

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД  
ОЦЕНКИ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ МПКМ**

© 2012 О.Ю. Мантусова, В.И. Постнов

Ульяновский научно-технологический центр  
Всероссийского института авиационных материалов

Поступила в редакцию 02.11.2012

В статье приводится разработка численно-аналитических методик для оценки напряженно-деформированного состояния и параметров разрушения конструкций из металлополимерных композиционных материалов, подкрепленных ребрами жесткости.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, коэффициент интенсивности напряжений.

Практический интерес представляют материалы, прочностные свойства которых за период эксплуатации изделий в течение более 25 лет снизился бы не более чем на 10-20%. Прогресс современного машино- и приборостроения и авиационно-космической техники обеспечивается такими важнейшими свойствами современных полимерных композитов, как вибро- и трещиностойкость, ударопрочность, статистическая и динамическая усталость, связанными с их релаксационными свойствами.

Все большее внимание уделяется разработке и применению методов расчета долговечности элементов конструкции. Их многообразие объясняется с одной стороны, отсутствием к настоящему времени единой фундаментальной теории возникновения и развития усталостных повреждений, а с другой – потребностями практики проектирования и эксплуатации авиационных конструкций в создании инженерных методов расчета, обладающих простотой применения и приемлемой точностью оценок долговечности. Из них наиболее перспективными являются методы расчета, основанные на концепции локального напряженно-деформированного состояния (НДС).

Развитие методов линейной механики разрушения и их практическое использование при проектировании создали предпосылки появления надежных, безопасных и экономичных конструкций летательных аппаратов (ЛА). Стремление использовать экономическую отдачу каждого самолета до его полного изнашивания, т.е. эксплуатировать до появления трещин в силовых элементах, и при этом гарантировать безопасность полетов, привело к новому подходу в Мантусова Ольга Юрьевна, инженер-технолог, аспирант. E-mail: untcviam@gmail.com  
Постнов Вячеслав Иванович, доктор технических наук, доцент, заместитель начальника. E-mail: untcviam@gmail.com

определении срока службы конструкции - принципу безопасных повреждений. Этот принцип основан на предположении, что во время эксплуатации в конструкции присутствуют трещины, размер которых меньше или равен минимально обнаруживаемому средствами неразрушающего контроля.

Анализ распределения напряжений и деформаций в составном элементе конструкции с повреждением является начальным этапом для расчета его остаточной прочности и долговечности. Поэтому разработка эффективных расчетных и расчетно-экспериментальных методов определения НДС конструкций из МПКМ – весьма актуальная проблема как для задач проектирования, так при испытаниях конструкций ЛА.

Разрушение композитного материала - одна из наиболее сложных областей механики деформируемого твердого тела. Применение методов линейной механики разрушения и теории упругости к этим материалам усложнено прежде всего из-за анизотропии и неоднородности структуры КМ.

Основными методами экспериментального исследования НДС являются: тензометрический, поляризационно-оптический, рентгенографический, методы хрупких покрытий, делительных сеток, метод голографического муара.

Целью работы является разработка численно-аналитических методик для оценки напряженно-деформированного состояния и параметров разрушения авиационных конструкций из металлополимерных композиционных материалов. Полученные результаты подкрепляются экспериментальным исследованием НДС тензометрическим методом.

Исследуем предельное равновесие панели ослабленной одной прямолинейной трещиной длиной  $2l$  в начале координат. К пластине приклепана бесконечная периодическая система

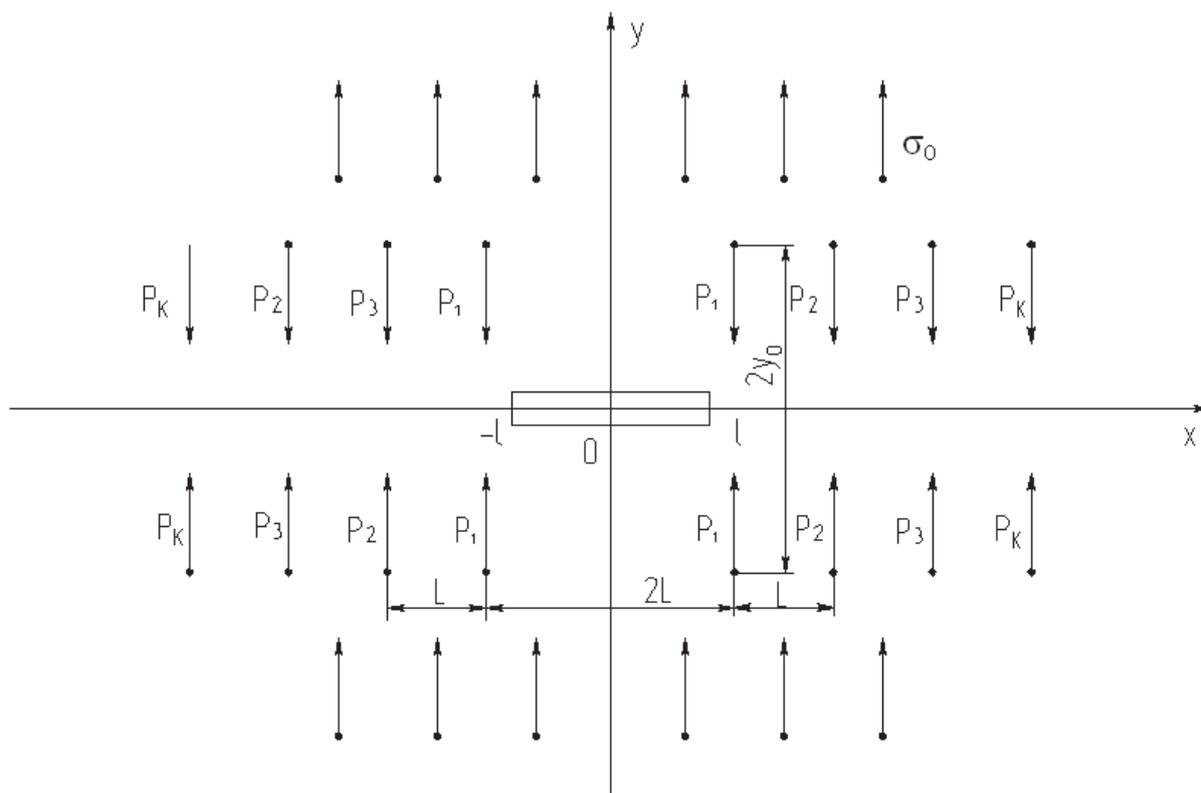


Рис. 1. Панель ослабленная одной прямолинейной трещиной длиной  $2l$  в начале координат

поперечных стрингеров. Действие приклепанных подкрепленных стрингеров в расчетной схеме заменим сосредоточенными силами, приложенными в местах расположения заклепок. Найдем коэффициенты интенсивности напряжений, зависимости от геометрических и физических параметров системы и приложим внешние нагрузки.

Выбор системы декартовых координат и обозначения пояснены на рис. 1.

Берега трещины свободны от внешних нагрузок. На бесконечности клепаная пластина подвергается однородному растяжению вдоль стрингеров напряжения  $\sigma_y^\infty = \sigma_0$ .

Действие приклепанных подкрепляющих стрингеров в расчетной схеме заменяется сосредоточенными силами, приложенными в местах расположения заклепок. Величины сосредоточенных сил подлежат определению в результате решения задачи.

Рассматриваемая задача состоит в определении величины сил  $P_n (n = 1, 2, \dots)$ , напряженно-деформированного состояния вне трещины, а также в нахождении величины предельной внешней нагрузки  $\sigma_0$ , по достижению которой трещина начнет развиваться по сечению пластины.

В любой точке упругого тела напряженное состояние в случае плоской задачи определяется тремя компонентами напряжения  $\sigma_x, \sigma_y$  и  $\tau_{xy}$ , которые удовлетворяют уравнениям равновесия

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Граничные условия на берегах трещины для рассматриваемой задачи имеют следующий вид:

$$\sigma_y - i\tau_{xy} = 0 \text{ при } y=0, |x| \leq l. \quad (2)$$

Согласно закону Гука величина сосредоточенной силы  $P_n$ , действующей на каждую заклепку со стороны  $n$ -го ребра жесткости, равна

$$P_n = \frac{E_s F_n}{2y_0} \Delta v_n, (n = 1, 2 \dots). \quad (3)$$

Здесь  $E_s$  – модуль Юнга материала ребра жесткости,  $F_n$  – площадь поперечного сечения ребра (в дальнейшем, не нарушая общности, будем считать  $F_n = F$ ),  $2y_0$  – расстояние между заклепками,  $\Delta v_n$  – взаимное смещение заклепок, равное удлинению  $n$ -го ребра.

Обозначим через  $r$  радиус заклепки. Примем допущение о том, что взаимное упругое смещение точек в рассматриваемой задаче теории упругости равно отмеченному выше взаимному смещению заклепок  $\Delta v_n$ . Это дополнительное условие совместности позволяет эффективно отыскать решение поставленной выше задачи.

В механике разрушения важную роль играют коэффициенты интенсивности напряжений, которые отражают перераспределение напряжений в пластине вследствие наличия трещины.

**Таблица 1.** Результаты усталостных испытаний постоянных стопперов из МПКМ АЛОР Д16/41

Серия, номер образца	Материал ПС. Вид соединения	Кол-во циклов до разрушения, N, кцикл	$\sigma_{max}$ , МПа	Характер разрушения обшивки, длина трещины перед разрушением
14-1 -2 -3	Алор клепка	386,0 514,0 237,8 $N_{cp}=379$	100	По крайнему ряду $l$ – не определена. По трещине 87,8
16-1 -4 -5	Алор Клееклепка Образцы обшивки с трещиной поперечные	$N_{cp}=326,0$	120	Разрыв по крайнему ряду заклепок $l=22,7$ при $N=158,0$  Разрыв по крайнему ряду $l=21,6$ при $N=320,0$

Для коэффициента интенсивности напряжений  $K_I$  у вершины трещины на концах  $x = \pm l$  будем иметь формулу

$$K_I = -\lim_{x \rightarrow l} [\sqrt{2\pi|x-l|} \cdot g(x)]. \quad (4)$$

Функция  $g(x)$  имеет сингулярность порядка  $S$  в окрестности .

Воспользовавшись результатами расчетов по определению коэффициентов интенсивности напряжений, представленных в работах Гаджиева В.Д. [1], коэффициент интенсивности напряжений находится соотношением

$$K_I = \frac{\sqrt{\pi l}}{M} \sum_{r=1}^M (-1)^r P_r^0 \cdot ctg \frac{\theta_r}{2};$$

$$\theta_r = \frac{2r-1}{2M} \pi \quad (r = 1, 2, \dots, M). \quad (5)$$

Зная коэффициент интенсивности напряжений, с помощью критерия хрупкого разрушения Гриффитса-Ирвина ( $K_I = K_C$ ) определяем предельные величины внешней нагрузки  $\sigma_0$ , достижения которой трещина находится в подвижно-равновесном состоянии.

$$\sigma_* = \frac{\sigma_0 \sqrt{L}}{K_C} = \frac{N}{\sqrt{\frac{\pi l}{L}}} F_1\left(\frac{l}{L}, \varepsilon\right). \quad (6)$$

Здесь  $\sigma_*$  – предельная внешняя приложенная нагрузка,  $N$  – количество циклов до разрушения,  $K_C$  – коэффициент интенсивности напряжений,  $L$  – граница исследуемой области,  $F_1\left(\frac{l}{L}, \varepsilon\right)$  – функция зависимости коэффициента интенсивности напряжений от начальной длины трещины и границ исследуемой области.

$$N = \frac{\sigma_* \sqrt{\frac{\pi l}{L}}}{F_1\left(\frac{l}{L}, \varepsilon\right)}. \quad (7)$$

Объектами испытаний стали модельные панели с приклепанными стопперами трещин 140x140x1,25 мм из Алор Д16/41-2/1-0,3-Р-1,3. Характеристика нагружения:  $\sigma_{min} = 10$  МПа;  $\sigma_{max} = 120$  МПа; частота нагружения – 10 Гц; тип испытательной машины – EUS40.

Сходимость результатов усталостной прочности панелей из МПКМ, полученных аналитическим и экспериментальным путем, составляет 98%, что говорит о возможности использования приведенной методики для расчета количества циклов до разрушения панелей при циклических нагрузках.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаджиев Вахид Джалал оглы. Разрушение клепаной панели: Дисс. канд. физ.-мат. наук. Баку. 1986. 141 с.

### CALCULATION-EXPERIMENTAL METHOD FOR ESTIMATING THE FATIGUE STRENGTH MPCM

© 2012 O.Yu. Mantusova, V.I. Postnov

Ulyanovsk Scientific and Technological Center VIAM

This article is the development of numerical and analytical methods for evaluating the stress-strain state and fracture parameters of the structures of metal composite materials reinforced with stiffening ribs

Keywords: The stress-strain state, the stress intensity factor.

Olga Mantusova, Engineer, Graduate Student.

E-mail: untcviam@gmail.com

Vyacheslav Postnov, Doctor of Technics, Associate Professor,

Deputy Chief. E-mail: untcviam@gmail.com