

УДК 629.735.023

А. С. БЕКЕТОВА, М. А. ШЕВЦОВА, Я. С. КАРПОВ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина***НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗАФОРМОВАННЫХ КРЕПЕЖНЫХ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ТРАНСВЕРСАЛЬНОМ НАГРУЖЕНИИ**

Предложен способ определения напряженно-деформированного состояния заформованного микрокрепежного элемента при трансверсальном нагружении. Методика позволяет перейти от объемной задачи к плоской одномерной задаче простого адгезионного соединения и определить действующие касательные напряжения. В основе метода лежит переход от приведенных площадей к периметру крепежного элемента в представительном трансверсально-армированном элементе композиционного материала, нагруженного перпендикулярно плоскости. Произведено определение упругих характеристик представительного элемента с целью дальнейшего расчета касательных напряжений по классической модели соединительного слоя и модели Фолькерсена. Данная методика применима при итерационном проектировании объемных (гибридных) соединений, работающих на отрыв. Располагая информацией о предельных касательных напряжениях соединительного слоя, благодаря представленной методике, можно оценить (прогнозировать) несущую способность рассмотренных конструктивно-технологических решений соединений.

Ключевые слова: *напряженно-деформированное состояние, трансверсальное нагружение, композиционный материал, крепежный элемент, касательные напряжения, уравнение равновесия, уравнение совместности деформаций.*

Введение

Волокнистые полимерные композиционные материалы (КМ) широко используются в ответственных отраслях промышленности, таких как авиационно-ракетостроение, соответственно. Для них решаются задачи оптимального проектирования и соединения в сборочные единицы и агрегаты. Сложная структура, а также постоянное развитие технологии и модификации структурных компонентов, требует проведение экспериментальных и теоретических исследований по определению напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов композитных конструкций. Композит по своей природе является неоднородным материалом, требующий многочисленных исследований свойств волокна, матрицы, неоднородного контакта между ними, влияния технологических аспектов и конструктивных особенностей [1]. Особое внимание уделяется соединениям композитных элементов конструкции с металлическими частями агрегата. Разрабатываются теории по определению физико-механических свойств материала, входящего в зону гибридного объемно-армированного соединения, а также методики по определению НДС композитных конструкций и сборочных единиц [2]. При этом проведенный анализ ряда экспериментальных и теоретических исследований, изучающих поведение композита в соединении, показывает, что построенные ком-

плексные модели деформирования и разрушения материалов, входящих в зону яркой неоднородности – соединений, требуют дальнейшего развития или уточнений.

1. Постановка задачи исследования

Рассмотрим случай нагружения из плоскости представительного элемента КМ с трансверсальным крепежным микроэлементом. Образованный представительный элемент является элементарной ячейкой распространенных видов трансверсально-армированных пластиков, которые ложатся в основу проектирования новых гибридных соединений. Соединения изделий из КМ, как известно, весьма перспективная и ответственная область исследования. Отдельное место занимают соединения, работающие на отрыв, хотя в авиационной технике достаточно редко встречается простое нагружение элементов таких конструкций, но, как правило, они встречаются на стратегических объектах авиационно-космической техники (АКТ), например, на боевых летательных аппаратах (ЛА) для установки различного вооружения. В конструкции таких элементов присутствует большое количество стыков и соединений, а с целью снижения массы ЛА, их выполняют из КМ. Примерами таких конструктивно-технологических решений (КТР) могут быть всевозможные кронштейны, петли, бугеля, испыты-

вающие отрывные усилия (рис. 1). Соответственно, зона их соединения является объектом данного исследования по определению НДС в представительном элементе КМ. Форма микрокрепежного элемента и частота их размещения может быть различной и выбирается соответственно с требованиями по необходимой несущей способности проектируемой конструкции. Размер представительного элемента варьируется и тем самым определяет объемное содержание z-арматуры в КМ (рис. 1). В связи с чем, разработка методики, позволяющей определять касательные напряжения (предельные для данных видов соединений) является актуальной областью исследования и перспективной задачей для дальнейшего внедрения КМ в АКТ, повышения надежности и минимизации массы ЛА.

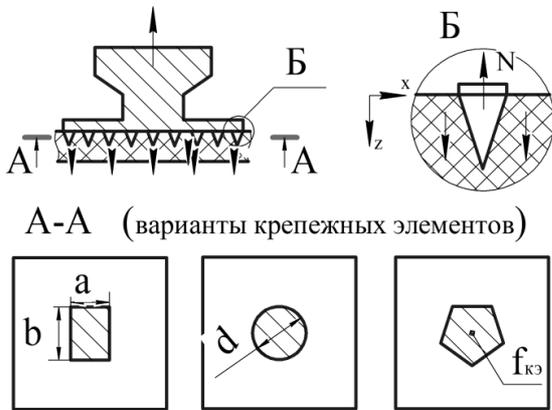


Рис. 1. Примеры соединения различных конструкций и формы поперечного сечения крепежных элементов

Формы крепежных элементов зачастую определяются способом получения металлического основания (законцовки) с объемной контактной поверхностью, так при фрезеровании, как правило, образуются крепежные элементы с прямоугольным поперечным сечением, а при сварке и запрессовке удобней размещать цилиндрические крепежные элементы (рис. 1).

2. Определение напряженно-деформированного состояния крепежного микроэлемента при трансверсальном нагружении

Для оценки НДС трансверсально-армированного соединения, нагруженного отрывом, в первую очередь определяются с размерами элементарной ячейки и объемным содержанием крепежных элементов. Для этого рассмотрим контакт поверхности крепежного элемента с композитом. Зона контакта представляет собой адгезионное соединение, расчет

которого производится по одномерной расчетной схеме. Одномерная расчетная схема строится на основании двух моделей соединительного слоя: классической, где касательные напряжения сосредоточены в клеевом соединении и модели Фолькерсена, где сдвигающие напряжения сосредоточены в соединительном слое, состоящем из клеевой прослойки и прилегающих к ней половинок толщин деталей.

Таким образом, одномерная расчетная схема базируется на следующих допущениях:

- клеевая прослойка работает только на сдвиг;
- геометрические и жесткостные параметры деталей и клеевого слоя постоянны по длине;
- нормальные напряжения распределены по толщине равномерно;
- материалы деталей ортотропны в осях x, y .

На рис. 2 представлена модель клеевого соединения, где P – это периметр поперечного сечения крепежного элемента; $\delta_1 = \frac{f_{к3}}{P}$ – приведенная толщина крепежного элемента; $\delta_2 = \frac{t_1 t_2 - f_{к3}}{P} = \frac{t_1 t_2 (1 - \gamma_n)}{P}$ – приведенная толщина композита. Из-за большого разнообразия форм поперечного сечения крепежных микроэлементов целесообразней перейти к приведенному диаметру. Принцип этого перехода изображен на рис. 2, где t_1, t_2 – габаритные размеры представительного элемента; $f_{к3}$ – площадь крепежного элемента; $d_{пр}$ – приведенный диаметр крепежного элемента; D – приведенный диаметр представительного элемента.

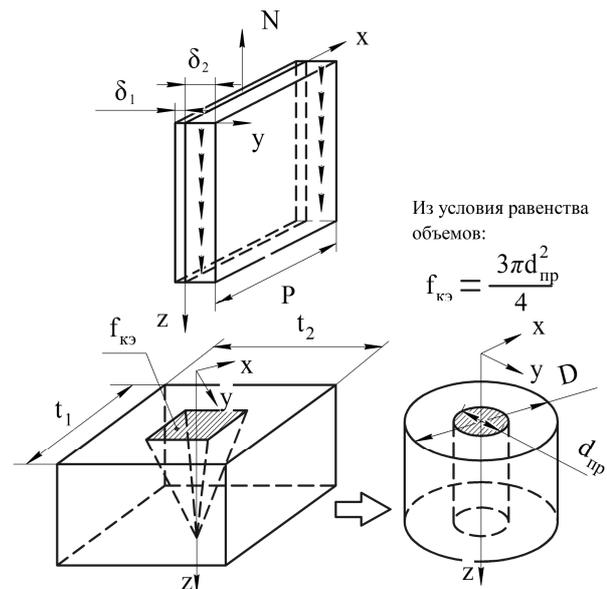


Рис. 2. Расчетная схема соединения

Таким образом, предложенная расчетная схема учитывает не только различные формы поперечного сечения крепежного элемента, но и его форму, которая влияет на объемное содержание крепежных элементов в элементарной представительной ячейке трансверсально-армированного соединения.

Принимая переход от начальной формы крепежного элемента к цилиндрической подразумевается равенство жесткостей этих форм поперечного сечения крепежных элементов:

$$E_{кэ} f_{кэ} = E_{пр} \frac{\pi d_{пр}^2}{4} = E_{пр} \frac{P_{кэ}^2}{4\pi}, \quad (1)$$

где $E_{кэ}$ – модуль упругости крепежного элемента;

$E_{пр}$ – приведенный модуль упругости крепежного элемента.

Отсюда определим приведенный модуль упругости для крепежного элемента:

$$E_{пр} = E_{кэ} \frac{4\pi f_{кэ}}{P_{кэ}^2}. \quad (2)$$

Аналогично определим приведенный модуль упругости для КМ:

$$E_z (t_1 t_2 - f_{кэ}) = E_{zпр} \left(t_1 t_2 - \frac{P_{кэ}^2}{4\pi} \right);$$

$$E_{zпр} = E_z \frac{t_1 t_2 - f_{кэ}}{t_1 t_2 - \frac{P_{кэ}^2}{4\pi}} = E_z \frac{1 - y_n}{1 - \frac{P_{кэ}^2}{4\pi t_1 t_2}} = E_z \frac{1 - y_n}{1 - y_n^*}, \quad (3)$$

где E_z – модуль упругости композита по оси z;

$E_{zпр}$ – приведенный модуль упругости композита по оси z.

При одинаковом поперечном сечении круг имеет наименьший периметр. Оценим это выражение для круга:

$$P_{кэ} = \pi d; \quad y_n = \frac{\pi d^2}{4t_1 t_2}.$$

Тогда

$$E_{zпр} = E_z \frac{1 - y_n}{1 - \frac{\pi^2 d^2}{4\pi t_1 t_2}} = E_z \frac{1 - y_n}{1 - y_n} = E_z. \quad (4)$$

Из формулы (4) видно, что и для других поперечных сечений $E_{zпр} = E_z$.

Для дальнейших расчетов потребуется податливость соединительного слоя δ_c / G_c . Определить ее можно по классической модели:

$$\frac{\delta_c}{G_c} = \frac{\delta_k}{G_k}; \quad (5)$$

где δ_k – толщина клея;

G_k – модуль сдвига клея.

Модели Фолькерсена для определения податливости необходимы половинные толщин деталей входящих в соединение, которые приводим по периметру и площади.

По периметру

$$\frac{\delta_1}{2} = \frac{2\pi d_{пр}^2}{4\pi d_{пр}} = \frac{d_{пр}}{2};$$

$$\frac{\delta_2}{2} = \frac{2(D^2 - d_{пр}^2)}{4(D - d_{пр})} = \frac{D + d_{пр}}{2}. \quad (6)$$

По площади

$$\frac{\delta_1}{2} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{4f_{кэ}}{\pi}} = \sqrt{\frac{f_{кэ}}{\pi}};$$

$$\frac{\delta_2}{2} = \frac{D}{2} \left(1 + \frac{d_{пр}}{D} \right) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{4t_1 t_2}{\pi}} \times$$

$$\times \left(1 + \frac{\sqrt{\frac{4f_{кэ}}{\pi}}}{\sqrt{\frac{4t_1 t_2}{\pi}}} \right) = \sqrt{\frac{t_1 t_2}{\pi}} \left(1 + \sqrt{\frac{f_{кэ}}{t_1 t_2}} \right) =$$

$$= \sqrt{\frac{t_1 t_2}{\pi}} (1 + \sqrt{y_n}). \quad (7)$$

Суммарное перемещение соединительного слоя равно:

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_k. \quad (8)$$

Перемещение крепежного элемента, представительного элемента КМ и клея определяются как:

$$\Delta_1 = \gamma_1 \frac{\delta_1}{2}; \quad \Delta_2 = \gamma_2 \frac{\delta_2}{2}; \quad \Delta_k = \gamma_k \delta_k, \quad (9)$$

где γ_1 – сдвиговая деформация крепежного элемента;

γ_2 – сдвиговая деформация КМ;

γ_k – сдвиговая деформация клея.

Средняя деформация сдвига соединительного слоя равна:

$$\gamma_{ср} = \frac{\Delta}{\delta_c}, \quad \delta_c = \frac{\delta_1}{2} + \frac{\delta_2}{2} + \delta_k, \quad (10)$$

где δ_c – толщина соединительного слоя.

Модуль сдвига соединительного слоя:

$$G_c = \frac{\tau}{\gamma_{ср}} = \frac{\tau \delta_c}{\gamma_1 \frac{\delta_1}{2} + \gamma_2 \frac{\delta_2}{2} + \gamma_k \delta_k} =$$

$$= \frac{\delta_c}{\frac{\delta_1}{2G_{1_xz}} + \frac{\delta_2}{2G_{2_xz}} + \frac{\delta_k}{G_k}}, \quad (11)$$

где G_{1_xz}, G_{2_xz} – модули сдвига крепежного элемента и композита.

В результате действия выдергивающей силы в клеевом соединении возникает уравнивающий поток касательных напряжений (рис. 3).

Поток касательных напряжений и касательное напряжение по оси z выглядит как:

$$q_z = \tau_z 2(t_1 + t_2); \quad \tau_z = \frac{N}{\delta_c 2(t_1 + t_2)}. \quad (12)$$

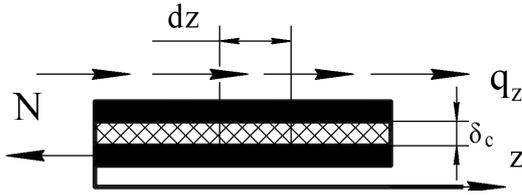


Рис. 3. Одномерная модель соединения

В соответствии со схемой деформирования (рис. 4) ниже записаны уравнения равновесия и совместности деформаций.

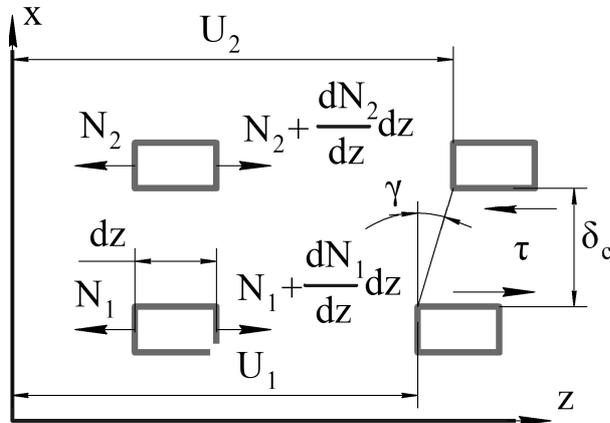


Рис. 4. Схема деформирования соединения

Уравнения равновесия примут вид:

$$\begin{aligned} \frac{dN_1}{dz} dz &= -\tau dz P; \\ \frac{dN_2}{dz} dz - \tau dz P + q_z dz &= 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Отсюда

$$\frac{dN_1}{dz} = -\tau P; \quad \frac{dN_2}{dz} = \tau P - q_z. \quad (14)$$

Запишем уравнение совместности деформаций:

$$\begin{aligned} U_2 - U_1 &= \gamma \delta_c = \frac{\tau}{G_c} \delta_c = \tau \frac{\delta_c}{G_c} = \tau \Pi_3; \\ \frac{dU_2}{dz} - \frac{dU_1}{dz} &= \varepsilon_2 - \varepsilon_1. \end{aligned} \quad (15)$$

Согласно физическому закону и гипотезе Дюамеля-Наймана:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{N_1}{E_{кз} f_{кз}} + \alpha_1 \Delta T = \frac{N_1}{E_{кз} t_1 t_2 y_n} + \\ &+ \alpha_1 \Delta T = N_1 \Pi_1 + \alpha_1 \Delta T; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_2 &= \frac{N_2}{E_{znp} (t_1 t_2 - f_{кз})} + \alpha_2 \Delta T = \frac{N_2}{E_z (1 - y_n) t_1 t_2} + \\ &+ \alpha_2 \Delta T = N_2 \Pi_2 + \alpha_2 \Delta T, \end{aligned}$$

где α_1, α_2 – коэффициенты линейного температурного расширения материалов крепежного и представительного элементов.

Тогда уравнение совместности деформаций (15) преобразуется к виду:

$$N_2 \Pi_2 - N_1 \Pi_1 + \Delta T (\alpha_2 - \alpha_1) = \Pi_3 \frac{d\tau}{dz}, \quad (16)$$

где Π_1, Π_2, Π_3 – податливости крепежного элемента, композита и клея.

Продифференцируем выражение по z:

$$\Pi_2 \frac{dN_2}{dz} - \Pi_1 \frac{dN_1}{dz} - \Pi_3 \frac{d^2 \tau}{dz^2} = 0.$$

Разделив (16) на $-\Pi_3$, получим дифференциальное уравнение второго порядка:

$$\frac{d^2 \tau}{dz^2} - \tau P \frac{\Pi_1 + \Pi_2}{\Pi_3} = -q_z \frac{\Pi_2}{\Pi_3}. \quad (17)$$

Решением этого дифференциального уравнения является следующее выражение:

$$\tau(z) = C_1 \text{ch} kz + C_2 \text{ch} k(z-1) + C_3, \quad (18)$$

где C_1, C_2 – произвольные константы, а C_3 – частное решение.

Подставив в уравнение (18) получим:

$$\begin{aligned} &k^2 (C_1 \text{ch} kz + C_2 \text{ch} k(z-1)) - \\ &- k^2 (C_1 \text{ch} kz + C_2 \text{ch} k(z-1)) - k^2 C_3 = -q_z \frac{\Pi_2}{\Pi_3}, \end{aligned}$$

где $k^2 = \Pi \frac{\Pi_1 + \Pi_2}{\Pi_3}$.

Отсюда частное решение равно:

$$C_3 = q_z \frac{\Pi_2}{k^2 \Pi_3}. \quad (19)$$

Произвольные константы (постоянные интегрирования) определим из граничных условий (рис. 1):

- при $z = 0$ $N_1 = N; N_2 = 0;$
- при $z = 1$ $N_1 = 0; N_2 = 0.$

Подставив первое граничное условие в выражение (16), запишем:

$$\frac{d\tau}{dz} = k C_1 \text{sh} kz + k C_2 \text{sh} k(z-1) = -k C_2 \text{sh} kl. \quad (20)$$

Соответственно, второе граничное условие даст следующее выражение:

$$\frac{d\tau}{dz} = k C_1 \text{sh} kz + k C_2 \text{sh} k(z-1) = k C_1 \text{sh} kl. \quad (21)$$

Из выражений (20) и (21) получим следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} -N_1\Pi_1 + \Delta T(\alpha_2 - \alpha_1) &= \Pi_3(-kC_2shkl); \\ \Delta T(\alpha_2 - \alpha_1) &= \Pi_3(kC_1shkl). \end{aligned} \quad (22)$$

Тогда (22) определяет константы C_1 , C_2 :

$$C_1 = \frac{\Delta T(\alpha_2 - \alpha_1)}{\Pi_3kshkl}; \quad C_2 = \frac{N_1\Pi_1 - \Delta T(\alpha_2 - \alpha_1)}{\Pi_3kshkl}. \quad (23)$$

Полученные константы интегрирования полностью определяют зависимость касательного напряжения в соединительном клеевом слое заформованного микрокрепежного элемента.

3. Определение оптимального объемного содержания трансверсальных микроэлементов

Рассмотренная расчетная схема позволяет численно оценить НДС элементарной ячейки трансверсального соединения с заформованным крепежным микроэлементом. Такая оценка при идеализированных условиях нагружения позволит определить условие, при котором крепежный трансверсальный микроэлемент будет максимально эффективным.

С помощью разработанной методики НДС оценивается, что при действии отрывного усилия в $N=1$ кН, разрушение соединения начнется с вырыва вершины крепежного элемента из связующего ($E_z = 20$ МПа), поэтому значения касательных напряжений оценивались именно при вершине, с длиной самого крепежного элемента 3 мм. Диапазон жесткостей элементов и материалов, входящих в соединение, расширен благодаря использованию различных объемных содержаний крепежных элементов в представительном элементе КМ. Площадь поперечного сечения крепежного элемента фиксирована ($f_{кз} = 2,25$ мм²). Рассмотрены варианты стального, титанового и алюминиевого крепежного микроэлемента с различным объемным содержанием трансверсальных элементов в ячейке КМ ($\theta = 1..10\%$). В качестве клеевого слоя выбран многоцелевой эпоксидный клей Loctite 3430 с прочностью на сдвиг при нормальных условиях ($\tau = 20$ МПа) [3].

Таким образом, получены графические зависимости (рис. 5) изменения касательных напряжений заформованного трансверсального микрокрепежного элемента в элементарной ячейке КМ для различного отношения жесткостей элементов, входящих в соединение. Из рис. 5 видно, что при переходе за 4% объемного содержания микрокрепежных элементов в ячейке КМ, диапазон возможных вариантов жесткостей существенно сокращается, а на-

пряжения в соединении растут более интенсивно. Ранее проведенные экспериментальные исследования по эффективному насыщению слоистых композитов поперечными связями (z-штифтами) ограничивался именно $\theta = 4\%$ [4].

Также в ходе численного исследования проанализированы разнообразные виды поперечного сечения крепежного трансверсального элемента (рис. 1), из чего следует, что форма поперечного сечения влияет на параметр площади и периметра несущественно, конструктивные же ограничения претерпевают больших изменений. Разнообразные формы поперечного сечения способны менять рисунок расположения крепежных элементов на основании законцовки, варьировать их количеством и частоту размещения. Наиболее выгодное соотношение периметра и площади поперечного сечения имеет круг, а лучшей конструктивной формой крепежного элемента является квадрат, из-за минимального размера представительной ячейки КМ. Следовательно, такая форма крепежного элемента позволяет примерно на 10% сократить размеры законцовки, по сравнению с круглым поперечным сечением, при одинаковом НДС, хотя на микроструктурном уровне обе формы крепежных элементов имеют отрицательные особенности (острые углы и зоны чистого связующего).

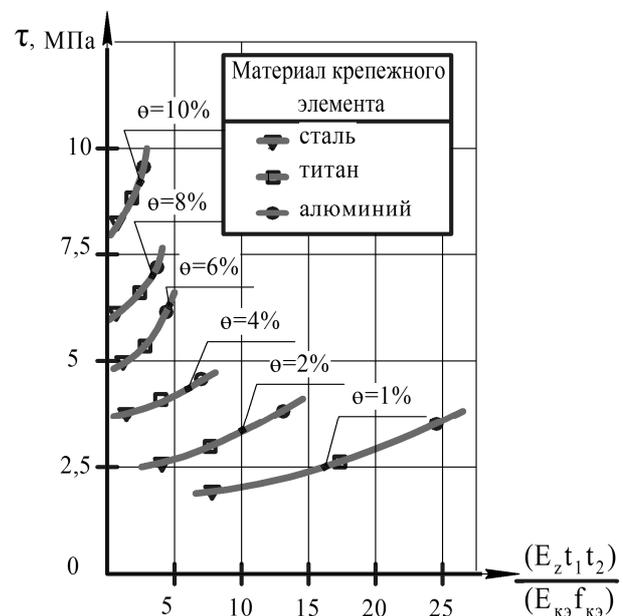


Рис. 5. Распределение касательных напряжений от переменной жесткости

Для наглядной демонстрации эффективности адгезионного соединения с трансверсальными элементами приведены зависимости возникающих касательных напряжений в элементарной ячейке с крепежным трансверсальным элементом из разно-

образных материалов и простого адгезионного соединения (рис. 6).

Площадь представительного элемента S подбирается из условия сохранения параметра θ . Соотношение объемного содержания трансверсальных микрокрепежных элементов и площади клеевой поверхности элементарной ячейки соединения, представлено в таблице 1.

Таблица 1
Точки определения касательных напряжений

№ точки	θ , %	S , мм ²
1	0,5	450
2	1	225
3	2	112,5
4	4	56,25
5	6	37,5
6	8	28
7	10	22,5

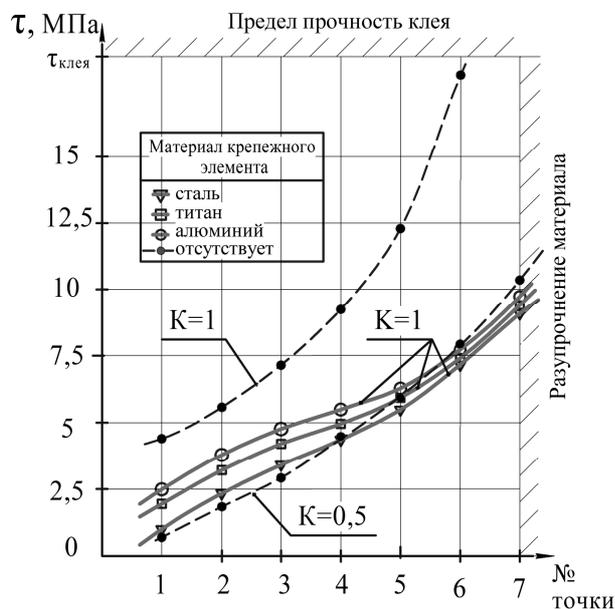


Рис. 6. Эффективность трансверсально-армированного соединения при действии отрывного усилия

Напряжения для представительного элемента трансверсального соединения исследовалось при различном параметре θ . Для простого адгезионного соединения переменным параметром выступала площадь склеивания, которая эквивалентна площади представительного элемента трансверсального соединения.

Каждой точке в зависимостях на рис. 6 соответствует объемное содержание крепежного трансверсального элемента из стали, титана и алюминия, соответственно, в представительном элементе КМ, площадь которого эквивалентна площадям склейки для простого адгезионного соединения (табл. 1). Эффективную зону трансверсального армирования

можно ограничить по оси абсцисс – пределом прочности используемого клея, а по оси ординат 10-ю процентами объемного содержания крепежных элементов, что соответствовало разупрочнению основного материала. Точка 4 является переломной, после нее напряжения растут менее интенсивно, она соответствует $\theta = 4\%$. В университете Мельбурна исследовали трансверсальные соединения с насыщением микрокрепежными элементами до 4 % объясняя тем, что даже к этой границе разрушающая нагрузка вырастает на 80%, а энергия деформирования в 6-7 раз, что вызывает разрушение самих микроэлементов, а не зоны контакта «микроэлемент-композит» [4]. Мы не учитывали такое поведение энергии деформирования, а идеализировано продлили характер распределения на всю рассмотренную нами зону. Кривая клевого соединения лежит выше кривых трансверсально-армированных соединений различной жесткости, и только снижение действующей силы в 2 раза ($K=0,5$) НДС простого адгезионного соединения и трансверсально-армированного соединения приблизительно сходятся. И из чего следует, что трансверсальное соединение способно выдержать в 2 раза большую нагрузку, чем эквивалентное по габариту клеевое соединение.

4. Сравнение напряженно-деформированного состояния конечно-элементного моделирования и расчетной схемы трансверсального микрокрепежного элемента

Прогнозировать прочность на отрыв металлокомпозитных соединений с крепежными микроэлементами можно в среде конечно-элементного анализа Solid Works Simulation 2009, для этого рассмотрим четвертую часть представительного элемента соединения с объемным содержанием крепежных элементов ($\theta = 2\%$). Для верхней металлической части соединения заданы свойства, характерные алюминиевым сплавам ($E=72$ ГПа; $\mu=0,33$). Для композитной детали были заданы ортотропные свойства, характерные для КМ на основе стеклоткани ($E_x=E_y=30$ ГПа; $E_z=6$ ГПа; $\mu_{xy}=0,18$; $\mu_{xz}=\mu_{yz}=0,3$; $G_{xy}=G_{yz}=G_{xz}=5$ ГПа).

Клеевая прослойка между металлической и композитной деталями моделировалась с помощью виртуального соединителя «Пружина», который применяется к совпадающим граням деталей. На грани модели, лежащие в плоскости симметрии представительного элемента, накладываются ограничения типа «Симметрия». Приложенная нагрузка представлена распределенным нормальным давлением величиной равной теоретическому пределу прочности клея на отрыв ($\sigma_{отр}=5$ МПа) (рис. 7 а).

Для стабилизации модели использовалась инерционная разгрузка. После выполнения линейного статического анализа исследовались касательные напряжения на соединяемых гранях (рис. 7 б).

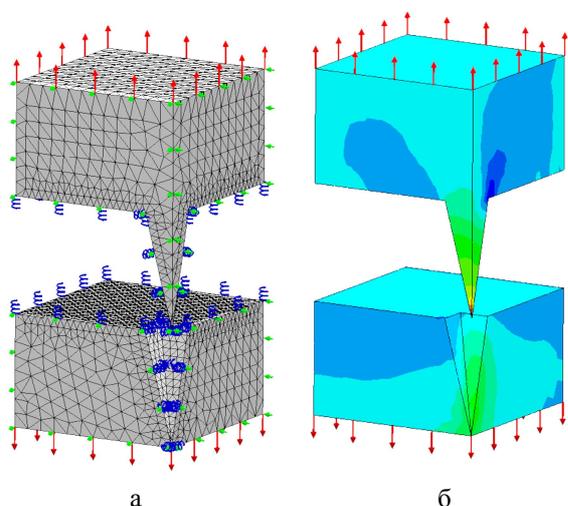


Рис. 7. Конечно-элементное моделирование

Распределение касательных напряжений получено для грани контакта пирамидального крепежного элемента с длиной ($l = 3$ мм) и композита, представлено на рис. 8. Результаты моделирования сопоставлены с теоретическими значениями, полученными по рассмотренной выше расчетной схеме.

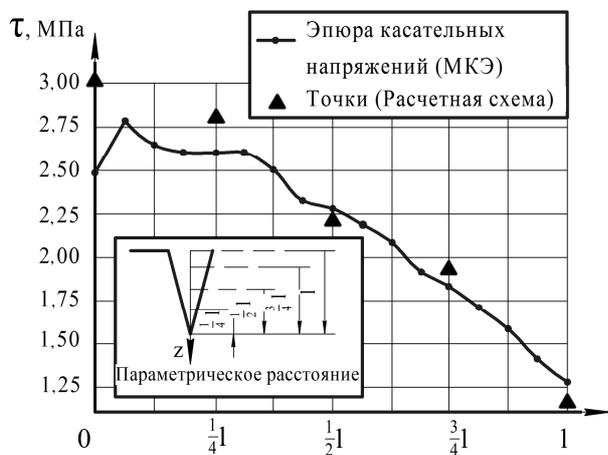


Рис. 8. Оценка касательных напряжений заформованного микрокрепежного элемента

Максимальные расхождения значений касательных напряжений по расчетной схеме и эпюры касательных напряжений по длине крепежного элемента, полученной благодаря методу конечных элементов (МКЭ), составила порядка 15-20%. Хотя оценка запасов прочности приводит лишь к 7-10% повышению несущей способности соединения в целом. Поэтому одним из популярнейших вариантов повышения эффективности несущей способности соединений, работающих на отрыв, является при-

менение заклинивающих микроэлементов, спиралевидных (рис. 9 а) и гарпунных (рис. 9 б, в).

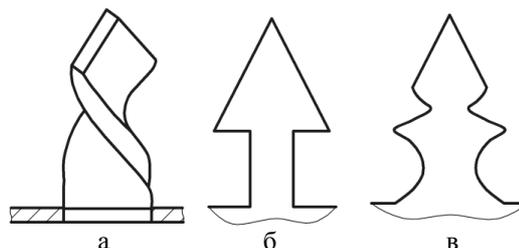


Рис. 9. Примеры заклинивающих элементов

Численные эксперименты, проведенные на основании рассмотренной расчетной схемы, результаты которых частично были сопоставлены с конечно-элементным моделированием, демонстрирующим неплохую сходимость ($\approx 20\%$). Из чего следует, что данное численное моделирование позволило определить эффективное условие введения трансверсального крепежного армирования в слоистый пакет КМ, испытывающий воздействие отрывной нагрузки. Мнение многих авторов сходится в том, что насыщение зоны соединения большим, чем $\theta = 4\%$, количеством крепежных элементов вызовет слишком неоднородное поле напряжений и приведет к потере прочности конструкции в плоскости монослоя. Экспериментальные исследования данного утверждения подтвердили, что такое насыщение зоны соединения трансверсальными элементами (z-штифтами) приводит к кратному увеличению прочности на отрыв и усталости соединения, с минимальными потерями прочности основного материала [4]. Экспериментальное исследование влияния неоднородности на свойства углепластиков демонстрировало неэффективность армирования более чем $\theta = 10\%$, превышение этого рубежа вызывает критическое падение прочности основного материала, в связи с чем дальнейший рост θ не имеет смысла [5]. Кроме того, достаточно часто, технологически больший процент армирования не реализуем в принципе. Анализ исследований усталостной прочности в [6], который проводился для стеклопластиковых экспериментальных образцов с $\theta = 4,4\%$ (пирамидальная форма крепежных элементов), а для более жестких образцов из углепластика, параметр θ достиг 7% (форма микроэлементов «гарпун»). Из чего следует, что достаточно часто в композитных конструкциях встречается трансверсальное армирование с θ больше 4%, а соответственно, используется разработанное условие эффективного трансверсального-армирования микрокрепежными элементами при действии отрывных усилий. Трансверсальное армирование малоразмерными крепежными элементами ($\theta = 1,75\%$) вызывает существенное по-

вышение межслойной прочности и общей жесткости материала, что, в свою очередь, приводит к увеличению прочности на отрыв в два раза и выводу соединений с таким КТР в зону малоциклового усталости уже при 30% от максимальной нагрузки для стеклопластика и 50% – для углепластика [7].

Хотя при реализации численных исследований применяли ряд допущений, с целью упрощения математического описания физических процессов в соединениях, а результаты требуют уточнения и поверочных дополнительных исследований и экспериментов, все же этими результатами можно очертить область применяемых материалов и КТР рассматриваемых соединений. Что в значительной мере снизит количество итераций при проектировании соединений, работающих на отрыв.

Заключение

Рассмотрена соединительная зона объемных (гибридных) соединений с микрокрепежными элементами, которые подвержены отрывному нагружению. Объектом данного исследования стал трансверсальный микрокрепежный элемент, заформованный в КМ.

Построены зависимости роста касательных напряжений, возникающих при действии отрывного усилия для разнообразного диапазона соотношения жесткости крепежного элемента и представительного элемента КМ соединительного слоя.

Численное исследование подтверждает эффективность трансверсального армирования по сравнению с простым адгезионным соединением, примерно в 2 раза, кроме того полученные результаты верифицировались посредством МКЭ. Конечно-элементное моделирование продемонстрировало сходимость в диапазоне погрешностей 15-20%. А запасы прочности говорят о малой эффективности пирамидальных микрокрепежных элементов, что подтверждает идею о применении заклинивающих микроэлементов.

Литература

1. Васильев, В. В. *Механика конструкций из композиционных материалов [Текст]* / В. В. Васильев. – М. : Машиностроение, 1988. – 264 с.
2. Карпов, Я. С. *Соединение деталей и агрегатов из композиционных материалов [Текст]* / Я. С. Карпов. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т “Харьк. авиац. ин-т”, 2006. – 359 с.
3. *Loctite: самые прочные в мире клеи становятся еще прочнее [Электронный ресурс]*. – Режим доступа: <http://www.luidor.by/pdf/epoxy.pdf>. – 16.01.2015.
4. Mouritz, A. P. *Review of z-pinned composite*

laminates [Text] / A. P. Mouritz // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2007. – Vol. 38. – P. 2383–2397.

5. Бекетова, А. С. *Экспериментальные исследования влияния трансверсальных крепежных элементов на свойства углепластиков [Текст]* / А. С. Бекетова, М. А. Шевцова // *Открытые информационные интегрированные технологии : сб. науч. тр. / Нац. аэрокосм. ун-т “Харьк. авиац. ин-т”*, 2014. – Вып. 63. – С. 53–60.

6. Бекетова, А. С. *Экспериментальные исследования усталостной прочности на отрыв конструктивно-технологических решений соединений [Текст]* / А. С. Бекетова // *Интегрированные компьютерные технологии в машиностроении : тез. док. Всеукр. науч.-техн. конф., 2014 г. – Харьков, 2014*. – С. 168.

7. Beketova, G. *Comparison of Hybrid Metal-Composite Small-Pin joints with Conventional Ones in Terms of Static and Fatigue Strength [Text]* / G. Beketova, M. Shevtsova, V. Symonov // *Applied Mechanics and Materials*. – 2016. – Vol. 821. – P. 479–485.

References

1. Vasil'ev, V. V. *Mekhanika konstruksii iz kompozitsionnykh materialov* [Mechanics of composite structures]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988. 264 p.
2. Karpov, Ya. S. *Soedinenie detalei i agregatov iz kompozitsionnykh materialov* [Connection parts and units of composite materials]. Kharkov, Nat. Aerospace Univ. “KhAI” Publ., 2006. 359 p.
3. *Loctite: samye prochnye v mire klei stanovyatsya eshche prochnee* [Loctite: the strongest glues in the world become even stronger]. Available at: <http://www.luidor.by/pdf/epoxy.pdf>. (accessed 16.01.2015).
4. Mouritz, A. P. Review of z-pinned composite laminates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2007, vol. 38, pp. 2383 – 2397.
5. Beketova, A. S., Shevtsova, M. A. *Eksperimental'nye issledovaniya vliyaniya transversal'nykh krepzhnykh elementov na svoistva ugleplastikov* [Experimental study of the effect of transversal fastening elements on the properties of CFR plastics]. *Trudy Nats. aerokosm. un-t “Khark. aviats. in-t” «Otkrytye informatsionnye integrirovannye tekhnologii»* [Proc. Nat. Aerospace Univ. “KhAI” «Open information integrated technologies»], 2014, no. 63, pp. 53–60.
6. Beketova, A. S. *Eksperimental'nye issledovaniya ustalostnoi prochnosti na otryv konstruktivno-tekhnologicheskikh reshenii soedinenii* [Experimental study of the fatigue strength of the pull structural and technological solutions of joints] *Integrirovannye komp'yuternye tekhnologii v mashinostroenii : tez. dok. Vseukr. Nauch.-tekh. konf., 2014* [Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering : Thes. Rep. All-Ukr. Sci. Conf., 2014]. Kharkov, 2014, pp. 168.

7. Beketova, G., Shevtsova, M., Symonov, V. Fatigue Strength. *Applied Mechanics and Materials*, Comparison of Hybrid Metal-Composite Small-Pin joints with Conventional Ones in Terms of Static and 2016, vol. 821, pp. 479 – 485.

Поступила в редакцию 1.04.2016, рассмотрена на редколлегии 14.04.2016

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН ЗАФОРМОВАНИХ КРІПІЛЬНИХ МІКРОЕЛЕМЕНТІВ ПРИ ТРАНСВЕРСАЛЬНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Г. С. Бекетова, М. А. Шевцова, Я. С. Карпов

Запропоновано спосіб визначення напружено-деформованого стану заформованого мікрокріпильного елемента при трансверсальному навантаженні. Методика дозволяє перейти від об'ємної задачі до плоскої одновимірної задачі простого адгезійного з'єднання і визначити діючі дотичні напруження. В основі методу лежить перехід до наведених площ або периметру кріпильного елемента в представницькому трансверсально-армованому елементі композиційного матеріалу, навантаженого перпендикулярно площині. Проведено визначення пружних характеристик представницького елемента через приведений діаметр з метою подальшого розрахунку дотичних напружень за класичною моделлю з'єднувального шару та моделі Фолькерсена. Дану методику застосовно при ітераційному проектуванні об'ємних (гібридних) з'єднань, що працюють на відрив. Володіючи інформацією щодо граничних дотичних напружень з'єднувального шару, завдяки методиці, що представлено, можна оцінити (прогнозувати) несучу здатність розглянутих конструктивно-технологічних рішень з'єднань.

Ключові слова: напружено-деформований стан, трансверсальне навантаження, композиційний матеріал, кріпильний елемент, дотичні напруження, рівняння рівноваги, рівняння спільності деформацій.

STRESS-STRAIN STATE OF THE MOLDED FIXING MICROELEMENTS UNDER A TRANSVERSAL LOADING

A. S. Beketova, M. A. Shevtsova, Ya. S. Karpov

A method for determining the stress-strain state of the molded micro fastener element in transverse loading. The method allows passing on the bulk of the problem to a flat one-dimensional problem of simple adhesive bonding and defining tangential stresses. The method is based on the transition to given areas or the perimeter of the fastener in a representative element transversely reinforced composite material loaded perpendicular to the plane. Produced determining the elastic characteristics of the representative element for further calculation of shear stresses on the classical model of a connecting layer and Wolkersen's model. This technique is useful in iterative design volume (hybrid) of the compounds employed in the lead. With information about the limit shear stress tie layer due to the method presented, we can estimate (predict) the carrying capacity of the considered structural and technological solutions of the compounds.

Key words: stress-strain state, transverse loading, composite material, fastening element, shear stresses, equilibrium equation, the equation of compatibility of strains.

Бекетова Анна Сергеевна – мл. науч. сотр. кафедры композитных конструкций и авиационного материаловедения, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, Украина, e-mail: a.c.beketova@gmail.com.

Шевцова Марина Анатольевна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры композитных конструкций и авиационного материаловедения, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, Украина, e-mail: shevmar@d4.khai.edu.

Карпов Яков Семенович – д-р техн. наук, профессор, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, Украина.

Beketova Anna Sergeevna – Junior Researcher of Dept. of composite structures and aviation materials science, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: a.c.beketova@gmail.com.

Shevtsova Marina Anatol'evna – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Dept. of composite structures and aviation materials science, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: shevmar@d4.khai.edu.

Karpov Yakov Semenovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine.