

УДК 629.7.015.4

## ИССЛЕДОВАНИЯ ОСТАТОЧНОЙ ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ С ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ ПОВРЕЖДЕНИЯМИ

© 2011 г.

С.А. Туктаров

Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского, г. Жуковский

imperio1986@mail.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Представлены расчетно-экспериментальные исследования по оценке влияния различных параметров конструкции из композиционного материала на характеристики остаточной прочности при наличии эксплуатационных повреждений. Приведены исследования по определению допускаемых напряжений в композиционной подкрепленной панели на основе параметрического изменения размера повреждения в виде надреза как в обшивке панели, так и в композиционных слоях стрингеров.

*Ключевые слова:* коэффициент перегруженности, остаточная прочность, разрушающее напряжение, эксплуатационное повреждение, конечный элемент, композиционный пакет.

Композиционные материалы (КМ) состоят из отдельных однонаправленных слоев, имеющих очень высокие механические свойства вдоль продольной оси и низкие свойства в поперечном направлении. С точки зрения расчета и проектирования это является главным отличием композитов от металлов. Свойство направленности композиционных слоев обеспечивает возможность проектирования материала под заданные нагрузки и требования по прочности и жесткости путем минимизации его массы. При этом принципиальным моментом при проектировании больших композиционных конструкций является определение уровня допускаемых (разрушающих) напряжений. Наличие производственных и эксплуатационных повреждений может существенно снизить нагрузки, при которых происходит разрушение. Способ укладки слоев композиционного материала в конструкции и тип конструкции также значительно влияют на прочностные характеристики. Для определения разрушающих напряжений необходимо исследовать зависимость предельной несущей способности композиционной конструкции от различных проектных параметров, в частности, от типа нагружения и размеров повреждения.

Для определения остаточной прочности конструкции из композиционного пакета необходим комплексный подход, состоящий из двух этапов: определение напряженно-деформированного состояния и определение полей перегруженностей на основе известных критериев прочности.

Первый этап проводился с использованием системы MSC.Nastran, позволяющей на основе метода конечных элементов эффективно опреде-

лять поле напряжений и перемещений при действии различных видов нагружения. После определения напряжений в слоях композиционного пакета необходимо решить, насколько они близки к разрушающим. Для этого служат критерии разрушения, зависящие как от характеристик композиционного материала, так и от вида нагружения. Применение того или иного критерия прочности должно быть хорошо обосновано на основе расчетно-экспериментального исследования.

На втором этапе проводился расчет коэффициентов перегруженности по критерию Цая – Хилла:

$$g(x) = r = \frac{\sigma_1^2}{X^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} \leq 1.$$

В качестве  $X$  выбиралось допускаемое напряжение растяжения вдоль направления волокон, если  $\sigma_1 > 0$ , или соответствующее допускаемое напряжение сжатия, если  $\sigma_1 < 0$ . В качестве  $Y$  выбиралось допускаемое напряжение растяжения поперек направления волокон, если  $\sigma_2 > 0$ , или соответствующее допускаемое напряжение сжатия, если  $\sigma_2 < 0$ . Величина  $S$  представляет собой величину допускаемого касательного напряжения. Величины  $X$ ,  $Y$  и  $S$  определялись экспериментально путем нагружения однонаправленного композиционного слоя.

На рис. 1 показаны экспериментальный образец из КМ с пропилом, моделирующим эксплуатационные повреждения. Размер пропила  $40 \times 1$  мм. Композиционная пластина с трещиной, величина которой варьируется, моделировалась методом конечных элементов. На рис. 2 изобра-

жено поле перегруженностей в слое  $0^\circ$  КМ.



Рис. 1

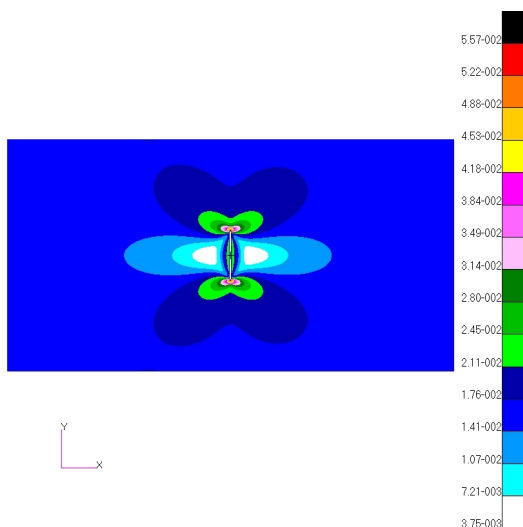


Рис. 2

На рис. 3, 4 приведены зависимости разрушающих напряжений от размера трещины соответственно при растяжении и сжатии образца. Кривые синего цвета относятся к первичному разрушению, а кривые красного цвета – к вторичному разрушению, красными точками обозначены экспериментальные данные. При растяжении образца результаты расчета для первичного разрушения сильно отличаются от разрушающих напряжений, полученных в эксперименте. В то же время рассчитанные разрушающие напряжения при вторичном разрушении достаточно близки к экспериментальным значениям при длине пропила 25 мм. При этом значения разрушающих напряжений ниже экспериментальных на 10–15%. Интересно заметить, что при длине трещины меньше, чем 30 мм, разрушение волокон происходит в слое  $90^\circ$ , а когда длина трещины больше 30 мм, разрушение волокон наблюдается в слое  $0^\circ$ .

При сжатии результаты расчетов первичного и вторичного разрушения мало отличаются в слоях с минимальным разрушающим напряжением. Из рис. 4 следует, что экспериментальное значение

разрушающего напряжения практически совпадает с расчетным напряжением в слое 0.

Исследовано влияние формы вершины трещины с использованием различных конечно-элементных моделей. Установлено, что форма трещины незначительно влияет на значение разрушающих напряжений. Различие в результатах составляет не более 2%.

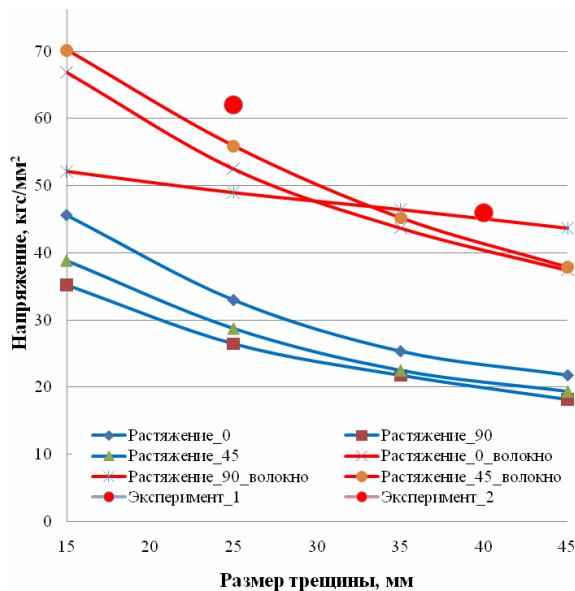


Рис. 3

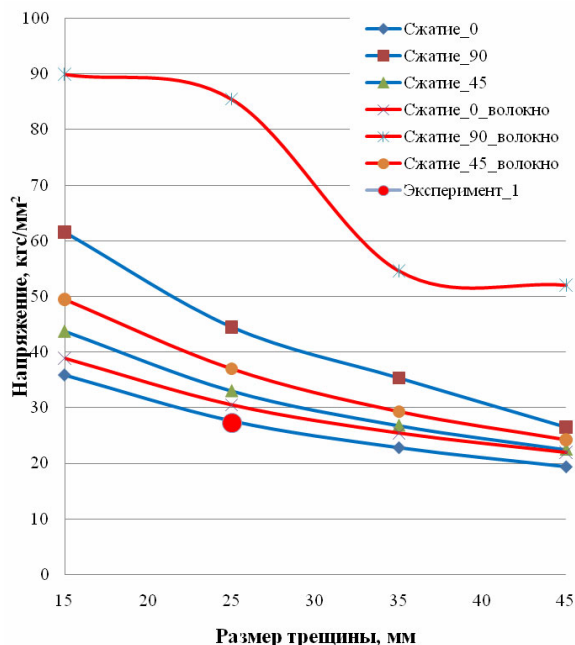


Рис. 4

Были также проведены расчеты подкрепленной панели с различными условиями приложения нагрузок и закрепления конструкции с целью изучения возникающих при растяжении/сжатии изгибных напряжений. Исследовано влияние разме-

ров повреждений на остаточную прочность композиционной пластины и подкрепленной панели. В случае возникновения повреждения между стрингерами наиболее критичными являются длины трещин в диапазоне от 40 до 100 мм, когда наблюдается существенное снижение разрушаю-

щих напряжений. Для стрингерной панели без перерезанных стрингеров разрушающие напряжения панели снижаются почти в два раза. Более опасным является случай с поврежденным стрингером, когда разрушающие напряжения панели снижаются более чем в три раза.

## **THE STUDY OF RESIDUAL STRENGTH IN STRUCTURAL ELEMENTS WITH IMPACT DAMAGE**

*S.A. Tuktarov*

The analytical-experimental study is presented to estimate the influence of different parameters of composite structures with impact damage on the properties of the residual strength. Ultimate stresses in a composite stiffened panel are determined as a function of the size of damage in the form of a notch both in the panel shell and in the composite layers of the stringers.

*Keywords:* failure factor, residual strength, ultimate stress, impact damage, finite element, composite laminate.