Никамкин, М.Ш. Экспресс-оценка усталостной прочности композитных фланцев методом инфракрасной термографии / М.Ш. Никамкин, Д.Г. Соломонов. – DOI: 10.15593/perm.mech/2024.4.03 // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2024. – № 4. – С. 26–35.

Perm Polytech Style: Nihamkin M.S., Solomonov D.G. An Express Estimation of Fatigue Strength of Composite Flanges by Infrared Thermography. *PNRPU Mechanics Bulletin,* 2024, no. 4, pp. 26-35. DOI: 10.15593/perm.mech/2024.4.03

пермский политех

ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА
№ 4, 2024
PNRPU MECHANICS BULLETIN
https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2024.4.03
УДК 620.17

ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКА УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ КОМПОЗИТНЫХ ФЛАНЦЕВ МЕТОДОМ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕРМОГРАФИИ

М.Ш. Никамкин, Д.Г. Соломонов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 22 марта 2024 г.
Одобрена: 04 октября 2024 г.
Принята к публикации:
08 октября 2024 г.

Ключевые слова:

полимерные композиционные материалы, углепластик, фланцевое соединение, многоцикловая усталость, инфракрасная термография, предел выносливости, экспериментальная механика.

АННОТАЦИЯ

При проектировании изделий из полимерных композиционных материалов, работающих в условиях вибраций, приходится проводить специальные трудоемкие и длительные испытания, чтобы получить характеристики сопротивления разрушению вследствие многоцикловой усталости. В ответственных случаях для учета влияния конструктивных и технологических факторов проводят испытания натурных деталей или типовых элементов конструкций. Для ускоренной оценки усталостной прочности материалов активно развивается метод инфракрасной термографии, основанный на использовании эффекта саморазогрева, сопровождающего появление и накопление усталостных повреждений. Цель настоящей работы состояла в разработке методики экспресс-оценки предела выносливости фланцев из слоистого полимерного композиционного материала с использованием метода инфракрасной термографии. Объектом исследования является образец, вырезанный из натурной композитной оболочки с фланцем.

Разработана методика исследования, основанная на блочном циклическом нагружении образцов на электродинамическом вибростенде. В процессе нагружения поддерживается постоянной амплитуда деформаций образца в каждом блоке, регистрируется поле температур на его поверхности с помощью инфракрасной камеры. Для оценки предела выносливости были использованы два параметра, характеризующие саморазогрев образца в каждом блоке нагружения: скорость нагрева в начале блока и значение стабилизационной температуры в конце блока. Их определяли по термограммам и осредняли по наиболее нагруженной зоне образца. Скорость нагрева в начале блока и стабилизационная температура в конце блока резко возрастают, когда амплитуда деформации в блоке нагружения превышает предел выносливости. Полученные по обоим этим параметрам значения предела выносливости согласуются между собой и с результатами стандартных усталостных испытаний. Разработанная методика позволяет получить приближенную экспресс-оценку предела выносливости типовых элементов композитных конструкций в условиях многоцикловой усталости.

© **Нихамкин Михаил Шмерович** – д. т. н., проф., проф. кафедры авиационных двигателей,
e-mail: nikhamkin@mail.ru, ID: 0000-0002-3649-4482.
Соломонов Данил Глебович – асп., ассистент кафедры авиационных двигателей,
e-mail: solomonov1198@yandex.ru, ID:0000-0003-2577-3037.

Mikhail Sh. Nikhamkin – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Aircraft Engines,
e-mail: nikhamkin@mail.ru, ID: 0000-0002-3649-4482.
Danil G. Solomonov – Postgraduate student, Assistant of the Aviation Engines Department,
e-mail: solomonov1198@yandex.ru, ID: 0000-0003-2577-3037.

Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

AN EXPRESS ESTIMATION OF FATIGUE STRENGTH OF COMPOSITE FLANGES BY INFRARED THERMOGRAPHY

M.S. Nihamkin, D.G. Solomonov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 22 March 2024
Approved: 04 October 2024
Accepted for publication:
08 October 2024

Keywords:

polymer composite materials,
carbon fiber reinforced plastic,
flange connection, high-cycle fatigue,
infrared thermography, fatigue limit,
experimental mechanics.

ABSTRACT

When designing structures made of polymer composite materials operating under vibration conditions, special time-consuming and long-term tests have to be carried out in order to obtain characteristics of fracture resistance due to multicycle fatigue. Full-scale parts or typical structural elements are tested in critical cases to take into account the influence of structural and technological factors. The method of IR thermography based on the use of the self-heating effect accompanying the appearance and accumulation of fatigue damage is actively developing to an accelerated assessment of the fatigue strength of materials. The purpose of this work is to develop a technique for rapid estimation of the fatigue limit of flanges made of layered polymer composite materials using the IR thermography method. The study is focused on a sample cut from a full-scale composite shell with a flange. A research technique based on block cyclic loading of samples using an electrodynamic vibration stand was developed. The amplitude of deformations of the sample in each block is maintained constant during loading, the temperature field on its surface is recorded using an IR camera. Two parameters characterizing the self-heating of the sample in each loading block were used to assess the fatigue limit: the heating rate at the beginning of the block and the value of the stabilization temperature at the end of the block. They were determined using thermograms and averaged over the most loaded zone of the sample. The heating rate at the beginning of the block and the stabilization temperature at the end of the block increase sharply when the amplitude of deformation in the loading block exceeds the fatigue limit. The values of the fatigue limit obtained using both of these parameters are consistent with each other and with the results of standard fatigue tests. The developed technique makes it possible to obtain an approximate express estimation of the fatigue limit of typical elements of composite structures under conditions of high-cycle fatigue.

Введение

В последние годы все больше внимания уделяется изучению сопротивления усталостному разрушению полимерных композиционных материалов (ПКМ). Это обусловлено современной тенденцией применения этих материалов для изготовления высоконагруженных, подверженных вибрациям элементах конструкций, таких как детали и узлы ветрогенераторов, автомобилей и судов (см., например [1]). В наибольшей степени проблема усталостной прочности ПКМ актуальна для обеспечения надежности и безопасности в авиастроении, где постоянно увеличивается доля элементов из слоистых угле- и стеклопластиков [2–7].

Несмотря на то, что усталость композитов изучается во всем мире десятки лет, при проектировании ответственных изделий обычно приходится проводить специальные исследования и испытания, чтобы получить недостающие характеристики сопротивления усталостному разрушению. Причина в многообразии материалов наполнителя и матрицы, схем армирования, влиянии технологических и эксплуатационных факторов и, как следствие, многообразии механизмов разрушения [8–12]. У наиболее распространенных слоистых стекло- и углепластиков (GFRP и CFRP) выделяют несколько стадий усталостного разрушения: появление микротрещин в матрице, расслоения на границах матрицы и волокна, расслоения ламината, разрыв армирующих волокон [13].

Для определения характеристик сопротивления усталости композиционных материалов обычно проводят испытания образцов при циклическом нагружении с построением кривой усталости и определением ограниченного предела выносливости в соответствии со стандартами [14; 15]. Такой подход требует проведения длительных дорогостоящих испытаний большого количества образцов при различных уровнях нагрузки. Это ограничивает возможности оптимизации схем армирования, проверки конструктивных и технологических решений при проектировании изделий, затягивает сроки и стоимость разработки. Для приближенной экспресс-оценки предела выносливости металлов применяют ускоренные методы Про, Эномото, Локатти и др. [16–19]. Применительно к металлам был разработан подход к оценке характеристик сопротивления многоцикловой усталости без усталостных испытаний с использованием характеристик рассеяния энергии при циклических деформациях (см., например, [19; 20]).

Для ускоренного определения предела выносливости металлов в работах A.Risitano [21] и M.Luong [22] был предложен термографический метод (IRT-метод, Infra-Red Thermography), основанный на интенсификации саморазогрева образца в процессе нагружения при нагрузках выше предела выносливости вследствие появления и развития усталостных повреждений. Достоверность результатов авторы [21; 22] подтверждают сравнением с пределами выносливости, полученными путем стандартных усталостных испытаний. В качестве главного преимущества метода IRT перед стандартными усталостными испытаниями отмечается, что он позволяет получить предел выносливости за короткое время на небольшом количестве образцов.

Метод IRT с некоторыми вариациями успешно применялся не только к металлам [23–26], но и к различным полимерным композиционным материалам: слоистым термореактивным углепластикам [27], 3D-армированным углепластикам [28], стеклопластикам [29], термопластам [30; 31], гибридным композитам [32]. В работе [28] перечислены основные механизмы накопления усталостных повреждений, вызывающие рассеивание энергии и саморазогрев армированных композитов при циклическом нагружении: вязкоупругое деформирование материала матрицы, растрескивание матрицы, трение на поверхности раздела волокон и матрицы, переориентация волокон, разрушение волокон.

Особую роль в усталостной прочности слоистых угле- и стеклопластиков играют конструктивные и технологические факторы. Даже если доступны полученные из испытаний образцов характеристики усталостной прочности материала, их использование при проектировании конструкций из этого материала ограничено и часто требует дополнительных исследований [13; 18; 38]. Причина в том, что условия нагружения волокон и матрицы в образцах и конструктивных элементах могут существенно различаться, особенно в локальных зонах изгиба слоев ламината, утолщений, отверстий, соединений. Такие локальные зоны имеются, например, у подкрепляющих элементов оболочек, фланцев и т.д. Другая причина в том, что даже одинаковые технологии изготовления образцов и конструктивных элементов не гарантируют совпадение их механических характеристик. Поэтому в ответственных случаях для определения характеристик сопротивления усталостному разрушению приходится проводить испытания натурных деталей или типовых конструктивных элементов (см., например, [39–43]).

В настоящей работе рассматривается усталостная прочность элементов фланцевых соединений, которые широко применяются и часто являются наиболее нагруженными в конструкциях из ПКМ [44–46]. В работах [45; 46] исследовано напряженно-деформированное состояние фланцев композитных оболочек при статическом нагружении. В работе [47] исследованы закономерности разрушения и теплового состояния фланцев углепластиковых оболочек в условиях усталостных испытаний.

Цель настоящего исследования – разработка методики экспресс-оценки предела выносливости фланцев из слоистого композита с использованием метода IRT.

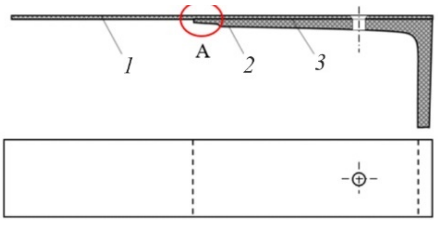


Рис. 1. Образец: *1* – оболочка; *2* – фланец; *3* – клеевой слой

Fig. 1. The sample: *1* – shell; *2* – flange; *3* – adhesive layer

Методика исследования

Объектом исследования в настоящей работе является типичная оболочка с Г-образным фланцем, который служит для ее соединения с соседними деталями [44]. Образец для исследований представляет собой вырезанный из натурной конструкции прямоугольный в плане фрагмент оболочки с фланцем (рис. 1). Оболочка изготовлена из слоистого углепластика на основе однонаправленной углеродной ткани и эпоксидного связующего, а фланец – на основе равнопрочной ткани; они склеены между собой. Размеры образца 150×40 мм, толщина оболочки около 2 мм.

В процессе эксплуатации конструкция подвергается воздействию вибрации, которая вызывает циклический изгиб фланца *2* (см. рис. 1). Проведенное в работе [47] исследование показало, что разрушение начинается с появления расслоения в зоне А между оболочкой *1* и фланцем *2* (рис. 1) и постепенно распространяется до угла фланца.

Методика экспресс-оценки предела выносливости фланцев опирается на использование IRT-метода. Этот метод в соответствии с описанием авторов [21; 22] предполагает блочное циклическое нагружение исследуемого образца с регистрацией температуры T на его поверхности. В каждом блоке температура образца вследствие саморазогрева увеличивается, достигая некоторого стабильного для данной нагрузки значения T_{stab}. В блоках с амплитудой нагрузки, превышающей предел выносливости, стабилизационное значение температуры и скорость возрастания температуры в начале блока резко увеличиваются. Этот эффект связан с активизацией тепловыделения при появлении усталостных повреждений. На рис. 2 проиллюстрирована эта процедура: нагрузка в каждом блоке характеризуется амплитудой деформации ε_a, нагрев образца – повышением температуры $\theta = T - T_0$ (T_0 – температура в начале блока), стабилизационным значением $\theta_{stab} = T_{stab} - T_0$ скоростью возрастания температуры в начале блока $\Delta\theta/\Delta N$. Эмпирическая зависимость θ_{stab} от амплитуды деформации в блоке ε_a аппроксимируется двумя прямыми, абсцисса точки пересечения которых ε_a^*, в соответствии с идеей метода, принимается за деформацию, соответствующую пределу выносливости (рис. 3, *а*). Аналогичная зависимость для параметра $\Delta\theta/\Delta N$ также позволяет определить предел выносливости. В работах авторов метода [21; 22] и работах других авторов (см., например, [27]) для некоторых материалов показано, что полученные обоими способами значения согласуются между собой и с пределом выносливости, полученным в результате стандартных испытаний образцов с построением кривой усталости.

Применение метода инфракрасной термографии для оценки предела выносливости элементов конструкций, в частности исследуемого композитного фланца, требует разработки и верификации конкретной методики. В настоящей работе было необходимо разработать спо-

соб нагружения, обосновать выбор количества и параметров блоков нагружения (амплитуда, количество циклов), метода и зоны регистрации температуры поверхности, сравнить эффективность выбора параметров нагрева (θ_{stab} или $\Delta\theta/\Delta N$), верифицировать методику по результатам стандартных усталостных испытаний. Перед испытаниями образцов с целью исключения исходных дефектов был проведен неразрушающий контроль ультразвуковым методом на фазированных решетках.

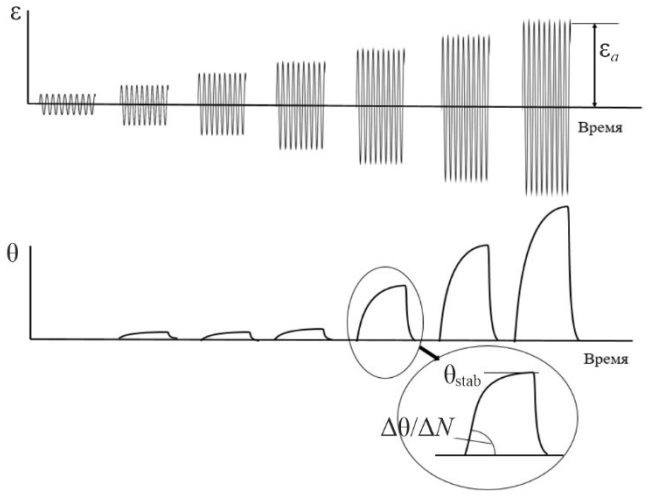


Рис. 2. Блочное нагружение образца в соответствии с методом инфракрасной термографии [21; 22]

Fig. 2. Block loading of the sample in accordance with the IR-thermography method [21; 22]

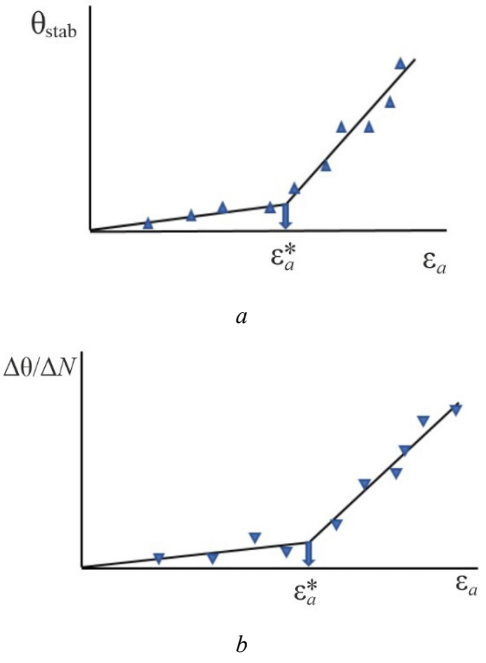


Рис. 3. Определение предела выносливости в соответствии с методом IRT [21; 22] по θ_{stab} (*a*) и $\Delta\theta/\Delta N$ (*b*) с ростом нагрузки в блоке

Fig. 3. Determination of the fatigue limit in accordance with the IRT method [21; 22] using θ_{stab} (*a*) and $\Delta\theta/\Delta N$ (*b*) with increasing load in the block

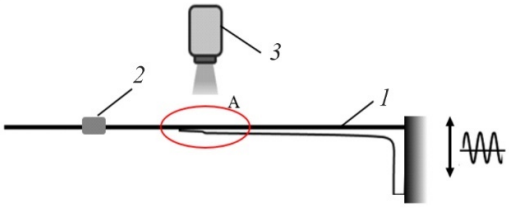


Рис. 4. Схема нагружения образца: *1* – образец; *2* – груз; *3* – инфракрасная камера

Fig. 4. Sample loading scheme: *1* – sample; *2* – cargo; *3* – infrared camera

Блочное циклическое нагружение образца проводили на электродинамическом вибростенде. Образец нагружается силой инерции закрепленного на нем груза при резонансных гармонических колебаниях по изгибной форме (рис. 4). Экспериментальная установка подробно описана в работе [47]. Деформация измеряется тензодатчиком, расположенным на наружной поверхности в зоне А, где начинается усталостное разрушение (см. рис. 4). Она изменяется во времени по гармоническому закону с амплитудой ε_a и резонансной частотой f. При такой схеме испытаний обеспечивается симметричный цикл нагружения образца (коэффициент асимметрии цикла $R = -1$).

Масса груза подбиралась таким образом, чтобы частота колебаний образца в резонансном режиме составляла около 80 Гц. Как показали предварительные эксперименты, при такой частоте колебаний температура саморазогрева образца лежит в пределах 10°. Такая температура не вызывает существенного изменения механических свойств углепластика, при этом она достаточна для инфракрасной термографии.

Регистрацию поля температур на поверхности образца в процессе испытаний проводили с помощью прецизионной инфракрасной камеры NEC TH 9100 WR ProNew с погрешностью ±2 % от показания (см. рис. 4). Для повышения точности измерения температуры перед началом экспериментов поверхность образца покрывали черной матовой краской.

В каждом блоке нагружения задавали и поддерживали постоянной амплитуду деформаций ε_a. Количество циклов в блоке на каждом уровне нагрузки устанавливалось индивидуально по достижению стабильной температуры на поверхности образца. При частоте колебаний 80 Гц продолжительность блоков составила 30–50 тысяч циклов. Поле температур на поверхности образца регистрировали в процессе нагружения через каждые 5 тысяч циклов. Каждый новый блок нагружения начинался только после полного остывания образца, перерыв после каждого блока нагружения составлял 30–40 мин.

Для определения предела выносливости были использованы два параметра нагрева образца в каждом цикле нагружения $\Delta\theta/\Delta N$ и θ_{stab}. Их определяли по термограммам и осредняли по прямоугольной области размером 40×40 мм на поверхности образца в наиболее

нагруженной зоне А. Далее получали зависимости $\Delta\theta/\Delta N$ и θ_{stab} от амплитуды деформации в блоке.

Для определения предела выносливости по зависимости $\theta_{stab}(\varepsilon_a)$ ее аппроксимировали двумя прямыми, коэффициенты линейной аппроксимации каждой из них определяли методом наименьших квадратов, качество аппроксимации оценивали по коэффициенту детерминации R^2 [48]. Значение ε_a*, соответствующее пределу выносливости, определяли как абсциссу точки пересечения правой и левой прямых – ветвей аппроксимации.

В зоне пересечения ветвей аппроксимации возникает неопределенность отнесения экспериментальных точек к правой или левой ветвям. Эту неопределенность разрешали подбором по максимальному значению суммарного для обеих ветвей коэффициента детерминации R^2_Σ.

Аналогичным образом ε_a* определяли по эмпирической зависимости $\Delta\theta/\Delta N(\varepsilon_a)$.

Результаты и их обсуждение

В соответствии с описанной выше методикой были исследованы два образца (см. рис. 1). Блочное нагружение образца включало в себя 16 блоков, их параметры приведены в табл. 1. На рис. 5 показаны в качестве примера термограммы образца №1, зарегистрированные в конце блоков нагружения № 3, 8, 15. Пунктиром выделена область А, по которой осредняли $\Delta\theta/\Delta N$ и θ_{stab}. На термограммах видно возрастание и локализацию нагрева в области А с увеличением нагрузки в блоке. Повышение температуры поверхности образца в угловой зоне фланца связано, возможно, с менее интенсивным, чем в области А, теплоотводом при колебаниях образца.

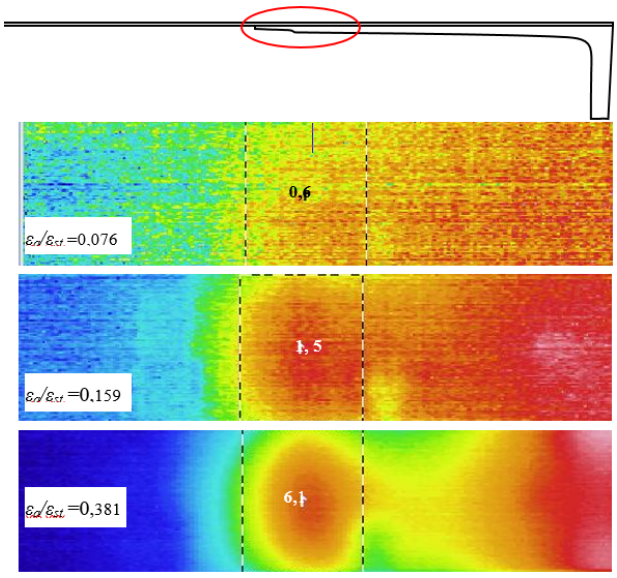


Рис. 5. Термограммы поверхности образца №1, зарегистрированные в конце блоков № 3, 8, 15

Fig. 5. Thermograms of Sample 1 surface registered at the end of blocks No. 3, 8, 15

На рис. 6 показаны зависимости среднего по области А повышения температуры θ образца № 1 с увеличением числа циклов усталостной наработки для различных уровней амплитуды деформации ε_a в блоке. Значение ε_a отнесено к значению деформации при статическом разрушении материала ε_{st}. На рис. 6 также показан доверительный интервал для измеренной температуры. Температура θ в каждом блоке стабилизируется за 30–50 тысяч циклов. С возрастанием нагрузки в блоке значение θ_{stab} увеличивается. Значение $\Delta\theta/\Delta N$ в начале блока, которое вычисляется для всех блоков по первым ΔN=5000 циклов, также увеличивается с возрастанием нагрузки в блоке. Определенные по термограммам значения θ_{stab} и $\Delta\theta/\Delta N$ для всех реализованных блоков нагружения приведены в табл. 1.

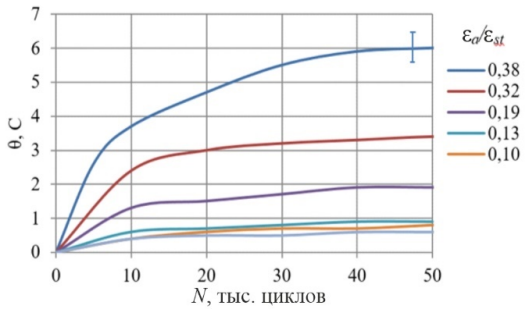


Рис. 6. Повышение средней по области А температуры θ образца №1при различных значениях амплитуды деформации в блоке $\varepsilon_a/\varepsilon_{st}$

Fig. 6. An increase of the average temperature θ of Sample 1 in the A region at different values of the deformation amplitude in the block $\varepsilon_a/\varepsilon_{st}$

Таблица 1

Характеристики нагрева поверхности образца №1 в реализованных блоках нагружения

Table 1

Characteristics of Sample 1 surface heating in realized loading blocks

№ блока	$\varepsilon_a/\varepsilon_{st}$	N, циклов	θ_{stab}, град	$\Delta\theta/\Delta N*10^{-3}$, град/цикл
1	0,0509	100 000	0,6	0,02
2	0,0636	70 000	0,4	0,02
3	0,0763	60 000	0,6	0,04
4	0,0890	60 000	0,8	0,03
5	0,1017	80 000	0,9	0,04
6	0,1271	50 000	0,9	0,06
7	0,1398	40 000	0,9	0,06
8	0,1589	60 000	1,5	0,07
9	0,1907	60 000	1,9	0,13
10	0,2225	60 000	2,1	0,15
11	0,2543	70 000	3,2	0,21
12	0,2860	60 000	3,1	0,21
13	0,3178	60 000	3,4	0,24
14	0,3496	100 000	5,6	0,31
15	0,3814	70 000	6,1	0,37
16	0,4132	30 000	6,4	0,5

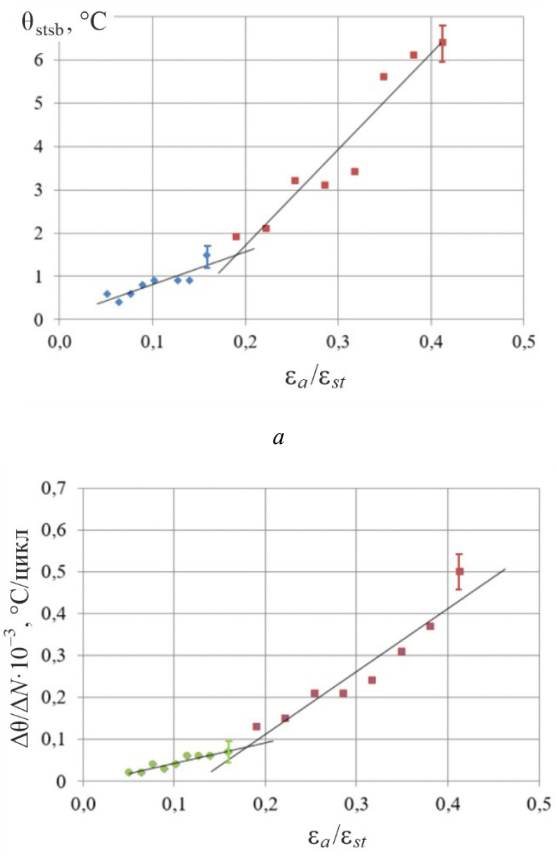


Рис. 7. Изменение осредненной по зоне А стабилизационной температуры θ_{stab} (*a*) и $\Delta\theta/\Delta N$ (*b*) для образца №1с ростом нагрузки в блоке

Fig. 7. Change in the stabilization temperature averaged over zone A θ_{stab} (*a*) and $\Delta\theta/\Delta N$ (*b*) for Sample 1with increasing load in the block

На рис. 7, *a*, приведена зависимость стабилизационной температуры, осредненной по зоне А, от амплитуды деформации ε_a в блоке нагружения; показаны также доверительные интервалы для измеренных температур. Эта зависимость аппроксимируется двумя прямыми. Как описано выше, точка их пересечения соответствует пределу выносливости. В таблице для образца №1 приведены значения коэффициентов линейной аппроксимации для левой и правой ветвей аппроксимации

$$\theta_{stab} = k_1\varepsilon_a / \varepsilon_{st} + b_1 \quad \text{и} \quad \theta_{stab} = k_2\varepsilon_a / \varepsilon_{st} + b_2, \qquad (1)$$

а также суммарное значение R^2_Σ для обеих ветвей.

Соответствующие значения амплитуды деформации ε_a* приведены в табл. 3. Аналогичные данные для скорости нарастания температуры в блоке нагружения $\Delta\theta/\Delta N$ приведены на рис. 7, *b*, и табл. 2 и 3.

В табл. 3 приведены средние по двум испытанным образцам значения предела выносливости ε_a*. Расхождение между исследованными образцами по коэффициенту вариации лежит в пределах 6 %. Расхождение между значениями ε_a*, полученными по θ_{stab} и по $\Delta\theta/\Delta N$, составило 6 %.

Для верификации полученных результатов были проведены стандартные усталостные испытания 18 образцов из той же партии (см. рис. 1) на той же экспериментальной установке с той же схемой нагружения на базе 10^7 циклов. Построена кривая усталости и определен предел выносливости. Полученные по разработанной ускоренной методике значения ε_a* согласуются с результатами стандартных усталостных испытаний. Предел выносливости ε_a*, определенный по $\Delta\theta/\Delta N$, выше полученного из стандартных испытаний на 8,1 %, а определенный по θ_{stab} – на 14,9 %. Такое расхождение сопоставимо с погрешностью определения предела выносливости, полученным стандартным методом.

В случае использования в качестве параметра нагрева величины $\Delta\theta/\Delta N$ рассеяние экспериментальных значений вокруг аппроксимации по суммарному коэффициенту детерминации R^2_Σ несколько меньше, чем в случае использования стабилизационной температуры θ_{stab}, что свидетельствует о более высокой точности аппроксимации и определения предела выносливости.

Таблица 2

Коэффициенты аппроксимации зависимостей $\theta_{stab}(\varepsilon_a)$ и $\Delta\theta/\Delta N(\varepsilon_a)$ для образца №1

Table 2

Approximation Coefficients of dependencies $\theta_{stab}(\varepsilon_a)$ and $\Delta\theta/\Delta N(\varepsilon_a)$ for Sample 1

$\theta_{stab}(\varepsilon_a)$					$\Delta\theta/\Delta N(\varepsilon_a)$				
k_1	b_1	k_2	b_2	R^2_Σ	k_1	b_1	k_2	b_2	R^2_Σ
7,5432	0,0638	22,1	-2,6976	1,689	0,4933	-0,0061	1,5058	-0,1896	1,799

Таблица 3

Полученные значения предела выносливости

Table 3

The obtained values of the fatigue limit

Параметр	ε_a*/ε_{st} среднее значение	Коэффициент вариации, %	Расхождение со стандартными усталостными испытаниями
θ_{stab}	0,174	5,7	8,1
$\Delta\theta/\Delta N$	0,185	3,8	14,9
Стандартные усталостные испытания	0,161	–	–

Алгоритм определения предела выносливости элементов конструкции из ПКМ по разработанной методике можно описать следующим образом. На первом этапе проводятся предварительные испытания с целью анализа теплового состояния исследуемого образца на разных этапах усталостного разрушения, выявляются характерные зоны саморазогрева. Следующий этап исследования представляет собой непосредственно испытания с блочным циклическим нагружением. Для каждого уровня нагрузки определяются стабилизационная температура и скорость роста температуры в начале блока нагружения. На заключительном этапе проводит-

ся обработка полученных результатов и определяется предел выносливости.

Разработанная методика может быть рекомендована для экспериментальной экспресс-оценки усталостной прочности элементов композитных конструкций на этапе прочностной доводки при выборе вариантов конструктивных и технологических решений.

Заключение

В рамках метода инфракрасной термографии разработана методика экспресс-оценки предела выносливости типовых элементов композитных конструкций на примере фланцев из слоистого углепластика. Методика предполагает блочное циклическое нагружение образца, вырезанного из натурной детали, с регистрацией температуры в выделенной зоне на его поверхности.

Сравнивались два варианта методики: с использованием стабилизационного значения повышения температуры в конце блока нагружения θ_{stab} и с использованием скорости повышения температуры в начале блока $\Delta\theta/\Delta N$. Получены экспериментальные оценки предела выносливости по обоим вариантам методики.

Расхождение полученного IRT методом предела выносливости между исследованными образцами лежит в пределах 6 % (по коэффициенту вариации). Расхождение между значениями ε_a*, полученными по θ_{stab} и по $\Delta\theta/\Delta N$, также составило 6 %.

Полученные значения предела выносливости согласуются с результатами проведенных ранее стандартных усталостных испытаний образцов этой же партии. Расхождение лежит в пределах 15 %. Такое расхождение сопоставимо с погрешностью определения предела выносливости, полученным стандартным методом.

Трудоемкость и длительность испытаний методом инфракрасной термографии значительно меньше, чем стандартных усталостных испытаний; значительно меньше количество испытываемых образцов (в пределе – только один). Это особенно актуально в случаях, когда требуется быстро оценить предел выносливости элементов конструкции на стадии прототипа.

Библиографический список

1. Келли, А. Инженерный триумф углеволокон. Композиты и наноструктуры / А. Келли. – 2009. – № 1. – С. 38–49.
2. Каблов, Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 / Е.Н. Каблов // Крылья Родины. – 2019. – С. 54–58.
3. Scientific Advancements in Composite Materials for Aircraft Applications: A Review / B. Parveez, M.I. Kittur, I.A. Badruddin, S. Kamangar, M. Hussien, M.A. Umarfarooq // Polymers. – 2022. – Vol. 14. – P. 1–12.
4. Колобков, А.С. Полимерные композиционные материалы для различных конструкций авиационной техники (обзор) / А.С. Колобков // Труды ВИАМ. – № 6-7 (89). – 2020. – С. 38–44.
5. Каримбаев, Т.Д. Рабочие лопатки вентиляторов из углепластика для перспективных двигателей. Достижения и проблемы / Т.Д. Каримбаев, А.А. Луппов, Д.В. Афанасьев // Двигатель. – 2011. – № 6 (78). – С. 2–7.
6. Путилина, П.М. Полимерные композиционные материалы на основе углеродных и стеклянных волокон для изготовления деталей беспилотных летательных аппаратов и перспективы их развития / П.М. Путилина, К.Е. Куцевич, А.Ю. Исаев // Труды ВИАМ. – 2023. – № 8 (126). – С. 8.
7. Стрижиус, В.Е. Оценка усталостной долговечности слоистых композитов с использованием нормализованных кривых усталости / В.Е. Стрижиус // Материаловедение. Энергетика. – Т. 26, № 3. – 2020. – С. 20–32.
8. The fatigue of carbon fibre reinforced plastics – a review / P. Alam, D. Mamalis, C. Robert, C. Floreani, C.M.Ó. Brádaigh // Composites Part B. – 2019. – P. 555–579.
9. Sevenois, R.D.B. Fatigue damage modeling techniques for textile composites: review and comparison with unidirectional composite modeling techniques / R.D.B. Sevenois, W. Van Paepegem // Applied Mechanics Reviews. – 2015. – Vol. 67, iss. 2. – 020802.
10. Talreja, R. Damage Mechanics and Fatigue Life Assesment of Composite Materials / R. Talreja // International Journal of Damage Mechanics. – 1999. – Vol. 8. – P. 339–354.
11. Adrdte, S. Matrix cracking in laminated composites: a review / S. Adrdte // Composites Engineering. – 1991. – Vol. 1, no. 6. – P. 337–353.
12. Degrieck, J. Fatigue Damage Modelling of Fibre-Reinforced Composite Materials: Review / J. Degrieck, W. Van Paepegem // Applied Mechanics Reviews. – 2001. – Vol. 54, iss.4. – P. 279–300.
13. Каримбаев, Т.Д. Оценка усталостной долговечности изделий из композиционных материалов / Т.Д. Каримбаев // Авиационные двигатели. – 2020. – № 4(9). – С. 75–93.
14. ГОСТ 57143-2016. Композиты полимерные. Метод испытания на усталость при циклическом растяжении. – М.: Стандартинформ, 2016. – 16 с.
15. ASTM Standard D 3479/D 3479M–96 (2007). Test Method for Tension-Tension Fatigue of Polymer Matrix Composite Materials // ASTM International. – 2007. – 6 p.
16. РД 50-686-89. Методические указания. Надежность в технике. Методы ускоренных испытаний на усталость для оценки выносливости. – М.: Госстандарт, 1990. – 19 с.
17. Степнов, М.Н. Прогнозирование характеристик сопротивления усталости материалов и элементов конструкций / М.Н. Степнов, А.В. Зинин. – М.: Инновационное машиностроение, 2016. – 391с.
18. Коллинз, Д.А. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение / Д.А. Коллинз. – М.: Мир, 1984. – 624 с.
19. Трощенко, В.Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов / В.Т. Трощенко, Л.А. Сосновский. – Киев: Накова думка, 1987. – Т. 1. – 505 с.
20. Трощенко, В.Т. Об энергетических критериях усталостного разрушения / В.Т. Трощенко // Заводская лаборатория. – 1967. – № 9. – С. 1126–1128.
21. La Rosa, G. Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components / G. La Rosa, A. Risitano // International Journal of Fatigue. – 2000. – Vol. 22. – P. 65–73.

22. Luong, M.PP. Infrared thermographic scanning of fatigue in metals / M.PP. Luong // Nuclear Engineering and Design. – 1995. – Vol. 158. – P. 363–376.

23. Cura, F. A new iteration method for the thermographic determination of fatigue limit in steels / F. Cura, G. Curti, R. Sesana // International Journal of Fatigue. – 2005. – Vol. 27. – P. 453–459.

24. Куриленко, Г.А. Термографический метод определения индивидуальных пределов выносливости деталей приборов / Г.А. Куриленко, М.Б. Устюгов // Гео-Сибирь. – 2007. – Т. 4, № 1. – С. 242–246.

25. Разработка метода оценки предела выносливости материала по данным инфракрасной термографии / А.И. Терехина, А.Ю. Федорова, М.В. Банников, О.А. Плехов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2012. – № 4. – С. 115–127.

26. Colombo, C. Thermographic applications for the rapid estimation of fatigue limit / C. Colombo, L. Vergani // Procedia Structural Integrity. – 2019. – Vol. 24. – P. 658–666.

27. Investigation of self-heating and life prediction in CFRP laminates under cyclic shear loading condition based on the infrared thermographic data / J. Huang, C. Garnier, M.-L. Pastor, X.J. Gong // International Journal of Fatigue. – 2019. – Vol. 120. – P. 87–95.

28. Montesano, J. Use of infrared thermography to investigate the fatigue behavior of a carbon fiber reinforced polymer composite / J. Montesano, Z. Fawaz, H. Bougherara // Composite Structures. – 2013. – Vol. 97. – P. 76–83.

29. Effect of delamination on the fatigue life of GFRP: A thermographic and numerical study / C. Colombo, T. Bhujangrao, F. Libonati, L. Vergani // Composite Structures. – 2019. – Vol. 218. – P. 152–161.

30. Investigation of self-heating and damage progression in woven carbon fibre composite materials, following the fibres direction, under static and cyclic loading / L. Muller, J.-M. Roche, A. Hurmane, F.-H. Leroy, C. Peyrac, L. Gornet // Journal of Composite Materials. – 2021. – Vol. 55(26). – P. 3909–3924.

31. Li, A. Enabling rapid fatigue life prediction of short carbon fiber reinforced polyetherether-ketone using a novel energy dissipation–based model / A. Li, J. Huang, C. Zhang // Composite structures. – 2021. – Vol. 272. – P. 1–36.

32. Sharba, M.J. Fatigue strength prediction of hybrid composites via IR thermography and energy loss methods / M.J. Sharba // Journal of Industrial Textile. – 2022. – Vol. 51. – P. 4184–4199.

33. Toubal, L. Damage evolution and infrared thermography in woven composite laminates under fatigue loading / L. Toubal, M. Karama, B. Lorrain // International Journal of Fatigue. – 2006. – Vol. 28. – P. 1867–1872

34. On the fatigue response of a bonded repaired aerospace composite using thermography / S.A. Grammatikos, E.Z. Kordatos, T.E. Matikas, A.S. Paipetis // Composite Structures. – 2018. – Vol. 188. – P. 461–469.

35. Full-field monitoring methods for damage analysis on aeronautical CFRP specimens under fatigue loads / R. Nobile, F.W. Panella, A. Pirinu, A. Saponaro // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2022. – Vol. 1214. – P. 1–12.

36. Fan, J. Quantitative thermography for fatigue damage assessment and life prediction of welded components / J. Fan, Y. Zhao // Mechanics of Materials. – 2022. – P. 1–11.

37. Rapid fatigue life prediction of butt joint using energy dissipation / W. Wei, Y. Sun, M. Chen, X. Zhao, Y. Tang, L. Zou, X. Yang // International Journal of Mechanical Sciences. – 2023. – Vol. 245. – P. 1–12.

38. The fatigue of carbon fibre reinforced plastics – a review / P. Alam, D. Mamalis, C. Robert, C. Floreani, C.M.Ó. Brádaigh // Composites Part B 166. – 2019. – P. 555–579.

39. Wang, Y. A Finite Element and Experimental Analysis of Composite T-Joints Used in Wind Turbine Blades / Y. Wang, C. Soutis // Applied Composite Materials. – 2018. – Vol. 25. – P. 953–964.

40. Quasi-UD glass fibre NCF composites for wind energy applications: a review of requirements and existing fatigue data for blade materials / K. Vallons, G. Adolphs, PP. Lucas, S.V. Lomov, I. Verpoest // Mechanics & 26Industry. – 2013. – Vol. 14. – P. 175–189.

41. Fatigue behavior of composite girders with concrete-filled tubular flanges and corrugated webs–experimental study / Z.Y. Wang, X.F. Zhou, Z.F. Liu, Q.Y. Wang // Engineering Structures. – 2021. – Vol. 241. – P. 1–12.

42. Расчетно-экспериментальное исследование влияния виброакустических нагрузок на прочность композитного соединения / С.В. Дубинский, Ф.С. Севастьянов, А.Ю. Голубев, С.Л. Денисов, В.М. Костенко, И.А. Жаренов // Акустический журнал. – 2019. – Т. 65, № 4. – С. 460–470.

43. Dávila, C.G. Fatigue life and damage tolerance of post-buckled composite stiffened structures with indentation damage / C.G. Dávila, C. Bisagni // Journal of Composite Materials. – 2018. – Vol. 52:7. – P. 931–943.

44. Соломонов, Д.Г. Выбор конструктивно-подобных элементов для испытаний на усталость авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов / Д.Г. Соломонов, М.Ш. Нихамкин, А.В. Торопицина // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2022. – № 69. – С. 62–70.

45. Testing and analysis of a highly loaded composite flange / N.E. Jansson, A. Lutz, M. Wolfahrt, A. Sjunnesson // ECCM13: 13th European Conference on Composite Materials. – Stockholm. – 2008. – 8 p.

46. Аношкин, А.Н. Прогнозирование несущей способности композитных фланцев корпусных деталей авиадвигателей / А.Н. Аношкин, А.А. Ташкинов. – Пермь: Пермский гос. техн. ун-т, 1998. – 101 с.

47. Закономерности усталостного разрушения типового композитного фланца / Д.Г. Соломонов, Н.А. Саженков, И.П. Конев, А.В. Торопицина, М.Ш. Нихамкин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. – Механика. – 2023. – № 3. – С. 145–153.

48. Макарова, Н.В. Статистика в Excel / Н.В. Макарова, В.Я. Трофимец. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 368 с.

References

1. Kelly A. Inzhenernyy triumf uglevolokon [The Engineering Triumph of Carbon fibre] // Kompozity i nanostruktury. – 2009. – №1. – p.38-49.

2. Kablov E.N. VIAM: materialy novogo pokoleniya dlya PD-14 [VIAM: new generation materials for PD-14] // Krylya Rodiny. – 2019. – №7–8. – p.54-58.

3. Parveez, B.; Kittur, M.I.; Badruddin, I.A.; Kamangar, S.; Hussien, M.; Umarfarooq, M.A. // Scientific Advancements in Composite Materials for Aircraft Applications: A Review. – Polymers. – 2022. – V. 14. – p.1-12

4. Kolobkov A.S.Polimernyye kompozitsionn·yye materialy dlya razlichnykh konstruktsiy aviatsionnoy tekhniki (obzor) [Pol-

ymer composite materials for various designs of aviation equipment (review)]. Trudy VIAM, №6-7 (89), 2020, p.38-44. doi: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-38-44

5. Karimbayev T.D., Luppov A.A., Afanasyev D.V. Rabochiye lopatki ventilyatorov iz ugleplastika dlya perspektivnykh dvigateley. Dostizheniya i problemy [Fan blades made of carbon fiber for advanced engines. Achievements and challenges]. Dvigatel, 2011, №6 (78), ppp. 2-7

6. Putilina P.M., Kucevich K.E., Isaev A.Yu. Polimernye kompozicionnye materialy na osnove uglerodnyh i steklyannyh volokon dlya izgotovleniya detalej bespilotnyh letatel'nyh apparatov i perspektivy ih razvitiya // Trudy VIAM. – 2023. – № 8 (126). – 8 S.

7. Strizhius V.E. Ocenka ustalostnoj dolgovechnosti sloistyh kompozitov s ispol'zovaniem normalizovannyh krivyh ustalosti // Materialovedenie. Energetika. – T. 26. – №3. – 2020. – S. 20-32.

8. Alam P, Mamalis D, Robert C., Floreani C., Brádaigh C. M. Ó. The fatigue of carbon fibre reinforced plastics – a review// Composites Part B. – 2019. – P. 555-579.

9. Sevenois R. D. B., Van Paepegem W. Fatigue damage modeling techniques for textile composites: review and comparison with unidirectional composite modeling techniques // Applied Mechanics Reviews. –2015. – 67. – Iss.2. 020802.

10. Talreja R. Damage Mechanics and Fatigue Life Assesment of Composite Materials // International Journal of Damage Mechanics. – 1999. – V.8. – p.339-354

11. Adrdte S. Matrix cracking in laminated composites: a review // Composites Engineering. –1991. – Vol. 1. – No. 6. – P. 337-353.

12. Degrieck J., Van Paepegem W. Fatigue Damage Modelling of Fibre-Reinforced Composite Materials: Review// Applied Mechanics Reviews, 54. – 2001. – Iss.4. – PP.279-300.

13. Karimbayev T.D. Otsenka ustalostnoy dolgovechnosti izdeliy iz kompozitsionnykh materialov [Estimation of fatigue life of products from composite materials]. Aviatsionnyye dvigateli, no. 4 (9), 2020, p. 75-93.

14. GOST 57143-2016 Kompozity polimernyye. Metod ispytaniya na ustalost pri tsiklicheskom rastyazhenii [Polymer composites. Cyclic Tensile Fatigue Test Method]. Moscow, Standartinform, 2016, 16 p.

15. ASTM Standard D 3479/D 3479M–96 (2007). Test Method for Tension-Tension Fatigue of Polymer Matrix Composite Materials// ASTM International. – 2007. – 6pp.

16. RD 50-686-89 Metodicheskie ukazaniya. Nadezhnost' v tekhnike. Metody uskorennyh ispytanij na ustalost' dlya ocenki vynoslivosti. // M. Goostandart. – 1990. – 19 s.

17. Stepnov M. N., Zinin A.V. Prognozirovanie harakteristik soprotivleniya ustalosti materialov i elementov konstrukcij // M. «Innovacionnoe mashinostroenie». – 2016. – 391s.

18. Kollinz D.A. Povrezhdenie materialov v konstrukciyah. Analiz, predskazanie, predotvrashchenie. // M. Mir. – 1984. – 624 s.

19. Troshchenko V.T., Sosnovskij L.A. Soprotivlenie ustalosti metallov i splavov. // Kiev. «Nakova dumka». – 1987. – T.1. – 505 s.

20. Troshchenko V.T. Ob energeticheskih kriteriyah ustalostnogo razrusheniya // Zavodskaya laboratoriya. – 1967. – № 9. – S. 1126-1128.

21. La Rosa G., Risitano A. Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components// International Journal of Fatigue. – 2000. – V. 22. – p. 65–73.

22. Luong M.PP. Infrared thermographic scanning of fatigue in metals // Nuclear Engineering and Design. – 1995. – 158. – p.363-376.

23. Cura F., Curti G., Sesana R. A new iteration method for the thermographic determination of fatigue limit in steels // International Journal of Fatigue. – 2005. – 27. – pp. 453–459.

24. Kurilenko G.A., Ustyugov M.B. Termograficheskij metod opredeleniya individual'nyh predelov vynoslivosti detalej priborov // Geo-Sibir'. – 2007. – T. 4. – № 1. – S. 242-246

25. Terekhina A.I., Fedorova A.Yu., Bannikov M.V., Plekhov O.A. Razrabotka metoda ocenki predela vynoslivosti materiala po dannym infrakrasnoj termografii //Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika. – 2012. – № 4. – S. 115-127.

26. Colombo C., Vergani L. Thermographic applications for the rapid estimation of fatigue limit // Procedia Structural Integrity. – 2019. – V.24. – P. 658–666.

27. Huang J., Garnier C., Pastor M.-L., Gong X.J. Investigation of self-heating and life prediction in CFRP laminates under cyclic shear loading condition based on the infrared thermographic data // International Journal of Fatigue. – 2019. – 120. – pp. 87–95.

28. Montesano J., Fawaz Z., Bougherara H. Use of infrared thermography to investigate the fatigue behavior of a carbon fiber reinforced polymer composite // Composite Structures. – 2013. – 97. – p. 76–83

29. Colombo C., Bhujangrao T., Libonati F., Vergani L. Effect of delamination on the fatigue life of GFRP: A thermographic and numerical study // Composite Structures. – 2019. – V.218. – P.152-161.

30. Muller L., Roche J.-M., Hurmane A., LeroyF.-H., Peyrac C., Gornet L. Investigation of self-heating and damage progression in woven carbon fibre composite materials, following the fibres direction, under static and cyclic loading // Journal of Composite Materials. – 2021. – Vol. 55(26). – p. 3909–3924.

31. Li A., Huang J., Zhang C. Enabling rapid fatigue life prediction of short carbon fiber reinforced polyetherether-ketone using a novel energy dissipation–based model // Composite structures. – 2021. – V. 272. – p.1-36

32. Sharba M.J. Fatigue strength prediction of hybrid composites via IR thermography and energy loss methods // Journal of Industrial Textile. – 2022. – Vol. 51. – P.4184–4199.

33. Toubal L., Karama M., Lorrain B. Damage evolution and infrared thermography in woven composite laminates under fatigue loading//International Journal of Fatigue. – 2006. – 28. – P. 1867–1872

34. Grammatikos S. A.,. Kordatos E.Z, Matikas T.E., Paipetis A.S. On the fatigue response of a bonded repaired aerospace composite using thermography//Composite Structures. – 2018. – V.188. – P. 461-469.

35. Nobile R, Panella F W, Pirinu A , Saponaro A. Full-field monitoring methods for damage analysis on aeronautical CFRP specimens under fatigue loads // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2022. – V. 1214. – p. 1-12

36. Fan J., Zhao Y. Quantitative thermography for fatigue damage assessment and life prediction of welded components // Mechanics of Materials. – 2022. – p.1-11

37. Wei W., Sun Y., Chen M., Zhao X., Tang Y., Zou L., Yang X. Rapid fatigue life prediction of butt joint using energy dissipation // International Journal of Mechanical Sciences. – 2023. – V. 245. – p.1-12

38. Alam P, Mamalis D, Robert C., Floreani C., Brádaigh C.M.Ó. The fatigue of carbon fibre reinforced plastics – a review// Composites Part B 166. – 2019. – PP.555-579.

39. Wang Y., Soutis C. A Finite Element and Experimental Analysis of Composite T-Joints Used in Wind Turbine Blades // Applied Composite Materials. – 2018. – V.25. – P.953–964

40. Vallons K., Adolphs G., Lucas PP., Lomov S.V., Verpoest I. Quasi-UD glass fibre NCF composites for wind energy applications: a review of requirements and existing fatigue data for blade materials//Mechanics & 26Industry. – 2013. – 14. – pp.175–189.

41. Wang Z.Y., Zhou X.F., Liu Z.F., Wang Q.Y. Fatigue behavior of composite girders with concrete-filled tubular flanges

and corrugated webs—experimental study // Engineering Structures. – 2021. – V. 241. – p.1-12

42. Dubinskij S. V., Sevast'yanov F. S., Golubev A. Yu., Denisov S. L., Kostenko V. M., Zharenov I.A. Raschetno-eksperimental'noe issledovanie vliyaniya vibroakusticheskih nagruzok na prochnost' kompozitnogo soedineniya //Akusticheskij zhurnal. – 2019. – T. 65. – № 4. – s. 460–470

43. Dávila C.G., Bisagni C. Fatigue life and damage tolerance of postbuckled composite stiffened structures with indentation damage//Journal of Composite Materials. – 2018. – 52:7. – p. 931-943.

44. Solomonov D.G., Nikhamkin M.Sh., Toropicina A.V. Vybor konstruktivno-podobnyh elementov dlya ispytanij na ustalost' aviacionnyh konstrukcij iz polimernyh kompozicionnyh materialov [A choose of structurally-similar samples for fatigue testing of polymer composite aviation structures] // Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika. – 2022. – № 69. – C. 62–70.

45. Jansson N.E., Lutz A., Wolfahrt M., Sjunnesson A. Testing and analysis of a highly loaded composite flange // ECCM13: 13th European Conference on Composite Materials. – Stockholm. – 2008. – 8p.

46. Anoshkin A.N., Tashkinov A.A. Prognozirovanie nesushchej sposobnosti kompozitnyh flancev korpusnyh detalej aviadvigatelej. // Permskij gos. tekhn. un-t. Perm'. – 1998. – 101 s.

47. Solomonov D.G., Sazhenkov N.A., Konev I.P., Toropicina A.V., Nihamkin M.Sh. Zakonomernosti ustalostnogo razrusheniya tipovogo kompozitnogo flanca // Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. – Mekhanika. – 2023. – № 3. – S. 145–153.

48. Makarova N.V., Trofimec V.Ya. Statistika v Excel. // M.: Finansy i statistika. – 2002. – 368 s.

Финансирование. Исследование было выполнено при частичном финансировании Российским научным фондом (грант № 21-79-30041).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.

Financing. The study was partially funded by the Russian Science Foundation (Grant No. 21-79-30041).

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

The contribution of the authors is equivalent.