

DOI: 10.18721/JEST.25309
УДК 629.7.023

В.Е. Стрижиус

Национальный исследовательский университет «МАИ», г. Москва, Россия

ОСОБЕННОСТИ ДИАГРАММ ПОСТОЯННОЙ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ

Представлен обзор и краткий анализ четырех известных моделей диаграмм постоянной усталостной долговечности слоистых полимерных композиционных материалов, наиболее часто встречаемых в научных публикациях. Отмечены основные достоинства и недостатки представленных моделей. В качестве определенной альтернативы рассмотренных диаграмм для инженерных расчетов усталостных характеристик слоистых композитов при различных коэффициентах асимметрии R циклического нагружения предложена специальная модификация диаграммы Харриса. На примере построения предложенной диаграммы для образцов со свободными отверстиями из ламината углепластика типа AS4-PW показано хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных, что позволяет надеяться на приемлемую точность расчетных оценок характеристик усталостной прочности слоистых композитов с использованием этой диаграммы. Представлен пример использования диаграммы при расчетных оценках усталостной долговечности образцов со свободным отверстием из ламината углепластика типа T300/5208 [45/0/-45/90]2s при квазислучайном программном нагружении.

Ключевые слова: слоистые полимерные композиционные материалы, усталостная долговечность, кривая усталости, асимметрия циклического нагружения, диаграмма постоянной усталостной долговечности.

Ссылка при цитировании:

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

V.E. Strizhius

National Research University «Moscow Aviation Institute», Moscow, Russia

CONSTANT-LIFE DIAGRAMS OF LAYERED COMPOSITES

A review and a brief analysis of four well-known constant-life diagram models of layered composites, most often encountered in scientific publications, are presented. The main advantages and disadvantages of models are noted. A special modification of the Harris diagram was proposed as an alternative to the given diagrams for engineering predictions of fatigue characteristics of layered composites at different asymmetry coefficients R of cyclic loading. Using the example of constructing the proposed diagram for CFRP AS4-PW open-hole specimens, a good agreement between the calculated and experimental data is shown, which makes it possible to hope for acceptable accuracy of the calculated estimates of fatigue strength characteristics of layered composites using this diagram. An example of using the diagram for estimation of fatigue life of CFRP T300/5208 [45/0/-45/90]2s open-hole specimens under quasi-random program loading is presented.

Keywords: layered composites, fatigue life, S-N curve, asymmetry of cyclic loading, constant-life diagram.

Citation:

V.E. Strizhius, Constant-life diagrams of layered composites, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 25 (03) (2019) 120–132. DOI: 10.18721/JEST.25309

Введение. Известно, что большое значение при использовании полимерных композиционных материалов (ПКМ) приобретает возможность управления их физико-механическими характеристиками, в том числе характеристиками сопротивления усталости. Одной из таких характеристик является диаграмма постоянной усталостной долговечности (ДПУД), «связывающая» средние значения и амплитуды циклического напряжения при постоянной усталостной долговечности слоистого ПКМ. Диаграммы постоянной усталостной долговечности являются аналогом известных диаграмм предельных амплитуд цикла, применяемых при расчетных оценках усталостных характеристик металлических элементов.

С помощью ДПУД можно решать одну из важнейших задач усталостной прочности слоистых ПКМ – получать кривые усталости при различных коэффициентах асимметрии R циклического нагружения. Следует отметить особое значение решения этой задачи при инженерных расчетах усталостной долговечности слоистых ПКМ, когда предполагается, что объем известных экспериментальных данных будет достаточно ограниченным.

Обзору и анализу различных моделей ДПУД посвящены многие научные публикации, среди которых можно выделить, прежде всего, работы [1–3].

В настоящей статье представлен обзор и краткий анализ четырех известных моделей ДПУД, наиболее часто встречаемых в научных публикациях. К таким моделям можно отнести следующие:

1. Асимметричная диаграмма Гудмана [1].
2. Нелинейная асимметричная диаграмма Гербера [1].
3. Колоколообразная диаграмма Харриса [1–6].
4. Анизоморфные диаграммы Каваи [1–2, 7–12].

Отмечены основные достоинства и недостатки перечисленных моделей.

В качестве определенной альтернативы рассмотренных диаграмм для инженерных расчетов

усталостных характеристик слоистых ПКМ при различных коэффициентах асимметрии R циклического нагружения предложена специальная модификация диаграммы Харриса, позволяющая выполнять подобные расчеты с достаточно высокой точностью и приемлемой трудоемкостью.

Обзор и анализ известных моделей ДПУД

Ниже представлен краткий обзор и анализ представленных выше моделей ДПУД.

Асимметричная диаграмма Гудмана. Асимметричная диаграмма Гудмана учитывает различие прочности слоистых ПКМ при растяжении и сжатии и по данным работы [1] может быть выражена в следующей форме:

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

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.

Безусловным достоинством асимметричной диаграммы Гудмана является простота использования и приемлемый объем необходимых исходных данных.

В работе [1] отмечается, что к достоинствам асимметричной диаграммы Гудмана можно также отнести приемлемую точность расчетных характеристик усталостной прочности слоистых ПКМ, получаемых при ее использовании.

Однако этот вывод можно подвергнуть определенному сомнению. На рис. 1 приведен пример асимметричной диаграммы Гудмана для образцов со свободными отверстиями из ламината углепластика типа AS4-PW. При построении диаграммы использованы экспериментальные данные работы [13], которые получены из кривых усталости для рассматриваемых образцов при различных коэффициентах асимметрии R – см. рис. 2.

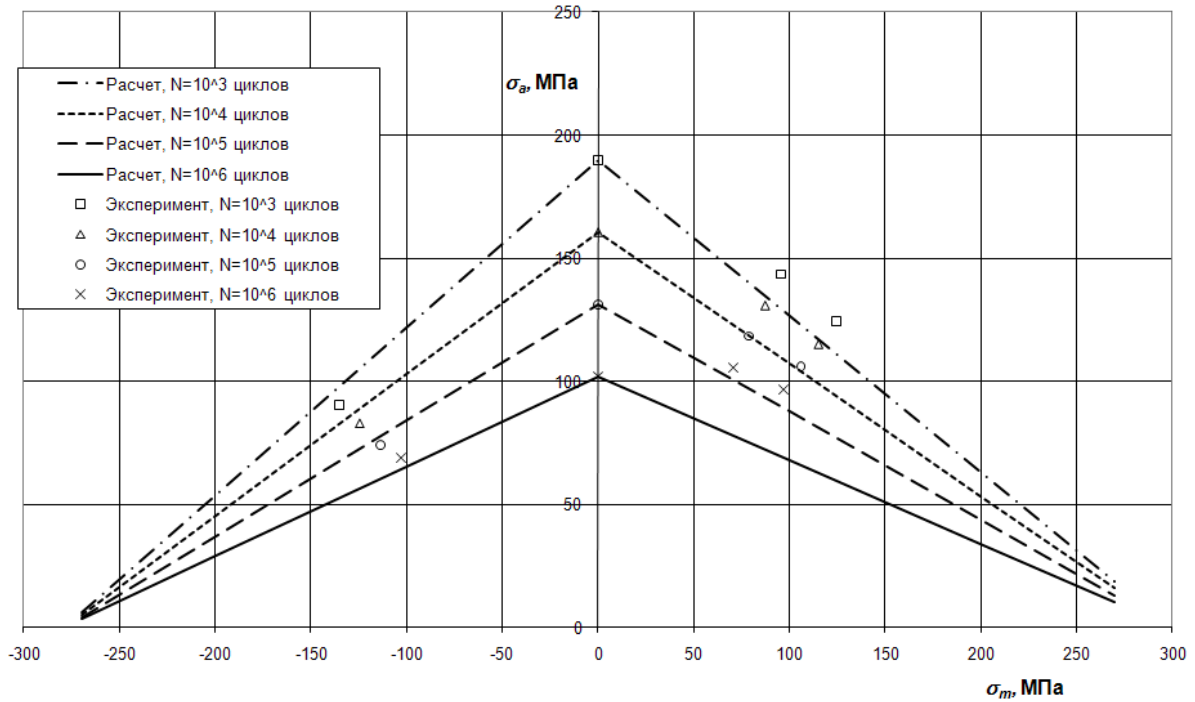


Рис. 1. Асимметричная диаграмма Гудмана для образцов со свободными отверстиями из ламината углепластика типа AS4-PW

Fig. 1. Asymmetric Goodman diagram for CFRP AS4-PW open-hole specimens

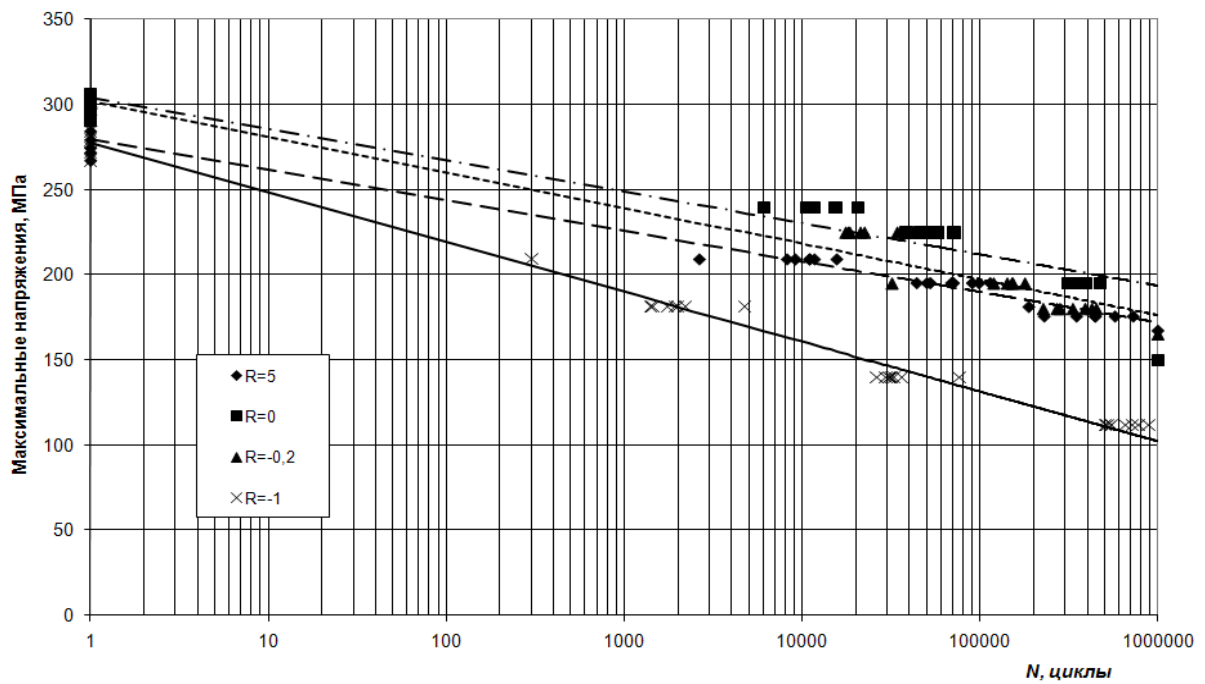


Рис. 2. Кривые усталости образцов со свободными отверстиями из ламината углепластика типа AS4-PW (использованы данные работы [13])

Fig. 2. S-N curves for CFRP AS4-PW open-hole specimens (data from [13] were used)

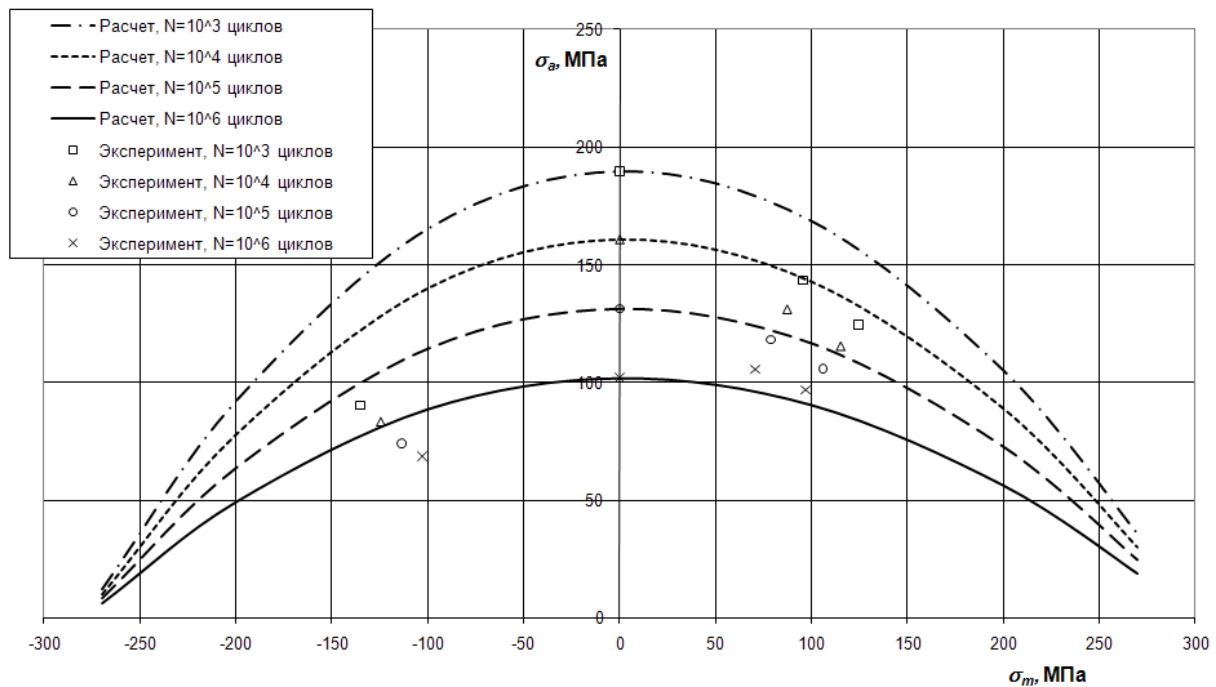


Рис. 3. Асимметричная диаграмма Гербера для образцов со свободными отверстиями из ламината углепластика типа AS4-PW

Fig. 3. Asymmetric Gerber diagram for CFRP AS4-PW open-hole specimens

Как следует из анализа данных, представленных на рис. 1, в области положительных средних напряжений циклического нагружения совпадение расчетных и экспериментальных значений асимметричной диаграммы Гудмана нельзя признать удовлетворительным.

Кроме этого, многие исследователи, в частности, авторы работ [1–2], отмечают, что линейный характер асимметричной диаграммы Гудмана не находит подтверждения в эксперименте.

Нелинейная асимметричная диаграмма Гербера. Нелинейная асимметричная диаграмма Гербера по данным работы [1] может быть выражена в следующей форме:

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

Безусловным достоинством нелинейной асимметричной диаграммы Гербера, также, как и асимметричной диаграммы Гудмана, яв-

ляется простота ее использования и приемлемый объем необходимых исходных данных.

В работе [1] не приведены какие-либо данные о точности определения расчетных характеристик усталостной прочности слоистых ПКМ при использовании этой диаграммы.

На рис. 3 приведен пример нелинейной асимметричной диаграммы Гербера для образцов со свободными отверстиями из ламината углепластика типа AS4-PW. При построении диаграммы использованы экспериментальные данные работы [13].

Как следует из анализа данных, представленных на рис. 3, совпадение расчетных и экспериментальных значений диаграммы Гербера в представленном примере нельзя признать удовлетворительным.

Колоколообразная диаграмма Харриса. Достаточно «революционный» отказ от традиционной диаграммы Гудмана был сделан Харрисом и соавторами в работах [3–5]. Ими была

предложена так называемая колоколообразная диаграмма, процедуру построения которой можно представить следующим образом.

1. Предполагается, что условие постоянной усталостной долговечности слоистых ПКМ для разных уровней асимметрии цикла нагружения может определяться параметрической зависимостью:

$$a = f(1 - m)^u (c + m)^v, \quad (1)$$

где $a = \sigma_a / \sigma_{UTS}$ – относительная амплитуда циклических напряжений растяжения-сжатия; $m = \sigma_m / \sigma_{UTS}$ – относительное среднее напряжение цикла нагружения; $c = \sigma_{UCS} / \sigma_{UTS}$ – соотношение пределов прочности рассматриваемого элемента при сжатии и растяжении; f , u и v – параметры, зависящие от усталостной долговечности рассматриваемого ПКМ.

2. Выражение (1) можно переписать как

$$\sigma_{ai} = f \cdot \sigma_{UTS}^{1-u-v} \cdot (\sigma_{UTS} - \sigma_{mi})^u \times (\sigma_{UCS} + \sigma_{mi})^v. \quad (1,a)$$

3. По данным работы [6] значения параметра f могут значительно различаться для углепластиков и стеклопластиков. Харрис и его коллеги предложили определять значения параметра f с использованием соотношения:

$$f = A c^{-p}, \quad (2)$$

где A и p – эмпирические вариации от $\log N_f$, которые, в свою очередь, могут определяться с использованием соотношений:

$$A = 0,94 + 0,014 \log N_f;$$

$$p = 0,938 + (8,4 \cdot 10^{-4}) \exp\left(\frac{\log N_f}{1,016}\right),$$

где N_f – заданная усталостная долговечность слоистого ПКМ.

По данным работы [3] приемлемые по точности результаты для широкого спектра углепластиков и стеклопластиков дает использование соотношения (2) в виде:

$$f = 0,71 c^{-1,05}. \quad (2,a)$$

4. По данным работы [5] значения параметров u и v могут быть определены как

$$u = 0,033 \lg N + 2,032; \quad v = 0,068 \lg N + 2,089.$$

Значения параметров u и v , соответствующие фиксированным усталостным долговечностям N , приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения параметров u и v , соответствующие фиксированным усталостным долговечностям N

The values of the parameters u and v , corresponding to fixed fatigue life N

N , циклы	u	v
1000	2,131	2,293
10 000	2,164	2,361
100 000	2,197	2,429
1 000 000	2,230	2,497

По данным работ [1–6] безусловным достоинством колоколообразной диаграммы Харриса является «физичность» формы диаграммы, которая подтверждена многими исследователями.

Многие исследователи отмечают также приемлемую точность расчетных оценок с использованием этой диаграммы. Однако в отдельных случаях с этим доводом нельзя согласиться, см., например, рис. 4 (при построении диаграммы использовано соотношение (2,a)).

Анизоморфные диаграммы Каваи. В качестве определенного развития колоколообразной диаграммы Харриса можно считать формирование анизоморфных диаграмм Каваи [1, 2, 7–12].

Каваи и соавторы в указанных работах разработали формулу, которая описывает асимметричную диаграмму постоянной усталостной долговечности, обозначенную как *анизоморфная* диаграмма постоянной усталостной долговечности. Основная характеристика этой диаграммы состоит в том, что она может быть построена с использованием только одной экспериментально полученной кривой усталости,

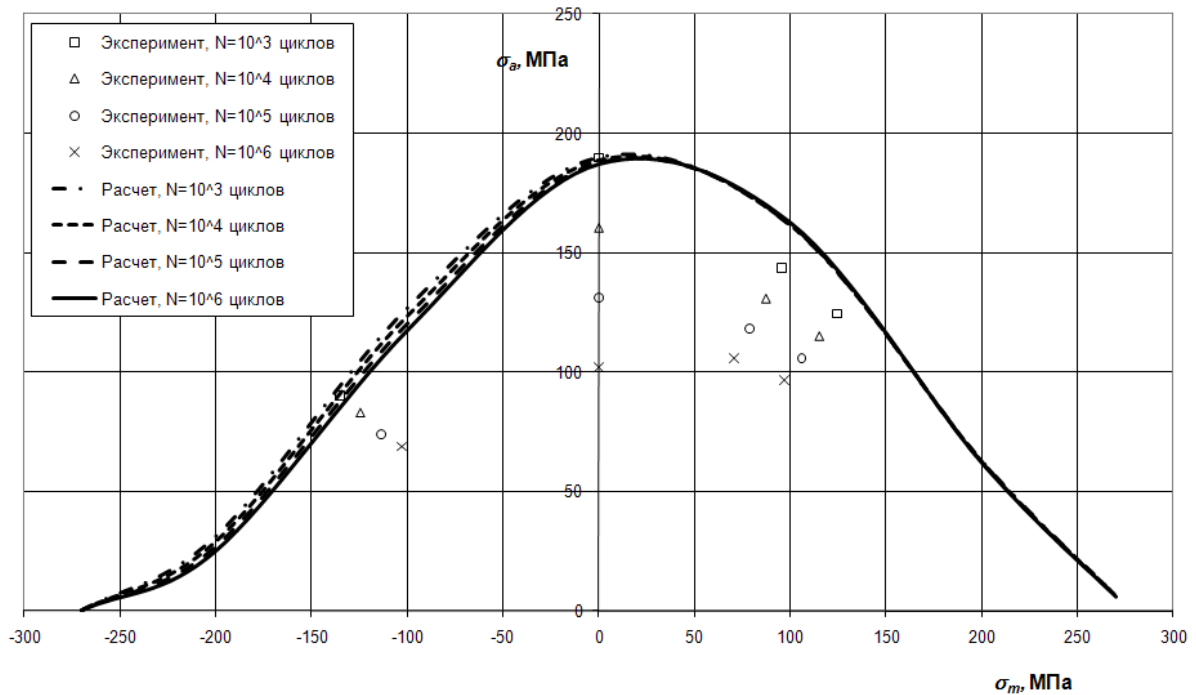


Рис. 4. Диаграмма Харриса для образцов со свободными отверстиями из ламината углепластика типа AS4-PW (использованы данные работы [13])

Fig. 4. Harris diagram for CFRP AS4-PW open-hole specimens (data from [13] were used)

обозначенный как *критическая S–N* кривая усталости. Критический коэффициент асимметрии *R* для этой кривой определяется как

$$R = \chi = \frac{\sigma_{UCS}}{\sigma_{UTS}}$$

Формирование диаграммы основано на трех основных допущениях.

1. Амплитуда напряжения σ_a для данного постоянного значения усталостной долговечности *N* является наибольшей при критическом значении *R* для критической *S–N* кривой усталости.

2. Форма кривых диаграммы постоянной усталостной долговечности постепенно меняется от прямой к параболе с увеличением усталостной долговечности.

3. Диаграмма ограничена огибающей статического разрушения, т. е. двумя прямыми линиями, соединяющими предельное растяжи-

вающее и предельное сжимающее напряжения с максимальным значением σ_a критической *S–N* кривой усталости.

Формирование диаграммы зависит от положения среднего напряжения σ_m на плоскости $(\sigma_m - \sigma_a)$, т. е. находится ли среднее напряжение в области растяжения или сжатия. Математическое выражение диаграммы можно представить следующим образом:

$$\frac{\sigma_a^\chi - \sigma_m^\chi}{\sigma_a^\chi} = \begin{cases} \left(\frac{\sigma_m - \sigma_m^\chi}{\sigma_{UTS} - \sigma_m^\chi} \right)^{(2-\psi_\chi)} & , \sigma_{UTS} \geq \sigma_m \geq \sigma_m^\chi, \\ \left(\frac{\sigma_m - \sigma_m^\chi}{\sigma_{UTS} - \sigma_m^\chi} \right)^{(2-\psi_\chi)} & , \sigma_{UCS} \leq \sigma_m \leq \sigma_m^\chi, \end{cases} \quad (3)$$

где σ_a^χ и σ_m^χ представляют амплитуду и среднее значение циклических напряжений при заданном значении усталостной долговечности *N* при усталостном нагружении с критиче-

ским значением коэффициента R ; ψ_χ обозначает коэффициент критической усталостной прочности и определяется как:

$$\psi_\chi = \frac{\sigma_{\max}^\chi}{\sigma_B}, \quad (4)$$

где σ_{\max}^χ — максимальное циклическое напряжение при заданном значении усталостной долговечности N при усталостном нагружении с критическим значением коэффициента R . $\sigma_B (\gt 0)$ — так называемая справочная прочность материала (абсолютный максимум между σ_{UTS} и σ_{UCS}), которая определяется как пик огибающей статического разрушения. Очевидно, что ψ_χ всегда изменяется в диапазоне $[0, 1]$ и экспоненты $(2 - \psi_\chi)$ в уравнении (3) всегда больше единицы. Впоследствии, линейная (когда $2 - \psi_\chi = 1$) или параболическая (когда $2 - \psi_\chi \gt 1$) кривые могут быть получены из уравнения (3).

Коэффициент критической усталостной прочности (см. уравнение (4)) связан с числом циклов нагружения, определяемым с использованием критической $S-N$ кривой усталости:

$$\psi_\chi = f(2N_f).$$

После определения критической $S-N$ кривой усталости путем обработки имеющихся данных по усталости рассматриваемого слоистого ПКМ с использованием значений пределов статической прочности σ_{UTS} и σ_{UCS} может быть построена диаграмма постоянной усталостной долговечности. Очевидно, что зависимость анизоморфной ДПУД от критической $S-N$ кривой усталости ограничивает ее применимость. Когда не известна критическая $S-N$ кривая усталости с критическим значением коэффициента асимметрии R , может быть использована кривая усталости со значением R , которое наиболее близко к критическому значению [11].

Для повышения эффективности использования исходной анизоморфной диаграммы предложена модифицированная анизоморф-

ная диаграмма [11]. Авторы работ [7–9] заметили, что усталостное поведение матрично-доминантных углепластиков не может быть описано простыми линиями или изогнутыми кривыми между σ_{UTS} и амплитудами критической $S-N$ кривой усталости. Поэтому они предложили использование другой $S-N$ кривой усталости, которую обозначали как «подкритическую» $S-N$ кривую усталости. Использование «подкритической» $S-N$ кривой усталости было предложено с целью разделения секторов между пределами статической прочности σ_{UTS} и σ_{UCS} и критической $S-N$ кривой усталости, что более точно соответствует поведению слоистого ПКМ. Модифицированная анизоморфная диаграмма Каваи оказалась более точным инструментом моделирования усталостного поведения материала, но ее применимость оказалась ограниченной исследуемым материалом и такая диаграмма не может быть обобщена без дополнительных экспериментальных данных.

Тем не менее, по данным работ [1–2, 7–12] с использованием анизоморфных диаграмм Каваи может быть достигнута достаточно высокая точность результатов расчетных оценок. Этот факт можно считать основным достоинством диаграмм.

К основным недостаткам диаграмм Каваи можно отнести следующие.

1. Определенная уникальность исходных данных, требуемых для построения диаграмм. Это касается, прежде всего, необходимости построения критической $S-N$ кривой усталости с критическим значением коэффициента асимметрии R циклического нагружения.

2. Достаточная сложность использования основного математического выражения (3) для построения диаграмм.

3. Неприемлемая точность результатов расчетных оценок с использованием приближенных методов построения диаграмм Каваи в соответствии с рекомендациями работы [1] — см. рис. 5.

В табл. 2 приведены результаты обзора основных положений рассмотренных ДПУД.

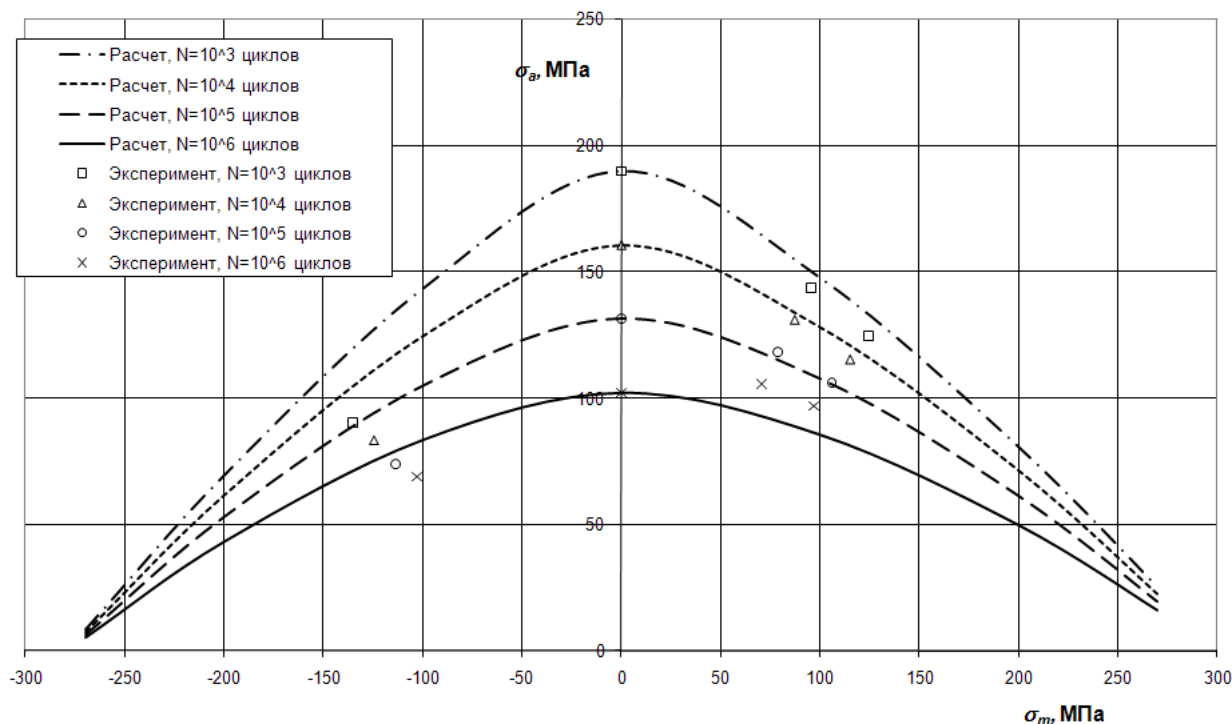


Рис. 5. Диаграмма Кавая для образцов со свободными отверстиями из ламината углепластика типа AS4-PW (использованы данные работы [13])

Fig. 5. Kawai diagram for CFRP AS4-PW open-hole specimens (data from [13] were used)

Таблица 2

Обзор основных положений различных моделей ДПУД

An overview of the key points of various constant-life diagram models

Тип ДПУД	Точность расчетных оценок	Трудоемкость (сложность) применения	Необходимые исходные данные	Рекомендации о применении
Несимметричная диаграмма Гудмана	Неустойчивая	Небольшая	$\sigma_{UTS}, \sigma_{UCS}$, $S-N$ кривая при $R = -1$	Рекомендуется при $\sigma_m < 0$
Нелинейная несимметричная диаграмма Гербера	Неприемлемая	Небольшая	$\sigma_{UTS}, \sigma_{UCS}$, $S-N$ кривая при $R = -1$	Не рекомендуется
Колоколообразная диаграмма Харриса	Неустойчивая	Небольшая	$\sigma_{UTS}, \sigma_{UCS}$,	В исходном виде рекомендуется применять с осторожностью
Анизоморфные диаграммы Кавая	Высокая (по данным работ [1–2, 7–12])	Достаточно высокая	$\sigma_{UTS}, \sigma_{UCS}$, критическая $S-N$ кривая усталости при $R = \chi$; 1 – «подкритические» $S-N$ кривые усталости	Не рекомендуется при инженерных расчетах

Модификация основного математического выражения колоколообразной диаграммы Харриса

По результатам обзора и анализа представленных моделей ДПУД можно сделать вывод, что наиболее перспективной модификацией какой-либо модели ДПУД в плане достижения точности расчетных оценок при приемлемой трудоемкости может являться модификация колоколообразной диаграммы Харриса.

В качестве основы такой модификации предлагается введение в математическое выражение диаграммы Харриса (уравнение (1)) параметров специальной кривой усталости рассматриваемого ПКМ при заданной усталостной долговечности. В этом смысле модификация будет в чем-то схожей с анизоморфными диаграммами Каваи.

В качестве такой специальной кривой усталости может быть предложена кривая усталости рассматриваемого слоистого ПКМ при циклическом нагружении симметричным циклом, т. е. при $R = -1$. Предполагается, что введение параметров этой кривой в математическое выражение диаграммы Харриса обеспечит повышение точности расчетных оценок по сравнению с применением исходной диаграммы Харриса.

Математически модификация колоколообразной диаграммы Харриса состоит в следующем.

Запишем соотношение (1,а) для симметричного цикла нагружения:

$$\sigma_a^{R=-1} = f \cdot \sigma_{UTS}^{1-u-v} \cdot \sigma_{UTS}^u \cdot |\sigma_{UCS}|^v.$$

Тогда

$$f = \sigma_a^{R=-1} / (\sigma_{UTS}^{1-u-v} \cdot \sigma_{UTS}^u \cdot |\sigma_{UCS}|^v). \quad (5)$$

Подставляя уравнение (5) в соотношение (1,а), получаем:

$$\sigma_{ai} = \frac{\sigma_a^{R=-1} \cdot (\sigma_{UTS} - \sigma_{mi})^u \cdot (|\sigma_{UCS}| + \sigma_{mi})^v}{\sigma_{UTS}^u \cdot |\sigma_{UCS}|^v} \quad (6)$$

или

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

С целью практического использования соотношений (6)–(7) очевидна необходимость по-

лучения *средних значений* параметров u и v , единых для всего диапазона «рабочих» долговечностей $N = 10^3 \div 10^6$. В качестве таких значений по результатам обработки данных табл. 1 можно рекомендовать следующие: $u = 2,18$; $v = 2,40$.

На рис. 6 представлена модифицированная диаграмма Харриса, построенная с использованием соотношения (6) для образцов со свободными отверстиями из ламината углепластика типа AS4-PW. При построении диаграммы использованы экспериментальные данные работы [13], в том числе кривая усталости для рассматриваемых образцов при коэффициенте асимметрии $R = -1$ циклического нагружения.

По результатам анализа данных, представленных на рис. 6, можно сделать следующие основные выводы.

1. Модифицированная диаграмма Харриса сохранила основное достоинство оригинальной диаграммы – колоколообразность и асимметричность формы.

2. Известно, что существует значительный разброс усталостных характеристик слоистых ПКМ. Тем не менее, можно отметить достаточно хорошее совпадение расчетных и экспериментальных значений модифицированной диаграммы Харриса, что позволяет надеяться на приемлемую точность расчетных оценок с использованием этой диаграммы.

Основное практическое значение предложенной диаграммы заключается в следующем.

1. При построении предложенной диаграммы удастся избежать неоднозначных определений значений параметра f (см. выражения (1) и (1,а)) с использованием соотношений (2) и (2,а).

2. С использованием соотношения (6) возможно построение кривых усталости для рассматриваемого слоистого ПКМ практически с любой асимметрией циклического нагружения. Процедура построения заключается в следующем:

- предполагается, что известна кривая усталости рассматриваемого слоистого ПКМ при коэффициенте асимметрии $R = -1$ циклического нагружения;

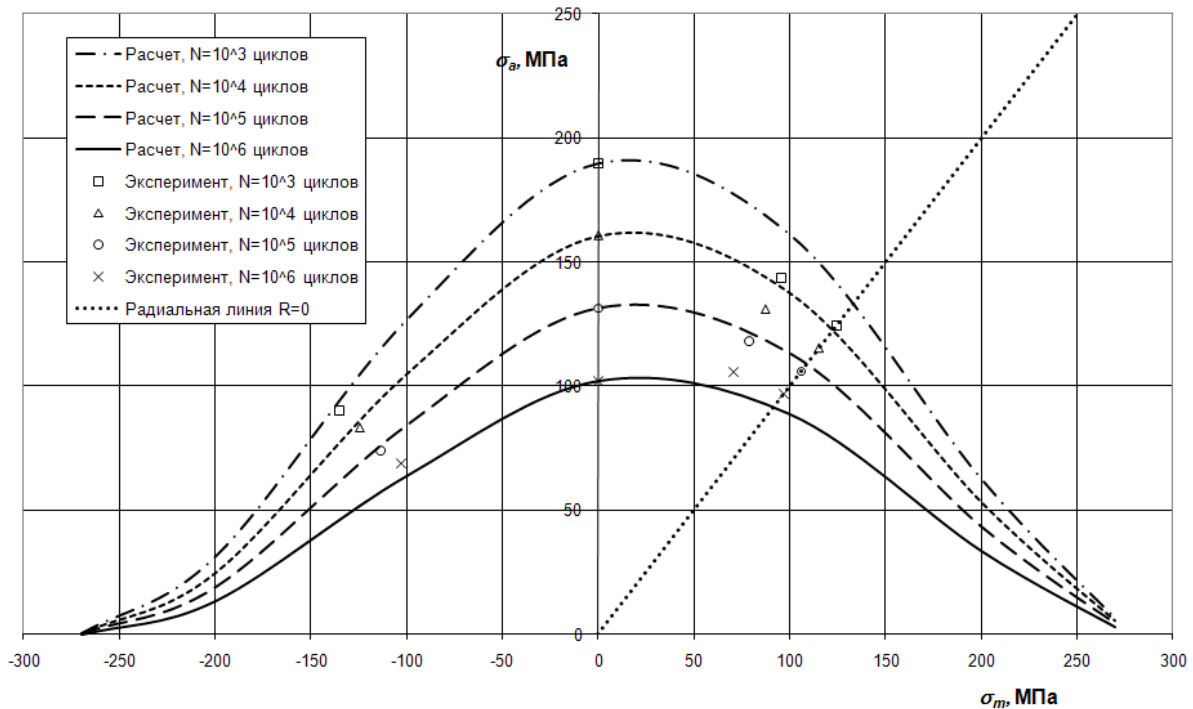


Рис. 6. Модифицированная диаграмма Харриса для образцов со свободными отверстиями из ламината углепластика типа AS4-PW (использованы данные работы [13])

Fig. 6. Modified Harris diagram for CFRP AS4-PW open-hole specimens (data from [13] were used)

- задаются определенные значения усталостной долговечности N рассматриваемого слоистого ПКМ, фиксируются значения $\sigma_a^{R=-1}$, соответствующие этой долговечности; с использованием соотношения (6) строится модифицированная диаграмма Харриса (см. рис. 6);
- задается требуемое значение коэффициента асимметрии R ; на модифицированной диаграмме строится радиальная линия (см. рис. 6):

$$\sigma_a = \left(\frac{1-R}{1+R} \right) \cdot \sigma_m;$$

- определяются значения (N, σ_m, σ_a) в точках пересечения модифицированной диаграммы и радиальной линии;
- для заданного значения коэффициента асимметрии R строится кривая усталости $N = f(\sigma_{max})$, где $\sigma_{max} = \sigma_m + \sigma_a$;
- построенная кривая усталости может использоваться для непосредственной оценки усталостной долговечности рассматриваемого

ПКМ при заданном значении коэффициента асимметрии R .

3. С использованием соотношения (7) для рассматриваемого ПКМ возможен пересчет циклов с произвольной асимметрией в эквивалентные симметричные циклы нагружения.

Обсуждение результатов

Основная особенность модифицированной диаграммы Харриса состоит в том, что она построена с использованием экспериментально полученной кривой усталости рассматриваемого слоистого ПКМ при коэффициенте асимметрии $R = -1$ циклического нагружения. Эта особенность является главным отличием модифицированной диаграммы от оригинальной. Вместе с тем представляется, что использование именно этой характеристики позволит обеспечить повышение точности расчетных оценок характеристик усталости при использовании этой диаграммы.

Как правило, кривая усталости рассматриваемого слоистого ПКМ при коэффициенте асимметрии $R = -1$ циклического нагружения входит в число известных исходных данных для оценки характеристик усталости рассматриваемого слоистого ПКМ. В этом смысле она выгодно отличается от обязательного знания критической $S-N$ кривой усталости при критическом коэффициенте асимметрии $R = \chi$ основной диаграммы Каваи, для построения которой требуется проведение специального эксперимента.

В работе [14] представлен пример использования соотношения (7) при расчетных оценках усталостной долговечности образцов со свободным отверстием из ламината углепластика типа T300/5208 [45/0/-45/90]_{2s} при квазислучайном программном нагружении. В работе [15] соотношение (7) использовано при расчетных оценках остаточной прочности образцов со свободным отверстием из ламината углепластика типа AS4/3501-6 [0/±45/90]_{s4} при сложном многоступенчатом нагружении. В указанных работах показана удовлетворительная точность выполненных расчетных оценок.

Заключение

Представлен обзор и краткий анализ четырех известных моделей ДПУД, наиболее часто

встречаемых в научных публикациях. Отмечены основные достоинства и недостатки перечисленных моделей.

В качестве определенной альтернативы рассмотренных диаграмм для инженерных расчетов усталостных характеристик слоистых ПКМ при различных коэффициентах асимметрии R циклического нагружения предложена специальная модификация диаграммы Харриса.

На примере построения предложенной диаграммы для образцов со свободными отверстиями из ламината углепластика типа AS4-PW показано, что с ее использованием возможно выполнение подобных расчетов с достаточно высокой точностью и приемлемой трудоемкостью.

С использованием предложенной диаграммы возможно построение кривых усталости для рассматриваемого слоистого ПКМ практически с любой асимметрией циклического нагружения. Подобные кривые усталости могут быть использованы в дальнейших расчетах характеристик сопротивления усталости слоистых ПКМ.

В качестве рекомендации для дальнейших исследований следует отметить необходимость увеличения объема верификации предложенной модифицированной диаграммы Харриса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Kawai M.** Fatigue life prediction of composite materials under constant amplitude loading, Fatigue life prediction of composites and composite structures. Ed. by Anastasios P. Vassilopoulos. Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, 2010.
- [2] **Vassilopoulos A.P., Keller T.** Fatigue of Fiber-reinforced Composites, Springer-Verlag London Limited, 2011.
- [3] **Harris B.** A parametric constant-life model for prediction of the fatigue lives of fiber-reinforced plastics, Fatigue in composites / ed. by B. Harris. Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC, 2003.
- [4] **Harris B., Gathercole N., Lee J.A., Reiter H., Adam T.** Life prediction for constant-stress fatigue in carbon-fiber composites // Phil Trans Roy Soc (Lond), A355. 1997. P. 1259–1294.
- [5] **Beheshty M.H., Harris B., Adam T.** An empirical fatigue-life model for high-performance fiber composites with and without impact damage // Compos A: Appl Sci & Manuf., A30. 1999. P. 971–987.
- [6] **Beheshty M.H., Harris B.** A constant life model of fatigue behavior for carbon fiber composites: the effect of impact damage // Compos. Sci. Technol. 1998. 58(1). P. 9–18.
- [7] **Kawai M., Itoh N.** A failure-mode based anisotropic constant life diagram for a unidirectional carbon/epoxy laminate under off-axis fatigue loading at room temperature // Journal of Composite Materials, 48 (2014) 571–592.



[8] Kawai M., Yano K., Anisomorphic constant fatigue life diagrams of constant probability of failure and prediction of P–S–N curves for unidirectional carbon/epoxy laminates // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2016. 83. P. 323–334.

[9] Kawai M., Yano K. Probabilistic anisomorphic constant fatigue life diagram approach for prediction of P–S–N curves for woven carbon/epoxy laminates at any stress ratio // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2016. 80. P 244–258.

[10] Tofallis C. A better measure of relative prediction accuracy for model selection and model estimation // Journal of the Operational Research Society. 2015. 66. P. 1352–1362.

[11] Broer A.A.R. Fatigue life prediction of carbon fibre-reinforced epoxy laminates using a single S-N curve, Master of Science Thesis, Delft University of Technology, 2018.

[12] Buimovich Y., Elmalich D. Examination of the KAWAI CLD Method for Fatigue Life Prediction of

Composites // 30th Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue, ICAF 2019, Krakow, Poland, June 2–7 2019, Proceedings, Krakow, 2019.

[13] Tomblin J., Seneviratne W. Determining the Fatigue Life of Composite Aircraft Structures Using Life and Load-Enhancement Factors, Report DOT/FAA/AR-10/6, 2011.

[14] Strizhius V. Fatigue life prediction of CFRP laminate under quasi-random loading // 30th Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue, ICAF 2019, Krakow, Poland, June 2–7 2019, Proceedings, Krakow, 2019.

[15] Стрижиус В.Е. Расчетная оценка остаточной прочности слоистых композитов при многоступенчатом нагружении // Деформирование и разрушение композиционных материалов и конструкций: материалы докладов третьей междунар. конф., г. Москва, 23–25 октября 2018 г. М.: Изд-во ИМАШ РАН, 2018. С. 138–140.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

СТРИЖИУС Виталий Ефимович – доктор технических наук профессор Национального исследовательского университета «МАИ»
E-mail: vitaly.strizhius@gmail.com

Статья поступила в редакцию: 10.09.2019

REFERENCES

[1] M. Kawai, Fatigue life prediction of composite materials under constant amplitude loading, Fatigue life prediction of composites and composite structures. Ed. by Anastasios P. Vassilopoulos. Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, 2010.

[2] A.P. Vassilopoulos, T. Keller, Fatigue of Fiber-reinforced Composites, Springer-Verlag London Limited, 2011.

[3] B. Harris, A parametric constant-life model for prediction of the fatigue lives of fiber-reinforced plastics, Fatigue in composites. Ed. by B. Harris. Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC, 2003.

[4] B. Harris, N. Gathercole, J.A. Lee, H. Reiter, T. Adam, Life prediction for constant-stress fatigue in carbon-fiber composites, Phil Trans Roy Soc (Lond), A355 (1997) 1259–1294.

[5] M.H. Beheshty, B. Harris, T. Adam, An empirical fatigue-life model for high-performance fiber

composites with and without impact damage, Compos A: Appl Sci & Manuf., A30 (1999) 971–987.

[6] M.H. Beheshty, B. Harris, A constant life model of fatigue behavior for carbon fiber composites: the effect of impact damage, Compos. Sci. Technol., 58 (1) (1998) 9–18.

[7] M. Kawai, N. Itoh, A failure-mode based anisomorphic constant life diagram for a unidirectional carbon/epoxy laminate under off-axis fatigue loading at room temperature, Journal of Composite Materials, 48 (2014) 571–592.

[8] M. Kawai, K. Yano, Anisomorphic constant fatigue life diagrams of constant probability of failure and prediction of P–S–N curves for unidirectional carbon/epoxy laminates, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 83 (2016) 323–334.

[9] M. Kawai, K. Yano, Probabilistic anisomorphic constant fatigue life diagram approach for prediction of

P–S–N curves for woven carbon/epoxy laminates at any stress ratio, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 80 (2016) 244–258.

[10] **C. Tofallis**, A better measure of relative prediction accuracy for model selection and model estimation, *Journal of the Operational Research Society*, 66 (2015) 1352–1362.

[11] **A.A.R. Broer**, Fatigue life prediction of carbon fibre-reinforced epoxy laminates using a single S-N curve, Master of Science Thesis, Delft University of Technology, 2018.

[12] **Y. Buimovich, D. Elmalich**, Examination of the KAWAI CLD Method for Fatigue Life Prediction of Composites, 30th Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue, ICAF 2019,

Krakow, Poland, June 2–7 2019, Proceedings, Krakow, 2019.

[13] **J. Tomblin, W. Seneviratne**, Determining the Fatigue Life of Composite Aircraft Structures Using Life and Load-Enhancement Factors, Report DOT/FAA/AR-10/6 (2011).

[14] **V. Strizhius**, Fatigue life prediction of CFRP laminate under quasi-random loading, 30th Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue, ICAF 2019, Krakow, Poland, June 2–7 2019, Proceedings, Krakow, 2019.

[15] **V.E. Strizhius**, Estimation of the residual strength of layered composites under multistage loading, Third International Conference DFCMS-2018, IMASH, Moscow, 23–25 October 2018, Proceedings, Moscow, 2018.

THE AUTHOR

STRIZHIUS Vitalii E. – *National research university «Moscow Aviation Institute»*
E-mail: vitaly.strizhius@gmail.com

Received: 10.09.2019