

Методика учета цензурированных образцов при испытаниях композитов на усталость

Ирина В. Гадолина^{1*}, Игорь С. Майданов², Сергей А. Смелов², Юлия В. Суслова¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация, ²ОНПП «Технология», Обнинск, Российская Федерация
*gadolina@mail.ru



Ирина В. Гадолина



Игорь С. Майданов



Сергей А. Смелов



Юлия В. Суслова

Резюме. Целью статьи явилось создание метода включения информации о цензурированиях для уточнения оценки кривой усталости композитов. Цензурированные образцы – это не разрушившиеся к концу испытаний образцы, для которых зафиксирована некоторая наработка. Необходимо отметить, что в настоящее время исследователи часто игнорируют данные о наработках не разрушившихся к концу испытаний образцов, что не представляется оправданным с точки зрения экономии средств и надежности статистических выводов. Информация о цензурированиях весьма содержательна с точки зрения прочности, надо только иметь инструмент, чтобы ей воспользоваться. Это указывает на актуальность настоящей работы. **Метод** заключается в имитационном моделировании на основе статистического метода бутстрэп, относящегося к группе методов с интенсивным использованием вычислений на компьютере. В процессе разработки метода были рассмотрены подходы, применяемые ранее (в частности, для металлов). В рассмотренном примере применения метода используются данные, взятые из литературных источников. **Результаты.** Показан пример усталостных испытаний, проведенных авторами статьи, с большим количеством цензурированных образцов. Проведено сопоставление результатов, полученных с применением метода, с реальными данными. Показано, что качество статистической оценки повышается за счет применения метода. Приведены некоторые соображения по поводу инструмента механических испытаний для контроля качества. Обсуждается источник разброса данных при усталостных испытаниях. **Выводы.** Применение метода поможет включить информацию о цензурированных образцах в оценку кривой усталости. Для исследователей, занимающихся экспериментальным исследованием сопротивления усталости композитных материалов, предлагаемый метод может оказаться весьма полезным. Он учитывает характерные особенности исследований прочности композитов (большой разброс свойств и отсутствие неограниченного предела усталости). Метод позволит учесть важную, но не всегда востребованную до сей поры информацию об образцах, проработавших определенное число циклов, но не разрушившихся.

Ключевые слова: полимерный композит, разброс свойств, усталость, цензурированные выборки, статистический бутстрэп.

Формат цитирования: Гадолина И.В., Майданов И.С., Смелов С.А., Суслова Ю.В. Методика учета цензурированных образцов при испытаниях композитов на усталость // Надежность. 2021. №1. С. 4-10. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2021-21-1-4-10>

Поступила 08.12.2020 г. / После доработки 29.01.2021 г. / К печати 22.03.2021 г.

1. Введение

Исследования механических свойств полимерных композиционных материалов (ПКМ) показывают, что композиты имеют серьезные преимущества перед традиционными конструкционными металлами и сплавами, в основном связанные с высокими удельными характеристиками статической прочности. Полимерный композит – это многофазный материал, в котором армирующие наполнители интегрированы с полимерной матрицей, что приводит к синергическим механическим свойствам, которые не могут быть достигнуты ни одним из компонентов по отдельности. В то же время развитие науки и технологий приводит к тому, что стоимость производства композитов различных типов постоянно снижается, а качество растет. Таким образом, этот вид материала находит новые области применения. В связи с все более широким использованием композитов [1], в настоящее время приоритет отдается требованиям к качеству. Некоторые передовые методы контроля успешно применяются не только для диагностики технического состояния, но и для контроля качества [2, 3].

В [4, 5] описан опыт применения передовых методов неразрушающего (NDI) и разрушающего контроля. В качестве одной из возможностей композитные образцы были подвергнуты сквозному ультразвуковому NDI (ГТУ), который генерировал С-сканирование для количественной оценки плоских поврежденных областей с использованием программного обеспечения для анализа изображений. Дополнительные методы контроля, например, микроскопия и тепловизионное изображение, также используются для исследования устойчивости к повреждениям. Такие расширенные возможности могут дать некоторую дополнительную информацию о цензурированных образцах [4]. В статье [6] авторы отметили некоторые причины, влияющие на качество и достоверность определяемых значений, не позволяющие получать стабильные и достоверные физико-механические значения. Основное внимание в статье [6] уделено деформациям изготовленных образцов и вид их физико-механического разрушения.

Наряду с использованием современных физических методов, см., например, [5], в задаче анализа качества композитов никогда не потеряют своего значения исследования механических характеристик изделий: таких как прочность при статических испытаниях (растяжение, сжатие, сдвиг), жесткость (модуль упругости). В [7] прочность на сдвиг композитов, армированных углеродом, была исследована с целью анализа выбросов значений междвиговой прочности композитных образцов. На рис. 1 показаны диаграммы «ящик с усами» [7, 8] для нескольких партий. Наблюдается значительный разброс даже внутри одной партии. Целью исследования являлась разработка метода удаления выбросов. В этом конкретном примере показание $\tau = 83,9$ МПа было принято выбросом, что означало, что это значение

было в дальнейшем удалено и не использовалось для дальнейшего анализа.

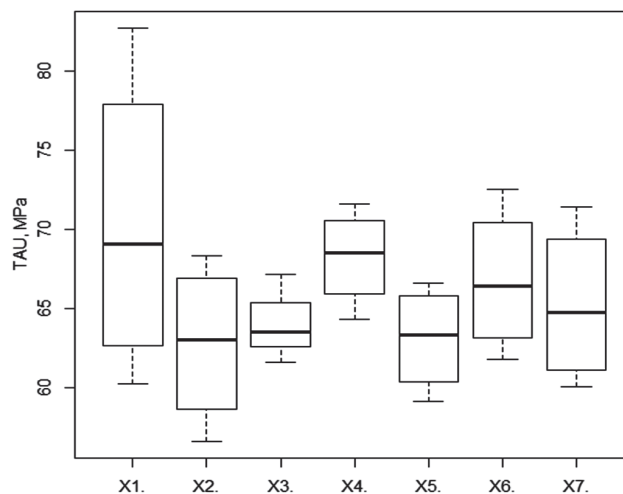


Рис. 1. Диаграммы ящик с усами для нескольких партий композитов [7].

Особняком стоят характеристики сопротивления усталости. Несмотря на то, что композиты все чаще используются в самолетах и космических аппаратах и других изделиях, подверженных повторяющимся циклическим нагрузкам, все же существует мнение, что статическая прочность композитов является достаточным показателем прочности. Отчасти это связано с тем, что на самом деле наклон кривой усталости m композитных образцов действительно очень велик по сравнению с аналогичной величиной для металлов. Если для металлов характерно значение $m = 5 \dots 9$ (показатель наклона кривой усталости), то для композитов нередко можно наблюдать $m = 15$ и более. Столь большое значение m в первую очередь означает значительный анализ усталостных свойств, что неудивительно. Для композитов большой разброс справедлив и для статических характеристик (см. рис. 1), и, как было отмечено ранее, при усталости разброс всегда больше [9]. Два важных фактора увеличивают разброс усталостных характеристик композитов. Во-первых, прочность композитов и при статических испытаниях демонстрирует больший разброс по сравнению с металлами. Во-вторых, разброс по усталости всегда больше, чем при статических испытаниях.

В рамках настоящего исследования были проведены испытания на сжатие малогабаритных образцов. Рис. 2а демонстрирует исходный образец, 2б – разрушенный после испытаний на усталость. Образцы были изготовлены из углеродного волокна и химического связующего на основе эпоксидных и фенолформальдегидных смол, обычно применяемого для производства изделий и деталей для авиационной и космической техники. На первом этапе были проведены статические испытания на сжатие этих образцов. В табл. 1 приведена сводка по испытаниям на статику при сжатии σ_c^B . Коэффициент вариации весьма высок: $V = 0,25$, что свидетельствует о невысокой стабильности свойств.

Табл. 1. Сводка по испытаниям на сжатие (статика) σ_c^B

Среднее σ_c^B	701,3	МПа
СКО	175,0	МПа
Вариация V	0,25	



а)



б)

Рис. 2. Малогабаритный образец из углепластика для испытаний на сжатие. а) – до испытаний; б) – после разрушения от усталости

Показанный на рис. 2б образец после разрушения от усталости демонстрирует разрушение с нарушением связей между волокнами. Частично разрушение имеет место

также в орголитовых накладках. Поскольку такой вид разрушения образца при испытаниях является весьма распространенным, данный результат по усталости (конкретно, образец № 7, рис. 2б) был включен в общую таблицу.

На рис. 3 показаны предварительные данные по испытаниям образцов на усталость:

Показанные на рис. 3 результаты демонстрируют не только большой разброс, но и чрезвычайно высокую степень цензурированности – т.е. наличие большого количества не разрушившихся к концу испытание образцов. Этот рисунок весьма условно можно назвать кривой усталости – скорее, это некий агломерат данных, отдаленно указывающих на наличие зависимости числа циклов от амплитуды напряжений. Высокий разброс может быть связан с: а) малым размером образцов, не обеспечивающим осреднение свойств по ширине; б) искривлением волокон; в) неоднородностью прессования при изготовлении.

Вывод – нужны специальные методы для учета цензурированных при построении кривой усталости образцов из композитов.

2. Учет информации о цензурированиях (приостановках)

Исследования на усталость композитов различных типов, а также поведение материалов при циклических нагрузках привлекают внимание многих ученых [10–14]. Как уже было отмечено ранее и исходя из здравого смысла, можно сделать вывод, что информацию о приостановках (цензурировании) следует как-то включать

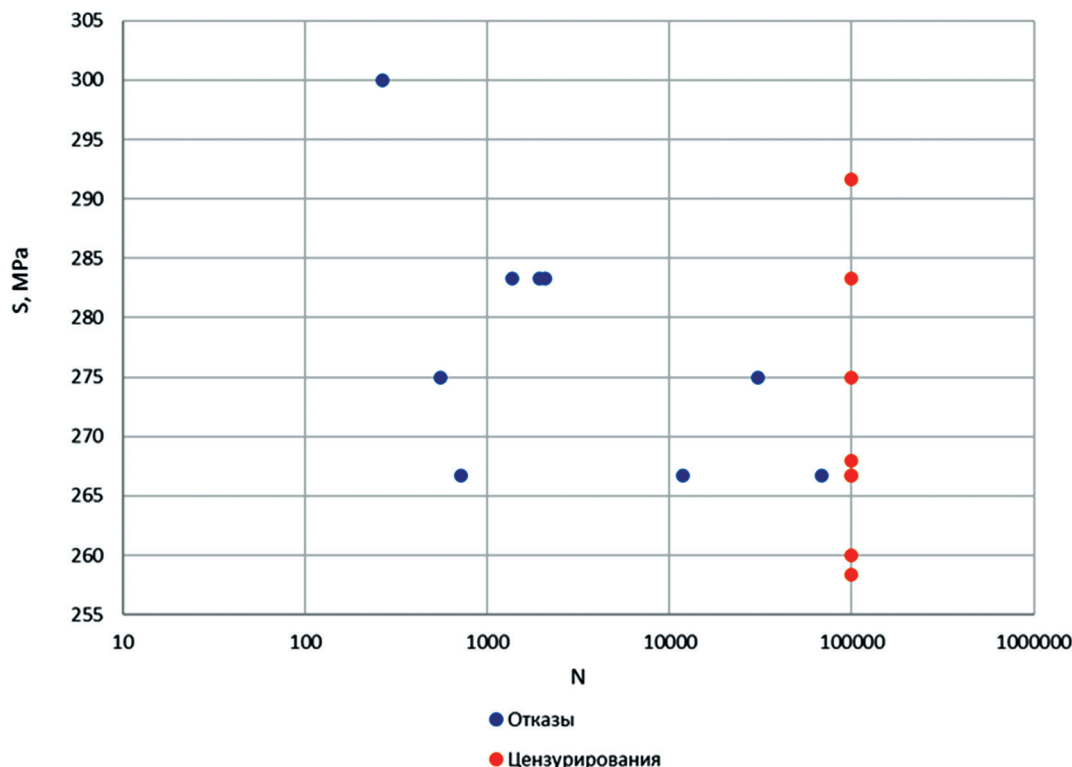


Рис. 3. Результат испытаний на усталость при сжатии малогабаритных образцов из углепластика

в статистические выводы. Это улучшило бы статистические данные об усталости. В самом деле, мы знаем, что конкретный образец (не сломанный до цикла испытаний) выдержал некоторое количество циклов (большое количество!) без разрушения. Возможно, он не сломался до испытательной базы из-за 1) комбинации индивидуальных положительных характеристик образца; или 2) из-за необоснованно низкой выбранной амплитуды напряжения σ_a . Обычно при испытаниях на усталость рекомендуется принимать амплитуду напряжения для первого уровня испытаний как $\sigma_a = 2^{-1} (0,75 \dots 0,85) \sigma_c^B$, где σ_c^B – среднее значение предельного напряжения сжатия, оцененного по 6 или 5 образцам. Можно констатировать, что при оценке σ_c^B весьма вероятна ошибка (см. табл. 1).

Проблема цензурированных образцов также существует и при обработке результатов испытаний металлов на усталость. В [15–17] рассматривается проблема цензурированных металлических сварных образцов. Авторы считают, что в их объектах существует неограниченный предел выносливости σ_∞ . Из-за этого их задача еще больше усложнилась. Они пытаются оценить предел выносливости σ_∞ на основе информации об образцах, не поврежденных до базы испытания. Для решения этой проблемы они применяют метод максимального правдоподобия (MLM) (метод оценки параметров популяции, например, коэффициентов регрессии) для оценки значений, для которых вероятность получения наблюдаемых данных максимальна.

Существует основная линейная связь между $\lg \sigma_a$ и $\lg N$ в форме уравнения Баскуина:

$$\lg N = \lg A - m \cdot \lg \sigma_a, \quad (1)$$

где m – показатель усталости (наклон), а $\lg A$ – точка пересечения. Здесь σ_a – амплитуда напряжения, обычно [МПа], а N – число циклов до отказа (или какой-либо другой критерий отказа в случае испытаний композитов).

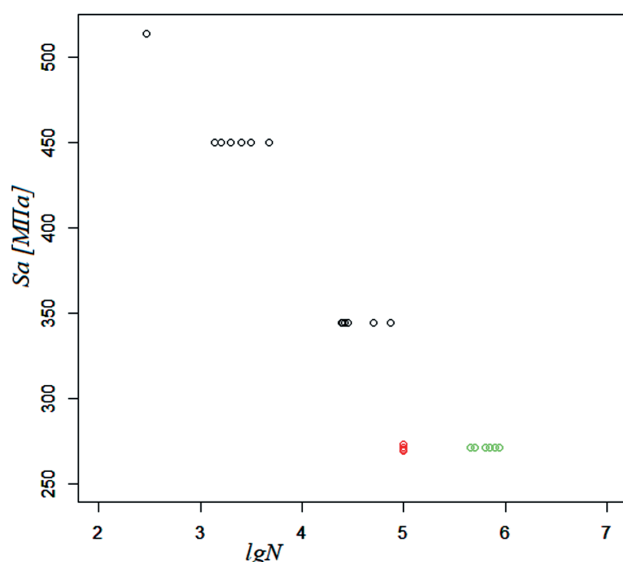


Рис. 4. Кривая усталости композита AS4-PW (по данным [4]) (черные и зеленые – отказы, красные точки для условно-цензурированных образцов – поясняется ниже).

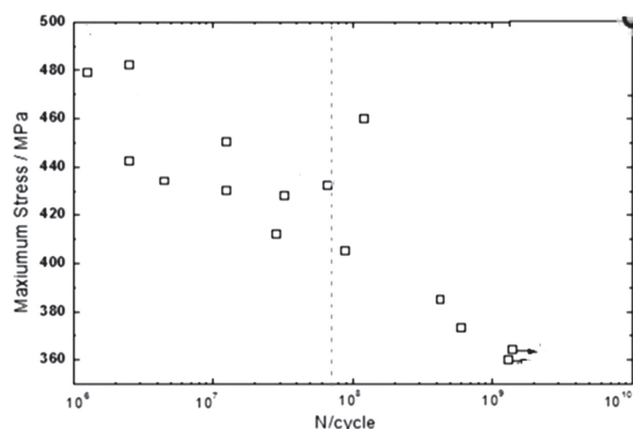


Рис. 5. Гигацикловая усталость композитного материала углеродное волокно / эпоксидная смола [19]

Наиболее подробное исследование усталостной долговечности композитов, используемых в конструкции самолета, можно найти в [4]. Следуя выводам более ранней работы [17], авторы [4] используют распределение Вейбулла не только для анализа разброса, но и для дополнения информации о сломанных во время циклического нагружения образцах информацией 1) о статических испытаниях; 2) о подвергнутых цензурированию экземплярах. Концепция Load-Enhancement (увеличение допускаемой максимальной нагрузки за счет учета информации о цензурированных образцах) широко используется в [4]. На рис. 4 показана кривая усталости из [4]. Информация на рис. 4 будет в дальнейшем использована при апробации разрабатываемого метода.

Исследования, направленные на прямое оценивание σ_∞ в композитах (например, по методу лестницы), отсутствуют [10]. К счастью, времена изменились, появились новые методы испытаний, и исследователи начали постигать область гигацикловой усталости, то есть $N > 10^8$ циклов [18]. Для ускорения испытаний были разработаны специальные ультразвуковые машины [19]. Этот новый в науке подход к испытаниям позволил (хотя и не без некоторых сомнений) пролить свет на то, существует ли σ_∞ в композитах.

На рис. 5 показаны данные [19] испытаний композитных материалов, армированных углеродным волокном (CFRP), которые широко используются в аэрокосмической области. Испытание проводилось при асимметрии $R = 0,2$ и при (внимание!) частоте испытаний 965 Гц. Для этого метода испытаний была разработана специальная система охлаждения. На рис. 5 можно увидеть, что кривая $\sigma_a - N$ снижается, даже когда количество циклов нагружения превышает 10^6 . На рис. 5 плато может быть замечено между 10^7 и 10^8 . Когда количество циклов больше 10^8 , усталостная прочность продолжает уменьшаться. Авторы приходят к выводу, что кривая усталости $\sigma_a - N$ не имеет неограниченного предела выносливости σ_∞ , аналогичного тому, что иногда наблюдается у металлов.

3. Метод

Метод разработан для улучшения качества линейной регрессии кривой усталости (1) за счет специального учета цензурированных. Допущения, лежащие в основе разрабатываемого метода: 1) не существует бесконечно-го предела выносливости для композитов; 2) уравнение (1) верно с принятием $\lg(\sigma_a)$ в качестве независимой переменной (фактора) и $\lg(N)$ как функции (зависимой переменной, нормально распределенной). Напомним, что исторически кривая усталости всегда изображается альтернативным способом: горизонтальная ось для $\lg(N)$ и вертикальная ось для $\lg(\sigma_a)$. Аналогично и в данной статье изображаются кривые усталости на графиках. При оценке коэффициентов регрессии инструментом методом наименьших квадратов справедливость восстанавливается, т.е.: $y \rightarrow \lg(N)$ и $x \rightarrow \lg(\sigma_a)$.

Примем, что имеется p пар значений σ_a, N , которые являются зарегистрированными отказами при испытаниях на усталость. Также у нас есть q цензурированных испытаний на нижнем уровне σ_a^* , для которого известно только количество испытанных образцов и их наработки до цензурирования.

В качестве предельного числа циклов до завершения испытаний принято условно $N_6 = 10^5$ (база испытаний на усталость). Этот тип ограничения данных называется однократным цензурированием справа. Данный тип цензурирования имеет место, когда субъект покидает исследование до того, как произошло событие, или когда исследование заканчивается до того, как событие произошло. В отличие от эксплуатационных испытаний на надежность во время службы, когда наработки до цензурирования различаются [20], при испытании на усталость все подвергнутые цензурированию элементы имеют одинаковый срок службы, а именно база испытаний N_6 .

Для восстановления утраченных данных о потенциальной долговечности неразрушенных q образцов, в соответствии с разрабатываемым методом предложено создавать выборки бутстрэпа [20, 21]. Каждая выборка бутстрэпа состоит из p элементов, выбранных в специальном случайном порядке. На основе исходной выборки представляется возможным оценить уравнение регрессии, вида (1) по методу наименьших квадратов. Выборки бутстрэпа состоят из того же количества пар $(\lg\sigma_a, \lg N)$ и только из тех же этих пар, но с другой вероятностью появления. Для формирования j -й бутстрэп-выборки выполняется случайный выбор

с возвращением. В табл. 2 показан пример выбора шести возможных комбинаций из 10 пар в исходной выборке для бутстрэп-выборок по правилам данного метода, в соответствии с которым случайный выбор осуществляется с возвращением [21]:

Индексы в табл. 2 относятся к информации о $\lg \sigma_a$ и $\lg N$. Для каждой j -й выборки строится уравнение регрессии. В этом примере у нас имеется 6 уравнений с уникальными коэффициентами $\lg A$ и m в уравнении (1). Используя эти 6 уравнений, мы можем получить 6 экстраполированных значений $N_i, i = 1 \dots 6$, для σ_a^* и все они будут разными. Считая эти значения актуальными, на следующем этапе мы включаем их в уточненную оценку кривой усталости и получаем улучшенные статистические параметры кривой усталости.

Дальнейшее объяснение метода дается на примере.

Данные для этого примера взяты из [4]. На рис. 4 некоторые точки показаны черным (отказы), $p = 13$, а некоторые красным (цензурирования, $q = 6$). Зеленые точки на рисунке показывают «как бы неизвестные отказы», при наработках $N > 10^5$. Они условно были признаны неизвестными, так как для целей апробации метода первоначально считалось, что испытания проводились до 10^5 циклов. На основании данных, касающихся разрушения, уравнение кривой усталости с помощью метода наименьших квадратов было оценено по 13 точкам (рис. 4, черные точки):

$$\lg N = 39,49 - 16,94 \lg \sigma_a. \quad (2)$$

После проведения имитационного моделирования бутстрэп мы получили 6 дополнительных точек долговечностей разрушения $N_i, i = 1 \dots 6$, при $\sigma_a^* = 112$ МПа.

4. Анализ результатов

На рис. 6 на графике нормальной вероятности (функция «qqplot» [22]) показаны два распределения случайной величины долговечности $\lg N$ для образцов, испытанных на уровне $\sigma_a^* = 112$ МПа. Одно распределение (показано синим) получено для реальных значений, полученных в [4]. Откроем секрет: в действительности эксперимент проводился до базы $N_6 = 10^6$ циклов, а группа точек, обозначенных красным на рис. 4, была принята цензурированными в целях апробации метода. Красным выделены те, которые получены описанным выше методом, а именно распределение моделирования бутстрэп. Как видно, распределения хорошо совпадают. Характеристики распределений, представленные в табл. 3, также демонстрируют хорошее соответствие.

Табл. 2. Пример выбора шести случайных индексов для выборок бутстрэпа на основе исходной выборки.

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	6	7	7	8	4	7	6	3	9	1
2	4	2	4	4	2	8	3	5	9	4
3	1	8	7	3	5	3	10	2	2	10
4	6	1	2	7	9	2	1	10	9	2
5	7	10	8	10	6	2	8	2	5	1
6	3	6	3	7	3	5	1	3	9	6

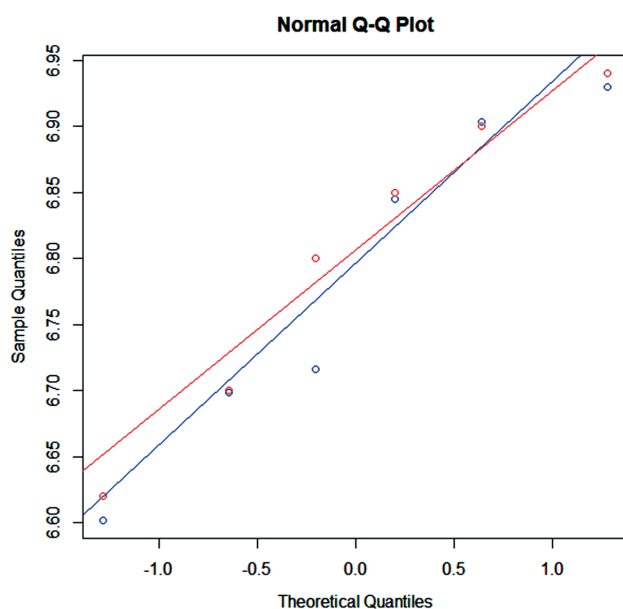


Рис. 6. Распределение случайной величины $\lg(N)$. синий – реальное распределение; красный – смоделированное для испытанных при амплитуде $\sigma_a = 112$ [МПа].

Табл. 3. Параметры экспериментальных и модельных выборок для случайного значения $\lg N$ (σ_a) для испытанных при амплитуде $\sigma_a = 112$ [МПа].

	Экспериментальная выборка	Смоделированная выборка
mean	6,78244	6,801667
RMS	0,129617	0,122052

После получения 6 дополнительных точек уравнение кривой усталости было обновлено:

$$\lg N = 39,23 - 15,82 \cdot \lg \sigma_a \quad (3)$$

Качество уравнения регрессии можно охарактеризовать коэффициентом детерминации R^2 :

$$R^2 = D(\hat{y}) / D(y) = 1 - D(e) / D(y) \quad (4)$$

где $D(y)$ – общая сумма квадратов; $D(e)$ – дисперсия прогнозов модели.

Исходя из (4) коэффициент детерминации для исходной кривой (2) равен: $R^2 = 0,909$, а для уточненной кривой (3) равен: $R^2 = 0,941$, поэтому можно констатировать, что улучшение было достигнуто.

5. Выводы

Обсуждались причины и способы анализа разброса прочностных испытаниях композитов, как при статическом нагружении, так и при усталости. На основе исследований, проведенных в последние годы, как при исследовании усталости металлов, так и при исследовании усталости композитов, разработан метод улучшения уравнения регрессии. Метод учитывает результаты цензурирования с помощью разработанной модели. Моделирование основано на статистическом бутстрэпе. На примере реального испытания, взятого из литературы, показана работоспособность предложенного метода.

Благодарность

Авторы выражают признательность сотрудникам Дмитровского Филиала МГТУ им. Баумана (руководитель группы к.т.н., доцент Таирова Л.П.) за помощь в проведении статических и усталостных испытаний образцов и в оформлении результатов.

Библиографический список

1. Березин А.В. и др. Применение композитных материалов углепластика в планерах самолетов гражданской авиации ПАО «Туполев» // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2016. № 3. С. 4-9.
2. Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Панков А.В. и др. Ранняя диагностика зон повреждения и вероятного разрушения композиционных материалов с использованием хрупких тензоиндикаторов и акустической эмиссии. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. Т. 82 № 1. С. 45-57.
3. Svirskiy Yu.A., Bautin A.A., Papis L., Gadolina I.V. Methods Of Modern Aircraft Structural Health Monitoring And Diagnostics of Technical State / Diagnostic Techniques in Industrial Engineering. Ed. M. Ram, J. P. Davim. Switzerland, 2017. P. 1-28.
4. 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.
5. Chulkov D.I. et al. A study of physical and mechanical characteristics of polymer compositematerials by ultrasonic technique // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2020. Vol. 934. Abs. 012031.
6. Chew S.L., Wang K., Chai S.P. et al. Elasticity, thermal stability and bioactivity of polyhedral oligomeric silsesquioxanes reinforced chitosan-based microfibers // Journal of Materials Science – Materials in Medicine. 2011. Vol. 22. Issue 6. P. 1365–1374.
7. Лисаченко Н.Г., Попов А.Г., Думанский А.М. Принятие решения при расчете статистически достоверных характеристик полимерных композиционных материалов на этапе анализа выбросов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 84. № 5. С. 74-80
8. Адлер Ю., Шпер В. 2019 Практическое руководство по статистическому контролю процессов. М.: Альпина Паблишер, 2019. 234 с.
9. Гадолина И.В., Радченко А.А., Хрущев М.М. и др. Использование данных электронной микроскопии для планирования усталостных испытаний углепластиков, деформирования и разрушения композиционных материалов и конструкций / Труды третьей международной конференции «Деформирование и разрушение композиционных материалов и конструкций», посвященной 80-летию ИМАШ РАН, 23–25 октября 2018 г. С. 22-24.
10. Стрекалов В.Б., Ломакина О.Г. Определение коэффициента безопасности деталей из композиционных материалов при одноосном нагружении // Машиноведение. 1982. № 6.

11. Каюмов Р.А. и др. 2020 Оценка остаточной прочности опорных композитных элементов конструкций // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2020. Vol. 934. Abs. 012042.

12. Стрижаус В.Ю. Некоторые закономерности усталостной прочности композитных элементов планера // Композиты и наноструктуры. 2016. Т. 8. № 4. С. 265–271.

13. Dumansky A.M., Hao L. Deformation Regularities Of Carbon Fiber Reinforced Plastic Under Time Variable Loading // IOP Conf. Ser.: Journal of Physics: Conf. Series. 1158 (2019). Abs. 022038.

14. Larionova A.A., Dudchenko A.A. Design and analysis of the strength and durability of metal composite assemblies of aircraft structures // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2020. Vol. 934. Abs. 012044.

15. Schneider C.R.A., Maddox S.J. Best Practice Guide On Statistical Analysis Of Fatigue Weld. Inst. Stat. Rep. 2003.

16. Pollak R., Palazotto A. A comparison of maximum likelihood models for fatigue strength characterization in materials exhibiting a fatigue limit // Probabilistic Engineering Mechanics. 24 (2009). P. 236–241.

17. Sendekyj G. P. Fitting Models to Composite Materials Fatigue Data // Test Methods and Design Allowable for Fibrous Composites, ASTM STP 734. West Conshohocken, PA: ASTM International, 1981. P. 245-260.

18. Paris P, Bathias C. Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice / Ultrasonic Fatigue Concepts. CRC Press; Boca Raton, FL, USA: 2004.

19. Wenbin Cui et al. Very High Cycle Fatigue (VHCF) Characteristics of Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) under Ultrasonic Loading. / Materials (Basel). 2020. Vol. 13(4). P. 908. DOI: 10.3390/ma13040908

20. Адлер Ю.П., Гадолина И.В., Ляндрес М.Н. Бустрэп-моделирование при построении доверительных интервалов по цензурированным образцам // Заводская лаборатория. 1987. Т. 53. № 10. С. 90–94.

21. B. Efron. Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife // The Annals of Statistics. 1979. Vol. 7. No. 1. P. 1–26.

22. R. Core Team R: язык и среда для статистических вычислений. R Фонд статистических вычислений, Вена, Австрия, 2020 г. URL: <https://www.R-project.org/>

Сведения об авторах

Ирина Викторовна Гадолина – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация, e-mail: gadolina@mail.ru

Игорь Сергеевич Майданов – инженер-технолог ОНПП «Технология», Обнинск, Российская Федерация, e-mail: i.caidanov@yandex.ru

Сергей Александрович Смелов – инженер ОНПП «Технология», Обнинск, Российская Федерация, e-mail: sergei_smelov@mail.ru

Юлия Викторовна Сулова – лаборант, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация, e-mail: demenika@bk.ru

Вклад авторов в статью

Гадолина И.В. — проведение эксперимента, обеспечение воспроизводимости усталостных испытаний;

Майданов И.С. — исследование литературных источников, постановка задачи;

Смелов С.А. — подготовка образцов для испытаний, контроль качества их изготовления, проверка геометрических параметров;

Сулова Ю.В. — обработка результатов, оформление статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.