

## УЧЕТ СТОЙКОСТИ К ПОВРЕЖДЕНИЯМ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПКМ

Пальчиков Д.С., Афанасьев Д.В.

ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова», г. Москва, [dspalchikov@ciam.ru](mailto:dspalchikov@ciam.ru)

*Ключевые слова: композиционный материал, углепластик, повреждения, прочность.*

Углепластики авиационного применения по своим удельным прочностным свойствам могут конкурировать с современными алюминиевыми и титановыми сплавами. Традиционно считается, что полимерные композиционные материалы (ПКМ) обладают низкой стойкостью к механическим повреждениям, которые обусловлены ударом или воздействием внешних сил, приложенных точечно. Однако опыт отечественных и зарубежных фирм показывает, что углепластики с успехом можно применять в конструкции планера самолёта (вместо алюминиевых сплавов), и в лопатках вентилятора (вместо титановых), если в процессе проектирования правильно подойти к оценке прочностных свойств ПКМ, сфокусировав внимание на их самых слабых сторонах.

В современной инженерной практике отсутствует простой инженерный способ проектирования изделий из ПКМ с учетом падения их прочностных свойств вследствие механических и, в частности, ударных повреждений. В данной работе предлагается использовать набор дополнительных прочностных характеристик материала, таких как остаточная прочность после нанесения ударных повреждений.

Для оценки запасов прочности предлагается использовать четыре вида типичных повреждений, присущих ПКМ: максимальная концентрация микротрещин внутри слоёв, максимальная плотность трещин между слоями, частичное разрушение волокон, сквозное повреждение материала с разрывом волокон и максимальным растрескиванием вокруг отверстия. Остаточные прочности образцов с такими повреждениями названы в данной работе, соответственно, как прочности с повреждениями первой-четвертой категории ( $\sigma_{1K}$ ,  $\sigma_{2K}$ ,  $\sigma_{3K}$ ,  $\sigma_{4K}$ ). Если для оценки работоспособности изделия из ПКМ используется критерий максимальных напряжений, то следует определить полный набор значений пределов прочности материала с повреждениями вышеуказанных четырех категорий.

В используемой концепции [1] четыре категории повреждений связаны не только с четырьмя видами дефектов, но и с четырьмя уровнями предельных нагрузок, реализованных в изделии. Нагрузка оценивается коэффициентом запаса, относительно предельной допустимой эксплуатационной нагрузки, то есть относительно Limit Load («LL»). Деталь с наличием повреждения 3-й категории должна оставаться работоспособной, т.е. выдерживать эксплуатационную нагрузку (Limit Load,  $\sigma_{LL}$ ). Деталь с первой категорией повреждений должна иметь запас прочности  $n_{1k}=1,5$  относительно предельно допустимого в эксплуатации уровня нагрузки ( $\sigma_{UL}=1,5\sigma_{LL}$ ); для второй категории –  $n_{2k}=1,2$ ; для третьей категории –  $n_{3k}=1$ , для 4-й –  $n_{4k}=0,7$ . Таким образом, вышеописанный подход определения допустимых нагрузок для детали сводится к определению характеристик прочности ПКМ с наличием повреждений различных категорий (уровней урона).

Большая часть данной работы посвящена практической стороне вопроса. На первом этапе решена задача нанесения повреждений на образцы ПКМ заданной категории. Для этого был использован метод квазистатического продавливания полусферическим индентором [2]. В качестве объекта исследования использовался новый углепластик авиационного назначения, полученный на основе препрега T144 и имеющий структуру армирования  $[0^\circ; +45^\circ; 0^\circ; -45^\circ]_{ns}$ . Анализ полной кривой продавливания образца ПКМ T144 позволил выявить точки, соответствующие смене этапов и механизмов разрушения при продавливании, и соотнести их с ранее классифицированными категориями повреждений. На следующем этапе работы повреждения 1-4 категории были нанесены на образцы различного типоразмера для

последующих испытаний на растяжение, сжатие, сдвиг в плоскости слоя. Для исследования влияния масштабного фактора на остаточную прочность были испытаны образцы на растяжения трёх типоразмеров: образцы полоски шириной 50 и 100 мм, а также образцы с уменьшенной рабочей зоной в виде галтели. Для определения сдвиговых характеристик ПКМ с повреждениями использовались образцы с V-образным вырезом для испытаний по стандарту ASTM D7078 [3], для испытаний на сжатие – образцы размерами 100×150×4 мм [4]. По результатам испытаний для углепластика T144 определены значения прочности при растяжении, сжатии, сдвиге в плоскости слоя с учетом повреждений различных категорий.

На основании полученных данных, а также требований FAA [1] оценены уровни допустимых напряжений при проектировании детали из углепластика марки T144 для уровня максимальных эксплуатационных нагрузок LL с учетом повреждений (табл. 1).

Таблица 1 – Уровень допустимых напряжений для деталей из углепластика T144

| $\sigma_{11(LL)}^+$ , МПа | $\sigma_{11(LL)}^-$ , МПа | $\tau_{12(LL)}$ , МПа |
|---------------------------|---------------------------|-----------------------|
| 506                       | 272                       | 150,4                 |

В рамках настоящей работы разработан метод экспериментального нанесения повреждений различных категорий на образцы. Проведены исследования остаточной прочности углепластика марки T144 с различными категориями повреждений при растяжении, сжатии и сдвиге в плоскости слоя. Исходя из полученных данных, оценены допустимые значения эксплуатации предельные значения напряжений в деталях из углепластика T144.

#### Список литературы

1. Federal Aviation Administration. Advisory Circular AC 20-107B. P. 13. 2010.
2. ASTM D6264/D6264M. Standard Test Method for Measuring Damage Resistance of Fiber-Reinforced Polymer-Matrix Composite to Concentrated Quasi-Static Indentation Force.
3. ASTM D7078. Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by V-notched Rail Shear Method. 2012.
4. ASTM D7137/D7137M. Standard Test Method for Compressive Residual Properties of Damaged Polymer Matrix Composite Plates. 2012.

#### Сведения об авторах

Пальчиков Денис Сергеевич, начальник сектора испытаний композиционных материалов (КМ). Область научных интересов: прочность деталей из КМ.

Афанасьев Дмитрий Викторович, начальник технологического сектора КМ. Область научных интересов: прочность деталей из КМ, инновационные технологии изготовления изделий из композиционных материалов.

### CONSIDERATION OF DAMAGE RESISTANCE IN COMPOSITE PARTS DESIGN

Palchikov D.S., Afanasiev D.V.

Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russia, dspalchikov@ciam.ru

*Keywords: composite material, carbon fiber reinforced plastic, damage, strength.*

The paper is devoted to the methods of experimental studies of carbon fiber reinforced plastics strength with mechanical damages of various categories. Also discusses assigning principles of limit stress values in damaged parts. Evaluation of safety margin of such parts are assessed.