

*В. Е. Стрижиус**

Московский авиационный институт, Россия

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДЕГРАДАЦИИ ОСТАТОЧНОЙ ПРОЧНОСТИ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ

*V. Strizhius**

PREDICTING THE DEGRADATION OF THE RESIDUAL STRENGTH IN CYCLIC LOADING OF LAYERED COMPOSITES

Keywords: layered composites, cyclic loading, S-N curve, degradation of the residual strength

A brief overview and analysis of three well-known degradation models of the residual strength of layered composites are presented: the Schaff and Davidson model, the model of degradation of normalized strength, and the model of progressive fatigue damage. The conclusion is made about the expediency of forming a new, special model in order to obtain engineering estimates of an acceptable accuracy and labor consumption for the residual strength of layered composites during cyclic loadings. The basic relations of such a model are proposed, which were verified using an example of calculated estimates for the residual strength of samples with an open hole made of an AS4/3501-6 [0/±45/90]_{s4} carbon-fiber plastic. The results found by the model proposed, the normalized strength degradation model, and the progressive fatigue damage model are compared.

Ключевые слова: материалы композитные полимерные слоистые, нагружение циклическое, кривая усталости, деградация остаточной прочности

Представлен краткий обзор и анализ трех хорошо известных моделей деградации остаточной прочности слоистых композитов: модели Шаффа и Дэвидсона, модели деградации нормализован-

*Автор, с которым следует вести переписку: vitaly.strizhius@gmail.com
Corresponding author: vitaly.strizhius@gmail.com

ной прочности и модели прогрессивного усталостного повреждения. Сделан вывод о целесообразности формирования новой, специальной модели с целью получения приемлемой точности и трудоемкости инженерных оценок остаточной прочности при циклическом нагружении слоистых композитов. Предложены основные соотношения такой модели. Проведена верификация соотношений предложенной модели на примере расчетных оценок остаточной прочности образцов со свободным отверстием из углепластика AS4/3501-6 $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_{s4}$. Результаты предложенной модели сравнены с полученными по модели деградации нормализованной прочности и модели прогрессивного усталостного повреждения.

Введение

По результатам анализа данных, представленных в многочисленных исследованиях усталостной прочности элементов конструкций из полимерных композитных материалов (ПКМ), можно сделать вывод о том, что накопленное в процессе усталостных испытаний или эксплуатации усталостное повреждение снижает (иногда достаточно значительно) механические свойства ПКМ.

Очевидно, что для элементов композитных авиаконструкций этот факт требует всестороннего изучения и учета, так как согласно требованиям нормативного документа [1] остаточная прочность композитных авиаконструкций в процессе эксплуатации не должна опускаться ниже уровня, соответствующего предельным расчетным нагрузкам. Фактически это означает, что усталостная долговечность, по которой определяются ресурсные характеристики рассматриваемого элемента из ПКМ, должна соответствовать этому уровню остаточной прочности. Очевидно, что игнорирование этого требования и определение усталостной долговечности без обеспечения такого соответствия могут привести к серьезным ошибкам (не в запас прочности) при определении ресурсных характеристик элементов из ПКМ.

Известно, что исследование снижения механических свойств ПКМ на основе прямых испытаний требует значительных затрат. Ввиду этого необходимость разработки и использования специальных моделей, позволяющих выполнять объективные *расчетные* оценки снижения (деградации) остаточной прочности в процессе накопления усталости, представляется очевидной.

В настоящее время наиболее известны три подобные модели, применяемые в современной практике расчетов на усталость элементов из ПКМ: модель Шаффа и Дэвидсона (Schaff and Davidson) [2, 3], модель деградации нормализованной прочности [4—6] и модель прогрессивного усталостного повреждения [7]. Проведен краткий анализ этих моделей. По результатам

анализа отмечены их основные достоинства и недостатки, сделан вывод о целесообразности формирования новой, специальной модели с целью получения приемлемых точности и трудоемкости инженерных оценок остаточной прочности при циклическом нагружении слоистых композитов.

1. Методы и материалы

1.1. Базовые кривые усталости слоистых композитов. Известно, что кривые усталости являются важнейшим элементом анализа различных аспектов усталостной прочности слоистых композитов, в том числе элементом анализа деградации остаточной прочности композитов в процессе циклического нагружения.

По результатам обзора и анализа данных, представленных в [3, 6, 8—15], можно сделать вывод о том, что для многих типовых элементов композитных конструкций, работающих в условиях одноосного растяжения—сжатия, могут быть построены “классические” кривые усталости $\sigma - N$ вида

$$\sigma_{\max} = c + d \lg N \quad (1)$$

или

$$\sigma_{\max} = AN^m, \quad (2)$$

где σ_{\max} — максимальные нормальные номинальные (в сечении “брутто”, средние в пакете слоев) напряжения циклического растяжения—сжатия рассматриваемого образца или элемента; N — усталостная долговечность элемента; c, d, A и m — параметры уравнений (1) и (2).

По результатам анализа известных экспериментальных данных и кривых усталости, построенных с использованием уравнений (1) и (2), можно сделать следующие выводы.

1. Для параметров c и A справедливы соотношения $c \approx A \approx \sigma_{UTS}$ — при доминирующем циклическом растяжении (σ_{UTS} — предел прочности элемента при растяжении); $c \approx A \approx |\sigma_{UCS}|$ — при доминирующем циклическом сжатии (σ_{UCS} — предел прочности элемента при сжатии).

2. Для параметров d и m справедливы соотношения $d < 0$ и $m < 0$.

1.2. Расчетно-экспериментальная оценка уровня остаточной прочности элементов из ПКМ с использованием модели Шаффа и Дэвидсона. По результатам обзора и анализа данных, представленных в [2, 3], можно сформулировать следующее основное положение и допущение этой модели.

1. Уровень снижения остаточной прочности в процессе накопления усталости конструктивного элемента из ПКМ зависит от его конструктивно-технологических особенностей (типа ПКМ, параметров укладки, толщины, типа концентратора напряжения и т.д.) и механических характеристик. В работах [2, 3] сделано допущение, что механические харак-

теристики при одноосном циклическом нагружении элемента могут быть связаны зависимостью

$$\sigma_{RS} = \sigma_{US} - (\sigma_{US} - \sigma_a) \left(\frac{n}{N} \right)^v, \quad (3)$$

где σ_{RS} — остаточная прочность элемента из ПКМ; σ_{US} — предел статической прочности элемента; σ_a — амплитуда циклического нагружения; n — количество приложенных циклов нагружения; N — количество циклов нагружения до разрушения элемента; v — параметр деградации прочности, значение которого зависит от величины σ_a , а также от коэффициента асимметрии циклического нагружения R .

2. Предполагали, что значение параметра v должно определяться на основе сравнения расчетных и экспериментальных данных.

Основной акцент в работе [2] сделан на построении зависимостей вероятности разрушения образца или элемента от приложенных циклов нагружения $P = f(n)$, а в работе [3] отмечена сложность определения подобных зависимостей. Зависимости (3) для конкретных образцов и элементов в работах [2, 3] не представлены. В работах [2, 3] отмечена сложность определения значений параметра v .

1.3. Расчетно-экспериментальная оценка уровня остаточной прочности элементов из ПКМ с использованием модели деградации нормализованной прочности (МДНП). По результатам обзора и анализа данных, представленных в работах [4—6], можно сформулировать следующие основные положения и допущения этой модели.

1. Уровень снижения остаточной прочности в процессе накопления усталости конструктивного элемента из ПКМ зависит от его конструктивно-технологических особенностей (типа ПКМ, параметров укладки, толщины, типа концентратора напряжения и т.д.) и механических характеристик. В работах [4—6] сделано допущение, что механические характеристики при одноосном растяжении элемента могут быть связаны зависимостью

$$t^a + s^b = 1, \quad (4)$$

где $t = (\lg n - \alpha) / (\lg N - \alpha)$ — функция нагружения; n — количество циклов нагружения при уровне максимальных напряжений цикла σ_{\max} ; N — количество циклов нагружения до разрушения рассматриваемого элемента при уровне напряжений σ_{\max} ; α — константа, $\alpha = \lg(0,25) = -0,6021$; $s = (\sigma_{RS} - \sigma_{\max}) / (\sigma_{UTS} - \sigma_{\max})$ — относительная остаточная прочность элемента из ПКМ; σ_{RS} — остаточная прочность элемента из ПКМ; σ_{UTS} — предел прочности рассматриваемого элемента при растяжении; a и b — параметры, зависящие от свойств материала и окружающей среды.

2. На основе зависимости (4) в работах [4—6] получено соотношение для оценки остаточной прочности рассматриваемого элемента в процессе накопления усталости

$$\sigma_{RS} = (\sigma_{UTS} - \sigma_{\max}) \left(1 - \left(\frac{\lg(n) - \alpha}{\lg(N) - \alpha} \right)^a \right)^{\frac{1}{b}} + \sigma_{\max} \quad (5)$$

По данным работы [6] параметры a и b для пластиков типа CFRP (пластик, армированный углеродным волокном), KFRP (пластик, армированный кевларовым волокном) и GRP (пластик, армированный стекловолокном) принимают значения, близкие к следующим значениям [6]: для CFRP $a = 1,8$ и $b = 23,1$; для KFRP — $1,8$ и $5,2$; для GRP — $1,5$ и $4,8$ соответственно. Очевидно, что значения параметров a и b будут оказывать значительное влияние на форму кривой снижения остаточной прочности $\sigma_{RS} - N$ и получаемые с использованием этой кривой конечные результаты оценок остаточной прочности. Поэтому с целью получения достаточно достоверных результатов таких оценок для каждого рассматриваемого элемента из ПКМ значения параметров a и b должны уточняться по результатам специально проведенных испытаний.

В работе [16] представлены экспериментальные данные по усталостной долговечности и остаточной прочности образцов со свободным отверстием из углепластика AS4/3501-6 с параметрами укладки $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_{s4}$. В работе [17] для этих же образцов приведены значения параметров a и b для некоторых видов нагружения при испытаниях: при продольном сжатии $a = 0,025$ и $b = 49,06$; при продольном растяжении — $0,473$ и $10,03$ соответственно.

На рис. 1 представлены зависимости (5) для образцов со свободным отверстием из углепластика AS4/3501-6 $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_{s4}$ при продольном

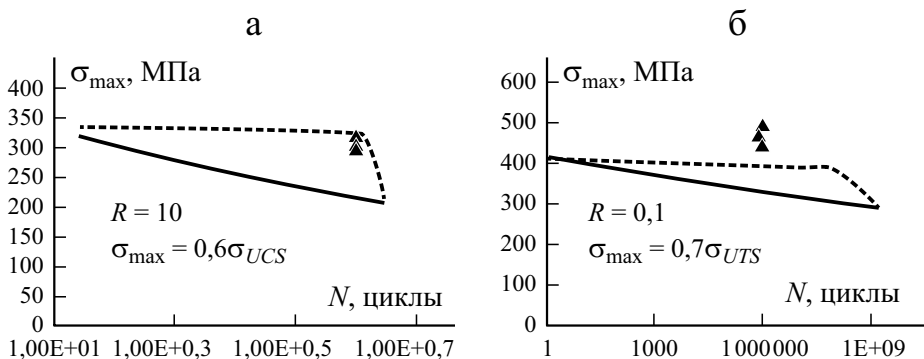


Рис. 1. Расчетная оценка деградации остаточной прочности при продольном сжатии (а) и растяжении (б) образцов со свободным отверстием из углепластика AS4/3501-6 $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_{s4}$ с использованием соотношения (5) (- - -) МДНП; (—) — кривая усталости; ▲ — эксперимент [16].

циклическом сжатии (рис. 1—*a*) и растяжении (рис. 1—*б*). При этом использованы следующие данные:

— $|\sigma_{\max}| = 361,75N^{-0,037}$, $\sigma_{\max} = 415,71N^{-0,017}$ — уравнения кривых усталости рассматриваемых образцов соответственно при продольном сжатии и растяжении (получены по результатам обработки данных работы [16]);

— $\sigma_{UTS} = 13,7$ МПа; $\sigma_{UCS} = -344,75$ МПа — по данным работы [16];

— значения параметров a и b [17].

Там же представлены отдельные экспериментальные значения σ_{RS} , полученные по данным работы [16].

1.4. Расчетно-экспериментальная оценка уровня остаточной прочности элементов из ПКМ с использованием модели прогрессивного усталостного повреждения (МПУП). По результатам обзора и анализа данных, представленных в работе [7], можно сформулировать следующие основные положения этой модели.

1. Уровень снижения остаточной прочности в процессе накопления усталости зависит от механических характеристик ПКМ. По данным работы [7] эти характеристики связаны зависимостью

$$s = \left[1 - t^A + C \cdot t^D (1-t)^E \right]^{1/B}, \quad (6)$$

где s и t — параметры, идентичные параметрам модели деградации нормализованной прочности; A, B, C, D и E — параметры формы кривой $s = f(t)$, определяемые по результатам обработки экспериментальных данных.

2. На основе зависимости (6) может быть получено соотношение для расчетной оценки остаточной прочности рассматриваемого элемента в процессе накопления усталости

$$\sigma_{RS} = (\sigma_{UTS} - \sigma_{\max}) \left[1 - t^A + C \cdot t^D (1-t)^E \right]^{1/B} + \sigma_{\max}. \quad (7)$$

На основании анализа соотношения (7) можно сделать следующие выводы.

1. Остаточная прочность элементов из ПКМ с использованием МПУП описывается достаточно сложным соотношением, содержащим пять параметров формы кривой $s = f(t)$: A, B, C, D и E .

2. Указанные параметры должны определяться по результатам специальной обработки экспериментальных данных достаточно значительного объема, что предполагает значительный объем испытаний и является основным недостатком рассматриваемой модели.

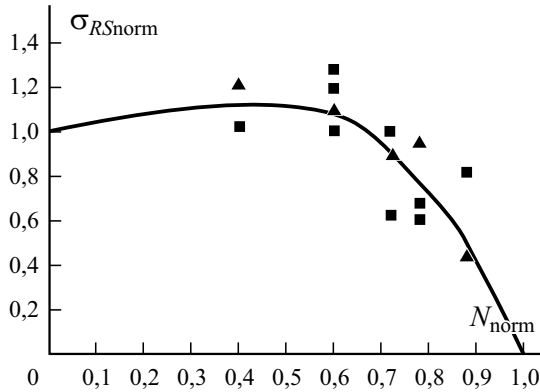


Рис. 2. Расчетная оценка деградации остаточной прочности при продольном растяжении образцов из однонаправленного пластика по соотношению (7) (—) МПУП и экспериментальные данные [7] при UTS 60% (▲) и 80% (■).

На рис. 2 представлен пример, иллюстрирующий достаточно хорошую точность оценок остаточной прочности образцов из однонаправленного пластика по соотношению (7) (использованы расчетные и экспериментальные данные работы [7]). Значения параметров формы кривой $s = f(t)$ следующие: $A = 3,76$, $B = 0,77$, $C = 1,72$, $D = 2,30$, $E = 0,99$.

Отметим, что указанные значения параметров были определены на основе результатов обработки экспериментальных данных испытаний на остаточную прочность рассматриваемых образцов, а затем с использованием значений этих параметров был выполнен “контрольный” расчет. Очевидно, что это значительно снижает результаты апробации рассматриваемой модели.

1.5. Расчетно-экспериментальная оценка уровня остаточной прочности элементов из ПКМ с использованием специальной модели деградации остаточной прочности (СМДОП). Ввиду отмеченных недостатков модели Шаффа и Дэвидсона, модели деградации нормализованной прочности и модели прогрессивного усталостного повреждения необходимость формирования новой, специальной модели деградации остаточной прочности слоистых композитов с целью получения приемлемой точности и трудоемкости инженерных расчетов на усталость представляется очевидной.

По результатам детального обзора и анализа данных работ [4—7, 10] можно сделать допущение, что в качестве основной зависимости для такой модели может быть предложено соотношение

$$s^* + t^* = 1,$$

где $s^* = \frac{\sigma_{RS}}{\sigma_{US}}$ — относительная остаточная прочность элемента из ПКМ;

$t^* = k_1 \left(\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{US}} \right)^{k_2} n$ — функция нагружения; σ_{RS} — остаточная прочность элемента из ПКМ; σ_{US} — предел прочности рассматриваемого элемента при растяжении или сжатии; σ_{\max} — максимальные напряжения растяжения или сжатия; n — количество циклов нагружения при уровне максимальных напряжений цикла σ_{\max} ; k_1 и k_2 — параметры соотношения. Тогда

$$\sigma_{RS} = \sigma_{US} \left(1 - k_1 \left(\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{US}} \right)^{k_2} n \right). \quad (8)$$

При этом предполагаем, что кривая усталости рассматриваемого элемента известна и может быть представлена уравнением (2).

Очевидно, что основная проблема в использовании соотношения (8) заключается в определении значений параметров k_1 и k_2 .

Процедуру определения этих значений можно представить следующим образом:

— соотношение (8) приводим к виду

$$\sigma_{\max} = \sigma_{US} \left(\frac{1 - \sigma_{RS} / \sigma_{US}}{k_1 N} \right)^{1/k_2};$$

— очевидно, что с учетом уравнения (2) можно записать соотношение

$$\sigma_{\max} = \sigma_{US} \left(\frac{1 - \sigma_{RS} / \sigma_{US}}{k_1 N} \right)^{1/k_2} = AN^m;$$

анализируя это соотношение, можно сделать допущение, что $k_2 = -1/m$;

— в момент усталостного разрушения элемента при уровне нагружения σ_{\max} можно полагать, что $\sigma_{RS} = \sigma_{\max}$. Таким образом соотношение (8) может принимать вид

$$\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{US}} + k_1 \left(\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{US}} \right)^{k_2} N = 1,$$

отсюда

$$k_1 = \frac{1 - \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{US}}}{\left(\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{US}} \right)^{k_2} N};$$

— при наличии экспериментальных данных по значениям остаточной прочности рассматриваемого элемента значение параметра k_1 можно определить с использованием соотношения

$$k_{1_RS} = \frac{1 - \frac{\sigma_{RS}}{\sigma_{US}}}{\left(\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{US}}\right)^{k_2} N_{RS}},$$

где N_{RS} — количество циклов нагружения, после которого экспериментально определяли остаточную прочность;

— при известном значении k_{1_RS} соотношение (8) принимает вид

$$\sigma_{RS} = \sigma_{US} \left(1 - k_{1_RS} \left(\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{US}} \right)^{k_2} n \right). \quad (9)$$

По результатам анализа представленных соотношений можно сделать следующий вывод.

Соотношения (8) и (9) достаточно просты, и их использование не предполагает значительной трудоемкости определения входящих в них значений параметров k_1 и k_2 . В первом приближении значения этих параметров могут быть найдены только при известном уравнении (2) кривой усталости рассматриваемого элемента. В этом плане соотношения (8) и (9) выгодно отличаются от соотношения (5) МДНП и соотношения (7) МПУП, для использования которых необходимо знание экспериментальных значений дополнительных параметров (двух параметров a и b для МДНП и пяти параметров A, B, C, D и E для МПУП).

Точность прогнозирования остаточной прочности слоистого композита с использованием предложенных соотношений будет проиллюстрирована примером расчета образцов со свободным отверстием из углепластика AS4/3501-6.

2. Результаты

На рис. 3 представлены результаты расчетных оценок остаточной прочности рассмотренных образцов со свободным отверстием из углепластика AS4/3501-6 $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_{s4}$ по специальной модели деградации остаточной прочности (СМДОП). При этом использованы следующие данные:

— $|\sigma_{\max}| = 361,75N^{-0,037}$, $\sigma_{\max} = 415,71N^{-0,017}$ уравнения кривых усталости образцов при продольном сжатии и растяжении соответственно (получены по результатам обработки данных работы [16]);

— $\sigma_{UTS} = 13,7$ МПа; $\sigma_{UCS} = -344,75$ МПа (получены по данным работы [16]);

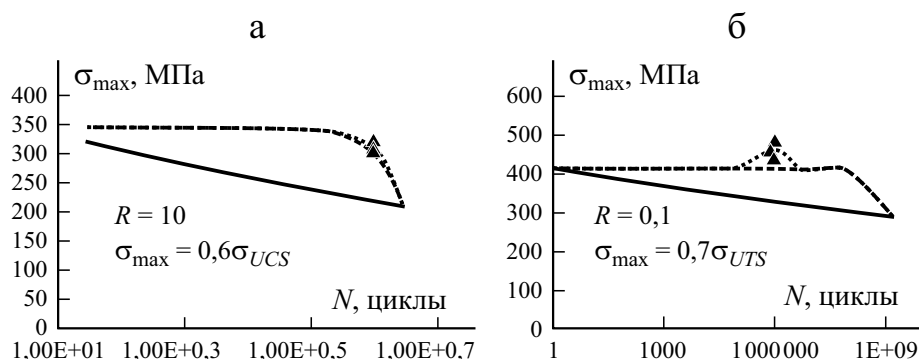


Рис. 3. Расчетная оценка деградации остаточной прочности при продольном сжатии (а) и растяжении (б) образцов со свободным отверстием из углепластика AS4/3501-6 $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_{s4}$ с использованием соотношений (8) (---) и (9) (- - -) СМДОП ($R = 10$, $\sigma_{\max} = 0,6\sigma_{UCS}$): (—) — кривая усталости; ▲ — эксперимент [16].

— значения параметров k_1, k_{1_RS} и k_2 для продольного циклического сжатия: $k_1 = 0,1301$, $k_{1_RS} = 0,0537$, $k_2 = 25,641$ (получены по результатам обработки данных работы [16] с использованием процедуры, описанной в разделе 1.4);

— значения параметров k_1, k_{1_RS} и k_2 для продольного циклического растяжения: $k_1 = 0,2331$, $k_{1_RS} = -155,287$, $k_2 = 58,824$ (получены по результатам обработки данных работы [16] с использованием процедуры, описанной в разделе 1.4).

Там же представлены отдельные экспериментальные значения σ_{RS} , полученные по данным работы [16].

3. Обсуждение результатов

По результатам анализа данных [2, 3] можно сделать вывод, что модель деградации остаточной прочности Шаффа и Дэвидсона используется в основном для построения зависимостей вероятности разрушения образца или элемента от приложенных циклов нагружения $P = f(n)$. В работе [3] отмечена сложность определения подобных зависимостей. Зависимости $\sigma_{RS} = f(n)$ для конкретных образцов и элементов в работах [2, 3], к сожалению, не представлены.

Как видно из данных, приведенных на рис. 1, основным недостатком, который может быть отмечен при практическом использовании соотношения (5) МДНП, является большая вероятность получения некорректных оценок остаточной прочности, прежде всего при продольном циклическом растяжении образцов.

На рис. 2 представлен пример, демонстрирующий достаточно хорошую точность оценок остаточной прочности образцов из однонаправленного пластика с использованием соотношения (7) МПУП. Однако, как уже было отмечено, параметры соотношения (7) должны определяться по результатам специальной обработки экспериментальных данных достаточно значительного объема, что предполагает значительный объем испытаний и является основным недостатком рассматриваемой модели.

На рис. 1—б, 2, 3—б при циклическом растяжении наблюдается рост остаточной прочности по сравнению со статической, т.е. циклическое растяжение упрочняет материал. К сожалению, ни авторы ключевой работы [7], ни авторы других работ еще не нашли объяснения этому уникальному явлению.

По результатам анализа данных рис. 4 можно сделать следующие выводы.

1. Результаты, полученные с использованием предложенной в настоящей работе СМДОП и полученные в работе [7] с использованием МПУП, показали точность оценок примерно одного уровня. При этом следует отметить значительно более низкую трудоемкость расчетных оценок с использованием СМДОП.

2. Использование СМДОП с параметром k_1 , найденным без привлечения экспериментальных данных по остаточной прочности рассматриваемых образцов, позволяет получать консервативные оценки остаточной прочности, что в некоторых случаях может считаться вполне приемлемым.

3. Сравнение результатов расчетных оценок с использованием предложенной модели и МДНП позволяет отметить преимущества и практическую значимость предложенной модели.

В качестве рекомендации для дальнейших исследований отметим необходимость увеличения объема верификации предложенных соотношений СМДОП. Очевидно, что при наличии необходимых данных ключевые соотношения (2) и (8) предложенной модели могут быть использованы при *регулярном* циклическом нагружении *с постоянной амплитудой* при разных коэффициентах асимметрии циклических напряжений.

При *переменных режимах нагружения* с переменными амплитудами процедура оценки деградации остаточной прочности значительно усложняется. В этом случае подобная процедура может быть предложена в следующем виде.

1. Рассматривают некий блок переменных нагрузок циклического нагружения.

2. Определяют так называемые эквивалентные напряжения, равные по повреждаемости рассматриваемому блоку нагрузок. Процедура расчетно-экспериментальной оценки эквивалентных напряжений, в частности, представлена, например, в работе [18]. Некоторые рекомендации по экспертным оценкам таких напряжений представлены в работе [19].

3. Для расчетной оценки деградации остаточной прочности необходимо знание двух соотношений: уравнения (2) в виде

$$\sigma_{a\text{ eqv}}^{R=-1} = AN^m, \quad (10)$$

где $\sigma_{a\text{ eqv}}^{R=-1}$ амплитуда *одного* симметричного цикла напряжения, *эквивалентного* по вносимому повреждению рассматриваемому блоку напряжений; N — усталостная долговечность элемента; A и m — параметры уравнения (10);

соотношения (8) в виде

$$\sigma_{RS} = \sigma_{UCS} \left(1 - k_1 \left(\frac{\sigma_{a\text{ eqv}}^{R=-1}}{\sigma_{UCS}} \right)^{k_2} n \right), \quad (11)$$

где σ_{UCS} предел прочности рассматриваемого элемента при сжатии.

Процедура определения значений параметров k_1 и k_2 соотношения (11) схожа с определением по соотношению (8).

К сожалению, ввиду практического отсутствия экспериментальных данных по остаточной прочности слоистых композитов при переменных режимах нагружения выполнить в настоящее время верификацию предложенной модели с использованием соотношений (10) и (11) не представляется возможным.

Заключение

С целью достижения приемлемой точности и трудоемкости инженерных оценок остаточной прочности при циклическом нагружении слоистых композитов предложена специальная модель деградации остаточной прочности.

Проведена верификация соотношений предложенной модели на примере расчетных оценок остаточной прочности образцов со свободным отверстием из углепластика AS4/3501-6 $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_{s4}$ при циклическом растяжении и сжатии. Проведено сравнение результатов расчетных оценок с использованием предложенной модели и модели деградации нормализованной прочности и модели прогрессивного усталостного повреждения. Отмечены преимущества и практическая значимость предложенной модели.

Очевидно, что предложенная модель имеет определенные возможности для дальнейшего развития и совершенствования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Composite Aircraft Structure. Advisory Circular No: 20-107B. U.S. Department of Transportation. Federal Aviation Administration. URL: http://www1.airweb.faa.gov/Regulatory_and_Guidance_Library/rgAdvisoryCircular.nsf (дата обращения: 21.01.2022)
2. *Schaff J. R. and Davidson B. D.* A life prediction methodology for composite structures. Part I: Constant amplitude and two stress level fatigue loading; Part II: Spectrum fatigue loading // *J. Compos. Mater.* — 1997. — Vol 31, No. 2 — P. 128—181.
3. *Post N. L., Lesko J. J. and Case S. W.* Residual strength fatigue theories for composite materials // *Fatigue life prediction of composites and composite structures* / Ed. by A. P. Vassilopoulos. - Woodhead Publ. Ltd and CRC Press LLC, 2010.
4. *Adam T., Dickson R. F., Fernando G., Harris B. and Reiter H.* The fatigue behavior of Kevlar/carbon hybrid composites // *IMEchE Conf. Publ. (Institute of Mechanical Engineers)*. — 1986. — Vol. 2. — P. 329—335.
5. *Adam T., Dickson R. F., Jones C. J., Reiter H. and Harris B.* A power law fatigue damage model for fiber-reinforced plastic laminates // *Proc. Institution Mech. Eng. Part C: Mech. Eng. Sci.* — 1986. — Vol. 200. P. 155—166.
6. *Harris B.* A historical review of the fatigue behavior of fiber-reinforced plastics // *Fatigue in Composites* / Ed. by B. Harris. — Woodhead Publ. Ltd and CRC Press LLC, 2003.
7. *Shokrieh M. M. and Lessard L. B.* Fatigue under multiaxial stress systems // *Fatigue in Composites* / Ed. by B. Harris. — Woodhead Publ. Ltd and CRC Press LLC, 2003.
8. *Mandell J. F.* Fatigue behaviour of fibre-resin composites // *Developments in Reinforced Plastics 2*/Ed. by G. Pritchard. — London: Appl. Sci. Publ., 1986. — P. 67—108.
9. *Reifsnider K.* Durability and damage tolerance of fibrous composite systems // *Handbook of Composites* / Ed. by S. T. Peters. — London: Chapman & Hall, 1998.
10. *ASM Handbook. Vol. 21. Composites (The Volume was prepared under the direction of the ASM Int. Handbook Committee, 2001).*
11. *Nijssen R. P. L.* Phenomenological fatigue analysis and life modelling // *Fatigue Life Prediction of Composites and Composite Structures* / Ed. by A. P. Vassilopoulos. — Woodhead Publ. Ltd and CRC Press LLC, 2010.
12. *Vassilopoulos A. P., Keller T.* Fatigue of Fiber-Reinforced Composites. — London: Springer-Verlag Ltd, 2011.
13. *Burhan I., Kim H. S.* S—N Curve models for composite materials characterisation: An evaluative review // *J. Compos. Sci.* — 2018. — Vol. 2 (38). DOI: 10.3390/JCS2030038
14. *Strizhius V.* Fatigue life prediction of CFRP laminate under quasi-random loading // 30th Symp. Int. Committee on Aeronautical Fatigue, ICAF 2019, Krakow, Poland, June 2-7 2019, Proceedings, Krakow, 2019.
15. *Strizhius V. E.* Fatigue life prediction of laminated composites using normalized S—N data // *Mater. Sci. Power Eng.* — 2020. — Vol. 26, No. 3. — P. 20—32. DOI: 10.18721/JEST.26302
16. *Han H. T. and Choi S. W.* The Effect of Loading Parameters on Fatigue of Composite Laminates: Part V. Report DOT/FAA/AR-01/24, June 2001.

17. Khan A. I., Venkataraman S., Miller I. Predicting fatigue damage of composites using strength degradation and cumulative damage model // J. Compos. Sci. — 2018. — Vol. 2. DOI: 10.3390/JCS2010009

18. Стрижиус В. Е. Расчет эквивалентных напряжений и эквивалентов программ усталостных испытаний элементов композитных авиаконструкций // Науч. вестн. МГТУ ГА. — 2020. — Т. 23, № 2. — С. 87—100. <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2020-23-2-87-100>

19. Bakuckas Jr. J.G., Chadha R., Swindell P., Fleming M., Lin J.Z., Ihn J.B., Desai N., Espinar-Mick E., and Freisthler M. Bonded repairs of composite panels representative of wing structure // Proc. 30th Symp. Int. Committee on Aeronautical Fatigue, June 2—7, 2019, Krakow, Poland, p. 565—580.

Поступила в редакцию 27.01.2022

Окончательный вариант поступил 06.04.2022

Received Jan. 27, 2022 (Apr. 6, 2022)
