

DOI: 10.18721/JEST.26302
УДК 629.7.023

В.Е. Стрижиус

Национальный исследовательский университет "МАИ", Москва, Россия

ОЦЕНКА УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НОРМАЛИЗОВАННЫХ КРИВЫХ УСТАЛОСТИ

Известно, что расчетная оценка усталостной долговечности слоистых композитов без проведения полномасштабных экспериментальных работ является достаточно важной практической задачей в области исследования усталостной прочности композитов. В настоящее время основной объем исследований в этом направлении посвящен расчетной оценке усталостной долговечности композитов с использованием различных диаграмм постоянной усталостной долговечности. К сожалению, несмотря на достаточно большой выбор таких диаграмм, достичь с их использованием *приемлемой трудоемкости и точности* получаемых результатов получается далеко не всегда. В качестве определенной альтернативы методов расчетной оценки усталостной долговечности слоистых композитов с применением диаграмм постоянной усталостной долговечности предлагается метод расчетной оценки усталостной долговечности с использованием нормализованных кривых усталости. При формировании метода использовано основное свойство нормализованных кривых усталости – возможность исключения влияния на усталостную долговечность разной прочности волокон, объемных долей и укладок в слоистых композитах. Сделано допущение, что нормализованные кривые усталости для рассматриваемых образцов могут быть получены по результатам обработки экспериментальных данных по усталостной долговечности так называемых "образцов – прототипов", без привлечения данных по усталостной долговечности рассматриваемых образцов. Именно в этом состоит практическая ценность предлагаемого метода. На основе уравнений нормализованных кривых усталости предложены уравнения для формирования «классических» *S-N* кривых усталости рассматриваемых образцов при различной асимметрии циклического нагружения, с использованием которых и предлагается выполнять собственно расчетные оценки усталостной долговечности. Представлен пример расчетной оценки усталостной долговечности образцов со свободным отверстием из углепластика T300/5208 [45/0/-45/90]_{2s}, демонстрирующий возможность предлагаемого метода.

Ключевые слова: слоистые композиты, усталостная долговечность, образцы со свободным отверстием, диаграммы постоянной усталостной долговечности, нормализованные кривые усталости.

Ссылка при цитировании:

Стрижиус В.Е. Оценка усталостной долговечности слоистых композитов с использованием нормализованных кривых усталости // *Материаловедение. Энергетика*. 2020. Т. 26, № 3. С. 20–32. DOI: 10.18721/JEST.26302

Эта статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

V.E. Strizhius

National Research University "Moscow Aviation Institute", Moscow, Russia

FATIGUE LIFE PREDICTION OF LAMINATED COMPOSITES USING NORMALIZED S-N DATA

It is known that fatigue life prediction of laminated composites without conducting full-scale experimental work is quite an important practical task in the field of studying the fatigue strength of composites. Currently, the main volume of research in this direction is devoted to fatigue life prediction of composites using various constant-life diagrams. Unfortunately, despite a fairly large selection of such diagrams, it is not always possible to achieve acceptable labor intensity and accuracy of the results obtained using them. As a definite alternative to methods for fatigue life prediction of laminated composites using constant-life diagrams, we propose a method for fatigue life prediction using normalized S-N data. When forming the method, the main property of normalized S-N data is used – the ability to exclude the influence on fatigue life of different fiber strength, volume fractions and layings in laminated composites. It is assumed that normalized S-N data for the specimens under consideration can be obtained by processing experimental data on the fatigue life of the so – called "prototype specimens", without involving data on the fatigue life of the specimens under consideration. This is the practical value of the proposed method. Based on the equations for normalized S-N data, we propose equations for the formation of "classical" S-N fatigue curves of the specimens under consideration at various asymmetries of cyclic loading, using which we propose to perform the actual prediction of fatigue life characteristics. An example of fatigue life prediction of open-hole specimens made of GFRP T300/5208 T300/5208 [45/0/-45/90]_{2s}, demonstrating the capabilities of the proposed method, is presented.

Keywords: laminated composites, fatigue life, open-hole specimens, constant-life diagrams, normalized S-N data.

Citation:

V.E. Strizhius, Fatigue life prediction of laminated composites using normalized S-N data, Materials Science. Power Engineering, 26 (03) (2020) 20–32, DOI: 10.18721/JEST.26302

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Известно, что в настоящее время современные полимерные композиционные материалы (ПКМ) находят все большее применение в основных силовых элементах конструкций. Многие исследователи механических свойств ПКМ считают, что по сравнению с традиционными конструкционными металлами и сплавами ПКМ имеют серьезные преимущества, связанные в основном с высокими удельными характеристиками статической и усталостной прочности.

Как правило, такие характеристики определяются по результатам специальных статических и усталостных испытаний, которые требуют большого объема материальных и финансовых затрат. В большей степени это касается испытаний по определению характеристик сопротивления усталости ПКМ. В связи с этим, многие современные исследования посвящены прогнозированию характеристик сопротивления усталости слоистых ПКМ при наличии *ограниченного объема испытаний, что особенно важно в процессе внедрения новых ПКМ на начальном этапе проектирования элементов конструкций.*

Известно, что главная цель прогнозирования характеристик сопротивления усталости слоистых ПКМ – это построение кривых усталости образцов и элементов из ПКМ при различных асимметриях циклического нагружения. В настоящее время основной объем исследований в этом направлении посвящен построению таких кривых с использованием различных диаграмм постоянной усталостной долговечности (ДПУД). К таким диаграммам 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, 7–11].

Однако, несмотря на достаточно большой выбор ДПУД, достичь *приемлемой трудоемкости и точности* получаемых результатов при прогнозировании характеристик сопротивления усталости ПКМ с использованием ДПУД получается далеко не всегда.

В качестве определенной альтернативы прогнозированию характеристик сопротивления усталости слоистых ПКМ с использованием ДПУД в настоящей статье предложен метод прогнозирования таких характеристик с использованием нормализованных кривых усталости.

Сформированы основные положения и процедура использования предлагаемого метода.

Представлен пример прогнозирования характеристик сопротивления усталости образцов со свободным отверстием из углепластика T300/5208 [45/0/-45/90]_{2s}, демонстрирующий возможности предлагаемого метода.

Метод прогнозирования характеристик сопротивления усталости слоистых ПКМ с использованием диаграмм постоянной усталостной долговечности

Основные положения метода прогнозирования характеристик сопротивления усталости слоистых ПКМ с использованием ДПУД можно проиллюстрировать на примере применения асимметричной диаграммы Гудмана.

Асимметричная диаграмма Гудмана учитывает различие прочности слоистых ПКМ при растяжении и сжатии и по данным работы [1] может быть выражена следующим соотношением:

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

где:

- σ – 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 ПКМ при растяжении;
- σ_{UCS} – предел прочности ПКМ при сжатии.

Таким образом, для использования диаграммы Гудмана необходимы следующие исходные данные.

1. Уравнение кривой усталости рассматриваемого ПКМ при регулярном нагружении симметричным циклом.

2. Значение пределов прочности рассматриваемого ПКМ при растяжении и сжатии.

Построение кривых усталости рассматриваемого слоистого ПКМ при различных значениях коэффициента асимметрии напряжений R и фиксированных долговечностях выполняется с использованием уравнений, получаемых из соотношения (1):

$$\sigma_a = \frac{\sigma_a^{R=-1}}{1 + \frac{(1-R)}{(1+R)} \times \frac{\sigma_a^{R=-1}}{\sigma_{US}}}, \quad (2)$$

$$\sigma_m = \sigma_a \times \frac{(1+R)}{(1-R)}, \quad (3)$$

где σ_{US} – предел прочности ПКМ при растяжении (σ_{UTS}) или сжатии (σ_{UCS}).

Собственно прогнозирование выполняется с использованием следующей процедуры.

1. Фиксируются требуемые значения коэффициента асимметрии напряжений R , для которых необходимо выполнить построение кривых усталости рассматриваемого слоистого ПКМ.

2. Выбирается ряд значений усталостной долговечности. С использованием уравнения кривой усталости рассматриваемого слоистого ПКМ при регулярном нагружении симметричным циклом (которая считается известной) определяются значения σ_a^{R-1} , соответствующие выбранным долговечностям.

3. С использованием уравнений (2) и (3) определяются значения σ_a и σ_m – амплитуды и среднего значения циклических напряжений, соответствующих зафиксированным долговечностям и коэффициентам асимметрии напряжений R .

4. Определяются значения пиковых напряжений, строятся кривые усталости рассматриваемого слоистого ПКМ для требуемых значений R .

5. Оценивается расчетная усталостная долговечность слоистого ПКМ при расчетных уровнях циклических напряжений.

6. При наличии экспериментальных данных по усталостной долговечности слоистого ПКМ выполняется сравнение расчетных и экспериментальных данных, делается вывод о корректности выполненного прогноза.

Анализируя представленный метод и процедуру прогнозирования можно сделать следующие выводы.

1. Безусловным достоинством асимметричной диаграммы Гудмана (1) и уравнений (2)–(3) является простота использования и приемлемый объем необходимых исходных данных.

2. Однако известно [1–2, 12], что достаточно часто при построении асимметричных диаграмм Гудмана совпадение расчетных и экспериментальных значений нельзя признать удовлетворительным.

3. Аналогичные выводы можно сделать на основе анализа опыта использования других ДПУД. При этом следует отметить определенную тенденцию: точность прогнозирования может быть увеличена с использованием более сложных ДПУД (например, анизоморфных диаграмм Каваи [1–2, 7–11]), однако объем необходимых исходных данных в этом случае должен быть значительно увеличен.

Метод прогнозирования характеристик сопротивления усталости слоистых ПКМ с использованием нормализованных кривых усталости

Известно, что экспериментальные данные по усталостной долговечности образцов и конструктивных элементов из слоистых ПКМ аппроксимируются несколькими типами уравнений. В инженерной практике наиболее часто используется аппроксимация уравнением Менделла (Mandell) [13–14]:

$$\sigma_{\max} = a + b \cdot \lg N, \quad (4)$$

где:

- σ_{\max} – пиковое значение циклического напряжения;
- N – усталостная долговечность образцов до появления усталостного повреждения;
- a и b – параметры уравнения, причем, как правило, принимается, что $a = \sigma_{UTS}$ – при циклическом нагружении превалирующим растяжением и $a = \sigma_{UCS}$ – при циклическом нагружении симметричным циклом и превалирующем сжатием.

В работе [15] для описания кривых усталости слоистых ПКМ при циклическом нагружении превалирующим растяжением предложено более сложное уравнение:

$$\sigma_{\max} = \sigma_{UTS} + b \cdot \lg N_f + c \cdot (\lg N_f)^2, \quad (5)$$

где:

- σ_{\max} – пиковое значение циклических напряжений растяжения;
- σ_{UTS} – предел прочности рассматриваемого ПКМ при растяжении;
- N_f – усталостная долговечность до разрушения;
- b и c – параметры уравнения.

В работе [16] отмечается, что с использованием уравнения (5) для однонаправленных стеклопластиков типа G913 при циклическом нагружении превалирующем растяжением может быть достигнута большая достоверность аппроксимации экспериментальных данных, чем при использовании уравнения (4).

В этой же работе приведены значения параметров b и c уравнения (5) для рассмотренных стеклопластиков. Там же приведены значения параметров $b' = b/\sigma_{UTS}$ и $c' = c/\sigma_{UTS}$ нормализованных кривых усталости рассмотренных стеклопластиков в виде

$$\sigma_{\max} / \sigma_{UTS} = 1 + b' \cdot \lg N_f + c' \cdot (\lg N_f)^2. \quad (6)$$

В работе [16] также отмечено, что процедура нормализации использована для исключения влияния на усталость разной прочности волокон, объемных долей и укладок. Каких-либо выводов о возможности осреднения и обобщения представленных значений b' и c' в работе не сделано, хотя по результатам анализа данных табл. 1 можно допустить, что такая возможность существует, по крайней мере, для значений параметра b' .

Таблица 1

Значения параметра b' уравнения (6) для однонаправленных стеклопластиков типа G913 при циклическом нагружении превалирующем растяжением (данные работы [16])

Table 1

Values of parameter b' of equation (6) for unidirectional fiberglass G913 composite under tension cyclic loading (data from [16])

Тип ПКМ	$b' = b/\sigma_{UTS}$
G913	– 0,109
G913/913	– 0,090
G913/920	– 0,097
G913/SiC	– 0,110
G913/PE	– 0,110
G913/G	– 0,103

Можно предположить, что процедура нормализации возможна и для кривых усталости, выражаемых уравнением Менделла (4). В этом случае, например, для слоистых углепластиков уравнения кривых усталости Менделла и уравнения нормализованных кривых усталости могут быть выражены соотношениями, представленными в табл. 2.

На основе анализа представленных выше уравнений можно сформировать основные положения специального метода прогнозирования характеристик сопротивления усталости слоистых ПКМ с использованием нормализованных кривых усталости (НКУ). Эти положения заключаются в следующем.

Таблица 2

Уравнения кривых усталости Менделла и нормализованных кривых усталости при циклическом нагружении слоистых углепластиков

Table 2

Mendell equations of *S-N* curves and equations of normalized fatigue curves under cyclic loading of layered carbon fiber composites

Тип циклического нагружения	Уравнения кривых усталости Менделла	Уравнения нормализованных кривых усталости
Симметричный цикл	$\sigma_a^{R-1} = \sigma_{UCS} + b \cdot \lg N$ (7)	$\sigma_a^{R-1} / \sigma_{UCS} = 1 + b' \cdot \lg N$ (10)
Превалирующее растяжение	$\sigma_{max} = \sigma_{UTS} + b \cdot \lg N$ (8)	$\sigma_{max} / \sigma_{UTS} = 1 + b' \cdot \lg N$ (11)
Превалирующее сжатие	$ \sigma_{min} = \sigma_{UCS} + b \cdot \lg N$ (9)	$\sigma_{min} / \sigma_{UCS} = 1 + b' \cdot \lg N$ (12)

1. Рассматривается некий образец, изготовленный из слоистого ПКМ (например, из углепластика). Предполагается, что известны *только результаты статических испытаний* рассматриваемого образца на растяжение и сжатие. Необходимо построить для рассматриваемого образца «классические» *S-N* кривые усталости при циклическом нагружении с различной асимметрией напряжений. Именно с использованием таких кривых предполагается выполнять прогнозирование характеристик сопротивления усталости рассматриваемого образца.

2. Выбирается образец или группа образцов, которые по своим конструктивно-технологическим параметрам (тип ПКМ, тип и размеры образца, параметры укладки слоев и т.п.) с той или иной точностью могут быть определены как "образцы – прототипы" для рассматриваемого образца. Предполагается, что известны результаты усталостных испытаний "образцов – прототипов" при различной асимметрии циклического нагружения, а также результаты статических испытаний этих образцов на растяжение и сжатие.

3. По результатам обработки экспериментальных данных строятся *S-N* кривые усталости "образцов – прототипов", которые аппроксимируются уравнениями Менделла (7)–(8) – см. табл.2.

4. Для "образцов – прототипов" при рассматриваемых асимметриях циклического нагружения определяются уравнения (10)–(12) нормализованных кривых усталости. Выполняется анализ значений ключевого параметра уравнений нормализованных кривых усталости b' , выполняется поиск зависимости $b' = f(R)$.

5. Выполняется прогноз характеристик сопротивления усталости рассматриваемых образцов. Прогнозирование выполняется с использованием следующей процедуры:

- фиксируются требуемые значения коэффициента асимметрии напряжений R , для которых необходимо выполнить прогноз характеристик сопротивления усталости рассматриваемого образца;
- принимается допущение, что зависимость $b' = f(R)$, полученная для "образцов – прототипов", может быть использована для рассматриваемого образца;
- с использованием этой зависимости определяются значения параметра b' нормализованных кривых усталости рассматриваемого образца для требуемых значений R ;
- с использованием зависимостей $b' = b' \cdot \sigma_{UTS}$ или $b' = b' \cdot \sigma_{UCS}$ определяются значения параметра b уравнений (7)–(9) кривых усталости образца;
- строятся «классические» *S-N* кривые усталости образца для требуемых значений R ;
- оценивается расчетная усталостная долговечность рассматриваемого образца при расчетных уровнях циклических напряжений;

- при наличии экспериментальных данных по усталостной долговечности рассматриваемого образца выполняется сравнение расчетных и экспериментальных данных, делается вывод о корректности выполненного прогноза.

Результаты прогнозирования характеристик сопротивления усталости образцов со свободным отверстием из углепластика Т300/5208

В настоящем разделе представлены примеры расчетных оценок характеристик сопротивления усталости образцов со свободным отверстием из углепластика Т300/5208 [45/0/-45/90]_{2s} с использованием двух представленных выше методов прогнозирования: метода с использованием ДПУД и метода с использованием НКУ. Расчетные оценки проведены для циклического нагружения образцов с коэффициентами асимметрии напряжений $R = -1$, $R = -0,5$ и $R = 3$. Представлены также результаты сравнения расчетных оценок и экспериментальных данных.

Исходные данные для расчетных оценок характеристик сопротивления усталости образцов со свободным отверстием из углепластика Т300/5208 при циклическом нагружении с коэффициентами асимметрии напряжений $R = -0,5$ и $R = 3$ с использованием ДПУД.

По результатам обработки данных работы [17] для рассматриваемых образцов в качестве исходных данных получены:

1. Уравнение кривой усталости (7) при регулярном нагружении симметричным циклом:

$$\sigma_a^{R=-1} = 324,72 - 27,4172 \lg N.$$

2. Значение предела прочности рассматриваемых образцов при растяжении: $\sigma_{UTS} = 346,06$ МПа.

3. Значение предела прочности рассматриваемых образцов при сжатии: $\sigma_{UCS} = 320,56$ МПа.

В качестве ДПУД для расчетной оценки выбрана асимметричная диаграмма Гудмана. В качестве основных соотношений для расчетной оценки использованы соотношения (2)–(3).

Исходные данные для расчетных оценок характеристик сопротивления усталости образцов со свободным отверстием из углепластика Т300/5208 при циклическом нагружении с коэффициентами асимметрии напряжений $R = -1$, $R = -0,5$ и $R = 3$ с использованием НКУ.

В качестве "образцов – прототипов" для рассматриваемых образцов со свободным отверстием из углепластика Т300/5208 [45/0/-45/90]_{2s} выбраны образцы со свободным отверстием из углепластика Т700-PW 10/80/10, экспериментальные данные по усталостной и статической прочности которых представлены в работе [18]. Кривые усталости "образцов – прототипов" при циклическом нагружении с различными коэффициентами асимметрии нарушения представлены на рис. 1.

Результаты аппроксимации представленных на рис. 1 кривых усталости уравнениями Менделла (7)–(9) приведены в табл. 3. Там же приведены уравнения (10)–(12) нормализованных кривых усталости.

По данным, приведенным в табл. 3, для «образцов-прототипов» может быть построена графическая зависимость $b' = f(R)$ – см. рис. 2. Представленная зависимость может быть аппроксимирована двумя уравнениями: $b' = 0,0469 - 0,0379R$ – для диапазона $-1 \leq R \leq 0$; $b' = 0,048 - 0,0008R$ – для диапазона $0 < R \leq 5$.

В табл. 4 приведены уравнения типа (10)–(12) нормализованных кривых усталости рассматриваемых образцов со свободным отверстием из углепластика Т300/5208 [45/0/-45/90]_{2s}, полученные с использованием графической зависимости $b' = f(R)$, представленной на рис. 2 для «образцов-прототипов». Там же для рассматриваемых образцов представлены уравнения типа (7)–(9) «классических» $S-N$ кривых усталости, полученные на основе уравнений (10)–(12) с использованием известных значений σ_{UTS} и σ_{UCS} . Предполагается, что именно эти уравнения будут использоваться для прогнозирования характеристик сопротивления усталости рассматриваемых образцов.

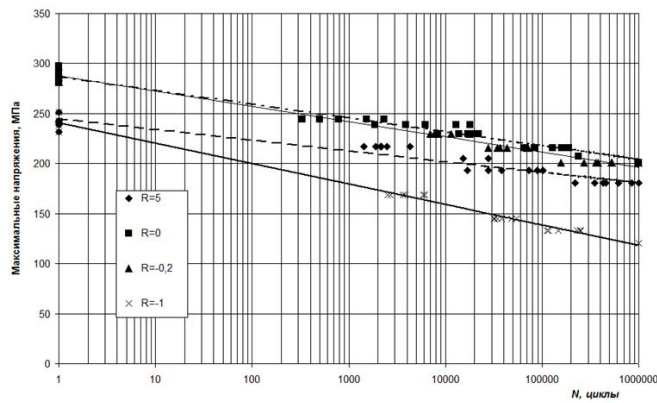


Рис. 1. Кривые усталости образцов со свободным отверстием из ламината углепластика T700-PW 10/80/10
 Fig. 1. *S-N* curves of specimens with open hole for a GFRP T700-PW 10/80/10 laminate

Таблица 3

Уравнения кривых усталости (7)–(12) при циклическом нагружении образцов со свободным отверстием из ламината углепластика T700-PW 10/80/10

Table 3

Equations (7)–(12) of *S-N* curves under cyclic loading of specimens with open hole for a GFRP T700-PW 10/80/10 laminate

<i>R</i>	Уравнения типа (7)–(9)	Уравнения типа (10)–(12)
- 1	$\sigma_a^{R-1} = 240,99 - 20,493 \cdot \lg N$	$\sigma_a^{R-1} / \sigma_{UCS} = 1 - 0,085 \cdot \lg N$
- 0,2	$\sigma_{max} = 287,76 - 15,257 \cdot \lg N$	$\sigma_{max} / \sigma_{UTS} = 1 - 0,053 \cdot \lg N$
0	$\sigma_{max} = 287,25 - 13,878 \cdot \lg N$	$\sigma_{max} / \sigma_{UTS} = 1 - 0,048 \cdot \lg N$
5	$ \sigma_{min} = 244,66 - 10,680 \cdot \lg N$	$\sigma_{min} / \sigma_{UCS} = 1 - 0,044 \cdot \lg N$

На рис. 3-5 представлены графические результаты прогнозирования и сравнение расчетных и экспериментальных данных.

Обсуждение результатов

Учитывая большой разброс данных по усталостной долговечности слоистых ПКМ трудно ожидать достаточно хороших результатов от любых методов прогнозирования. Тем не менее, по результатам анализа данных, представленных на рис. 3-5, можно сделать следующие выводы.

1. Кривая усталости рассматриваемых образцов, спрогнозированная с использованием НКУ при циклическом нагружении симметричным циклом, практически совпала с кривой усталости образцов по подобном нагружении, полученной на основе обработки экспериментальных данных – см. рис. 3.

2. Метод прогнозирования с использованием НКУ при циклическом нагружении превалирующем растяжении по своей точности значительно превосходит метод с использованием ДПУД – см. рис. 4.

3. Метод прогнозирования с использованием НКУ при циклическом нагружении превалирующем сжатием по своей точности уступает методу с использованием ДПУД – см. рис. 5.

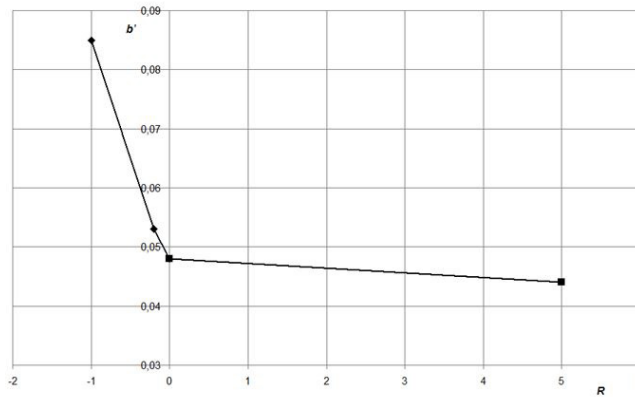


Рис. 2. Графическая зависимость $b' = f(R)$ для образцов со свободным отверстием из ламината углепластика T700-PW 10/80/10

Fig. 2. Graphic dependence $b' = f(R)$ for specimens with open hole for a GFRP T700-PW 10/80/10 laminate

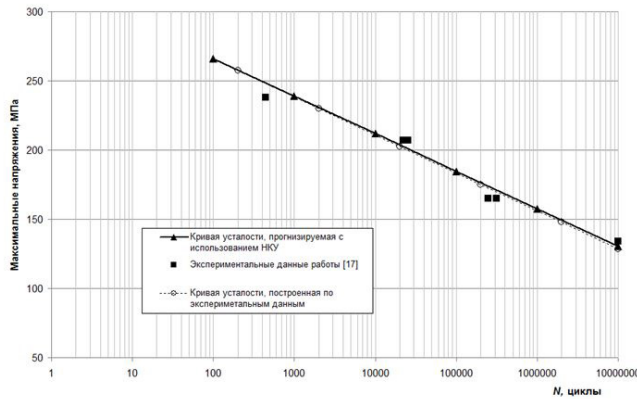


Рис. 3. Кривые усталости образцов со свободным отверстием из ламината углепластика T300/5208 [45/0/-45/90]_{2s} ($R = -1$)

Fig. 3. $S-N$ curves of specimens with open hole for a GFRP T300/5208 [45/0/-45/90]_{2s} laminate ($R = -1$)

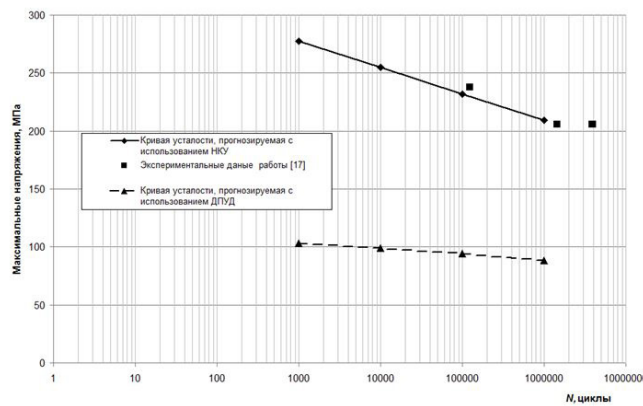


Рис. 4. Кривые усталости образцов со свободным отверстием из ламината углепластика T300/5208 [45/0/-45/90]_{2s} ($R = -0,5$)

Fig. 4. $S-N$ curves of specimens with open hole for a GFRP T300/5208 [45/0/-45/90]_{2s} laminate ($R = -0,5$)

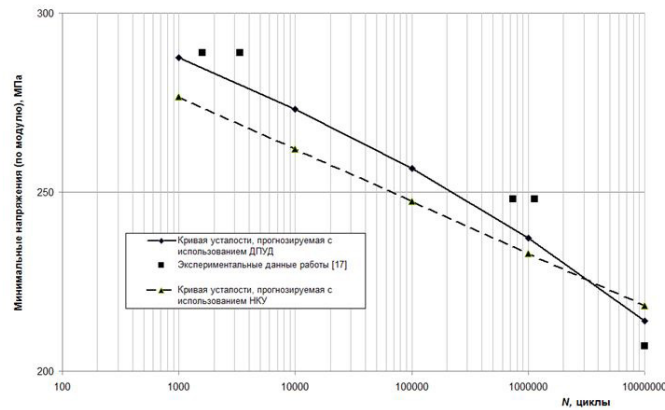


Рис. 5. Кривые усталости образцов со свободным отверстием из ламината углепластика T300/5208 [45/0/-45/90]_{2s} (R = 3)
 Fig. 5. S-N curves of specimens with open hole for a GFRP T300/5208 [45/0/-45/90]_{2s} laminate (R = 3)

Таблица 4

Уравнения кривых усталости (7)–(12) при циклическом нагружении образцов со свободным отверстием из ламината углепластика T300/5208 [45/0/-45/90]_{2s}

Table 4

Equations (7)–(12) of S-N curves under cyclic loading of specimens with open hole for a GFRP T300/5208 [45/0/-45/90]_{2s}

R	Уравнения типа (10)–(12)	Уравнения типа (7)–(9)
-1	$\sigma_a^{R=-1} / \sigma_{UCS} = 1 - 0,0848 \cdot \lg N$	$\sigma_a^{R=-1} = 320,56 - 27,183 \cdot \lg N$
-0,5	$\sigma_{max} / \sigma_{UTS} = 1 - 0,0659 \cdot \lg N$	$\sigma_{max} = 346,06 - 22,805 \cdot \lg N$
3	$\sigma_{min} / \sigma_{UCS} = 1 - 0,0456 \cdot \lg N$	$ \sigma_{min} = 320,56 - 14,618 \cdot \lg N$

4. Сравнивая объем и трудоемкости подготовки исходных данных для использования рассмотренных методов прогнозирования, можно отметить следующее.

- метод прогнозирования с использованием ДПУД предполагает обязательное наличие кривой усталости рассматриваемых образцов, как минимум, для симметричного цикла нагружения;
- метод прогнозирования с использованием НКУ предполагает наличие набора данных по усталостной долговечности "образцов – прототипов", с практической точки зрения этот метод может оказаться предпочтительнее.

Выводы

В качестве определенной альтернативы методов прогнозирования характеристик сопротивления усталости слоистых ПКМ с использованием ДПУД предложен метод прогнозирования с применением нормализованных кривых усталости. При формировании метода использовано основное свойство нормализованных кривых усталости – возможность исключения влияния на усталостную долговечность разной прочности волокон, объемных долей и укладок в слоистых ПКМ.

Сделано допущение, что нормализованные кривые усталости для рассматриваемых образцов могут быть получены по результатам обработки экспериментальных данных по усталостной долговечности так называемых "образцов – прототипов", без привлечения данных по усталостной

долговечности рассматриваемых образцов. Именно в этом состоит практическая ценность предлагаемого метода.

На основе уравнений нормализованных кривых усталости предложены уравнения для формирования «классических» $S-N$ кривых усталости рассматриваемых образцов при различной асимметрии циклического нагружения, с использованием которых предлагается выполнять собственно прогнозирование характеристик сопротивления усталости.

Представлен пример прогнозирования характеристик сопротивления усталости образцов со свободным отверстием из углепластика T300/5208 [45/0/-45/90]_{2s}, демонстрирующий возможности предлагаемого метода.

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] **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) 971–987.

[5] **Strizhius V.** Fatigue damage accumulation under quasi-random loading of composite airframe elements. Mechanics of Composite Materials. No. 52(4) (2016) 645–664.

[6] **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.

[7] **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

[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, 83 (2016) 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. 80 (2016) 244–258.

[10] **Tofallis C.** A better measure of relative prediction accuracy for model selection and model estimation. Journal of the Operational Research Society. 66 (2015) 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] **Mandell J.F.** Fatigue behaviour of fibre-resin composites. Developments in Reinforced Plastics 2 (editor G Pritchard). (Applied Science Publishers, London) (1986) 67–108.

[14] **Burhan I., Kim H.S.** S-N curve models for composite materials characterisation: An evaluative review. J. Compos. Sci., 2, 38 (2018). DOI: 10.3390/JCS2030038

[15] **Daniel I.M., Charewicz A.** Fatigue damage mechanisms and residual properties of graphite/epoxy laminates. Engineering Fracture Mechanics. 25(5–6) (1986) 793.

[16] **Fernando G.F., Al-Khodairi F.A.A.** The fatigue of hybrid composites. Fatigue in composites. Ed. by B. Harris. – Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC, 2003.

[17] **Phillips E.P.** Effects of truncation of a predominantly compression load spectrum on the life of a notched graphite/epoxy laminate. Fatigue of Fibrous Composite Materials. ASTM STP 723. K.N. Lauraitis, ed. ASTM (1981) 197–212.

[18] **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).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

СТРИЖИУС Виталий Ефимович – профессор, Национальный исследовательский университет "МАИ", д-р техн. наук.

E-mail: vitaly.strizhius@gmail.com

Дата поступления статьи в редакцию: 04.06.2020

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] **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.

[5] **V. Strizhius**, Fatigue damage accumulation under quasi-random loading of composite airframe elements, Mechanics of Composite Materials, No. 52(4) (2016) 645–664.

[6] **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.

[7] **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

[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.F. Mandell**, Fatigue behaviour of fibre-resin composites, *Developments in Reinforced Plastics 2* (editor G Pritchard), (Applied Science Publishers, London) (1986) 67–108.

[14] **I. Burhan, H.S. Kim**, S-N curve models for composite materials characterisation: An evaluative review, *J. Compos. Sci.*, 2, 38 (2018). DOI: 10.3390/JCS2030038

[15] **I.M. Daniel, A. Charewicz**, Fatigue damage mechanisms and residual properties of graphite/epoxy laminates, *Engineering Fracture Mechanics*, 25(5–6) (1986) 793.

[16] **G.F. Fernando, F.A.A. Al-Khodairi**, The fatigue of hybrid composites, *Fatigue in composites*, Ed. by B. Harris. – Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC, 2003.

[17] **E.P. Phillips**, Effects of truncation of a predominantly compression load spectrum on the life of a notched graphite/epoxy laminate, *Fatigue of fibrous composite materials*, ASTM STP 723, K.N. Lauritis, ed., ASTM (1981) 197–212.

[18] **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).

THE AUTHOR

STRIZHIUS Vitaly E. – *National Research University "Moscow Aviation Institute"*.
E-mail: vitaly.strizhius@gmail.com

Received: 04.06.2020