

УДК 629.7.02.01:620.22-419

Ф. М. ГАГАУЗ, В. В. ГУМЕННИКОВ

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина

РАСЧЕТ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СОЕДИНИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Предложен метод стыковки панелированных элементов композитных конструкций на основе соединительного элемента, изготавливаемого методом плоской намотки на станках с численным программным управлением. Разработана аналитическая методика расчета несущей способности клевого (адгезионного) соединения на основе одномерных моделей (классическая модель и модель Фолькерсена). Проведены параметрические исследования по определению касательных напряжений в кле и дана сравнительная оценка полученных результатов с результатами расчета методом конечных элементов.

Ключевые слова: композиционный материал, соединительный элемент, клевое соединение, расчетная модель, касательные напряжения.

Введение

Для соединения композитных деталей между собой и с другими деталями из традиционных для авиастроения сплавов в настоящее время используются классические способы реализации механических (точечных) и поверхностных (адгезионных) соединений. Следует отметить, что при организации стыковых узлов на основе стыковых соединений (болтовых, заклепочных и т.д.) необходимо учитывать присущие всем композиционным материалам (КМ) недостатки, такие как низкая межслоевая прочность, межплоскостная прочность и контактная прочность. Во-вторых, реализация механических соединений деталей из КМ с использованием существующей номенклатуры крепежных элементов предусматривает сверление отверстий, а значит и удаление основного материала (армирующих волокон), отвечающего за восприятие и передачу нагрузки. В результате проектирования соединений с учетом указанных факторов масса, вносимая этими соединениями (крепеж, усиление детали и т.д.) в общую массу конструкции, может быть достаточно большой.

Применение клеевых соединений, для организации соединительных узлов, является наиболее естественным для деталей из КМ, ввиду схожести протекания физико-химических процессов, поэтому указанные выше недостатки проявляются в меньшей степени. Одним из факторов, ограничивающих область применения традиционных адгезионных (клеевых) соединений, является их малая (по сравнению с механическими соединениями) несущая способность. В связи с этим актуальным является разработка альтернативных конструктивно-технологических решений (КТР) клеевых соединений, методик их расчета, которые бы обеспечили наиболее полную реализацию высокой удельной прочности композитных деталей при заданном уровне несущей способности соединения.

Одним из таких КТР является использование соединительного элемента (рис. 1, а, в) [1], изготавливаемого намоткой нитями или ровингом, который может применяться как для соединения однородных по толщине деталей, так и для стыковки панелей с наполнителем (типа «сэндвич»).

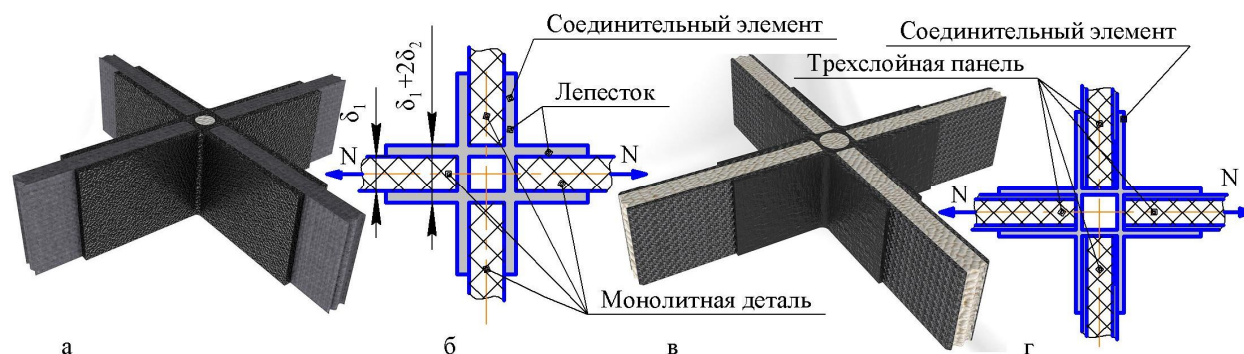


Рис. 1. Расчетная модель соединения монолитной детали с соединительным элементом

В качестве возможных областей применения соединительного элемента могут рассматриваться стыки панелей пола, обшивки между собой и с элементами каркаса (лонжеронами, нервюрами), а также соединение элементов каркаса между собой.

Постановка и решение задачи

Несущая способность соединений на основе соединительного элемента определяется и обеспечивается прочностью склеивания лепестков профиля к деталям (рис. 1, б, г).

На краях адгезионного соединения касательные (сдвиговые) напряжения достигают своего максимального значения, поэтому условие прочности можно записать в следующем виде

$$\tau_{\max} = \max [\tau_x(0), \tau_x(L)] \leq [\tau]_к, \quad (1)$$

где $[\tau]_к$ – предел прочности соединительного слоя на сдвиг;

$\tau_x(0), \tau_x(L)$ – напряжение на концах соединения.

В качестве величины $[\tau]_к$ следует принять минимальное из пределов прочности клея на сдвиг и межслойной прочности КМ $\tau_{мс}$, т.е.

$$[\tau]_к = \min(\tau_к, \tau_{мс}). \quad (2)$$

Максимальные касательные напряжения в соединительном слое согласно [2] определяются по формулам

$$\begin{aligned} \tau_x(0) &= \kappa \cdot N' \cdot \frac{\Pi_{1x} \cdot \text{chkL} + \Pi_{2x}}{b \cdot (\Pi_{1x} + \Pi_{2x}) \cdot \text{shkL}}; \\ \tau_x(L) &= \kappa \cdot N' \cdot \frac{\Pi_{1x} + \Pi_{2x} \cdot \text{chkL}}{b \cdot (\Pi_{1x} + \Pi_{2x}) \cdot \text{shkL}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь обозначено:

Π_{1x}, Π_{2x} – податливости соединяемых деталей

$$\Pi_{1x} = \frac{1}{\delta_1 E_{1x}}; \quad \Pi_{2x} = \frac{1}{\delta_2 E_{2x}}; \quad (4)$$

N', N – действующая сила в лепестке и в детали, $N' = 0,5 \cdot N$;

b – высота соединительного элемента;

$$\kappa^2 = \frac{\Pi_{1x} + \Pi_{2x}}{\Pi_{3x}} \text{ – коэффициент.} \quad (5)$$

Податливость соединительного слоя Π_{3x} может быть определена по двум моделям. Для классической модели, при которой соединяемые детали трактуются как абсолютно жесткие на сдвиг, в качестве соединительного слоя рассматривается клей, и тогда справедлива формула

$$\Pi_{3x} = \frac{\delta_к}{G_к}, \quad (6)$$

где $\delta_к$ и $G_к$ – толщина и модуль сдвига клея.

Второй подход к расчету несущей способности клеевых соединений заключается в использовании модели Фолькерсена, которая основана на том, что сдвиговые деформации будут возникать не только в клее, но и в половинах толщин соединяемых деталей. Тогда податливость соединительного слоя рассчитывается как

$$\Pi_{3x} = \frac{\delta_к}{G_к} + \frac{\delta_1^*}{2G_{1xz}} + \frac{\delta_2}{2G_{2xz}}, \quad (7)$$

где G_{1xz}, G_{2xz} – модули при межслойном сдвиге соединяемых деталей;

$\delta_1^* = 0,5 \cdot \delta_1$ – расчетная толщина соединяемой однородной детали;

$\delta_1^* = \delta_1$ – толщина, равная толщине несущего слоя при соединении трехслойных панелей.

Классическая модель соединительного слоя приводит к большим значениям напряжений, чем модель Фолькерсена. Учитывая, что объективный неразрушающий контроль клеевого соединения затруднен, разработчики чаще используют первую модель, которая приводит к большим значениям потребной длины, т.е. косвенно обеспечивается запас прочности и условно «снижается» риск разрушения соединения вследствие несовершенств (дефектов, неравномерного нанесения клеевого слоя (подслоя) по поверхностям склейки, в результате неравномерного обжатия лепестков при склейке).

Расчетные схемы адгезионного соединения соединительного элемента с однородной по толщине деталью и трехслойной панелью представлены на (рис. 2, а, б).

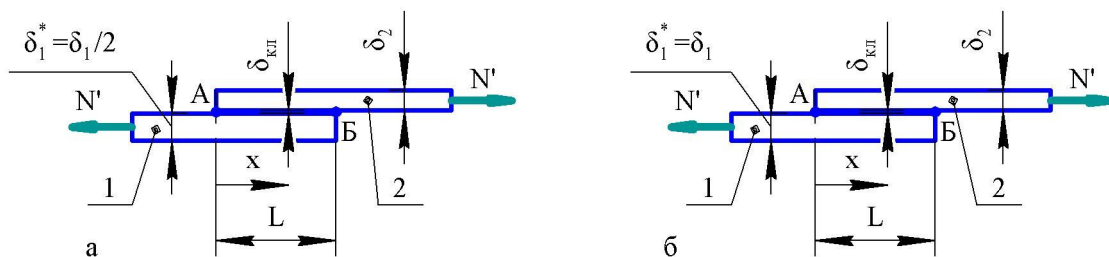


Рис. 2. Расчетная модель зоны соединения панели с соединительным элементом

Анализ формул (3) показывает, что с увеличением длины соединения максимальные напряжения на концах стремятся к асимптотическим значениям. На (рис. 3, а) показано изменение напряжений в соединительном слое при следующих исходных данных (расчетная схема (рис. 2, б)): $N = 10\text{кН}$, $\delta_k = 0,1\text{мм}$, $b = 10\text{мм}$, $G_k = 1\text{ГПа}$, $\delta_1 = 3\text{мм}$, $\delta_2 = 1,5\text{мм}$, $G_{1xz} = G_{2xz} = 4\text{ГПа}$, $E_{1x} = E_{2x} = 100\text{ГПа}$. В случае, когда податливость второй детали (лепестка соединительного элемента) больше податливости первой, максимальное значение касательных напряжений наблюдаются на конце соединения (точка Б, рис. 3, а). В соединениях, у которых податливость первой детали выше податливости второй, максимальное значение касательных напряжений наблюдается в точке А (для тех же исходных данных, кроме $\delta_1 = 1,5\text{мм}$, $\delta_2 = 3\text{мм}$) (рис. 3, б). Как видно из (рис. 3, а, б) дальнейшее увеличение длины лепестка не приводит к снижению напряжений на концах. В связи с этим представляет интерес определение предельной длины лепестка $L_{пр}$, после которого максимальные напряжения отличаются от асимптотических на наперед заданную величину.

Эта задача решена в [2], но для деталей с одинаковой податливостью. Специфической особенностью соединительного элемента является его изготовление намоткой нитями или ровингом, что предопределяет однонаправленную структуру КМ, а присоединяемая деталь может иметь сложноармированную структуру. Поэтому актуальным является определение предельной длины склейки для общих случаев.

Для определения $L_{пр}$ сформулируем условие, при котором дальнейшее увеличение длины соединения приведет к снижению пиковых напряжений не более чем на заданную малую величину ξ :

$$\frac{\tau_x(0) - \tau_{\min}(0)}{\tau_x(0)} \leq \xi; \tag{8}$$

$$\frac{\tau_x(L) - \tau_{\min}(L)}{\tau_x(L)} \leq \xi.$$

Здесь обозначено:

$\tau_{\min}(0)$, $\tau_{\min}(L)$ – напряжение на концах соединения (в точках А и Б, рис. 2) при $L \rightarrow \infty$:

$$\tau_{\min}(0) = \frac{\kappa \cdot N' \cdot \Pi_{1x} \cdot \text{ch}\kappa L}{b \cdot (\Pi_{1x} + \Pi_{2x}) \cdot \text{sh}\kappa L}; \tag{9}$$

$$\tau_{\min}(L) = \frac{\kappa \cdot N' \cdot \Pi_{2x} \cdot \text{ch}\kappa L}{b \cdot (\Pi_{1x} + \Pi_{2x}) \cdot \text{sh}\kappa L}.$$

После подстановки в (8) формул (3) и (9), а также некоторых преобразований, получим

$$\text{ch}\kappa L_H \geq \frac{\Pi_{2x}(1-\xi)}{\Pi_{1x}\xi}; \tag{10}$$

$$\text{ch}\kappa L_K \geq \frac{\Pi_{1x}(1-\xi)}{\Pi_{2x}\xi},$$

где L_H , L_K – значение длины соединения, при котором можно считать, что максимальные напряжения в начале и в конце соединения приблизительно равны своим асимптотическим значениям.

Пренебрегая величиной $e^{-\kappa L}$ по сравнению с $e^{\kappa L}$, преобразуем условие (10) к следующему виду

$$e^{\kappa L_H} \geq \frac{2\Pi_{2x}(1-\xi)}{\Pi_{1x}\xi}; \tag{11}$$

$$e^{\kappa L_K} \geq \frac{2\Pi_{1x}(1-\xi)}{\Pi_{2x}\xi}.$$

После логарифмирования этих выражений получим формулы для определения L_H и L_K :

$$L_H \geq \frac{1}{\kappa} \ln \left[\frac{2\Pi_{2x}(1-\xi)}{\Pi_{1x}\xi} \right]; \tag{12}$$

$$L_K \geq \frac{1}{\kappa} \ln \left[\frac{2\Pi_{1x}(1-\xi)}{\Pi_{2x}\xi} \right].$$

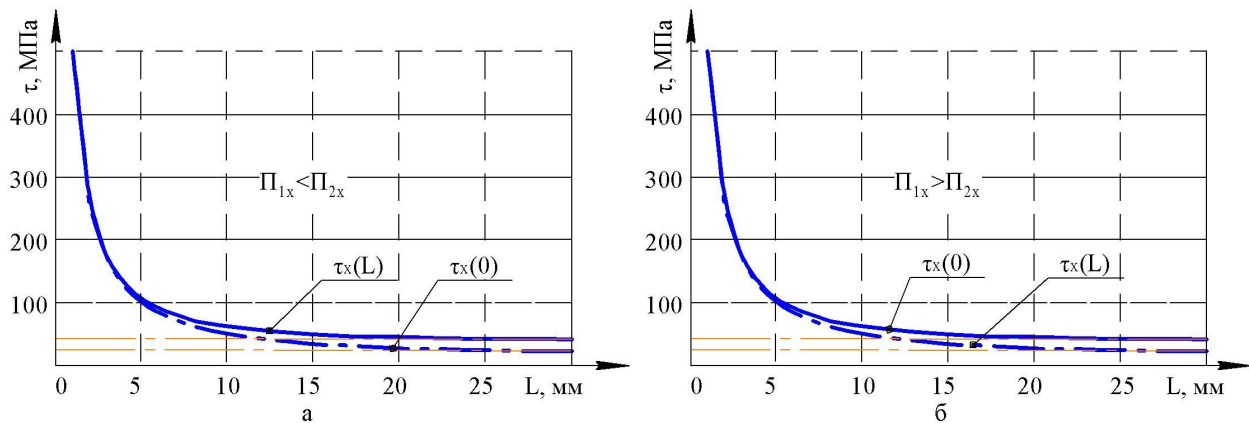


Рис. 3. Зависимость максимальных напряжений в клеевом слое от длины соединения

При $\Pi_{1x} / \Pi_{2x} = 0,5, \dots, 2$ и $\xi = 0,03$ прогно- стические оценки длины соединения, после которой максимальные напряжения существенно не снижа- ются (рис. 4), приведят к следующим результатам:

$$[L_n, L_k] = \frac{1}{\kappa} (3,476, \dots, 4,862). \quad (13)$$

Большой практический интерес представляет определение максимально реализуемой несущей способности соединительного элемента. Для этого из уравнения (3) выразим N' и, проведя некоторые преобразования, получим формулу для определения теоритически возможной несущей способности [2]:

$$N = \kappa [\tau] \Pi_{3x} \text{sh}\kappa L \times \times \min \left\{ \frac{1}{\Pi_{1x} \text{ch}\kappa L + \Pi_{2x}}, \frac{1}{\Pi_{1x} + \Pi_{2x} \text{ch}\kappa L} \right\}. \quad (14)$$

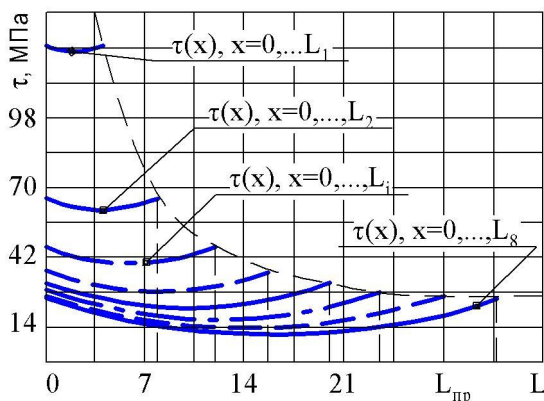


Рис. 4. Влияние длины соединения на распределение напряжений в соединительном слое

С ростом длины соединения $\text{sh}\kappa L \rightarrow \infty$ и $\text{ch}\kappa L \rightarrow \infty$, т.е. в формуле (14) имеем неопределенность типа ∞ / ∞ , для разрешения которой воспользуемся правилом Лопиталья [3]. Тогда асимптотическое значение N_{max} (рис. 5), с учетом того, что $\text{cth}\kappa L \rightarrow 1$, определяется по формуле

$$N_{\text{max}} = \kappa \cdot [\tau] \cdot \Pi_{3x} \cdot \min \left\{ \frac{1}{\Pi_{1x}}, \frac{1}{\Pi_{2x}} \right\}. \quad (15)$$

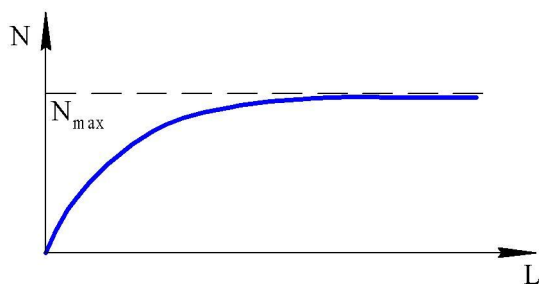


Рис. 5. Зависимость несущей способности соединения от длины лепестка

На (рис. 6) приведены результаты сравнительного анализа расчетных значений касательных напряжений в клеевом слое, полученных с использованием предложенной методики (классическая модель и модель Фолькерсена) и метода конечных элементов (МКЭ) (двухмерная и трехмерная модель соединения) для следующих исходных данных:

$$\delta_k = 0,1\text{мм}, b = 10\text{мм}, G_k = 1\text{ГПа}, \delta_1 = \delta_2 = 1,5\text{мм}, G_{1xz} = G_{2xz} = 4\text{ГПа}, E_{1x} = E_{2x} = 100\text{ГПа}, N = 10\text{кН}.$$

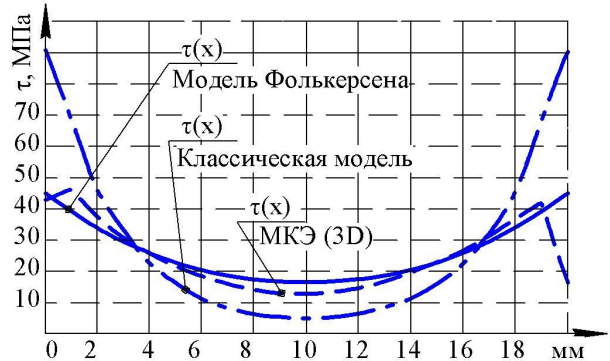


Рис. 6. Распределение касательных напряжений по длине лепестка

Выводы

В данной работе предложено КТР стыковки панелированных элементов конструкции из КМ на основе использования соединительного элемента. Для прогнозирования несущей способности клеевого соединения деталей на основе аналитического подхода разработана методика расчета и получены зависимости, которые могут использоваться при проектировании соединительного элемента. Проведенные параметрические исследования свидетельствуют о хорошей сходимости результатов аналитического расчета с результатами численного расчета МКЭ. С учетом того, что полученные результаты аналитического расчета касательных напряжений в клее обеспечивают некоторый запас прочности, полученные расчетные зависимости могут быть использованы для определения потребных геометрических параметров соединительного элемента.

Литература

1. Гуменников, В. В. Применение соединительных профилей из композитов в аэрокосмической технике [Текст] / В. В. Гуменников // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. – Х., Нац. аэрокосм.

ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2010. – Вып. 58. – С. 63 – 67.

2. Карпов, Я. С. Проектирование деталей и агрегатов из композитов [Текст] : учебник / Я. С. Карпов. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т им.

Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2010. – 768 с.

3. Крейн, С. Г. Математический анализ элементарных функций [Текст] / С. Г. Крейн, В. Н. Ушакова. – М. : Физматгиз, 1963. – 168 с.

Поступила в редакцию 03.12.2013, рассмотрена на редколлегии 11.12.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. авиационного материаловедения Я. С. Карпов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

РОЗРАХУНОК НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ З'ЄДНУВАЛЬНОГО ЕЛЕМЕНТУ З КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Ф. М. Гагауз, В. В. Гуменніков

Запропоновано метод стикування панельних елементів композитних конструкцій на основі з'єднувального елемента, що виготовляється методом намотування. Розроблено аналітичну методику розрахунку несучої здатності клейового з'єднання на основі одновимірних моделей. Проведено параметричні дослідження з визначення дотичних напружень в клеї, та дана порівняльна оцінка отриманих результатів з результатами розрахунку методом скінчених елементів.

Ключові слова: композиційний матеріал, з'єднувальний елемент, клейове з'єднання, розрахункова модель, дотичні напруження.

ANALYSIS OF LOAD BEARING CAPACITY OF THE COMPOSITE JOINING ELEMENT

F. M. Gagauz, V. V. Gumennikov

Method for butt joining of the composite panel structures based on the joining element manufactured by filament winding is proposed. An analytical approach based on one-dimensional models for calculating the load bearing capacity of the adhesive bond is developed. Parametric studies for determine the shear stresses distribution in the adhesive bond are conducted and the comparative analysis of the obtained results with the results of FEM-simulation is given.

Key words: composite material, joining element, adhesive bond, design model, shear stresses.

Гагауз Федор Миронович – канд. техн. наук, доцент, доцент каф. авиационного материаловедения, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, Украина.

Гуменников Вячеслав Вячеславович – мл. науч. сотр. каф. авиационного материаловедения, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, Украина.