

УДК 629.7.023

DOI: 10.26467/2079-0619-2021-24-6-66-81

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ УГЛЕПЛАСТИКА В ОБРАЗЦАХ ДВУХСРЕЗНОГО БОЛТОВОГО СОЕДИНЕНИЯ

В.Е. СТРИЖИУС¹

¹*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
г. Москва, Россия*

Отмечено, что в современных композитных авиаконструкциях присутствует значительное количество композитных и металлокомпозитных срезных болтовых соединений, усталостная долговечность которых является важным фактором обеспечения безопасности эксплуатации таких конструкций. Ввиду этого особое внимание при испытаниях и расчетных оценках элементов таких конструкций уделяется оценке усталостной долговечности слоистых композитов в подобных соединениях. Несмотря на значительное число публикаций и исследований по этой теме, можно отметить, что многие важные методические проблемы в этой области еще не решены. К таким проблемам можно отнести следующие: выбор основной моды усталостного повреждения слоистых композитов в срезных болтовых соединениях; неопределенность базовой кривой усталости; практическое отсутствие каких-либо моделей, представляющих диаграммы постоянной усталостной долговечности слоистых композитов в рассматриваемых соединениях; неопределенность правила суммирования усталостных повреждений в слоистых композитах в рассматриваемых соединениях. По результатам обзора и анализа данных ряда отечественных и зарубежных публикаций, а также по результатам специально проведенных исследований предложены решения отмеченных проблем. Проведена верификация предложенных решений на примере анализа расчетных и экспериментальных данных по усталостной долговечности ламинатов из углепластика НТА7/6376 [45/-45/0/90]_{3S} в образцах двухсрезного болтового соединения.

Ключевые слова: слоистые полимерные композиционные материалы, срезные болтовые соединения, кривые усталости, асимметрия циклического нагружения, диаграммы постоянной усталостной долговечности, правила суммирования усталостных повреждений.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что в современных композитных авиаконструкциях присутствует значительное количество композитных и металлокомпозитных срезных болтовых соединений, усталостная долговечность которых является важным фактором обеспечения безопасности эксплуатации таких конструкций. Ввиду этого особое внимание при испытаниях и расчетных оценках элементов таких конструкций уделяется оценке усталостной долговечности *слоистых композитов* в подобных соединениях.

В многочисленных публикациях рассматривается целый ряд факторов, оказывающих значительное влияние на усталостную долговечность таких композитов. К таким факторам можно отнести следующие.

1. Тип полимерного композиционного материала (ПКМ).
2. Параметры укладки слоев, толщину ламината.
3. Тип соединения (односрезное, двухсрезное), тип болтов (с выступающей головкой, с потайной головкой), осевую затяжку болтов, радиальную посадку болтов.
4. Асимметрию циклического нагружения.
5. Условия окружающей среды (прежде всего температура и влажность).
6. Качество отверстия под крепеж.

Исследованию влияния перечисленных факторов на усталостную долговечность композитов в рассматриваемых соединениях посвящены многие работы (в частности, [1– 12]), однако следует отметить, что многие наиболее важные методические проблемы в этой области еще не

решены, таким образом, «цельная» методика расчетов на усталость композитов в рассматриваемых соединениях практически отсутствует.

К наиболее важным нерешенным методическим проблемам можно отнести:

- 1) выбор основной моды усталостного повреждения слоистых композитов в срезных болтовых соединениях;
- 2) неопределенность базовой (расчетной) кривой усталости рассматриваемых элементов;
- 3) практическое отсутствие каких-либо моделей, представляющих диаграммы постоянной усталостной долговечности (ДПУД), «связывающие» средние значения и амплитуды циклического напряжения при постоянной усталостной долговечности композитов в рассматриваемых соединениях;
- 4) неопределенность правила суммирования усталостных повреждений в слоистых композитах в рассматриваемых соединениях.

В настоящей статье по результатам обзора и анализа данных работ [1–12], а также по результатам специально проведенных исследований предложены решения отмеченных проблем.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДИКИ РАСЧЕТНЫХ ОЦЕНОК УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ В СРЕЗНЫХ БОЛТОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ

Моды повреждения слоистых композитов в срезных болтовых соединениях

На рис. 1 представлены виды (моды) *статического разрушения* слоистых композитов в срезных болтовых соединениях.

Что касается мод *усталостных повреждений*, то по результатам анализа данных, представленных в Справочнике по композиционным материалам¹, можно сделать следующие выводы.

1. Для слоистых композитов в срезных болтовых соединениях основной, наиболее часто встречаемой модой усталостного повреждения является *овализация крепежного отверстия* по контактной поверхности ламината. Именно из-за овализации происходит выкрашивание заполнителя или герметика в крепежных точках, что может привести к нарушению герметичности соединения, что особенно важно для авиационных конструкций.
2. *Основным повреждающим видом напряжений*, вызывающим овализацию крепежных отверстий при одноосном нагружении ламинатов из слоистых ПКМ в срезных болтовых соединениях, являются *напряжения смятия* в опорных поверхностях крепежных отверстий.
3. В качестве нормированного уровня овализации крепежного отверстия в указанном Справочнике рекомендуется принимать уровень, соответствующий овализации 2 %. Однако следует отметить, что во многих случаях авторы исследований устанавливают значения критического уровня овализации по своему усмотрению.

Определение базовой (расчетной) кривой усталости слоистых композитов в срезных болтовых соединениях

По результатам обзора и анализа имеющихся в настоящее время данных по усталостной долговечности слоистых композитов в срезных болтовых соединениях можно заключить, что

¹ Composite Materials, Military Handbook 17, Materials Usage Design and Analysis. Department of Defense, Philadelphia, PA, 2002. Vol. 3. 693 p.

наиболее часто для представления закономерностей усталостного разрушения таких элементов используется следующее уравнение:

$$\sigma = a + b \cdot \lg N, \quad (1)$$

где N – усталостная долговечность слоистого композита в срезном болтовом соединении;

σ – некое напряжение в слоистом композите;

a и b – параметры уравнения.

Пример кривых усталости (1) представлен на рис. 2–3.

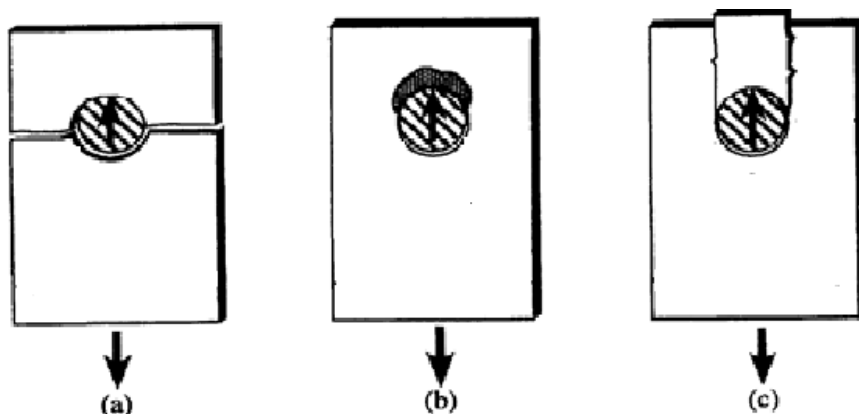


Рис. 1. Моды статического разрушения болтовых соединений:

a – разрушение от растяжения в сечении «нетто», b – оваллизация отверстия от смятия контактной поверхности, c – разрушение от сдвига

Fig. 1. Modes of bolted joints static fracture: a – tension fracture in the net section, b – ovalisation of a hole from crumpling, c – shear fracture

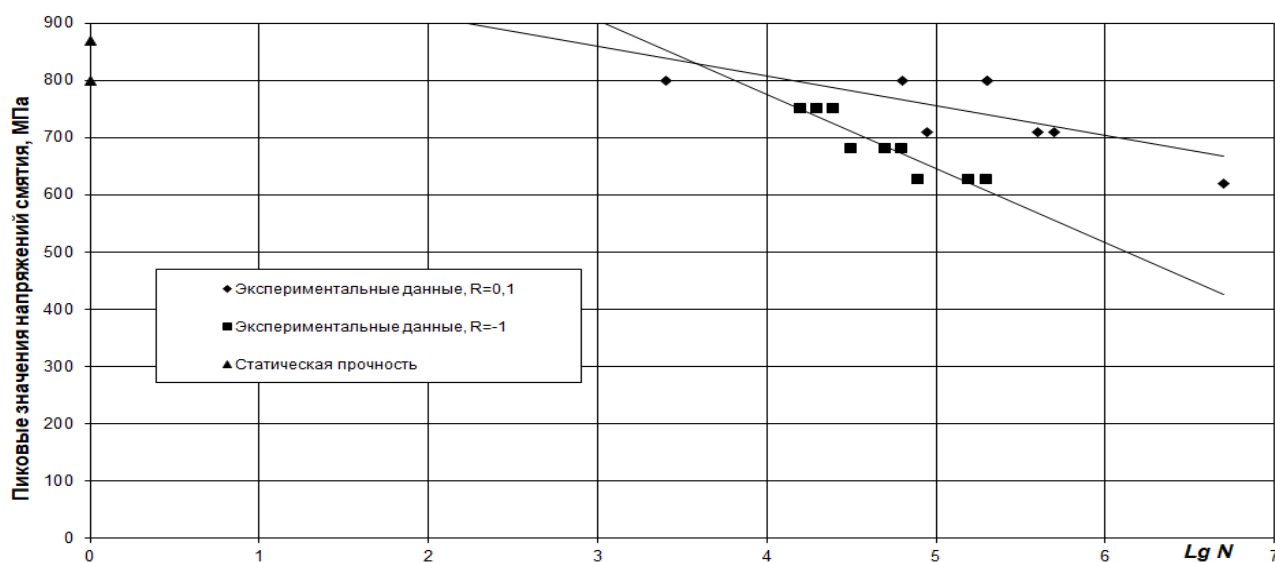


Рис. 2. Кривые усталости ламината из углепластика AS/3501-6 в образцах двухсрезного болтового соединения (по данным работы [2])

Fig. 2. S - N curves of AS/3501-6 CFRP laminate fatigue in the specimens of a double-shear bolted joint (data from [2] were used)

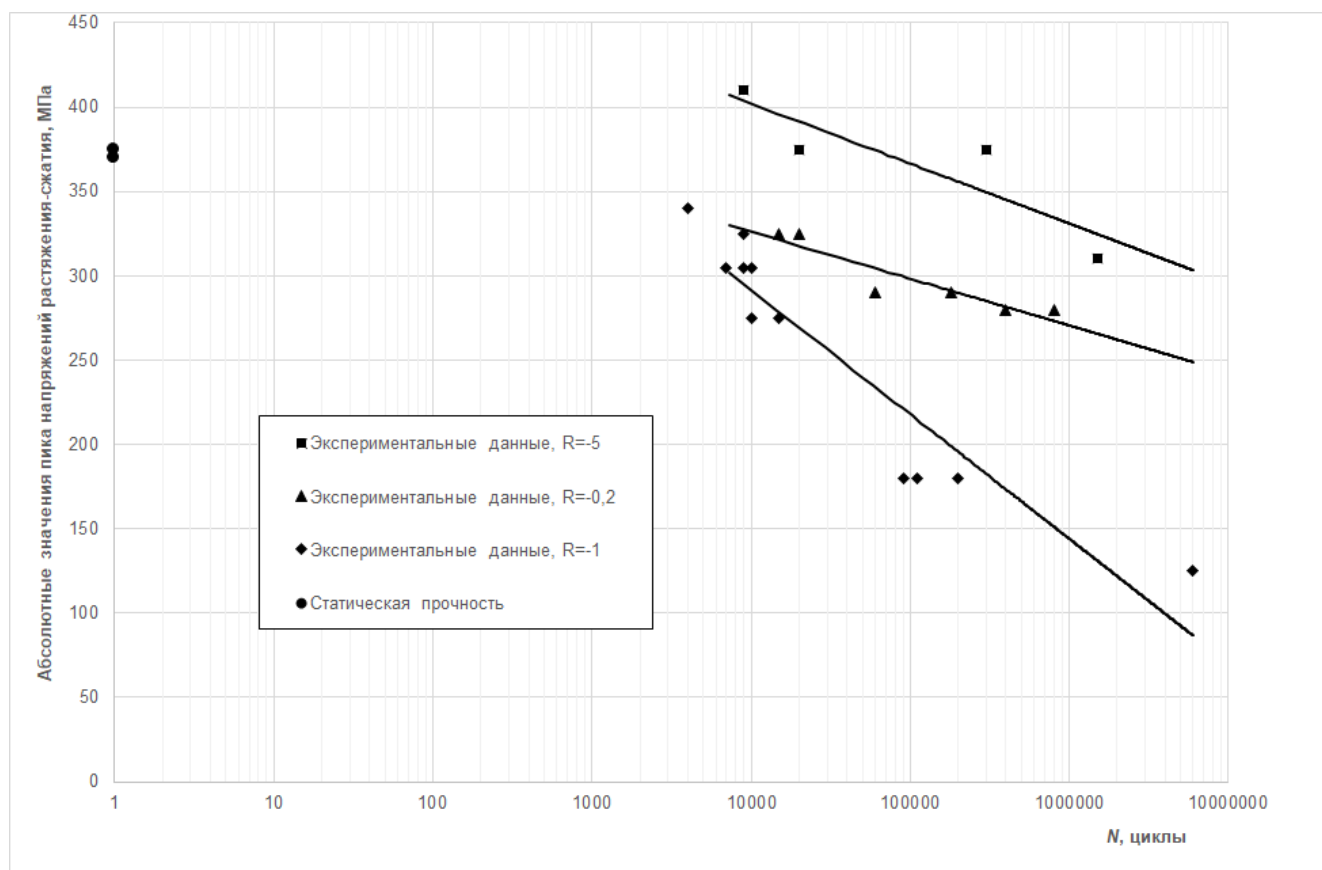


Рис. 3. Кривые усталости ламината из углепластика HTA7/6376 в образцах двухсрезного болтового соединения (по данным работы [3])

Fig. 3. *S-N* curves of HTA7/6376 CFRP laminate fatigue in the specimens of a double-shear bolted joint (data from [3] were used)

Комментарии к рис. 2–3.

1. На рис. 2 представлены кривые усталости ламината из углепластика AS/3501-6 $[0_5/\pm 45_2/90]_S$ в образцах двухсрезного болтового соединения. Кривые усталости получены с использованием циклического нагружения с асимметрией $R = -1$ и $R = 0,1$ и представлены в координатах « $\sigma_{peak\ br} - LgN$ », где $\sigma_{peak\ br}$ – пиковое значение напряжений смятия в опорной поверхности нагруженного крепежного отверстия, N – усталостная долговечность образцов до возникновения овализации крепежного отверстия 5,3 % [2].
2. На рис. 3 представлены кривые усталости квазиизотропного ламината из углепластика HTA7/6376 $[45/-45/0/90]_{3S}$ в образцах двухсрезного болтового соединения (рис. 4). Кривые усталости получены с использованием циклического нагружения с различной асимметрией ($R = -1$, $R = -0,2$ и $R = -5$) и представлены в координатах « $\sigma_{peak} - N$ », где σ_{peak} – абсолютное значение пика напряжений растяжения-сжатия в номинальном сечении «брутто» при одноосном нагружении, N – усталостная долговечность образцов (в циклах) до возникновения повреждения [3]. Критерий повреждения – увеличение амплитуды смещения захвата от пика к пику на 0,8 мм от исходного значения в начале испытаний.

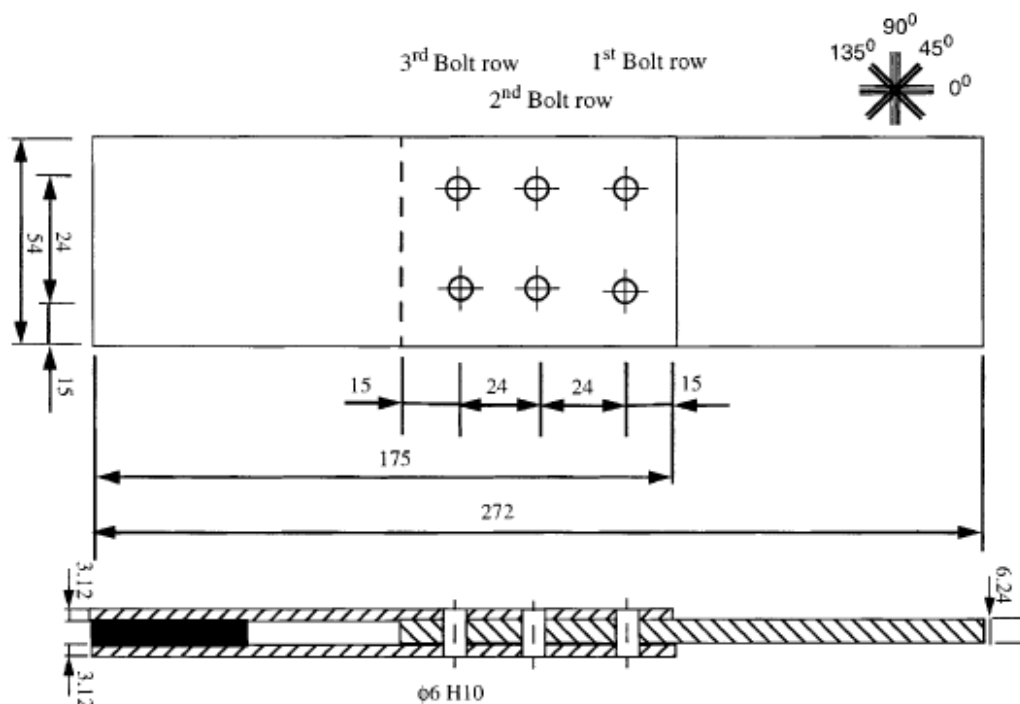


Рис. 4. Схема образцов двухсрезного болтового соединения из углепластика HTA7/6376 [45/-45/0/90]_{3S} (по данным работы [3])
Fig. 4. Scheme of the double-shear bolted joint specimens of HTA7/6376 [45/-45/0/90]_{3S} CFRP laminate (data from [3] were used)

В качестве уравнения базовой (расчетной) кривой усталости рассматриваемых элементов наиболее часто используется уравнение (1) в виде

$$\sigma_{a br}^{R=-1} = a + b \cdot \lg N, \quad (1, a)$$

где N – усталостная долговечность слоистого композита в срезном болтовом соединении;

$\sigma_{a br}^{R=-1}$ – амплитуда симметричного цикла напряжений смятия;

a и b – параметры уравнения.

Следует отметить, что практически во всех расчетных случаях напряжения смятия с помощью специального прочностного анализа можно связать с напряжениями растяжения-сжатия в номинальном сечении рассматриваемых образцов или элементов соединений.

В частности, в образцах двухсрезного болтового соединения из квазиизотропного ламината углепластика HTA7/6376 [45/-45/0/90]_{3S} (рис. 4) номинальные напряжения растяжения-сжатия σ_{peak} могут быть связаны с абсолютными значениями напряжений смятия в опорной поверхности наиболее нагруженного крепежного отверстия соединения простым соотношением

$$\sigma_{peak br} = k \times \sigma_{peak}, \quad (2)$$

где $\sigma_{peak br}$ – абсолютное значение пика напряжений смятия в опорной поверхности наиболее нагруженного крепежного отверстия соединения;

$k = 1,4$ – коэффициент перехода от номинальных напряжений растяжения-сжатия к напряжениям смятия, получен по результатам анализа схемы и нагруженности рассматриваемого образца, представленного на рис. 4, с использованием следующего соотношения:

$$k = \frac{\sigma_{peak\ br}}{\sigma_{peak}} = \frac{(\frac{R_1}{P}) \times \sigma_{peak} \times t \times \delta}{t \times d \times \sigma_{peak}} = \frac{0,35 \times 24 \times 6,24}{6,24 \times 6} = 1,4,$$

где $R_1 / P = 0,35$ – доля нагрузки на 1-й ряд крепежа; $t = 24$ мм – шаг крепежа; $\delta = 6,24$ мм – толщина образца; $d = 6$ мм – диаметр болта.

Уравнение кривой усталости типа (1, а) для рассматриваемых образцов может быть представлено в следующем виде:

$$\sigma_{a\ br}^{R=-1} = 821,62 - 103,20 \cdot \lg N.$$

Числовые значения параметров уравнения определены как значения параметров уравнения линии тренда при аппроксимации экспериментальных данных.

Формирование ДПУД для слоистых композитов в срезных болтовых соединениях

По результатам обзора данных работ [1–10], в которых представлены результаты исследований влияния самых различных факторов на усталостную долговечность слоистых композитов в срезных болтовых соединениях, можно утверждать, что по тематике ДПУД в подобных исследованиях *нет никаких сведений и предложений*.

Приходится констатировать, что необходим новый поиск подобных моделей. Такой поиск предлагается выполнять по двум направлениям.

1. На основе формирования модификаций известных и достаточно широко апробированных моделей ДПУД для *ламинатов без концентраторов напряжений и ламинатов со свободными отверстиями*. Принимается допущение, что подобные модели могут быть выбраны в качестве моделей-прототипов для формирования моделей ДПУД для слоистых композитов в срезных болтовых соединениях.
2. На основе поиска новых моделей ДПУД по результатам обработки известных экспериментальных данных.

По результатам обзора и анализа данных работ [11–15] в качестве моделей-прототипов для формирования ДПУД для *слоистых композитов в срезных болтовых соединениях* выбраны следующие известные модели ДПУД.

1. Асимметричная диаграмма Гудмана [11–12].
2. Нелинейная асимметричная диаграмма Гербера [11].
3. Колоколообразная диаграмма Харриса [13–15].

Асимметричная диаграмма Гудмана. Асимметричная диаграмма Гудмана учитывает различие прочности слоистых ПКМ при растяжении и сжатии и, по данным работ [11–12], может быть выражена в следующей форме:

$$-\frac{\sigma_a - \sigma_a^{R=-1}}{\sigma_a^{R=-1}} = \begin{cases} \sigma_m / \sigma_{UTS}, & 0 \leq \sigma_m \leq \sigma_{UTS}; \\ \sigma_m / \sigma_{UCS}, & \sigma_{UCS} \leq \sigma_m \leq 0, \end{cases} \quad (3)$$

где σ_a – амплитуда циклических напряжений растяжения-сжатия;

$\sigma_a^{R=-1}$ – амплитуда симметричного цикла нагружения, соответствующая *определенной (фиксированной)* усталостной долговечности слоистого ПКМ;

σ_m – среднее напряжение цикла нагружения;

σ_{UTS} – предел прочности рассматриваемого ПКМ при растяжении;

σ_{UCS} – предел прочности рассматриваемого ПКМ при сжатии.

В качестве основного метода формирования модификаций моделей-прототипов с целью использования этих модификаций в качестве ДПУД для слоистых композитов в срезных болтовых соединениях предлагается использовать метод замены напряжений растяжения-сжатия в математических выражениях моделей-прототипов *напряжениями смятия в опорной поверхности крепежных отверстий в слоистых композитах*.

Таким образом, для ламинатов из слоистых композитов в срезных болтовых соединениях можно предложить следующую модификацию выражения (3):

$$-\frac{\sigma_{a\ br} - \sigma_{a\ br}^{R=-1}}{\sigma_{a\ br}^{R=-1}} = |\sigma_{m\ br}| / \sigma_{UBS}, \quad (4)$$

где $\sigma_{a\ br}$ – амплитуда напряжений смятия в опорной поверхности рассматриваемого элемента соединения для цикла нагружения с коэффициентом асимметрии R ;

$\sigma_{m\ br}$ – среднее напряжение смятия для цикла нагружения с коэффициентом асимметрии R ;

$\sigma_{a\ br}^{R=-1}$ – амплитуда симметричного цикла напряжений смятия, соответствующая *определенной (фиксированной) усталостной долговечности* слоистого композита;

σ_{UBS} – сопротивление смятию (напряжение смятия при нормированной относительной овализации отверстия в рассматриваемом элементе соединения).

Нелинейная асимметричная диаграмма Гербера. Нелинейная асимметричная диаграмма Гербера, по данным работы [11], может быть выражена в следующей форме:

$$-\frac{\sigma_a - \sigma_a^{R=-1}}{\sigma_a^{R=-1}} = \begin{cases} (\sigma_m / \sigma_{UTS})^2, & 0 \leq \sigma_m \leq \sigma_{UTS}; \\ (\sigma_m / \sigma_{UCS})^2, & \sigma_{UCS} \leq \sigma_m \leq 0. \end{cases} \quad (5)$$

Для рассматриваемых ламинатов можно предложить следующую модификацию выражения (5):

$$-\frac{\sigma_{a\ br} - \sigma_{a\ br}^{R=-1}}{\sigma_{a\ br}^{R=-1}} = (\sigma_{m\ br} / \sigma_{UBS})^2. \quad (6)$$

Колоколообразная диаграмма Харриса. В работе [13] Харрисом и соавторами была предложена так называемая колоколообразная диаграмма постоянной усталостной долговечности слоистых ПКМ. В работах [14–15] для использования этой диаграммы в практических расчетах на усталость предложена модификация диаграммы, которую можно представить следующим образом:

$$\sigma_a^{R=-1} = \frac{\sigma_{ai} \cdot \sigma_{UTS}^u \cdot |\sigma_{UCS}|^v}{(\sigma_{UTS} - \sigma_{mi})^u \cdot (|\sigma_{UCS}| + \sigma_{mi})^v}. \quad (7)$$

В качестве *средних значений* параметров u и v для диапазона «рабочих» долговечностей $N = 10^3 \div 10^6$ в работах [14–15] рекомендовано использовать следующие значения: $u = 2,18$; $v = 2,40$.

Для рассматриваемых ламинатов можно предложить следующую модификацию выражения (7):

$$\sigma_{a\ br}^{R=-1} = \frac{\sigma_{a\ br} \cdot \sigma_{UBS}^4}{(\sigma_{UBS}^2 - \sigma_{m\ br}^2)^2}. \quad (8)$$

Верификация предложенных модификаций ДПУД

Верификация предложенных модификаций ДПУД проведена на примере обработки экспериментальных данных и построения ДПУД для ламинатов из углепластика HTA7/6376 [45/-45/0/90]_{3S} в образцах двухсрезных болтовых соединений. Используются экспериментальные данные работы [3].

На рис. 5–7 для рассматриваемых образцов представлены примеры графических зависимостей предлагаемых модификаций ДПУД для долговечностей $N = 10^4$, 10^5 и 10^6 циклов и сравнение этих зависимостей с экспериментальными данными. ДПУД построены для напряжений смятия, полученных с использованием соотношения (2).

В качестве определенной альтернативы предложенным модификациям на рис. 5–7 представлены также результаты аппроксимации экспериментальных данных с использованием полиномов 2-й степени вида

$$\sigma_{a\ bri} = a_i + b_i \times \sigma_{m\ bri} + c_i \times \sigma_{m\ bri}^2, \quad (9)$$

где a_i , b_i , c_i – параметры соотношения, значения которых зависят от целого ряда факторов (тип образца, тип ПКМ, рассматриваемая усталостная долговечность и т. д.). Предполагается, что эти значения будут определяться по результатам аппроксимации экспериментальных данных.

Соотношения (9) для рассматриваемых образцов и долговечностей представлены в табл. 1, графически эти соотношения представлены на рис. 8.

Таблица 1
Table 1

Соотношения (9) для ламината из углепластика HTA7/6376
в образцах двухсрезного болтового соединения
Ratios (9) for HTA7/6376 CFRP laminate in the double-shear bolted joint specimens

<i>N</i> , циклы	Соотношение (9)
10 000	$\sigma_{a\ bri} = 399,88 - 0,2568 \times \sigma_{m\ bri} - 0,0024 \times \sigma_{m\ bri}^2$
100 000	$\sigma_{a\ bri} = 329,35 - 0,2025 \times \sigma_{m\ bri} - 0,0015 \times \sigma_{m\ bri}^2$
1 000 000	$\sigma_{a\ bri} = 337,21 - 0,3559 \times \sigma_{m\ bri} - 0,0025 \times \sigma_{m\ bri}^2$

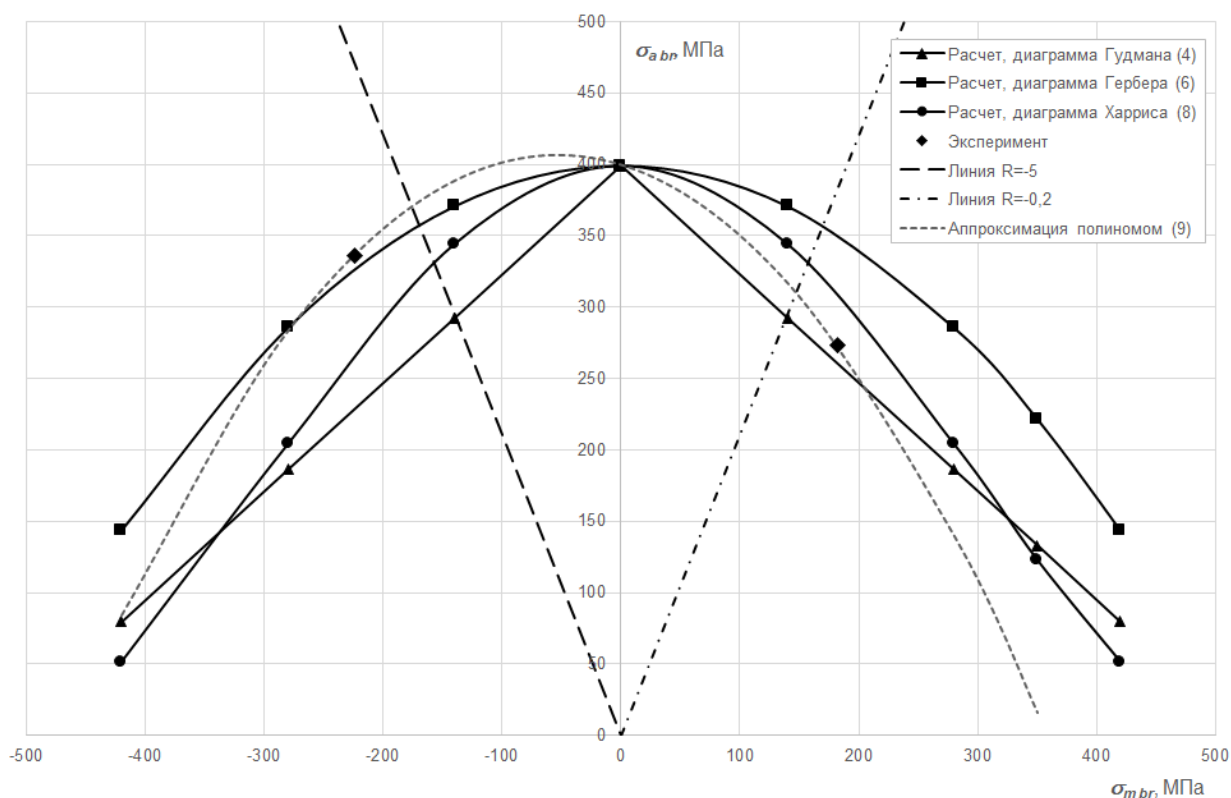


Рис. 5. Примеры графических зависимостей модификаций ДПУД для ламината из углепластика HTA7/6376 в образцах двухсрезного болтового соединения; усталостная долговечность $N = 10000$ циклов

Fig. 5. Examples of the graphical dependencies of DCFL modifications for HTA7/6376 CFRP laminate in the double-shear bolted joint specimens; fatigue life $N = 10000$ cycles

По результатам анализа данных, представленных на рис. 5–7, для рассматриваемых образцов и асимметрий циклического нагружения можно сделать следующие выводы.

1. Использование в качестве ДПУД для слоистых композитов в срезных болтовых соединениях модифицированных диаграмм Гудмана (4), Гербера (6) и Харриса (8) показывает неудовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных.
2. Для рассматриваемых образцов и асимметрий циклического нагружения во всем диапазоне напряжений и долговечностей наилучшее совпадение расчетных и экспериментальных данных может быть достигнуто с использованием в качестве ДПУД полиномов 2-й степени (9).
3. В общем виде соотношение (9) в качестве соотношения ДПУД для слоистых композитов в срезных болтовых соединениях может быть преобразовано к виду

$$\sigma_{a br}^{R=-1} = \sigma_{a br} + b \times \sigma_{m br} + c \times \sigma_{m br}^2. \quad (10)$$

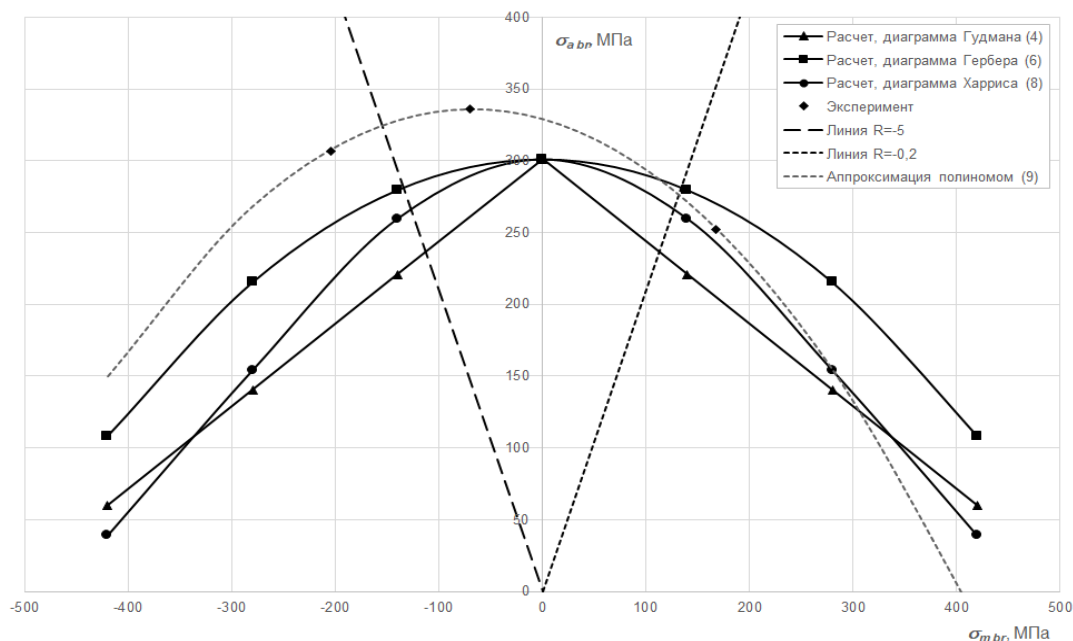


Рис. 6. Примеры графических зависимостей модификаций ДПУД для ламината из углепластика HTA7/6376 в образцах двухсрезного болтового соединения; усталостная долговечность $N = 100000$ циклов

Fig. 6. Examples of the graphical dependencies of DCFL modifications for HTA7/6376 CFRP laminate in the double-shear bolted joint specimens; fatigue life $N = 100000$ cycles

Некоторые особенности правила суммирования усталостных повреждений для слоистых композитов в срезных болтовых соединениях

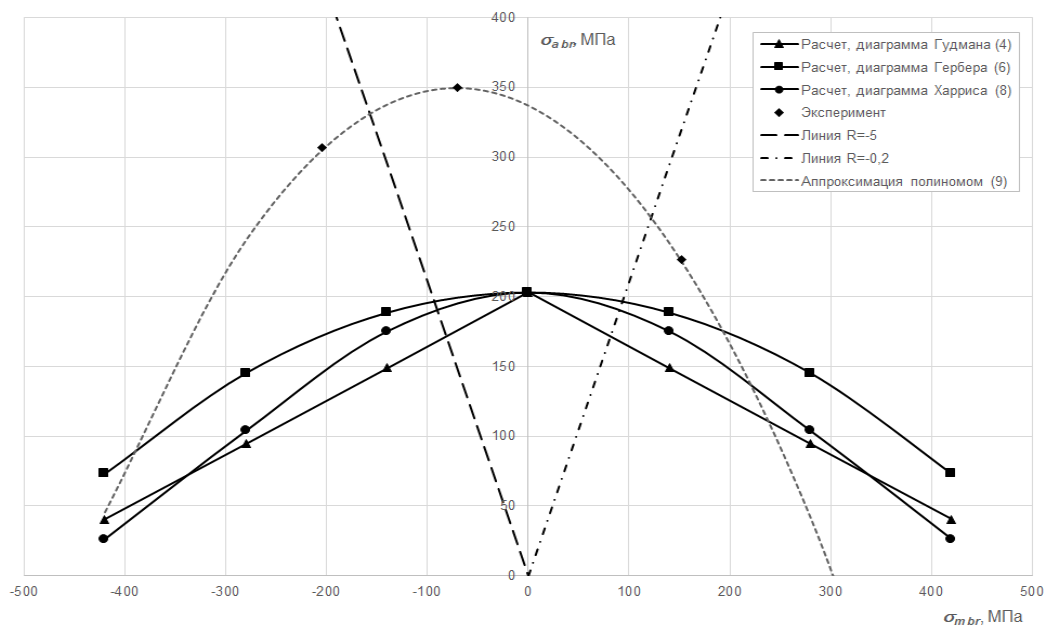


Рис. 7. Примеры графических зависимостей модификаций ДПУД для ламината из углепластика HTA7/6376 в образцах двухсрезного болтового соединения; усталостная долговечность $N = 1000000$ циклов

Fig. 7. Examples of the graphical dependencies of DCFL modifications for HTA7/6376 CFRP laminate in the double-shear bolted joint specimens; fatigue life $N = 1000000$ cycles

Известно, что правило суммирования усталостных повреждений является важной составляющей методик расчета усталостной долговечности как металлических, так и композитных элементов конструкций.

К сожалению, в настоящее время, по крайней мере в открытых публикациях, *практически отсутствуют какие-либо сведения и предложения* по части каких-либо специальных правил или гипотез суммирования усталостных повреждений для слоистых композитов в срезных болтовых соединениях. Исключение составляет только работа [3], где представлены некоторые данные о результатах применения гипотезы линейного суммирования усталостных повреждений (правило Пальмгрена – Майнера) при расчетных оценках усталостной долговечности рассмотренных ламинатов из углепластика HTA7/6376 [45/-45/0/90]_{3S} при сложном программном нагружении образцов двухсрезных болтовых соединений.

По результатам анализа данных, представленных в работе [3], можно отметить следующее.

1. Использование в качестве правила суммирования гипотезы линейного суммирования усталостных повреждений (правило Пальмгрена – Майнера)

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = 1,0$$

может привести к неконсервативным оценкам расчетной усталостной долговечности рассматриваемых образцов. Так, при сложном программном нагружении реальная (определенная по экспериментальным данным) сумма при разрушении образцов

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = A = 0,15 \div 0,30.$$

2. Для получения расчетных оценок приемлемой точности очевидна необходимость экспериментальной оценки суммы накопленного повреждения для каждого типа образца или элемента при нагружении конкретным спектром и уровнем нагружения.

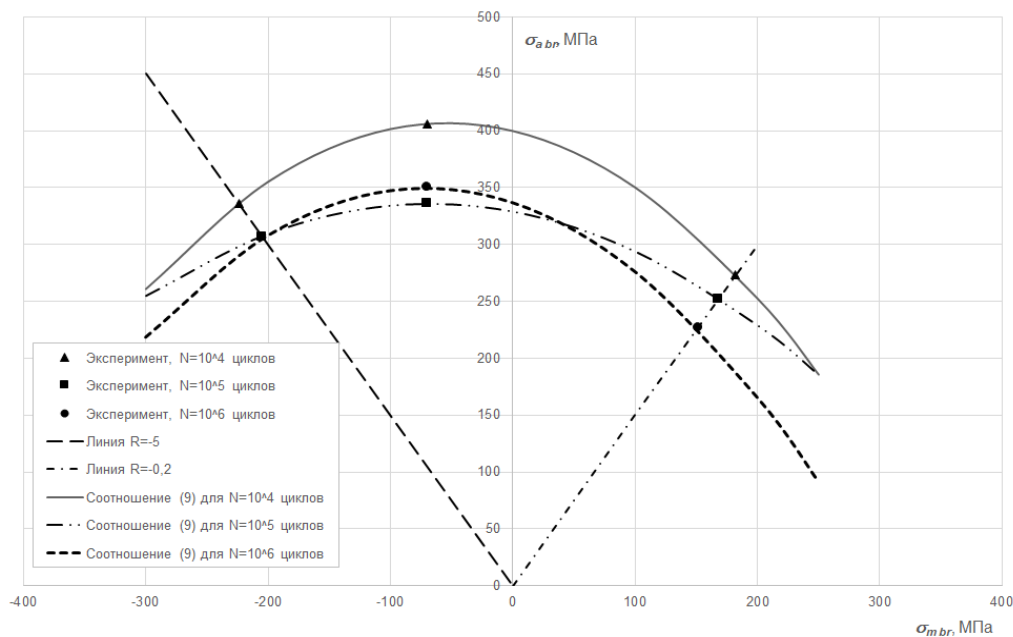


Рис. 8. Примеры графических зависимостей (9) для ламината из углепластика HTA7/6376 в образцах двухсрезного болтового соединения

Fig. 8. Examples of the graphical dependencies (9) for HTA7/6376 CFRP laminate in the double-shear bolted joint specimens

Процедура расчетных оценок усталостной долговечности слоистых композитов в срезных болтовых соединениях

Процедуру расчетных оценок усталостной долговечности слоистых композитов в срезных болтовых соединениях можно представить следующим образом.

1. По результатам обработки экспериментальных данных для рассматриваемого слоистого композита в рассматриваемом соединении определяются:
 - уравнение базовой кривой усталости (1, а);
 - соотношения (9) и (10) для построения ДПУД для базовых долговечностей $N = 10^4, 10^5$ и 10^6 циклов.
2. Рассматривается циклическое нагружение соединения, после обработки методом «дождевого потока» или методом «полных циклов» нагружение представляется в виде последовательности полных циклов с параметрами $\sigma_{a\ bri}$ и $\sigma_{m\ bri}$.
3. С использованием графических зависимостей (9) проводится грубая оценка долговечности слоистого композита при циклическом нагружении с параметрами $\sigma_{a\ bri}$ и $\sigma_{m\ bri}$, выбирается зависимость (9), соответствующая оценке долговечности. Все полученные полные циклы с использованием соотношений (10) пересчитываются в эквивалентные симметричные циклы с амплитудой $\sigma_{a\ bri}^{R=-1}$.
4. С использованием уравнения базовой кривой усталости (1, а) определяются долговечности N_i и сумма $\sum \frac{n_i}{N_i}$.
5. По результатам анализа экспериментальных данных или по результатам принятых допущений решается вопрос о правиле суммирования усталостных повреждений $\sum \frac{n_i}{N_i} = A$ для рассматриваемого слоистого композита и рассматриваемого типа циклического нагружения. При отсутствии экспериментальных данных в запас прочности рекомендуется принимать консервативное значение $A = 0,15$.
6. Определяется усталостная долговечность рассматриваемого слоистого композита с использованием соотношения

$$N = A / \sum (n_i / N_i).$$

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основе анализа и обобщения данных работ [1–15], а также по результатам специально проведенных исследований предложены решения ключевых методических проблем для выполнения расчетных оценок слоистых композитов в срезных болтовых соединениях.

1. В качестве основной моды усталостного повреждения слоистых композитов в срезных болтовых соединениях принята *овализация крепежного отверстия* по контактной поверхности ламината.
2. В качестве уравнения базовой (расчетной) кривой усталости рассматриваемых элементов принято уравнение типа (1, а) – уравнение кривой усталости в полулогарифмических координатах.
3. На основе результатов специально проведенных исследований для диаграммы постоянной усталостной долговечности (ДПУД) слоистых композитов в рассматриваемых соединениях предложены соотношения (9) и (10). На примере построения ДПУД образцов из ламината углепластика НТА7/6376 [45/-45/0/90]_{3S} показано, что с использованием этих соотношений возможна наиболее точная связь средних значений и ам-

плитуд циклического напряжения различной асимметрии при постоянной усталостной долговечности рассматриваемых образцов. Учитывая потенциальные возможности аппроксимации экспериментальных данных с использованием полиномов 2-й степени можно предположить, что соотношения (9) и (10) будут справедливы для различных типов слоистых композитов.

4. Отмечены ключевые особенности правила суммирования усталостных повреждений для слоистых композитов в срезных болтовых соединениях при сложном циклическом нагружении.

В качестве рекомендации для дальнейших исследований можно отметить необходимость увеличения объема верификации предложенных соотношений для моделей ДПУД и правила суммирования усталостных повреждений для других образцов и видов циклического нагружения.

ВЫВОДЫ

Отмечено, что особое внимание при испытаниях и расчетных оценках элементов композитных авиаконструкций уделяется оценке усталостной долговечности *слоистых композитов* в композитных и металлокомпозитных срезных болтовых соединениях.

Предложены основные положения методики и процедура, позволяющие выполнять расчетные оценки усталостной долговечности подобных элементов.

Проведена верификация предложенных решений на примере анализа расчетных и экспериментальных данных по усталостной долговечности ламинатов из углепластика HTA7/6376 [45/-45/0/90]_{3S} в образцах двухсрезного болтового соединения.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Стрижиус Виталий Ефимович, доктор технических наук, профессор кафедры проектирования и сертификации авиационной техники Московского авиационного института (национального исследовательского университета), vitaly.strizhius@gmail.com.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Schön J., Starikov R.** Fatigue of joints in composite structures. In book: Fatigue in composites / Ed. by B. Harris. Woodhead Publishing, 2003. P. 621–643. DOI: 10.1533/9781855738577.5.621
2. **Lewandowski J.J., Singh P.M.** Fracture and fatigue of DRA composites // Metals Handbook. 1996. Vol. 19. P. 895–904.
3. **Schon J., Nyman T.** Spectrum fatigue of composite bolted joints // International Journal of Fatigue. 2002. Vol. 24, iss. 2–4. P. 273–279. DOI: 10.1016/S0142-1123(01)00082-2
4. **Galinska A.** Mechanical joining of fibre reinforced polymer composites to metals—a review. Part I: Bolted joining // Polymers. 2020. Vol. 12, no. 10. ID 2252. 48 p. DOI: 10.3390/polym12102252
5. **Galinska A., Galinski C.** Mechanical joining of fibre reinforced polymer composites to metals – A review. Part II: Riveting, clinching, non-adhesive form-locked joints, pin and loop joints // Polymers. 2020. Vol. 12, no. 8. ID 1681. 40 p. DOI: 10.3390/polym12081681
6. **Choi J.-I.** Failure load prediction of composite bolted joint with clamping force / J.-I. Choi, S.M. Hashemina, H.-J. Chun, J.-C. Park, H.S. Chang // Composite Structures. 2018. Vol. 189. P. 247–255. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.01.037

7. **Cheng X.** Effect of damage on failure mode of multi-bolt composite joints using failure envelope method / X. Cheng, S. Wang, J. Zhang, W. Huang, Y. Cheng, J. Zhang // *Composite Structures*. 2017. Vol. 160. P. 8–15. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.10.042
8. **Giannopoulos I.K.** Effects of bolt torque tightening on the strength and fatigue life of airframe FRP laminate bolted joints / I.K. Giannopoulos, D. Daroni-Dawes, K.I. Kourousis, M. Yasaei // *Composites Part B: Engineering*. 2017. Vol. 125. P. 19–26. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.05.059
9. **Wu C., Bai Y., Mottram J.T.** Effect of elevated temperatures on the mechanical performance of pultruded FRP joints with a single ordinary or blind bolt [Электронный ресурс] // *Journal of Composites for Construction*. 2016. Vol. 20, iss. 2. ID 04015045. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000608 (дата обращения: 23.08.2021).
10. **Zhang K.** Combined effects of seawater ageing and fatigue loading on the bearing performance and failure mechanism of CFRP/CFRP single-lap bolted joints / K. Zhang, H. Li, H. Cheng, B. Luo, P. Liu [Электронный ресурс] // *Composite Structures*. 2020. Vol. 234. ID 111677. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111677 (дата обращения: 23.08.2021).
11. **Kawai M.** Fatigue life prediction of composite materials under constant amplitude loading, Fatigue life prediction of composites and composite structures. In book: *Fatigue Life Prediction of Composites and Composite Structures* / Ed. by A.P. Vassilopoulos. Woodhead Publishing, 2010. P. 177–219. DOI: 10.1533/9781845699796.2.177
12. **Vassilopoulos A.P., Keller T.** Fatigue of fiber-reinforced composites. Springer-Verlag London Limited, 2011. 238 p. DOI: 10.1007/978-1-84996-181-3
13. **Harris B.** A parametric constant-life model for prediction of the fatigue lives of fiber-reinforced plastics. In book: *Fatigue in composites* / Ed. by B. Harris. Woodhead Publishing, 2003. P. 546–568. DOI: 10.1533/9781855738577.4.546
14. **Стрижиус В.Е.** Особенности диаграмм постоянной усталостной долговечности слоистых композитов // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. 2019. Т. 25, № 3. С. 120–132. DOI: 10.18721/JEST.25309
15. **Strizhius V.** Fatigue life prediction of CFRP laminate under quasi-random loading // *Proceedings of the 30th Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue*. Krakow, Poland, 2–7 June 2019. P. 423–431.

FATIGUE LIFE PREDICTIONS OF CARBON FIBER REINFORCED PLASTIC IN SPECIMENS OF DOUBLE-SHEAR BOLTED JOINT

Vitaly E. Strizhius¹

¹*Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia*

ABSTRACT

It is noted that in modern aircraft composite structures there is a significant number of composite and metal-composite shear bolted joints, the fatigue life of which is an important factor to ensure the operating safety of such constructions. Thus, special attention is given to the evaluation of the layered composites fatigue life in such joints during tests and calculations of the similar structures components. Despite a considerable number of publications and studies on this subject, it can be observed that many important methodological issues have not been solved yet in this field. These problems can deal with the choice of the main mode of layered composites fatigue damage in shear bolted joints; the uncertainty of the basic fatigue curve; the practical absence of some models, representing diagrams of constant life fatigue for the layered composites in the joints under consideration; the uncertainty of fatigue damage summation rule in the layered composites in the investigated joints. Based on the review results and the data analysis of domestic and foreign publications including the results of specially conducted studies, the solutions to these problems are proposed.

The proposed solutions were verified by analyzing the calculated and experimental data on the fatigue life of carbon fiber reinforced plastic laminates HTA7/6376 [45/-45/0/90]_{3S} in the double-shear bolted joints specimens.

Key words: layered polymer composites, shear bolted joints, S-N curves, asymmetry of cyclic loading, constant fatigue life diagrams, rules of fatigue damage summation.

REFERENCES

1. Schön, J. and Starikov, R. (2003). *Fatigue of joints in composite structures*. In book: *Fatigue in composites*, in Harris B. (Ed.). Woodhead Publishing, p. 621–643. DOI: 10.1533/9781855738577.5.621
2. Lewandowski, J.J. and Singh, P.M. (1996). *Fracture and fatigue of DRA composites*. Metals Handbook, vol. 19, p. 895–904.
3. Schon, J. and Nyman, T. (2002). *Spectrum fatigue of composite bolted joints*. International Journal of Fatigue, vol. 24, issue 2-4, p. 273–279. DOI: 10.1016/S0142-1123(01)00082-2
4. Galinska, A. (2020). *Mechanical joining of fibre reinforced polymer composites to metals – A review. Part I: Bolted joining*. Polymers, vol. 12, no. 10, ID 2252, 48 p. DOI: 10.3390/polym12102252
5. Galinska, A. and Galinski, C. (2020). *Mechanical joining of fibre reinforced polymer composites to metals – A review. Part II: Riveting, clinching, non-adhesive form-locked joints, pin and loop joints*. Polymers, vol. 12, no. 8, ID 1681, 40 p. DOI: 10.3390/polym12081681
6. Choi, J.-I., Hashemina, S.M., Chun, H.-J., Park, J.-C. and Chang, H.S. (2018). *Failure load prediction of composite bolted joint with clamping force*. Composite Structures, vol. 189, p. 247–255. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.01.037
7. Cheng, X., Wang, S., Zhang, J., Huang, W., Cheng, Y. and Zhang, J. (2017). *Effect of damage on failure mode of multi-bolt composite joints using failure envelope method*. Composite Structures, vol. 160, p. 8–15. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.10.042
8. Giannopoulos, I.K., Doroni-Dawes, D., Kourousis, K.I. and Yasaee, M. (2017). *Effects of bolt torque tightening on the strength and fatigue life of airframe FRP laminate bolted joints*. Composites Part B: Engineering, vol. 125, p. 19–26. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.05.059
9. Wu, C., Bai, Y. and Mottram, J.T. (2016). *Effect of elevated temperatures on the mechanical performance of pultruded FRP joints with a single ordinary or blind bolt*. Journal of Composites for Construction, vol. 20, issue 2, ID 04015045. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000608 (accessed: 23.08.2021).
10. Zhang, K., Li, H., Cheng, H., Luo, B. and Liu, P. (2020). *Combined effects of seawater ageing and fatigue loading on the bearing performance and failure mechanism of CFRP/CFRP single-lap bolted joints*. Composite Structures, vol. 234, ID 111677. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111677 (accessed: 23.08.2021).
11. Kawai, M. (2010). *Fatigue life prediction of composite materials under constant amplitude loading, Fatigue life prediction of composites and composite structures*. In book: *Fatigue Life Prediction of Composites and Composite Structures*, in Vassilopoulos A.P. (Ed.). Woodhead Publishing, p. 177–219. DOI: 10.1533/9781845699796.2.177
12. Vassilopoulos, A.P. and Keller, T. (2011). *Fatigue of fiber-reinforced composites*. Springer-Verlag London Limited, 2011. 238 p. DOI: 10.1007/978-1-84996-181-3
13. Harris, B. (2003). *A parametric constant-life model for prediction of the fatigue lives of fiber-reinforced plastics*. In book: *Fatigue in composites*, in Harris B. (Ed.). Woodhead Publishing, p. 546–568. DOI: 10.1533/9781855738577.4.546
14. Strizhius, V.E. (2019). *Constant-life diagrams of layered composites*. St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, vol. 25, no. 3, p. 120–132. DOI: 10.18721/JEST.25309 (in Russian)

15. Strizhius, V. (2019). *Fatigue life prediction of CFRP laminate under quasi-random loading*. Proceedings of the 30th Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue. Krakow, Poland, 2–7 June 2019, p. 423–431.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vitaly E. Strizhius, Doctor of Technical Sciences, Professor of Aircraft Engineering and Certification of Aeronautical Equipment Chair, Moscow Aviation Institute (National Research University), vitaly.strizhius@gmail.com.

Поступила в редакцию 29.09.2021
Принята в печать 25.11.2021

Received 29.09.2021
Accepted for publication 25.11.2021