для различных компонентов, как матрицы, так и волокна. Для этого принимается

допущение, что вследствие ортотропии свойств, при действии сил в различных направлениях, основную роль в принятии нагрузки играют разные компоненты, поскольку напряжения будут распределяться неравномерно. Этот подход привел к применению авторами соотношений для описания коэффициентов разрушения волокна и матрицы [2].

Границы разрушения определяются критериями разрушения, выбираемыми в соответствии с условиями расчета и конкретного материала.

В случае полного разрушения в какой-то точке сразу обоих компонентов композита, когда коэффициент деградации становится равным единице для волокна и матрицы одновременно, математически следует, что данная точка имеет нулевую жесткость по всем направлениям, что дает возможность считать это место трещиной в материале. Учитывая невозможность уменьшения D , трещина способна либо оставаться неизменной, либо прогрессировать, например образовываясь в соседних точках.

Данная математическая модель прогрессирующего разрушения была реализована на языке программирования фортран для возможности проведения расчетов конструкций методом конечных элементов. Программный код можно интегрировать в различные расчетные комплексы, например Ansys или Abaqus, поддерживающие возможность создания пользовательского материала [3]. Для обеспечения корректной работы программы предполагается итерационный расчет с малым приращением нагрузки, и чем более плавно идет ее прирост или уменьшение, тем точнее проходят вычисления.

При каждой итерации на основе значений относительных деформаций в данном конечном элементе вычисляются сначала эквивалентные деформации, а затем и сами понижающие коэффициенты. Далее переопределяется матрица жесткости материала и пересчитываются напряжения, после чего наступает новая итерация. Особенностью работы данной программы является то, что расчет в течение итерации происходит линейный, на основе закона Гука, а нелинейность зависимости напряжений от деформаций обеспечена деградацией свойств материала. Это дает возможность увеличить скорость расчета в пределах итерации, несмотря на рост общего их числа, поскольку вычисления производятся в упругой зоне по относительно простым формулам решателя программы.

В логику и возможности программы были внесены некоторые дополнительные нововведения, которые отсутствовали в математической модели, а также улучшения для комфортной работы пользователя. В частности, были введены обширные возможности по

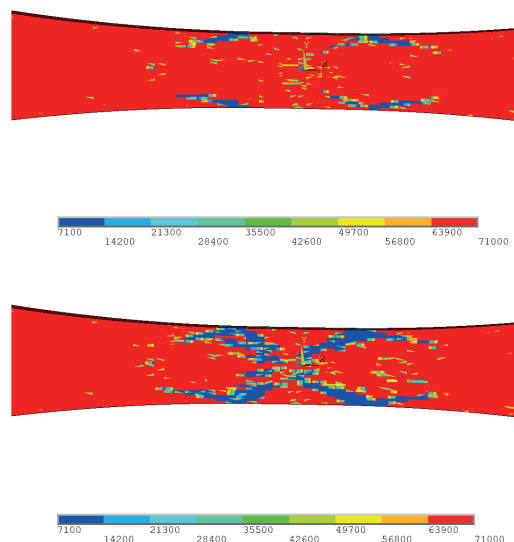


Рисунок. Деградация упругих характеристик на примере модуля Юнга E_{11}

отображению различных параметров в Post Processor, таких как эквивалентные перемещения, коэффициенты разрушения, деградировавшие упругие характеристики, элементы, соответствующие трещине, и т.д. Также возможно поитерационно визуально отслеживать изменение свойств и рост трещины в материале, причем в зависимости от знака нагрузки. Пример визуализации постепенного снижения упругих свойств показан на рисунке.

Доступно несколько критериев разрушения для обеспечения гибкого применения данной методики. Удобной стороной для пользователя является и то, что редактировать код данной программы можно без применения специальных технических средств.

С помощью разработанной программы была проведена серия расчетов, имитирующих реальные испытания некоторых композиционных материалов (керамический C-SiC и углепластик) на различные виды нагрузок. Для этого в Ansys APDL была интегрирована разработанная программа, и были построены образцы для испытаний. Сравнение результатов расчета с реальными результатами испытаний позволяет сделать вывод о допустимости применения данного метода анализа прочностных свойств композиционного материала и о границах его применения.

3. Заключение

Составлена математическая модель описания прогрессирующего разрушения композиционного материала для анализа его прочностных свойств. Разработан программный код для реализации данной модели и интеграции в расчетную среду для

вычислений методом конечных элементов в соответствии с описанной математической моделью. Проведены расчеты, имитирующие результаты испытаний на различные виды нагрузок с образцами из композиционных материалов. Сравнение результатов расчета с данными имитируемых испытаний показывает возможность получения результатов с допустимой погрешностью

Список использованных источников

[1] Guo Q., Yao W., Li W. Constitutive models for the

structural analysis of composite materials for the finite element analysis: A particular review of recent practices // *Composite Structures*. 2021. Vol. 260. P. 113–135.

[2] Zhang C. Progressive damage simulation of triaxially braided composite using a 3D meso-scale finite element model // *Composite Structures*. 2015. Vol. 125. P. 104–116.

[3] Arruda M.R., Trombini M., Pagani A. Implicit to explicit algorithm for AABAQUS standart USER-SUBROUTINE UMAT for a 3D Hashin-based orthotropic damage model // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, no. 2. P. 1155.