

УДК 621.01:539.4

ОБ ОЦЕНКЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ОБРАЗЦОВ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Каримбаев Т.Д., Матюхин Д.В.

*ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения
им. П.И. Баранова», г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Сложность внутренней структуры композиционных материалов приводит к многообразию форм усталостных повреждений в них, каждая из которых как в отдельности, так и в сочетании с другими вносит свою лепту в несущую способность неметаллического изделия. Многообразие форм усталостных повреждений в изделиях из композиционных материалов и характер их развития не позволили до настоящего времени сформировать для композиционных материалов общепринятые законы, подобные закону Пэриса, закону линейного суммирования Минера и другим. В работе рассмотрен вариант обнаружения зародившегося усталостного повреждения в образце и его дальнейшего развития путём исследования падения его собственной частоты. Для этого проведены экспериментальные исследования усталостной прочности консольно-закрепленных образцов из углепластика при их испытаниях на усталость по первой изгибной форме. Рекомендуется считать, что образец исчерпал свою несущую способность, если его собственная частота снизилась на допустимую величину, которая определяется из анализа частотной диаграммы Кемпбелла. В настоящей работе за допустимую величину падения частоты собственных колебаний принималось пять процентов. После усталостных испытаний образцов, собственная частота которых снизилась на пять процентов, с их использованием проведены дополнительные исследования по определению их остаточной прочности и жесткости при трехточечном изгибе и остаточной прочности при сдвиге. Описан способ подготовки образцов для статических испытаний. Выполнен анализ остаточной прочности при изгибе. Установлены корреляционные связи между снижением частоты собственных колебаний и характеристиками остаточной прочности и жесткости. Исследованиями остаточной прочности и жесткости показано, что использованная в работе допустимая величина падения частоты на пять процентов является консервативной оценкой несущей способности изделия.

Ключевые слова: композиционный материал; усталость; повреждения; остаточная прочность; частота; собственные колебания

TO THE ESTIMATION OF SAMPLE FATIGUE FROM POLYMER COMPOSITE MATERIALS

Karimbaev T.D., Matyukhin D.V.

FSUE «Central institute of aviation motors named after P.I. Baranov», Moscow, Russia

ABSTRACT

The complexity of the internal structure of composite materials results in a variety of forms of fatigue damage in them, each of which individually or in combination with other contributes to the carrying capacity of the non-metallic products. . The variety of forms

of fatigue damage in composite materials products and their development are not allowed so far to form a composite material commonly accepted laws such as the law of Paris, the linear summation of Miner and others. In the paper the option of detecting emerging fatigue damage to the sample and its further development through the study of the fall of his natural vibration frequency is considered. For this the experimental researches of fatigue strength of cantilever-fastened specimens of CFRP in fatigue tests them by first bending form are carried out. It is recommended to account that sample has exhausted its carrying capacity, if his natural vibration frequency decreased to an acceptable value, which is determined from the analysis of the frequency chart Campbell. In this work five percent are taken for an acceptable value of the decreasing of the natural vibration frequency. After the fatigue testing of samples, natural frequency of which had decreased on five percent, the additional studies were conducted to determine their residual strength and stiffness at three-point bending and residual shear strength. The manner of samples preparing for static tests is described. Analysis of residual flexural strength is performed. The correlation connections between the decreasing of the natural vibration frequency and the characteristics of residual strength and stiffness are established. The researches of specimen residual strength and stiffness are shown that the five percent permissible value of the natural vibration frequency drop is a conservative assessment of the carrying capacity of the product.

Keywords: composite material; fatigue; damage; remained strength; frequency; normal mode of vibration

ВВЕДЕНИЕ

При циклическом нагружении прочность и жесткость металлов и композиционных материалов (КМ) снижаются. Снижение прочности и жесткости КМ при циклическом нагружении обусловлено тем, что в деталях из КМ всегда существуют технологические несовершенства, которые не обнаруживаются средствами контроля и которые являются источником эксплуатационных повреждений. В частности, повышенное рассеяние экспериментально полученных характеристик усталостной прочности, присущее КМ, обусловлено наличием отмеченных технологических дефектов. При циклическом нагружении повреждение, как правило, зарождается в области действия максимальных напряжений, и оно может расти и развиваться, окончательно приводя изделие к разрушению. Формирование повреждения и соответствующий его рост сопровождаются снижением прочности и жесткости изделия из КМ. Одним из принципов проектирования конструкций из КМ является оценка зарождения и развития эксплуатационных повреждений до допустимых величин. В отличие от металлов, в которых прогрессирование повреждения связано с развитием одной доминирующей трещины, в КМ присутствуют и взаимодействуют многочисленные повреждения различного типа. Как правило, повреждение в КМ сначала проявляется в форме трещины в матрице в слоях с волокнами, направление которых не совпадает с направлением нагрузки. При повторных нагрузках трещины в матрице растут и множатся. В зависимости от нагружения и последовательности укладки такие трещины формируют расслоения на стыке слоёв, проникают в последующем в соседние слои, обволакивая армирующие волокна (см. рис.1 [1-3]). При дальнейшем нагружении трещины в матрице и расслоения растут и тип повреждения, который будет доминировать в дальнейшем, является функцией нагрузки, геометрии детали, последовательности укладки, а также свойств компонентов (главным образом,

полимера) КМ. Концентрации напряжений в вершинах трещин в матрице и/или расслоений могут в последующем привести к разрыву волокна.

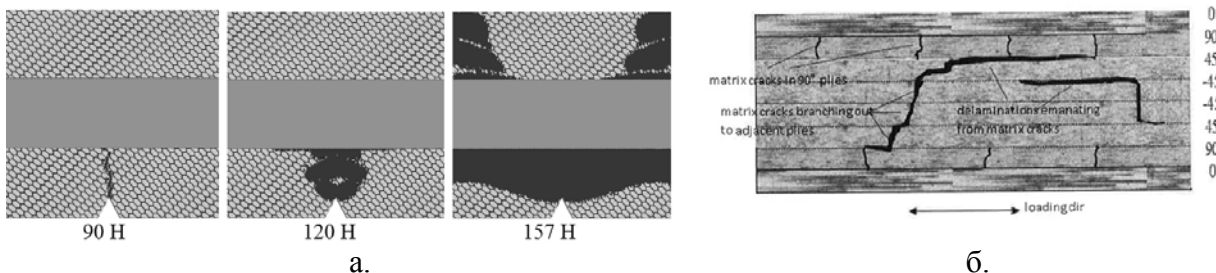


Рис.1. а – повреждения и их развитие с ростом нагрузки (изгиб балки с выточкой, [1]); б – повреждения в результате усталостного нагружения (растяжение-растяжение, [2]).

Изучение процессов зарождения и развития повреждений в конструкции из КМ включает анализ и испытания в широкой области масштабов усреднения структуры КМ (см. рис.2) таких как:

- микромасштаб, когда представительной точкой исследования является точка, в которой сформированы характеристики отдельной компоненты КМ (см., например, [4]) и КМ представляется в виде неоднородного сплошного тела;
- мезомасштаб, когда представительной точкой исследования является составная точка, в которой формируются усредненные характеристики каждой структурной компоненты КМ, а также параметры механического и физического их взаимодействия при деформировании [1,5,6] и КМ рассматривается как составная (например, двухкомпонентная) среда;
- макромасштаб, когда представительной точкой исследования является точка с усредненными по всем структурным составляющим КМ характеристиками и КМ рассматривается как однородная анизотропная среда (см. [7]).

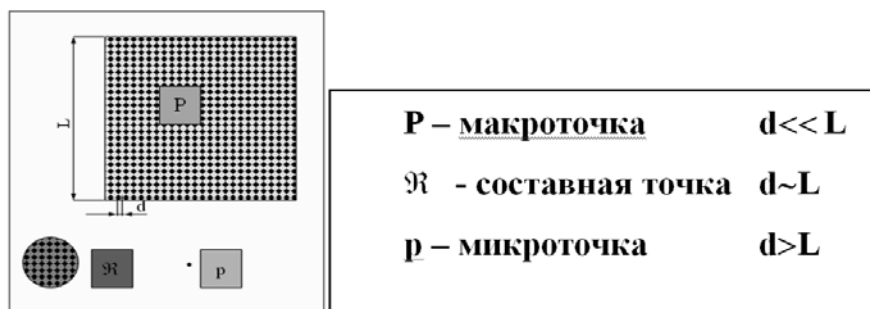


Рис.2. Математические модели композиционных материалов.

Конечно, полное понимание влияния эффектов масштаба на степень описания усталости КМ возможно только при проведении исследований на уровне всех этих масштабов. Однако в настоящей работе упор сделан на исследования в рамках макромасштаба, в области нескольких сотен диаметров волокон ($d \ll L$), с качественным усредненным анализом процесса возможного зарождения и развития повреждения в наинищем масштабе, а именно, в предположении присутствия внутренних несовершенств таких, как поверхностные трещины в волокнах, отсутствие связи между волокном и матрицей, поры и включения в материале матрицы и т.д. Этот подход является

удобным техническим предположением, которое упрощает аналитическое моделирование и которое может, в некоторой мере, предоставить возможность изучения случаев, когда для исследований необходимы модели более высокого уровня.

В ряде технических приложений в качестве критерия работоспособности конструкции при циклическом нагружении принимают допустимый уровень снижения резонансной частоты. Допустимый уровень снижения резонансной частоты устанавливается с помощью диаграммы Кэмпбелла в результате анализа и сравнения рабочих частот и частот собственных колебаний детали. Наиболее близкие (возможно и равные) рабочие и собственные частоты считаются опасными и требуют принятия различных технических решений для того, чтобы повысить их отличия до допустимых величин во всем жизненном цикле изделия. В частности, одним из мероприятий является установление допустимого уровня падения собственных частот изделия, обусловленное условиями эксплуатации (нагрузки, температуры, влажности и т.д.), в том числе, числом циклов нагружения при повторных нагрузках. Падение собственной частоты образца при циклическом нагружении с постоянной амплитудой деформации (напряжения) является интегральной характеристикой усталостной прочности. Несмотря на то, что интегральная характеристика, заключающаяся в падении собственной частоты, является характеристикой на уровне макро-масштаба, она непосредственно связана с внутренней структурой композиционного материала и явлениями, происходящими при нагружении на уровне отдельных его компонент. Падение собственной частоты на уровне макро-масштаба отражает снижение жесткости (модуля упругости) материала образца, которое обусловлено зарождением, накоплением и ростом повреждений при циклическом нагружении. Кроме того, при высокочастотных испытаниях образца в области максимальной амплитуды циклических деформаций возможно повышение температуры, приводящее к общему снижению жесткости. В работе для установления корреляции падения собственной частоты образца и качественными изменениями структуры композиционного материала, а также оценки остаточной прочности проведены испытания на усталость образцов из углепластика при различных уровнях амплитуды циклической деформации.

1. ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ

32 образца из углепластика на основе ткани УТ 900-И саржевого плетения и полимерного связующего Т-26 со структурой армирования $[0^\circ, \pm 60^\circ]_8$ размером $111 \times 20 \times 2$ мм были вырезаны из двух изготовленных пластин. Изготовленные образцы были испытаны на усталость при собственных колебаниях по первой изгибной форме консольно-закрепленных прямоугольных образцов и симметричном цикле напряжений с коэффициентом асимметрии $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = -1$ (минимальная σ_{\min} и максимальная σ_{\max} амплитуды напряжений) [8].

В испытаниях на усталость возбуждающее воздействие создавалось с помощью сигнала определенного напряжения и частоты, генерируемого системой управления вибростендом. Параметры состояния образца фиксировались с помощью тензорезистора и лазерного триангуляционного датчика. Частота управляющего сигнала настраивалась на собственную частоту f

образца, вводя образец в состояние резонанса. Это позволяло получать определенные уровни деформации при минимальных затратах энергии. Уровень деформаций можно было корректировать, изменяя напряжение управляющего сигнала.

При появлении и развитии повреждения собственная частота колебаний образца по первой изгибной форме снижалась, что приводило к необходимости корректировать частоту управляющего сигнала. В итоге, точность определения падения частоты определялась относительной погрешностью измерения системы управления вибростендом. Характеристики датчиков и измерительных приборов приведены в табл.1.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Из анализа проведенных экспериментальных исследований следует, что собственная частота образца при некоторых уровнях амплитуды циклической деформации ε_{\max} может начать снижаться с самого начала испытания. Это, по-видимому, связано с тем, что образец, в котором всегда имеются технологические дефекты и несовершенства, которые не могут быть обнаружены используемыми неразрушающими методами контроля качества, начинает приспосабливаться к действующей нагрузке. Например, даже в условиях стесненной деформации в окружении материала матрицы волокна, как элемент композиционного материала несущий основную часть нагрузки, начинают выстраиваться в направлении главного действующего напряжения. Степень и быстрота начального приспособления образца, конечно, зависят от уровня амплитуды циклических деформаций ε_{\max} . На рис.3 это участок, прилегающий к начальной точке (точке 0,0). Даже здесь можно видеть, что с увеличением амплитуды циклической деформации растет угол начального наклона, приводя к более быстрому приспособлению образца к нагрузке.

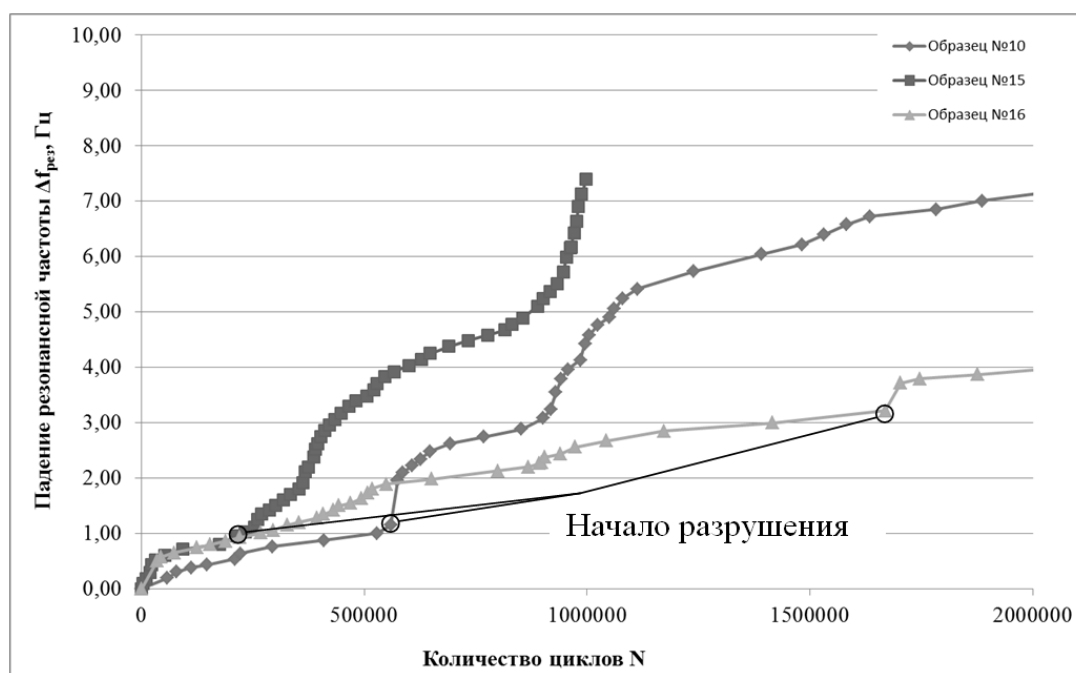
Таблица 1.

Наименование средства измерения	Диапазон измерения	Максимальная относительная погрешность
Тензорезистор VISHAY ED-DY-125AD-350	-1%...+1%	3%
Акселерометр KISTLER 8702B100M1	-100 g...+100 g	5%
Лазерный триангуляционный датчик RIFTEK RF603.10-25/45-232/U-IN/AL	0 мм...25 мм	0,1%
Система управления вибростендом Data Physics SignalStar Scalar	-10 В...+10 В	0,2%
Система измерения National Instruments модуль NI 9201	-10 В...+10 В	0,5%
модуль NI 9236	-5,55%...+6,25%	0,8%

Затем наблюдается монотонное падение резонансной частоты по почти прямой линии с постоянным углом наклона, зависящим от уровня амплитуды циклической деформации ε_{\max} и, очевидно, естественного разброса данных сопротивления композиционного материала повторным нагрузкам. Отмеченное опытное снижение резонансной частоты Δf можно связать с постепенным

развитием основного микрповреждения в области максимальных напряжений, которое при дальнейшем циклическом нагружении приводит к постепенному росту отдельного микродефекта. Как правило, зарождение и локальное развитие микродефекта имеет место в матрице композиционного материала в слоях, направление армирования которых не совпадает с направлением главного напряжения. Разрушения в материале матрицы незначительно сказываются на величине модуля упругости. Аналитическое описание процесса развития микрповреждения в матрице композиционного материала может быть описано методами, изложенными в [9].

По мере повышения числа циклов нагружения и соответствующего роста микродефекта могут появиться новые трещины, некоторые из которых могут начать взаимодействовать друг с другом. Всё это в совокупности приводит к скачкообразному изменению наклона кривой зависимости падения частоты от числа циклов нагружения (см. рис.3). В качестве предельного числа циклов нагружения при заданном уровне амплитуды максимальной деформации ε_{\max} принято число циклов нагружения N_1 при первом изменении угла наклона в зависимости падения частоты Δf от числа циклов нагружения n , приведенное на рис.3.



№ образца	Деформация	Количество циклов
10	0,376	559000
15	0,399	362000
16	0,397	1670000

Рис.3. Зависимость падения резонансной частоты от количества пройденных циклов образцов, испытанных в диапазоне деформаций от 0,37% до 0,40%.

Из рисунка видно, кроме того, показано ниже, что число циклов нагружения N_1 находится далеко от исчерпания несущей способности образца. Приведенные на рис.3 переменные изменения углов наклона в кривой зависимости падения частоты Δf от числа циклов нагружения n свидетельствуют о продолжающемся

развитии микроповреждения, зарождения новых, их слияния и взаимодействия. По нашим представлениям все экспериментально зафиксированные изменения во внутренней структуре композиционного материала происходят в матрице или на границе раздела волокно-матрица и не связаны с повреждениями волокна.

Таким образом, множество типов повреждений, которые присутствуют в композиционном материале и которые определяют характер поведения детали из него в процессе усталостного нагружения, усложняют формирование математической модели зарождения и развития повреждений в конструкциях из них. В металлах, где усталость определяется развитием единичного и доминирующего типа повреждения по подобной форме, степенные законы развития, подобные закону Пэриса ([8,9]), являются экспериментально подтвержденными моделями развития трещины. Такие модели являются базой применения критериев допустимой повреждаемости и линейного суммирования для предсказания долговечности, которые используются при проектировании металлических деталей. Множественность типов повреждений композиционных материалов и тот факт, что типы повреждения, которые оказывают доминирующее влияние на усталостные характеристики и ведут к разрушению, в реальности постоянно изменяются с числом циклов нагружения, в частности, установленные и в настоящей работе (см. рис.1), позволяют заключить, что:

- модели макромасштаба не достаточны для выявления и раскрытия причинно-следственных связей циклического нагружения с зарождением, развитием и взаимодействием повреждений различных типов в КМ;
- применение критериев, основанных на моделировании допустимого повреждения в КМ на уровне макромасштаба, является трудным для экспериментального обоснования и неэффективным в плане стоимости, как заявляют в некоторых работах (см. [2]);
- критерии, основанные на подходе безопасной долговечности, экспериментальном или аналитическом (прогнозном) построении кривых усталости S (амплитуда напряжения) – N (предельная частота) [8], могут быть приняты в качестве базовой модели на уровне макромасштаба для проектирования деталей из композиционных материалов.

3. ОСТАТОЧНАЯ ПРОЧНОСТЬ

Из проведенного анализа следует, что даже в случае резкого изменения наклона кривой зависимости падения резонансной частоты Δf от числа циклов нагружения n или в случае достижения определенного уровня падения резонансной частоты образец еще может нести нагрузку. Для того чтобы количественно определить несущую способность предварительно испытанных на усталость 32 образцов, проведены дополнительные исследования по определению их остаточной прочности σ_r . Проведены испытания образцов на трехточечный изгиб (16 образцов) и на межслоевой сдвиг (16 образцов). Определение остаточной изгибной и межслоевой прочности было реализовано на образцах, центральное сечение которых в испытаниях на изгиб и сдвиг в точности совпадало с областью максимальных деформаций при испытаниях на усталость. В испытаниях на трех точечный изгиб расстояние между опорами составляло 40 мм ($20h$, где $h = 2$ – толщина образцов), а в испытаниях на сдвиг оно было выбрано равным 10 мм.

Результаты испытаний остаточной прочности σ_r на изгиб в зависимости от числа циклов нагружений n приведены на рис.4. За исключением двух случаев (образцы 6 и 11) остаточные прочности σ_r на изгиб расположены выше принятых за разрушение при циклических испытаниях. Так, например, остаточные прочности приведенных на рис.3 образцов 10,15 и 16 в 1.17, 1.25 и 1.18 раз соответственно превышают принятые выше пределы усталости по первому излому в кривой зависимости падения собственной частоты Δf от числа циклов нагружения n . Так как равенство остаточной прочности σ_r и максимальной амплитуды циклического напряжения σ_{\max} является общепринятым критерием исчерпания несущей способности [2,3,10,11], то из анализа данных видно, что использованный выше критерий усталостного разрушения является консервативным, он имеет определенный запас «прочности».

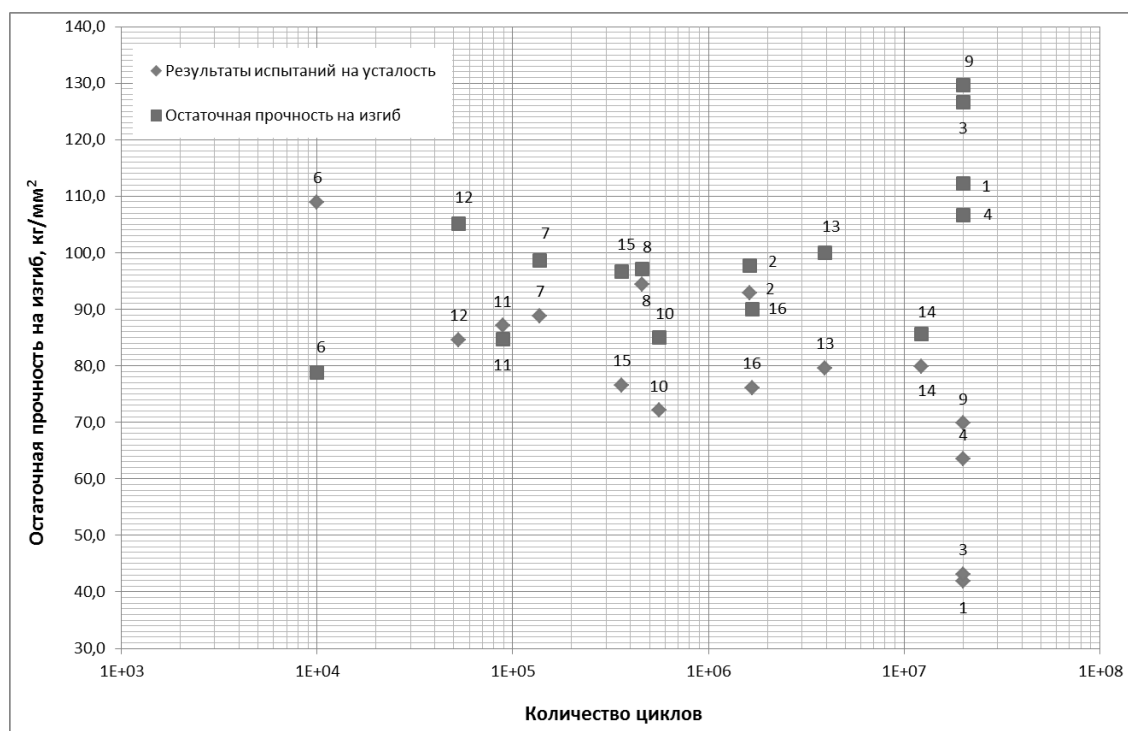


Рис.4. Зависимость остаточной прочности на изгиб от числа циклов нагружений.

На рис.5 приведена зависимость нормализованной остаточной прочности σ_r от максимальной амплитуды циклического нагружения σ при принятом N_1 уровне циклов n нагружения, т.е. зависимости отношения σ_r/σ от максимальной амплитуды циклического нагружения σ , вычисленные при $N=N_1$. На рис.5 можно также видеть, что в подавляющем большинстве случаев нормализованная остаточная прочность σ_r/σ располагается в окрестности 1. Отношение σ_r/σ не превышает критическое значение, равное 1, более чем в 1.3 раза.

Очевидно, что если нормализованная остаточная прочность σ_r , а именно остаточная прочность σ_r , отнесенная к максимальной амплитуде циклического нагружения σ при принятом N_1 уровне циклов n нагружения, распределена в окрестности 1, то это свидетельствует о соответствии принятого критерия общепринятому критерию.

Остаточные прочности σ_r на изгиб образцов 6 и 11 расположены ниже напряжений σ , принятых за разрушение при циклических испытаниях.

Экспериментально установленная остаточная прочность σ_r на изгиб образца 11 меньше амплитуды напряжений σ на 3%. Это отличие может быть объяснено естественным рассеянием, обусловленным как разбросом свойств материала, так и погрешностями испытания. 30% отличие остаточной прочности σ_r на изгиб образца 6 от амплитуды напряжений σ , имеющее место при больших напряжениях (109 кг/мм^2) и в области малоциклового усталости ($N_1=10^4$ циклов), связано, по-видимому, с отличием механизмов разрушения при амплитудах напряжений σ , близких к статической прочности. Быть может, этот случай не охватывается использованной моделью анализа и требуются математические модели более высокого уровня.

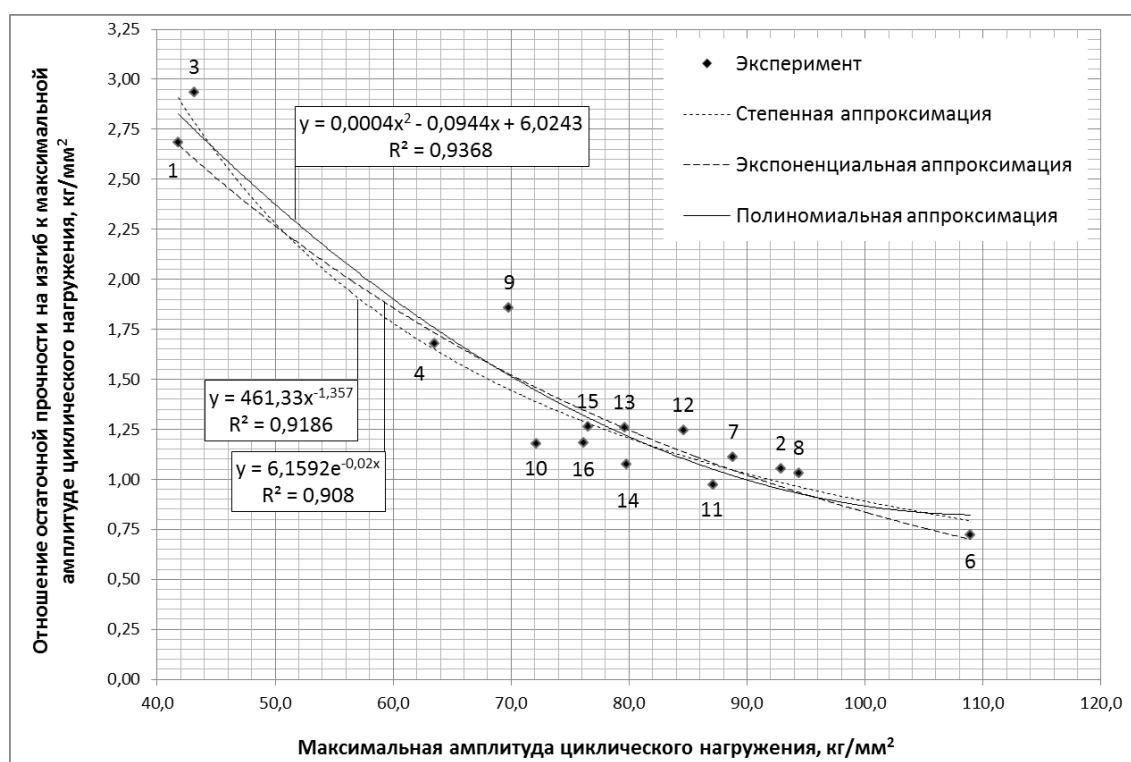


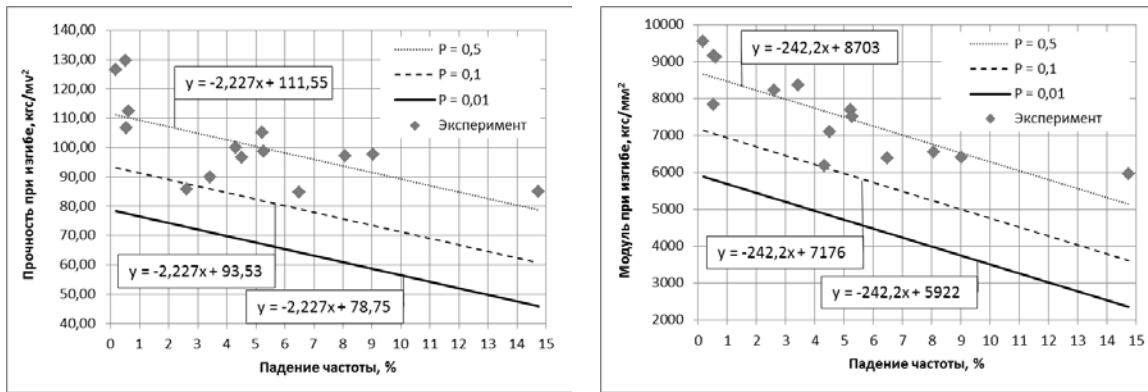
Рис.5. Зависимости отношения σ_r/σ от максимальной амплитуды циклического нагружения σ , вычисленные при $N=N_1$.

Результаты эксперимента аппроксимированы методом наименьших квадратов тремя функциями (степенной, экспоненциальной и полиномиальной). Соответствие использованных функций экспериментальным данным устанавливают по величине достоверности аппроксимации R^2 , являющейся квадратом коэффициента корреляции Пирсона. Все используемые функции имеют величину достоверности, превышающую 0,9, что является хорошим показателем. Предпочтительной является полиномиальная функция с максимальным коэффициентом корреляции.

4. СВЯЗИ ПАРАМЕТРОВ ПРОЧНОСТИ ОБРАЗЦА С ПАДЕНИЕМ ЧАСТОТЫ ЕГО СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ

В ниже приведенных результатах под падением частоты Δf понимается отношение $\Delta f = (f(N) - f(0))/f(0)$, выраженное в процентах. На рис.6 приведены

экспериментальные зависимости остаточной изгибной прочности σ_r и модуля упругости E на изгиб материала образца, полученные в испытаниях на трехточечный изгиб, от падения резонансной частоты Δf . Из приведенных результатов видна общая корреляция между σ_r и Δf и между E и Δf . Уровни вероятности P приняты в соответствии с методическими указаниями по обработке результатов усталостных испытаний [12].



а. б.

Рис.6. Зависимости остаточной прочности σ_r (а) и модуля упругости E (б) материала образца на трехточечный изгиб от падения резонансной частоты Δf .

На рис.7 приведены экспериментально полученные зависимости остаточной прочности при сдвиге τ_r материала образца, полученные в испытаниях на сдвиг, от падения резонансной частоты Δf . Сравнение результатов, приведенных на рис.6а и 7, показывает, что остаточная прочность при сдвиге τ_r имеет меньший разброс относительно среднего значения. Это, возможно, является свидетельством того, что в усталостных испытаниях в большей мере получили повреждения материал матрицы – компоненты композиционного материала, которая определяет сдвиговую прочность всего композиционного материала.

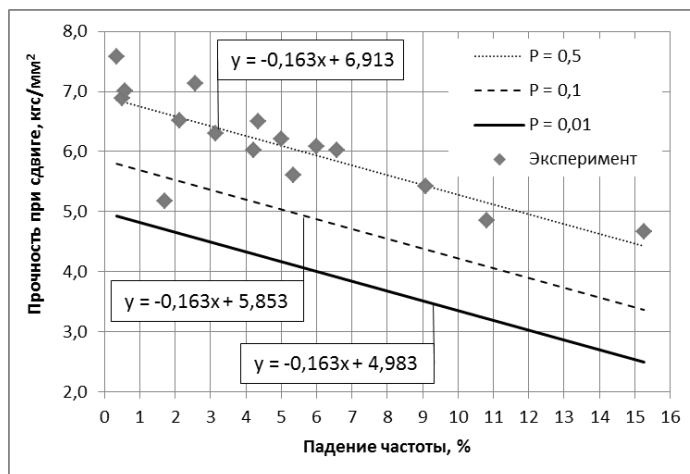


Рис.7. Падение прочности при сдвиге τ_r с увеличением Δf .

Установленная испытаниями корреляция характеристик прочности и жесткости образца с частотой его собственных колебаний позволяет использовать падение частоты Δf как критерий несущей способности образца.

Выше с использованием диаграммы Кэмпбелла устанавливалась допустимая величина падения частоты Δf . Например, если допустимая величина падения частоты Δf оказалась равной 5%, то в соответствии с приведенными на рис.6 и 7 результатами при проектировании изделия в качестве усталостной прочности на изгиб должна быть принята величина, равная 68 кг/мм² (81 кг/мм²), с вероятностью разрушения, не превышающей 1% (10%), а на сдвиг – 4.1 кг/мм² и 5 кг/мм² при 1% и 10% вероятности разрушения, соответственно.

Ниже по результатам испытаний даны оценки величин падения частоты Δf по средним значениям, по уровням вероятности 50%, 10% и 1%, при которой полностью теряются жесткость и прочность образца. Эти оценки, полученные линейной экстраполяцией соответствующих рис.6 и 7 экспериментальных результатов, приведены в табл. 2.

Таблица 2.

Параметр	Падение частоты, %		
	P=0,5	P=0,1	P=0,01
Нулевая прочность при изгибе	50,1	42,0	35,4
Нулевая прочность при сдвиге	42,4	35,9	30,6
Нулевой модуль упругости	35,9	29,6	24,5

По приведенным результатам, полученным на базе линейных подходов, только при больших значениях падения частоты собственных колебаний возможно полное исчерпание несущей способности образца при испытаниях на усталость с частотой собственных колебаний по первой изгибной форме.

ВЫВОДЫ

Множественность характера зарождения и развития повреждений в композиционных материалах затрудняет в рамках модели макромасштаба использовать критерии допустимых повреждений для оценки долговечности деталей из них.

Снижение собственных частот является характеристикой композиционного материала в рамках модели макромасштаба, которое в совокупности (интегрально) охватывает внутренние изменения в структуре материала при циклических нагрузках и связано с исчерпанием несущей способности на цикле нагружения, когда остаточная прочность окажется равной амплитуде действующей циклической нагрузки.

В рамках модели макромасштаба композиционного материала подход безопасной долговечности с использованием экспериментально установленных (возможно и прогнозных) усталостных S-N кривых пригоден для оценки долговечности деталей из них.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каримбаев Т.Д. *Подходы при моделировании деформаций композиционных материалов* // Космонавтика и ракетостроение. – 2009. – №1(54). – С.91-102.
2. Kassapoglou Ch. *Predicting the structural performance of composite structure under cycling loading*. – USA, Cambridge MA, Massachusetts Institute of Technology, 2012. – 140 p.

3. *Composite Materials. Handbook 17 2F. Vol.2,3. Polymer Matrix Composites. Properties.* June 17, 2002.
4. Reifsnider K., Case S. *Micromechanical models* / In Book: "Fatigue in composites. Science and technology of the fatigue response of fibre-reinforced plastics". – England, Cambridge: Woodhead Published Limited, 2003. – Pp.413-431.
5. Каримбаев Т.Д. *Основные соотношения механики двухкомпонентной среды и способы определения их параметров* // Труды ЦИАМ. – 1985. – №1119. – 23 с.
6. Ladevèze P., Lubineau G. *A computational meso-damage model for life prediction for laminates* / In Book: "Fatigue in composites. Science and technology of the fatigue response of fiber-reinforced plastics". – England, Cambridge: Woodhead Published Limited, 2003. – Pp.432-441.
7. Лехницкий С.Г. *Теория упругости анизотропного тела.* –М.: Наука, 1977. – 415 с.
8. Когаев В.П. *Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени.* – М.: Машиностроение, 1977. – 232 с.
9. Каримбаев Т.Д., Мыктыбеков Б., Панова И.М. *Математические модели нелинейного деформирования однонаправлено-армированных композиционных материалов* // Труды ЦИАМ. – 2005. – №1334. – 159 с.
10. Jeffrey R. *Schaff-fatigue and life prediction* // ASM Handbook. – 2001. – Vol.21. Composites.
11. *Fatigue in composites. Science and technology of the fatigue response of fibre-reinforced plastics* / Edited by Bryan Harris. – England, Cambridge: Woodhead Published Limited, 2003. – 742 p.
12. РД 50-398-83. *Методические указания. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний. Планирование механических испытаний и статистическая обработка результатов.* – М.: Издательство стандартов, 1984. – 200 с.

REFERENCES

1. Karimbaev T.D. *Podkhody pri modelirovanii deformatsii kompozitsionnykh materialov [Approaches for modeling deformation of composite materials].* Kosmonavtika i raketostroenie. 2009, №1(54), Pp.91-102.
2. Kassapoglou Ch. *Predicting the structural performance of composite structure under cycling loading.* Proefschrift, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge MA, USA, 2012, 140 p.
3. *Composite Materials. Handbook 17 2F. Vol.2,3. Polymer Matrix Composites. Properties.* June 17, 2002.
4. Reifsnider K., Case S. *Micromechanical models* / In Book "Fatigue in composites. Science and technology of the fatigue response of fibre-reinforced plastics". Woodhead Published Limited, Camdridge, England, 2003, Pp.413-431.
5. Karimbaev T.D. *Osnovnye sootnosheniia mekhaniki dvukhkomponentnoi sredy i sposoby opredeleniia ikh parametrov [The basic mechanics ratio of the two-component environment and ways of defining their parameters].* Trudy TsIAM. 1985, №1119, 23 p.
6. Ladevèze P., Lubineau G. *A computational meso-damage model for life prediction for laminates* / In Book: "Fatigue in composites. Science and technology of the fatigue response of fibre-reinforced plastics". Woodhead Published Limited, Camdridge, England, 2003, Pp.432-441.

7. Lehnitsky S.G. *Teoriia uprugosti anizotropnogo tela [The theory of an anisotropic elastic body]*. – Moskva: Nauka, 1977, 415 p.
8. Kogaev V.P. *Raschety na prochnost' pri napriazheniiakh, peremennykh vo vremeni [Strength analyses at time-varying stress]*. – Moskva: Mashinostroenie, 1977, 232 p.
9. Karimbaev T.D., Myktybekov B., Panova I.M. *Matematicheskie modeli nelineinogo deformirovaniia odnonapravleno-armirovannykh kompozitsionnykh materialov [Mathematical models of the nonlinear deformation unidirectional - reinforced composite materials]*. Trudy TsIAM. 2005, №1334, 159 p.
10. Jeffrey R. *Schaff-fatigue and life prediction*. ASM Handbook. 2001, Vol.21, Composites.
11. *Fatigue in composites. Science and technology of the fatigue response of fibre-reinforced plastics* / Edited by Bryan Harris, Woodhead Published Limited, Camdrige, England, 2003, 742 p.
12. RD 50-398-83. *Metodicheskie ukazaniia. Raschety i ispytaniia na prochnost' v mashinostroenii. Metody mekhanicheskikh ispytanii. Planirovanie mekhanicheskikh ispytanii i statisticheskaia obrabotka rezul'tatov [Methodical instructions. Strength analyses and tests in mechanical engineering. Mechanical test methods. Planning of mechanical tests and statistical analysis of the results]*. – Moskva: Izdatel'stvo standartov, 1984, 200 p.

Поступила в редакцию 10 октября 2015 года.

Сведения об авторах:

Каримбаев Тельман Джамалдинович – д.т.н., проф., нач. отдела «Прочность композиционных и керамических материалов», ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова», г. Москва, Россия; e-mail: karimbayev@ciam.ru
Матюхин Дмитрий Владимирович – инж. 1-й категории, отдел «Прочность композиционных материалов», ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова», г. Лыткарино, МО, Россия; e-mail: matyukhin@rtc.ciam.ru