

## Напряженно-деформированное состояние клеештифто-болтового соединения высоконагруженных деталей из композитов

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*

Приведена обобщенная методика оценки напряженно-деформированного состояния комбинированного металлокомпозитного соединения. Рассмотренное конструктивное решение соединения используется для агрегатов с ограниченными габаритами, например, для стыковых узлов малогабаритных крыльев. Получены инженерные формулы для определения усилий в соединяемых деталях и клее с учетом влияния температуры. Разработанная методика позволяет проводить расчет на прочность и оценку усилий в многорядных клеештифтовых соединениях, используя принцип суперпозиции.

**Ключевые слова:** металлокомпозитное соединение, податливость, температурные напряжения, болтовое соединение.

В конструкциях агрегатов современных летательных аппаратов все чаще используются сочетания разнородных материалов и конструктивно-технологических решений, каждое из которых выполняет определенную специальную функцию. Так, в случае соединения элементов конструкций из полимерных композитов и металлических сплавов для обеспечения эффективной передачи нагрузки и корректного решения ряда проблем, связанных с малой прочностью композитов на сдвиг и смятие, следует применять специальные КТР соединений. Наиболее эффективными и актуальными решениями являются соединения и стыки, которые максимально интегрируются в конструкцию при ее изготовлении и сводят к минимуму искажения исходной структуры композита. В работах [1, 2] рассмотрены варианты возможной практической реализации таких решений, которые основаны на использовании продольных и трансверсальных крепежных микроэлементов. Для ряда агрегатов, например малогабаритных крыльев, ввиду ограниченности их размеров не всегда удается реализовать в полной мере наиболее рациональный переход от металла к композиту (рис. 1, а). В таких случаях целесообразно использовать комбинированное конструктивно-технологическое решение стыкового узла, т.е. усиливать композитную деталь металлической накладкой, через которую будет передаваться часть нагрузки, а также использовать традиционные болты, воспринимающие и передающие на металлическую деталь остальную часть нагрузки (рис. 1, б). В общем случае такое комбинированное соединение может содержать несколько рядов болтов по длине соединения.

Расчет на прочность таких соединений состоит как минимум из двух этапов:

- определение усилий в одно- или многорядном болтовом (заклепочном, штифтовом и др.) соединении согласно классическому подходу [1, 2];
- определение НДС клеештифтового соединения при известной доле нагрузки, передаваемой исключительно болтами.

Для практической реализации второго этапа необходимо использовать решение для определения НДС соединения, нагруженного в своих пределах [3].

При наличии температурного поля соответствующие составляющие компонентов напряжений также могут быть определены независимо от механических компонент.

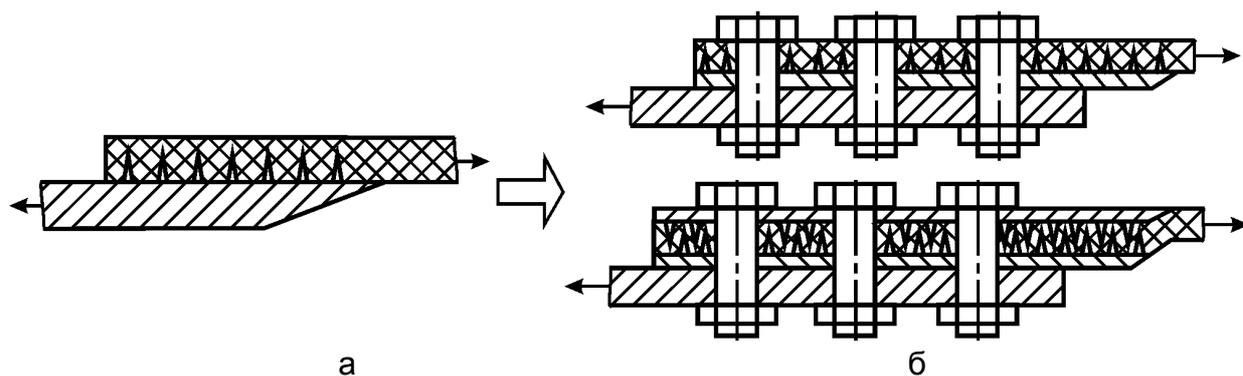


Рис. 1. Переход от соединения с трансверсальными микроэлементами к комбинированному КТР

Полное НДС комбинированного соединения определяется на основе принципа суперпозиции. Расчетная схема для частного случая упрощенного (с одним рядом болтов по ширине) комбинированного соединения длиной  $l$  и шириной  $b$  изображена на рис. 2.

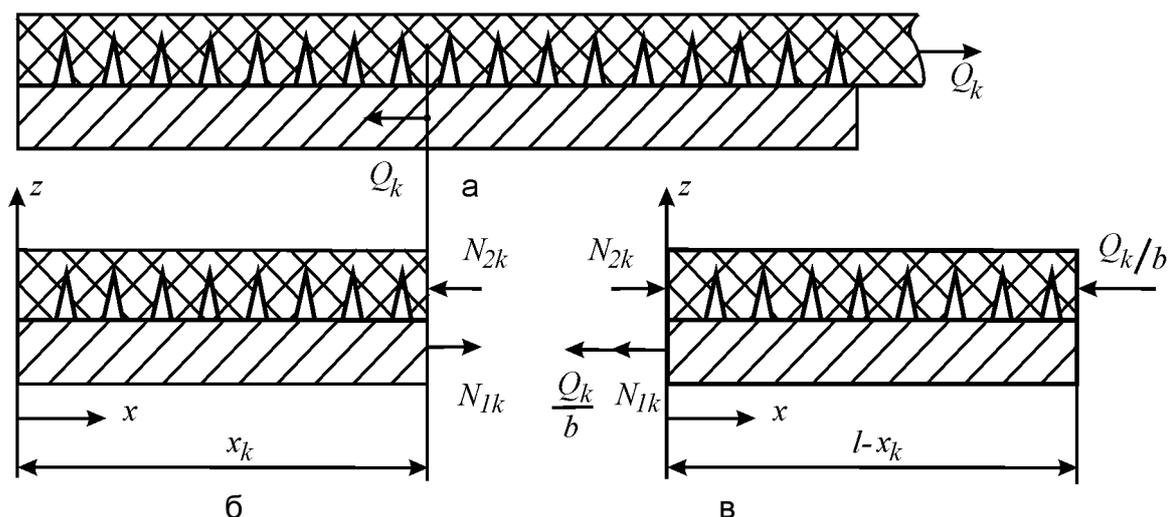


Рис. 2. Расчетная схема элементов комбинированного соединения с одним рядом болтов: а – соединение в целом; б – условно отсеченная левая часть соединения (без болтов); в – условно отсеченная левая часть соединения (с учетом усилия, передаваемого болтами)

Введем определенные допущения при анализе НДС такого КТР. Теоретически возможно изготавливать как композитную, так и металлическую законцовки с переменными параметрами по длине. Более того, как показали исследования, проведенные в ХАИ [1], несущая способность таких соединений будет наибольшей при прочих равных условиях. Но реализовать практически такие КТР достаточно сложно и зачастую не оправдано экономически ввиду необходимости изготовления штифтов разной высоты, более сложной их геометрии, необходимости их установки на наклонной поверхности, точного позиционирования (укладки) различного количества слоев препрега и ряда других причин. Поэтому предположим, что детали имеют постоянную жесткость по длине соединения.

Согласно методике расчета адгезионных соединений, представленной в [1, 2], неизвестные погонные усилия  $N_{1k}$  и  $N_{2k}$  находятся из условия равенства углов сдвига соединительного слоя левой части соединения при  $x = x_k$  (рис. 2, б) и второй части соединения при  $x = 0$  (рис. 2, в).

Касательные напряжения  $\tau_{xk}$  в клеевом слое левой части соединения определяют по формуле [1, 2, 3]

$$\tau_{xk1} = -\frac{KN_{1k}}{shKx_k} chKx, \quad (1)$$

где  $K^2 = \frac{\Pi_{1x} + \Pi_{2x}}{\Pi_{cx}}$ ;  $\Pi_{1x} = \frac{1}{\delta_1 E_{1x}}$ ;  $\Pi_{2x} = \frac{1}{\delta_2 E_{2x}}$ ;

$\Pi_{cx} = \frac{\delta_k}{G_k}$  – в случае использования классической модели соединительного

слоя;

$\Pi_{cx} = \frac{\delta_1}{2G_{1xz}} + \frac{\delta_2}{2G_{2xz}} + \frac{\delta_k}{G_k}$  – в случае использования для соединительного

слоя модели Фолькерсена;

$\delta_1, \delta_2, \delta_k$  – толщина деталей 1, 2 и клея;

$E_{1x}, E_{2x}, G_{1xz}, G_{2xz}, G_k$  – модули упругости и сдвига деталей 1, 2 и модуль сдвига клея.

В начале (0) и конце ( $x_k$ ) левой части соединения касательные напряжения

$$\tau_{xk1}(0) = -\frac{KN_{1k}}{shKx_k}; \quad \tau_{xk1}(x_k) = -\frac{KN_{1k}}{shKx_k} chKx_k.$$

Характер изменения касательных напряжений по длине левой части соединения показан на рис. 3.

Касательные напряжения во второй (правой) части соединения  $\tau_{xk2}$  могут быть аналогично найдены по формулам

$$\tau_{xk2} = C_1 shKx + C_2 chKx, \quad (2)$$

где  $C_1 = -KN_{1k} - \frac{Q_k \Pi_{1x}}{bK \Pi_{cx}}$ ;  $C_2 = KN_{1k} \frac{chK(l-x_k)}{shK(l-x_k)} + \frac{Q_k [\Pi_{2x} + \Pi_{1x} chK(l-x_k)]}{bK \Pi_{cx} shK(l-x_k)}$ .

Значения касательных усилий на концах правой части соединения равны:

$$\tau_{xk2}(0) = C_2; \quad \tau_{xk2}(l-x_k) = C_1 shK(l-x_k) + C_2 chK(l-x_k).$$

Для нахождения неизвестной реакции  $N_{1k}$  составим уравнение совместности деформации клеевого слоя левого и правого участков деталей:

$$\gamma_{xk1}(x_k) = \gamma_{xk2}(0)$$

или в зависимости от принятой модели соединительного слоя:

$$\tau_{xk1}(x_k) / G_k = \tau_{xk2}(0) / G_k \text{ – для классической модели;}$$

$$\tau_{xk1}(x_k) / G_c = \tau_{xk2}(0) / G_c \text{ – для модели Фолькерсена,}$$

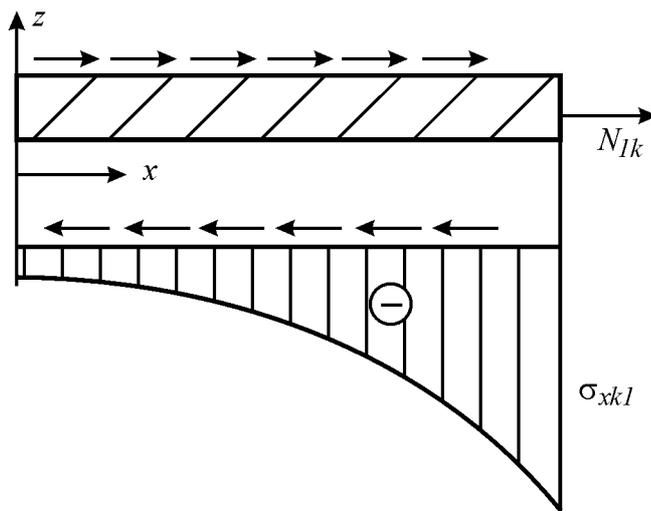


Рис. 3. Распределение касательных напряжений в клеевом слое левой части соединения

$$\text{где } G_c = \left( \frac{\delta_1}{2} + \frac{\delta_2}{2} + \delta_k \right) \left( \frac{\delta_1}{2G_{1xz}} + \frac{\delta_2}{2G_{2xz}} + \frac{\delta_k}{G_k} \right)^{-1}.$$

Так как жесткостные характеристики клея и деталей не зависят от координаты  $x$ , то для обеих моделей соединительного слоя верно тождество

$$\tau_{xk1}(x_k) = \tau_{xk2}(0).$$

Согласно формулам (1) и (2) касательные напряжения  $\tau_{xk1}(x_k)$  и  $\tau_{xk2}(0)$  могут быть определены так:

$$\begin{aligned} \tau_{xk1}(x_k) &= -K \frac{chKx_k}{shKx_k} N_{1k}; \\ \tau_{xk2}(0) &= K \frac{chK(l-x_k)}{shK(l-x_k)} N_{1k} + \frac{Q_k [\Pi_{2x} + \Pi_{1x}chK(l-x_k)]}{bK\Pi_{cx}shK(l-x_k)}. \end{aligned}$$

Приравняв эти выражения и разрешив это равенство относительно  $N_{1k}$ , получим

$$N_{1k} = -\frac{Q_k [\Pi_{2x} + \Pi_{1x}chK(l-x_k)]shKx_k}{bK^2\Pi_{cx}shKl}. \tag{3}$$

Теперь, используя формулы (1), (2), можно найти функцию распределения касательных напряжений по длине соединения и найти экстремумы на концах соединения

$$\begin{aligned} \tau_{xk1}(x) &= \frac{Q_k [\Pi_{2x} + \Pi_{1x}chK(l-x_k)]}{bK\Pi_{cx}shKl} chKx; \\ \tau_{xk2}(x) &= \frac{Q_k}{bK\Pi_{cx}shKl} [\Pi_{1x}chK(l-x_k-x)chKx_k + \Pi_{2x}chK(x_k-x)]. \end{aligned} \tag{4}$$

Температурные напряжения в соединении определяют по известной формуле [1]

$$\tau_{xT} = \Delta T \frac{(\alpha_{2x} - \alpha_{1x})}{K \Pi_{cx} \operatorname{sh} Kl} [chKx - chK(l-x)]. \quad (5)$$

Оценим величины касательных напряжений для конкретного клеештифтоболтового соединения, изображенного на рис. 4.

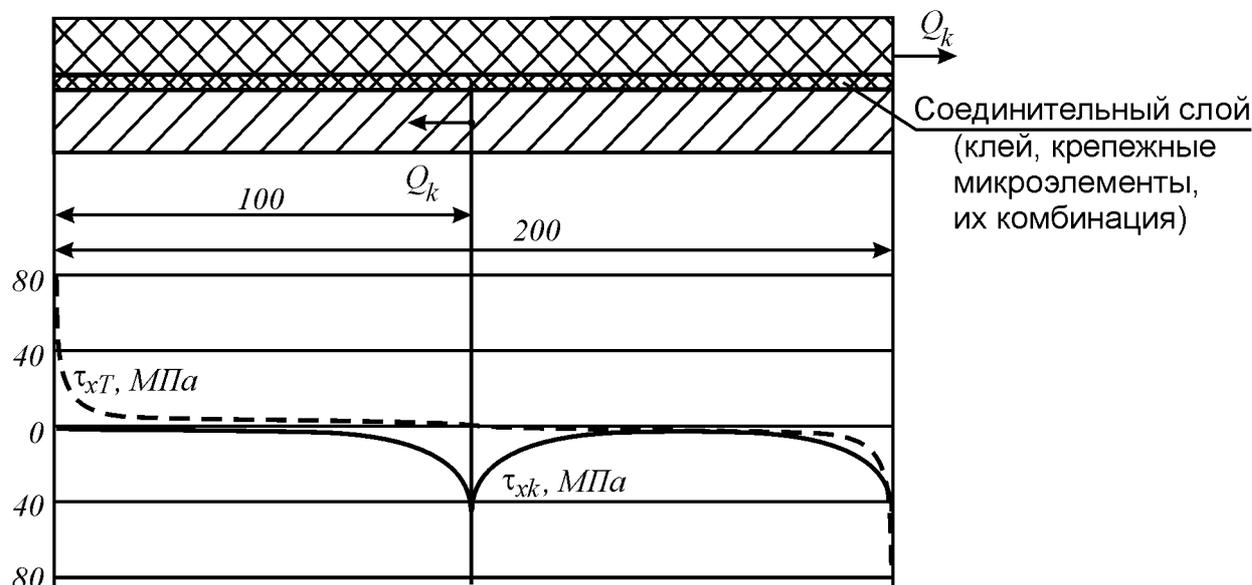


Рис. 4. Распределение касательных напряжений в соединительном слое от силового воздействия (сплошная линия) и температуры (пунктирная линия)

Зададимся свойствами материала и геометрическими размерами соединения:  $E_{1x}=200$  ГПа;  $E_{2x}=150$  ГПа;  $G_{1xz}=80$  ГПа;  $G_{2xz}=20$  ГПа;  $G_k=5$  ГПа;  $\delta_1=\delta_2=5$  мм;  $\delta_k=0,1$  мм, ширина соединения  $b=50$  мм, длина  $l=200$  мм, координата установки болта  $x_k=100$  мм, коэффициенты температурного расширения деталей:  $\alpha_1=10 \cdot 10^{-6}$  1/К,  $\alpha_2=5 \cdot 10^{-6}$  1/К, возможный перепад температуры  $\Delta T = 100^\circ \text{C}$ .

Рассчитав податливость соединительного слоя для классической модели, по формуле (3) можно найти соотношение между усилием в детали 1 и нагрузкой, передаваемой болтами:  $N_{1k} = -Q_k \cdot 5,35$ , где числовой коэффициент имеет размерность 1/м. Для простоты анализа предположим, что в данном соединении установлен всего один болт из стали 30ХГСА, имеющий две плоскости среза. Тогда предельная нагрузка среза, который может передать этот болт составит около 25 кН. Подставив это значение в формулы (4), можно получить функцию распределения касательных напряжений в данном конкретном соединении. График этой функции изображен на рис. 4 сплошной линией. Максимальное значение напряжений возникает в месте установки болта и составляет 46 МПа. График распределения температурных напряжений в соединительном слое по длине описывается формулой (5) и изображен на рис. 4 пунктирной линией. Максимальные значения температурных напряжений возникают по краям соединения и составляют 73 МПа. Следует отметить, что при сложении силовых и температурных напряжений они практически не компенсируют друг друга.

Таким образом, разработана методика определения НДС металло-композитных клеештифтовых соединений, нагруженных силой в пределах соединения. Применение принципа суперпозиции позволяет использовать разработанный подход для оценки НДС соединений с произвольным количеством рядов крепежа.

### Список литературы

1. Карпов, Я.С. Соединения деталей и агрегатов из композиционных материалов [Текст] / Я.С. Карпов. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, 2006. – 359 с.
2. Карпов, Я.С. Проектирование деталей и агрегатов из композитов [Текст]: учебник / Я.С. Карпов. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, 2010. – 768 с.
3. Карпов, Я.С. Проектирование соединений деталей из композиционных материалов [Текст]: учеб. пособие / Я.С. Карпов, С.П. Кривенда. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, 2012. – 128 с.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. каф. В.Е. Гайдачук, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.

Поступила в редакцию 12.12.12

## Напружено-деформований стан клеєштифто-болтового з'єднання високонвантажених деталей із композитів

Наведено узагальнену методику оцінювання напружено-деформованого стану комбінованого металокомпозитного з'єднання. Розглянуте конструктивне рішення з'єднання використовується для агрегатів з обмеженими габаритами, наприклад стикових вузлів малогабаритних крил. Отримано інженерні формули для визначення зусиль у деталях, що з'єднуються, та клеї з урахуванням впливу температури. Розроблена методика дозволяє виконувати розрахунок на міцність і оцінювання зусиль у багаторядних клеєболтових з'єднаннях за допомогою принципу суперпозиції.

**Ключові слова:** металокомпозитне з'єднання, податливість, температурні напруження, болтове з'єднання.

## Stress-strain state of adhesive-pin-bolt joint for high-loaded composite articles

Generalized method for determination stress-strain state of combined metal-composite joint is developed. Mentioned structural solution of joint is used in units with restricted overall dimensions, for example, for joining fuselage with low-dimension wing. Engineering formulas for determination loads in joining articles and adhesive layer taking into account temperature influence are obtained. Suggested method permits to conduct strength analysis and estimation loads in multi-row adhesive-bolt joints using superposition principle.

**Key words:** metal-composite joint, compliance, thermal stress, bolt joint.