

УДК 539.3

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕЖСЛОЕВОЙ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛА ОБШИВКИ ПРИ ВЫРЫВЕ ЗАКЛЕПОК С ПОТАЙНЫМИ ГОЛОВКАМИ

Боровская Я.С., Глебова М.А., Гришин В.И., Гусева Н.В., Осипян Е.Э.

*ФГУП Центральный аэрогидродинамический институт
им. проф. Н.Е.Жуковского, г. Жуковский, Россия*

РЕЗЮМЕ

Получены экспериментальные данные о величине усилия вырыва заклепки с потайной головкой из образцов слоистого композиционного материала. Методом конечных элементов исследовано их напряжённое состояние. На основе сравнения результатов расчета с данными эксперимента предложен деформационный критерий определения величины силы, необходимой для вырыва головки заклепки из композитной обшивки.

При использовании предложенного критерия расширена область экспериментальных значений межслоевых напряжений, возникающих при вырыве головки заклепки из тела композита.

Ключевые слова: деформации; конечно-элементная сетка; концентрация; критерии прочности; напряжения; эксперимент

INVESTIGATION OF SKIN MATERIAL INTERLAMINAR STRENGTH DUE TO TEARING OUT THE RIVET WITH FLAT HEAD

Borovskaja Ja.S., Glebova M. A, Grishin V. I, Guseva N.V., Osipjan E.E.

*Central Aerohydrodynamic Institute named after prof. N.E.Zhukovsky, Zhukovsky,
Russia*

SUMMARY

Received experimental data about a rivet tear-out force size with a flat head from polymeric composite materials samples. Investigated their stress state using finite element method. Suggested the deformation criteria to determination of force value required to tear out the rivet head from the composite material skin on the base of comparison the calculated results with experimental data.

Using the proposed criteria the experimental values area of interlaminar stresses arising due to tearing out the river head from composite material is expanded.

Key words: strains; finite-element mesh; concentration; strength criteria; stress; test

ВВЕДЕНИЕ

Для закрепления аэродинамических поверхностей на летательном аппарате от действия разряженного воздушного потока как правило используются заклепки либо потайные болты. При проектировании несущих элементов конструкции

самолета, состоящих из обшивки, приклепанной к стрингерному набору либо к полкам нервюр крыла и оперения, необходимо знать величину разрушающих усилий, возникающих при вырыве головки заклепки из обшивки от действия аэродинамического давления (q) на обшивку (рис.1).

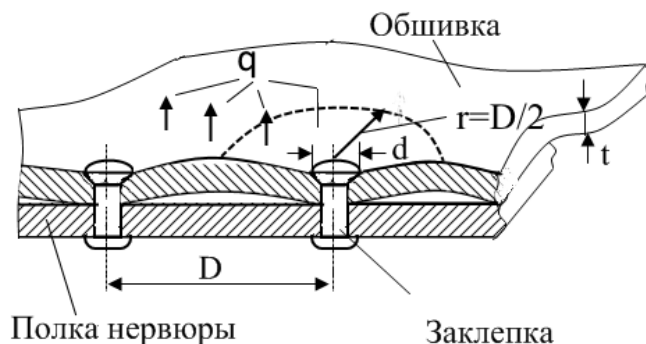


Рис.1. Схема заклепочного ряда крепления обшивки к полке нервюры.

Величина усилия вырыва заклепки из композитной обшивки зависит от многих факторов. Это, прежде всего, механические характеристики составляющих пакета - волокон и клеювого наполнителя, это и направления укладки волокон в пакете, немалое значение приобретает и величина гибкости обшивки, увеличивающаяся с увеличением расстояния между заклепками D . Поскольку расстояние между заклепками изменяется в зависимости от их диаметра и толщины приклепываемой обшивки, то экспериментальное определение усилий вырыва является трудоемкой задачей. С точки зрения расчета решение подобных задач осложняется наличием трехмерной геометрии, нелинейностью, связанной с контактным взаимодействием головки крепежного элемента с зазенкованной поверхностью отверстия композитной обшивки, а также физической нелинейностью металлического крепежного элемента. Кроме этих факторов определение прочности при вырыве заклепок осложняется отсутствием надежного критерия, отвечающего за предсказание усилия вырыва головки крепежного элемента из плоской многослойной обшивки.

В работе предлагается расчетно-экспериментальный метод определения усилий вырыва крепежных элементов из композиционной обшивки. На первом этапе в специальном приспособлении в результате испытаний получены значения максимальных усилий вырыва металлического болта, моделирующего заклепку, из композитного образца при постоянном значении величины D . На основе анализа результатов испытаний и сравнения их с МКЭ-расчетом предложен деформационный критерий определения усилия вырыва крепежа, который был использован для прогнозирования усилия вырыва при переменном значении расстояния D между крепежными элементами.

1. МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

Объектом испытаний являлись изготовленные из полимерного композиционного материала пластины размером 320×40 мм с просверленными по нормали к их плоскости зазенкованными отверстиями для установки крепежа диаметрами 6,35 и 7,94 мм (всего 6 пластин, по 7 испытываемых отверстий в каждой). Номинальные толщины пластин (t) составляли 4,1, 4,92 и 6,56 мм. Наполнителем пластин являются угольные нити, а связующим – эпоксидная

смола. Пластины набирались из монослоев с квазиизотропной укладкой $[\pm 45^\circ/0/90]_n$, где $n=5,6,8$. Толщина монослоя $t=0,205$ мм, модули упругости $E_{11}=120$ ГПа, $E_{22}=E_{33}=8$ ГПа, модули сдвига $G_{12}=5$ ГПа, $G_{23}=G_{31}=2,7$ ГПа, $\nu_{12}=0,45$, $\nu_{23}=\nu_{13}=0,02$. Материал крепежа – сталь: модуль упругости $E=210$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu=0,3$.

Общий вид образцов представлен на рис.2, а геометрические характеристики образцов и крепежа – в Табл.1.



Рис.2. Образцы с отверстиями для установки крепежа.

Таблица 1.

Размеры образцов.

№ пластины	Толщина образца, t , мм	Диаметр крепежа, мм	Диаметр головки крепежа, d , мм
1	4.1	6.35	10.54
2	4.1	7.94	13.35
3	4.92	6.35	10.54
4	4.92	7.94	13.35
5	6.56	6.35	10.54
6	6.56	7.94	13.35

Для подтверждения отсутствия внутренних технологических дефектов все образцы перед испытаниями были подвергнуты неразрушающему контролю.

Испытания проводились на универсальной электромеханической испытательной машине LFM-100 обеспечивающей точность измерения нагрузки $\pm 0,5\%$ от текущей величины в специальном приспособлении. Схема приспособления с установленным в нем композиционным образцом приведена на рис.3. Композиционный образец зажимается между двух стальных опор с помощью стяжных болтов, связывающих опоры с верхним и нижним кронштейнами. Нижний кронштейн крепится в гидрозхват, а к верхнему прикладывается растягивающая приспособление сила P . С увеличением силы P головка болта, контактирующая с зенкованной поверхностью композитного образца, сначала проминает композит, а затем происходит прорыв отверстия.

Общий вид смонтированных в оснастке и установленных в испытательную машину образцов показан на рис.4.

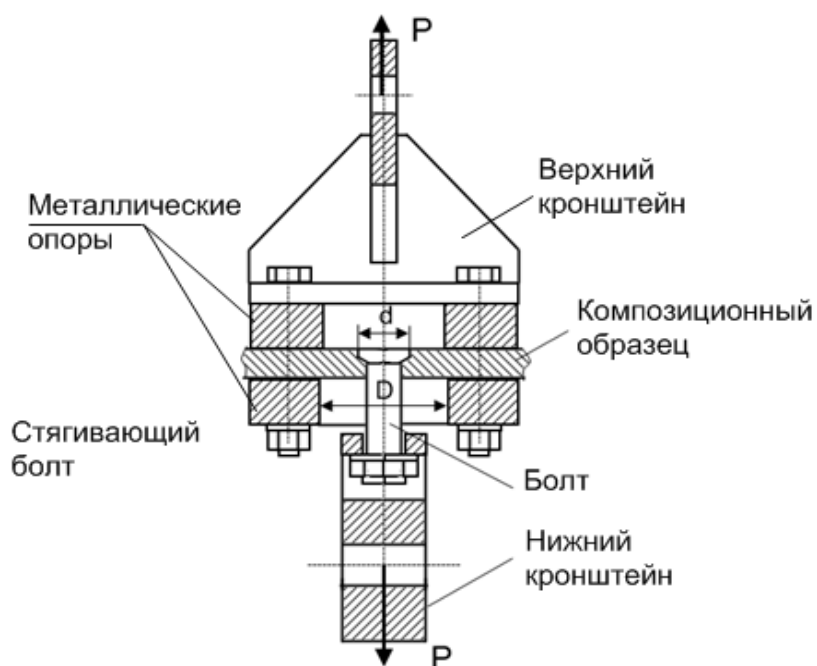


Рис.3. Схема приспособления для испытаний.



Рис.4. Смонтированные в оснастку и установленные в испытательную машину образцы с отверстием.

Испытания проводились до полного прорыва отверстия головкой болта. Каждый образец в процессе испытаний устанавливался в испытательную машину 7 раз (по количеству зенкованных отверстий).

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

С увеличением нагрузки разрушение в образцах начинается от смятия слоев композита в области контакта зенковки отверстия с головкой болта и оканчивается полным прорывом отверстия.

Типовая диаграмма деформирования отверстий "P-Δl", здесь P – прикладываемая нагрузка, а Δl – перемещение верхнего кронштейна приспособления, приводится на рис.5.

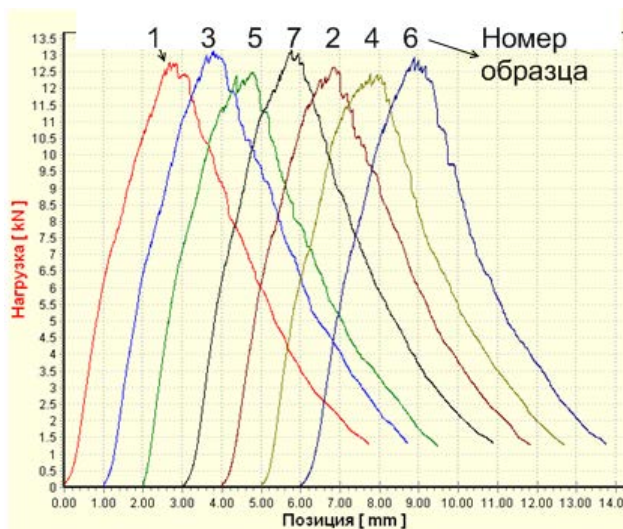


Рис.5. Диаграммы деформирования "P-Δl" отверстий в образцах.

Результаты испытаний на вырыв крепежа из обшивки приведены в Табл.2.

Таблица 2.

Результаты испытаний на вырыв крепежа из обшивки.

Номер пластины	Номер образца						
	1	2	3	4	5	6	7
	Разрушающая нагрузка P_{max} , кН						
1	6,87	6,50	6,90	6,72	6,80	6,84	6,87
2	9,65	9,15	9,54	9,60	9,48	9,33	8,98
3	8,99	9,16	9,37	9,06	9,32	9,03	9,65
4	12,77	12,64	13,13	12,44	12,47	12,93	13,15
5	14,28	14,78	13,96	14,88	14,19	14,44	14,57
6	18,68	18,31	18,29	18,31	18,98	18,72	19,20

Характер разрушений пластин в зоне отверстий показан на рис.6-7.

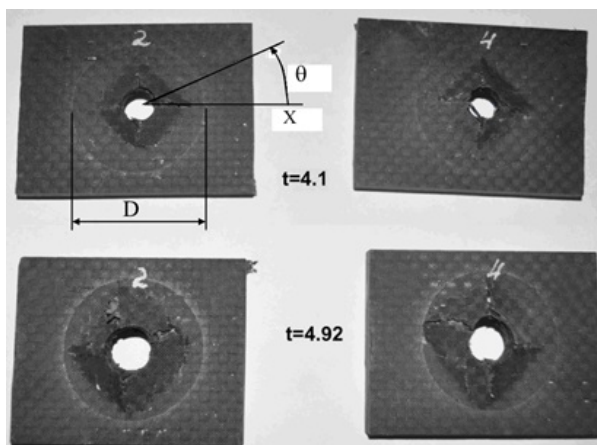


Рис.6. Характер разрушения отверстий в образцах пластин №1 №3.

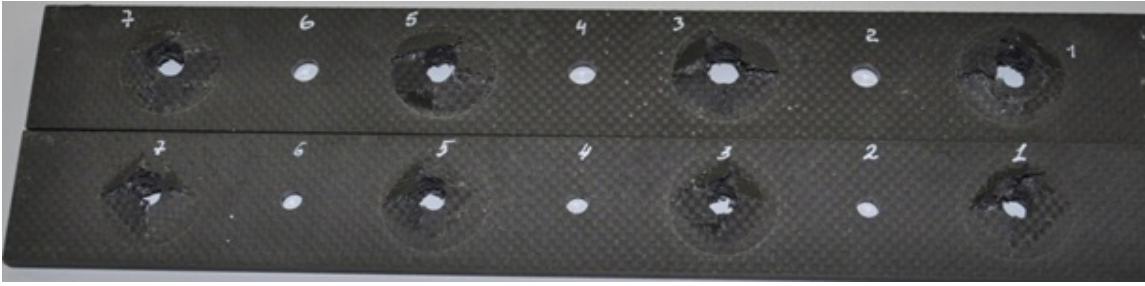


Рис.7. Характер разрушения отверстий в образцах пластин №5 и №6 (толщина пластин $t=6.56$ мм).

Как следует из рис.6 и 7 разрушение пластин сопровождается образованием четырех разломов нижнего монослоя композита с постоянным расположением их по контуру отверстия, характеризующимся углами $\theta=0^\circ, 90, 180, 270$ градусов по отношению к оси ОХ (рис.6).

Для всех образцов вычислялись условные межслоевые напряжения по выражению:

$$\tau_b = P_b / F_{\text{среза}}$$

(1)

где: P_b – усилие вырыва крепежа из композита, кН, $F_{\text{среза}}$ – площадь среза материала пластины головкой крепежа ($F_{\text{среза}} = \pi \cdot d \cdot t$).

В Табл.3 приводятся значения силы вырыва крепежа P_b и величины межслойных напряжений при вырыве крепежа из композитной обшивки.

Таблица 3.

Значения силы вырыва крепежа P_b и величины межслойных напряжений при вырыве крепежа из композитной обшивки.

Номер пластины	t , мм	d , мм	P_b , кН	τ_b , МПа
1	4,1	10,54	6,77	47,16
2	4,1	13,35	9,39	51,58
3	4,92	10,54	9,23	53,43
4	4,92	13,35	12,79	58,68
5	6,56	10,54	14,44	63,14
6	6,56	13,35	18,64	64,26

Как следует из Табл.3, величина разрушающих межслоевых напряжений не является постоянной величиной. При постоянном значении расстояния между крепежными элементами их величина увеличивается с увеличением толщины пластины.

3. РАСЧЕТ И АНАЛИЗ

Цель расчета заключалась в поиске критерия, предсказывающего значения разрушающих межслоевых напряжений при вырыве головок заклепок из обшивки. Для достижения этой цели определялось напряженно-деформированное состояние в обшивке при действии на заклепку растягивающей силы, равной силе вырыва заклепки из обшивки, полученной из эксперимента.

Расчет проведен в вычислительном комплексе программ *MSC.Software*. Расчетные конечно-элементные модели для *MSC.Marc* были созданы (см.рис.8а) в *MSC.PATRAN* для крепежа диаметром 6,35 мм и 7,94 мм. Образцы моделировались объемными 8-ми узловыми элементами *HEX8* (тип 149 для композиционного материала, тип 7 для изотропного) [1]. Каждому монослою соответствует один слой элементов.

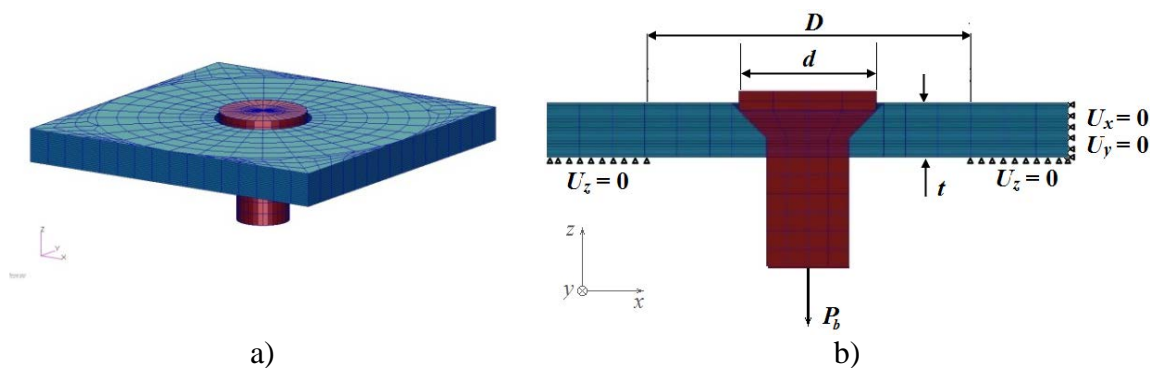


Рис.8. Расчетная модель (а) и ее сечение (б).

Модель закреплялась в направлении оси крепежного элемента по нижней поверхности образца за исключением области диаметром $D=30$ мм с центром в отверстии (рис.8б). Также модель закреплялась от смещения в плоскости образца за одну из боковых граней.

Нагрузка P_b , равная разрушающему усилию вырыва заклепок в эксперименте, прикладывалась к нижнему сечению крепежного элемента с помощью многоточечной нежесткой связи (MPC RBE3).

На рис.9 приводится распределение напряжений Мизеса в образце толщиной 4,1 мм с заклепкой $d=10,54$ мм: на рис.9а для образца, на рис.9б напряжения в зоне зенкованной части композита под головку заклепки.

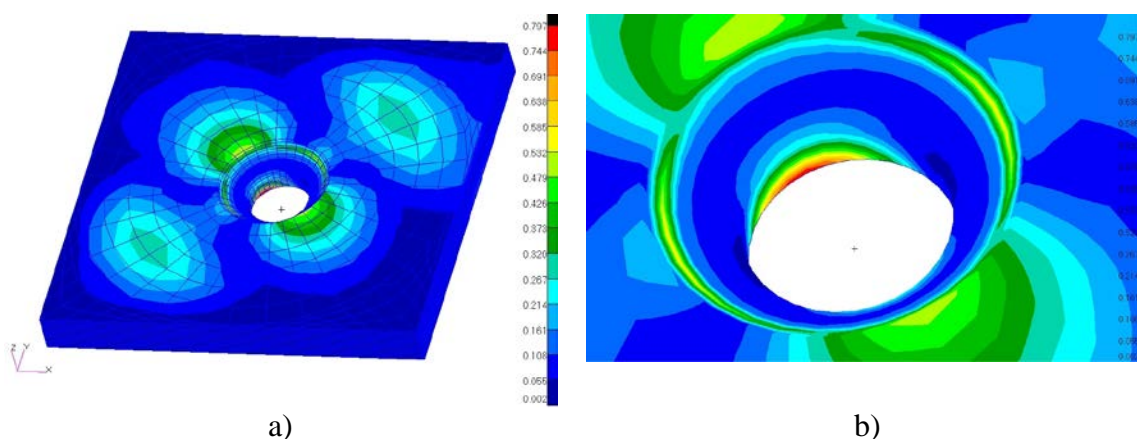


Рис.9. Распределение напряжений Мизеса в образце (ГПа).

Поскольку в эксперименте разрушение начиналось с нижнего слоя композита, волокна в котором располагались под углом 45° к оси Ox , то на рис.10,11 и в Табл.4 приводятся значения тангенциальных напряжений σ_θ и тангенциальных деформаций ε_θ в этом слое. Как видно из рис.10а и 11, максимальные тангенциальные напряжения концентрируются вдоль волокон композита, где они достигают величины ~ 800 МПа. Однако, как следует из

эксперимента, первоначальные очаги разрушения практически на всех образцах (см.рис.6,7) располагаются не в точках, в которых напряжения максимальны, а в местах, обозначенных цифрой 1 на рис.10б. По этой причине применение силовых критериев прочности [2-6] в подобных задачах не совсем эффективно.

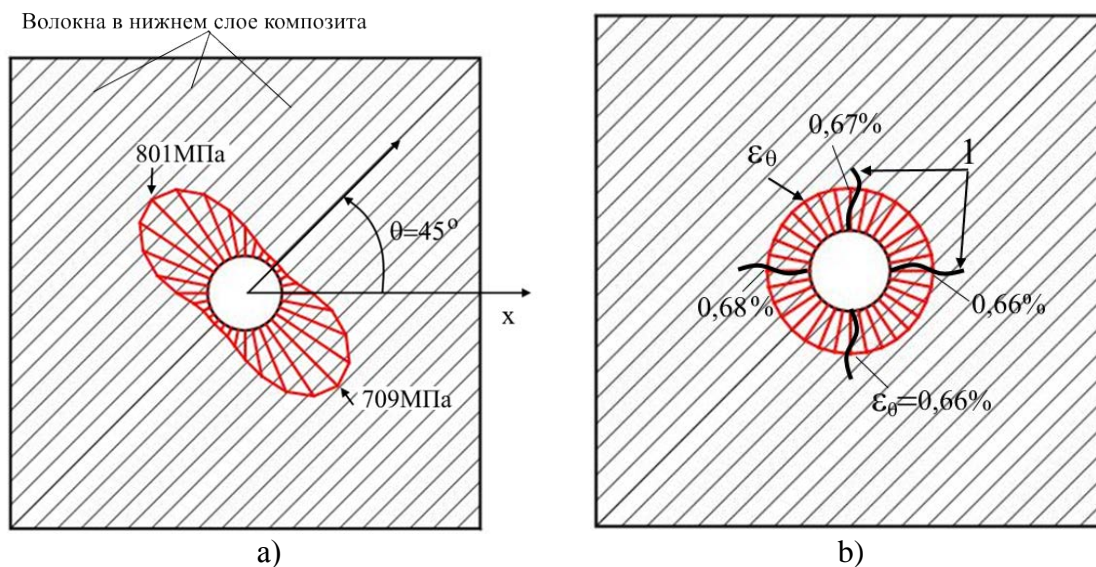


Рис.10. Тангенциальные напряжения σ_θ (ГПа) и деформации ε_θ в нижнем слое первого образца.

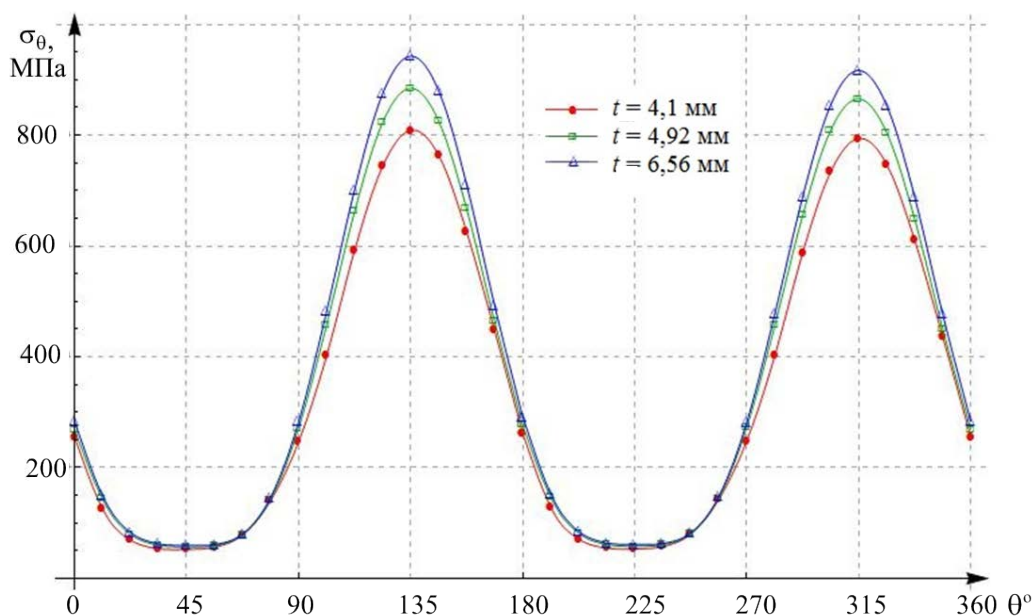


Рис.11. Тангенциальные напряжения σ_θ в нижнем слое первого образца.

Таблица 4.

Средняя тангенциальная деформация ε_θ в нижнем слое пластины.

$t_{пл}$, мм	d=10.54мм		d=13.35мм	
	ε_θ	γ	ε_θ	γ
4,1	6,62e-3	-3,78	6,08e-3	-11,63
4,92	7,23e-3	5,09	6,74e-3	-2,03
6,56	7,67e-3	11,48	6,94e-3	0,87

Как следует из Табл.4 максимальная относительная ошибка (γ) для всех испытанных образцов составляет $\sim 11,5\%$.

Если выбросить из рассмотрения минимальные и максимальные результаты по определению значений ошибок, которые могут быть связаны с несовершенством технологии изготовления композитных образцов, то в этом случае погрешность составит $\sim 5\%$.

По этой причине, для оценки силы, вырывающей заклепку из композита и последующего определения по выражению (1) межслоевых напряжений можно в качестве критерия использовать деформационный критерий:

$$\varepsilon_{\theta} \leq \varepsilon_{\theta b}, \quad (2)$$

где ε_{θ} – расчетное значение деформаций на контуре отверстия нижнего слоя композита, а $\varepsilon_{\theta b}$ – предельное значение деформации, определяемое расчетно-экспериментальным методом.

Используя выражение (2) как критерий разрушения и, принимая $\varepsilon_{\theta b} = 0.69\%$, расчетом определены разрушающие нагрузки для крепежных элементов, расположенных на расстоянии $D=20$ и 40 мм друг от друга, по значениям которых и выражению (1) получены критические межслоевые напряжения, приведенные на рис.12.

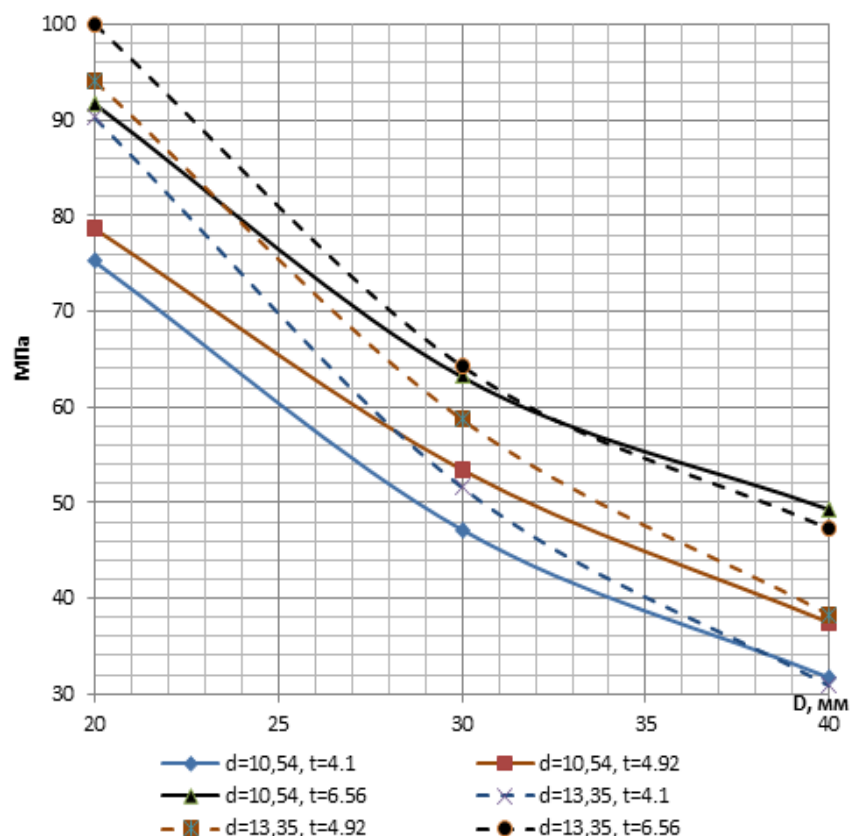


Рис.12. Значение разрушающих межслоевых напряжений при вырыве головок крепежных элементов из композитной обшивки.

Как следует из графиков, величина разрушающих межслоевых напряжений не является постоянной величиной. С уменьшением расстояния D между заклепками межслоевые напряжения увеличиваются. Увеличиваются они и при увеличении толщины t композита. С увеличением расстояния между заклепками

D более 35 мм диаметр головки заклепки практически не влияет на величину межслоевых напряжений. Следует отметить, что поскольку в работе не учитывалось взаимовлияние крепежных элементов, то ошибка в определении величины межслоевых напряжений на интервале $20 \leq D \leq 25$ может превышать реальное значение более, чем на 5%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено расчетно-экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния при вырыве заклепки с потайной головкой из тела композитной обшивки. На основе сравнения результатов расчета с данными эксперимента предложен деформационный критерий определения величины силы, необходимой для вырыва головки заклепки из тела композитной обшивки.

При использовании предложенного критерия расширена область экспериментальных значений межслоевых напряжений, возникающих при вырыве головки заклепки из тела композита.

Установлено, что с уменьшением расстояния между заклепками межслоевые напряжения увеличиваются. Увеличиваются они и при увеличении толщины композита. При расстоянии между заклепками более 35 мм диаметр головки заклепки практически не влияет на величину межслоевых напряжений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Volume B: Element Library // Marc 2013/ MSC. Software Corporation. U.S.A., 2013. – С.71. URL: http://simcompanion.mscsoftware.com/infocenter/index?page=content&id=DOC10339&cat=MARC_DOCUMENTATION&actp=LIST.
2. Tsai S.W., Wu E.M. A general theory of strength for anisotropic material // J. of Composite Materials. – 1971. – Vol.5. – P.58-80.
3. Hashin Z. Failure Criteria for Unidirectional Fibre Composites // J. of Applied Mechanics. – 1980. – Vol.47. – P.329-334.
4. Puck A., Schurmann H. Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models // Composites Science and Technology. – 1988.
5. Гришин В.И., Глебова М.А., Беспалов В.А., Гоцелюк Т.Б. Исследование критериев разрушения композиционных образцов с концентраторами напряжений при сжатии // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2013. – Т.20. – №1. – С.58-86.
6. Гришин В.И., Дзюба А.С., Дударьков Ю.И. Прочность и устойчивость элементов и соединений авиационных конструкций из композитов. – М.: Физматлит, 2013. – 272 с.

Поступила в редакцию 19 августа 2015 года

Сведения об авторах:

Боровская Янина Степановна – начальник установки, ФГУП Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е.Жуковского, г. Жуковский, Россия

Гришин Вячеслав Иванович – д.т.н., проф., гл.н.с., ФГУП Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е.Жуковского, г. Жуковский, Россия; e-mail: gvi0641@gmail.com

Глебова Мария Александровна – инж., ФГУП Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е.Жуковского, г. Жуковский, Россия

Гусева Наталья Вячеславовна – к.т.н., н.с., ФГУП Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е.Жуковского, г. Жуковский, Россия

Осипян Евгений Эдуардович – нач.сектора, ФГУП Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е.Жуковского, г. Жуковский, Россия