Никамкин, М.Ш. Концентрация напряжений в пластине из слоистого углепластика со свободным отверстием в условиях многоцикловой усталости / М.Ш. Никамкин, Д.Г. Соломонов, Е.М. Струнгарь. – DOI: 10.15593/ perm.mech/2025.6.05 // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2025. – № 6. – С. 47–58.

Perm Polytech Style: Stress concentration in a laminated carbon fiber plate with a free hole under conditions of multi-cycle fatigue. *PNRPU Mechanics Bulletin,* 2025, no. 6, pp. 47–58. DOI: 10.15593/perm.mech/2025.6.05

пермский политех

ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА
№ 6, 2025
PNRPU MECHANICS BULLETIN
https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2025.6.05
УДК 620.17

КОНЦЕНТРАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ПЛАСТИНЕ ИЗ СЛОИСТОГО УГЛЕПЛАСТИКА СО СВОБОДНЫМ ОТВЕРСТИЕМ В УСЛОВИЯХ МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

М.Ш. Никамкин, Д.Г. Соломонов, Е.М. Струнгарь

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 27 августа 2025 г.
Одобрена: 13 ноября 2025 г.
Принята к публикации:
10 декабря 2025 г.

Ключевые слова:

полимерные композиционные материалы, углепластик, многоцикловая усталость, инфракрасная термография, предел выносливости, чувствительность к концентрации напряжений, экспериментальная механика

АННОТАЦИЯ

Отверстия, неизбежные в конструкциях из полимерных композиционных материалов, становятся концентраторами напряжений, снижающими прочность конструкции, особенно в условиях вибраций, когда прочность определяется сопротивлением усталостному разрушению.

Для исследования влияния концентрации напряжений на сопротивление многоцикловой усталости слоистого углепластика в настоящей работе применяется метод инфракрасной термографии.

Цель работы состояла в разработке ускоренной методики определения предела выносливости образцов с отверстиями в рамках термографического метода, а также получении экспериментальных данных об усталостной прочности и чувствительности к концентрации напряжений таких элементов в условиях многоцикловой усталости. Объектом исследования является изготовленный по технологии RTM углепластика на основе равнопрочной ткани из углеволокна с эпоксидным связующим.

Разработка методики состояла в выборе оборудования, количества, амплитуды и продолжительности блоков, зоны и параметров регистрации температуры, методики обработки результатов.

Проведен анализ полей температуры саморазогрева образцов в процессе циклического нагружения. Методом цифровой корреляции изображений получены поля деформаций на поверхности образца вблизи отверстия. Установлено, что наиболее активный саморазогрев происходит в Х-образной зоне вблизи отверстия, где максимальны сдвиговые деформации. Это свидетельствует о интенсивном накоплении усталостных повреждений в этой зоне в рассматриваемом углепластике.

Получены экспериментальны данные о пределах выносливости образцов с отверстием при одноосном растяжении с коэффициентом асимметрии цикла 0,1. Определены эффективные коэффициенты концентрации напряжений в исследованных образцах и коэффициент чувствительности к концентрации напряжений. Установлено, что для исследованного углепластика характерна низкая чувствительность к концентрации напряжений, наличие отверстия незначительно снижает предел выносливости образцов из углепластика с рассмотренной схемой армирования.

Разработанная методика ускоренной оценки влияния концентрации напряжений на сопротивление многоцикловой усталости углепластика методом инфракрасной термографии позволяет многократно снизить количество испытываемых образцов и продолжительность испытаний по сравнению с традиционными усталостными испытаниями с получением кривой усталости.

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)

© **Михаил Шмерович Нихамкин** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Авиационные двигатели», e-mail: nikhamkin@mail.ru,ORCID: 0000-0002-3649-4482.
Данил Глебович Соломонов – аспирант, ассистент кафедры «Авиационные двигатели», e-mail: solomonov1198@yandex.ru, ORCID:0000-0003-2577-3037.
Струнгарь Елена Михайловна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Экспериментальная механика и конструкционное материаловедение», e-mail: cem.spaskova@mail.ru, ORCID: 0000-0002-2246-8638.

Mikhail Sh. Nikhamkin – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Aircraft Engines, e-mail: nikhamkin@mail.ru, ORCID: 0000-0002-3649-4482.
Danil G. Solomonov – Postgraduate student, Assistant of the Aviation Engines Department, e-mail: solomonov1198@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-2577-3037.
Elena M. Strungar – Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Experimental Mechanics and Structural Materials Science, e-mail: cem.spaskova@mail.ru, ORCID: 0000-0002-2246-8638.

STRESS CONCENTRATION IN A LAMINATED CARBON FIBER PLATE WITH A FREE HOLE UNDER CONDITIONS OF MULTI-CYCLE FATIGUE

M.S. Nihamkin, D.G. Solomonov, E.M. Strungar

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 27 August 2025
Approved: 10 October 2025
Accepted for publication:
10 December 2025

Keywords:

polymer composite materials, carbon fiber, high-cycle fatigue, infrared thermography, fatigue limit, stress concentration sensitivity, experimental mechanics

ABSTRACT

Holes are inevitable in structures made of polymer composite materials. They become stress concentrators that reduce the strength of the structure. This is especially true in conditions of vibration, where strength is determined by resistance to fatigue failure.

The infrared thermography method is used to study the effect of stress concentration on the multi-cycle fatigue resistance of layered carbon fiber.

The purpose of the work was to develop an accelerated method for determining the endurance limit of samples with holes using the thermographic method and to obtain experimental data on fatigue strength and sensitivity to stress concentration under conditions of multi-cycle fatigue. The object of research is a carbon fiber composite made using RTM technology based on an equal-strength carbon fiber fabric with an epoxy binder.

The development of the methodology involved selecting the equipment, the number, amplitude, and duration of the blocks, the temperature recording zone and parameters, and the methodology for processing the results.

The analysis of the temperature fields of self-heating of the samples in the process of cyclic loading was carried out. The fields of deformations on the surface of the sample near the hole were obtained by the method of digital image correlation. It was found that the most active self-heating occurs in the X-shaped zone near the hole, where the shear deformations are maximum. This indicates the intensive accumulation of fatigue damage in this zone in the carbon fiber composite under consideration.

Experimental data on the fatigue limits of samples with a hole under uniaxial tension with a cycle asymmetry factor of 0.1 have been obtained. The effective stress concentration factors in the studied samples and the sensitivity factor to stress concentration have been determined. It has been established that the studied carbon fiber has a low sensitivity to stress concentration, and the presence of a hole slightly reduces the endurance limit of carbon fiber samples with the considered reinforcement scheme.

The developed method for accelerated assessment of the effect of stress concentration on the resistance of carbon fiber composite to high-cycle fatigue using infrared thermography allows for a significant reduction in the number of samples tested and the duration of tests compared to traditional fatigue tests that produce a fatigue curve.

Введение

Оценка сопротивления разрушению от многоцикловой усталости конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ) с концентраторами напряжений – актуальное направление научных исследований, имеющее важное прикладное значение. Пластины из ПКМ с отверстиями – типичные элементы авиационной и космической техники, судостроения, медицинских и спортивных изделий. Отверстия, неизбежные в реальных конструкциях, становятся концентраторами напряжений, снижающими прочность конструкции, особенно в условиях вибраций, когда прочность определяется сопротивлением усталостному разрушению [1; 2].

Теоретический коэффициент концентрации напряжений α_σ определяют в предположении линейной упругости материала как отношение максимального локального напряжения вблизи концентратора к номинальному, рассчитанному без учета эффекта концентрации по площади нетто-сечения, или, в другом варианте, к напряжению, рассчитанному при отсутствии концентратора по площади брутто сечения [3; 4]. Для случая одноосного растяжения бесконечной пластины с круговым отверстием известно классическое решение $\alpha_\sigma = 3$ [4].

Для пластин конечной ширины из слоистых угле- и стеклопластиков с отверстием в работах [5; 6] методом конечных элементов получены значения α_σ в широком диапазоне от 3 до 7 в зависимости от схемы армирования и ширины пластины. Известно, что в случае металлов α_σ занижает оценку прочности, как при статическом, так и при усталостном нагружении (см., например, [3; 4]).

Для оценки статической прочности при наличии концентраторов используется коэффициент снижения прочности – отношение разрушающего усилия для гладкого образца и образца с концентратором [7]**.** Усталостная прочность при наличии концентраторов в инженерной практике характеризуется эффективным коэффициентом концентрации K_σ, представляющим собой отношение определяемых экспериментально пределов выносливости образца без концентратора и при наличии концентратора. И коэффициент снижения прочности при статическом нагружении и эффективный коэффициент концентрации при усталости обычно ниже теоретического α_σ. Разница характеризуется коэффициентом чувствительности к концентрации напряжений [3; 4]. В ПКМ, как и в металлах, снижение чувствительности к концентрации напряжений обусловлено появлением локальных зон неупругого деформирования вблизи концентратора [8; 9].

Сведения о чувствительности ПКМ к концентрации напряжений в литературе неоднозначны вследствие влияния многочисленных факторов, включая материал волокон связующего, геометрию и размеры образца и концентратора, схему армирования.

В работе [10] для образцов из слоистого однонаправленного углепластика с просверленным отверстием и схемами армирования $[0/90]_{2s}$ и $[90/0]_{2s}$ при циклическом растяжении с коэффициентом асимметрии $R = 0{,}1$ получены эффективные коэффициенты концентрации в диапазоне 1,2–1,5. Подобные оценки чувствительности к концентратору – круглому отверстию для перекрестно-слоистого углепластика с тремя разными схемами укладок слоев приведены в работе [11]. Полученные в этой работе кривые усталости с для образцов с отверстием и без него сближаются с увеличением числа циклов нагружения, то есть чувствительность к концентратору исчезает по мере усталостной наработки. Этот эффект авторы объясняют расслоением ламината и снижением напряжений в зоне концентрации.

В работе [12] исследованы поля деформаций на поверхности образцов из слоистого квазиизотропного стеклопластика с отверстием при циклическом нагружении. Использован метод цифровой корреляции изображений. Установлено, что с усталостной наработкой вблизи отверстия растет концентрация деформаций. Это происходит вследствие накопления усталостных повреждений и местного снижения жесткости.

Описанные в [13] результаты усталостных испытаний образцов из термопластичного композита с армированием короткими стекловолокнами показали высокую чувствительность такого материала к концентрации напряжений. При теоретическом коэффициенте концентрации напряжений $\alpha_\sigma = 2{,}5$ эффективный коэффициент концентрации оказался близким к 2, что соответствует коэффициенту чувствительности к концентрации напряжений $q = 0{,}67$.

В работах [14; 15] исследована прочность при циклическом растяжении образцов с отверстием из углепластиков с трехмерным армированием. Исследованные материалы оказались практически не чувствительны к концентрации напряжений.

Низкая чувствительность к концентрации напряжений обнаружена авторами работы [8] при статических испытаниях образцов из гибридных слоистых композитов на основе стеклянных и углеродных волокон. Снижение эффективного коэффициента концентрации удалось получить благодаря комбинации жестких и податливых компонент с поведением при растяжении, сходным с идеально упругопластическим.

В работе [16] приведены результаты экспериментального исследования усталостной прочности образцов с отверстием из эпоксидных композитов, усиленных углеродными нанотрубками. Коэффициент чувствительности к концентрации напряжений увеличивается с увеличением предела прочности нанокомпозита.

В работах [9; 17; 18] на примере образцов из слоистого стеклотекстолита с концентраторами напряжений получены экспериментальные данные, показывающие наличие масштабного эффекта чувствительности к концентрации напряжений. Он выражается в слабой чувствительности к концентраторам малого размера и объясняется структурной неоднородностью материала.

Для снижения концентрации напряжений в ПКМ в работах [19; 20] предложено использовать криволинейную укладку армирующих волокон. В частности, вместо сверления отверстий в ПКМ предлагается применять технологию раздвижения волокон в процессе изготовления детали. На примере образцов из стеклопластика с отверстием при статическом нагружении показано, что подобные схемы армирования позволяют практически исключить чувствительность к концентрации напряжений вблизи отверстий.

Таким образом, влияние концентрации напряжений на усталостную прочность композитов необходимо экспериментально оценивать каждый раз при выборе материала, схемы укладки ламината, технологии. Проведение для этого традиционных усталостных испытаний – трудоемкий, дорогой и длительный процесс. В этой связи представляется актуальной разработка ускоренных методов оценки характеристик сопротивления усталостному разрушению в ПКМ с концентраторами напряжений.

Метод ускоренного определения характеристик усталости материалов, основанный на анализе саморазогрева образцов (IRT – метод, Infra-Red Thermography) при усталостном разрушении, был предложен в работах [21; 22] в конце 1990-х гг. С тех пор он успешно применялся для определения предела выносливости металлов и композитов (см. обзоры [23; 24]. Преимуществом метода IRT для определения характеристик усталости является многократное снижение стоимости и длительности испытаний: необходимо существенно меньшее количество образцов и меньшее число циклов нагружения, чем при стандартных усталостных испытаниях. С энергетической точки зрения накопление усталостных повреждений – процесс, сопровождающийся диссипацией энергии, изменением теплового состояния материала. Теоретическое обоснование термографического метода изложено в широком круге работ (см., например [22; 25–28]).

Термографический анализ применялся для исследования эволюции теплового состояния в процессах накопления усталостных повреждений образцов концентраторами напряжений из стали [29], стеклопластиков [30], углепластиков [31; 32], сэндвич-панелей [33]. В работе [32], для углепластиковой пластины с отверстием термографическим методом получена оценка предела выносливости, которая согласуется с полученным традиционными усталостными испытаниями. Метод IRT использован в работе [34] для исследования развития усталостных повреждений и определения предела выносливости при циклическом растяжении образцов с отверстием из однонаправленного стеклопластика, усиленного вблизи отверстия углеродными нанотрубками.

В работе [35] IRT методом исследована концентрация напряжений при усталости в стеклопластиковых образцах с различными типами концентраторов: сквозным отверстием, *U*- и *V*-образными надрезами. Образцы испытывали на циклическое растяжение. Получены эффективные коэффициенты концентрации, которые свидетельствуют о низкой чувствительности исследованного стеклопластика к концентрации напряжений при усталости. Для гладких стеклопластиковых образцов IRT методом определен предел выносливости, который оказался несколько ниже, чем условный предел выносливости, полученный традиционным методом на базе 10 млн. ц. Причину авторы видят в том, что термографический метод определяет предел выносливости при неограниченном сроке службы.

Таким образом, инфракрасная термография представляется эффективным методом исследования процессов усталостного разрушения и ускоренного определения характеристик сопротивления многоцикловой усталости полимерных композиционных материалов и конструктивных элементов из них. В то же время, метод требует накопления опыта исследований, разработки техники экспериментов и обработки результатов применительно к различным материалам и типовым конструктивным элементам из ПКМ.

Цель настоящей работы состоит разработке ускоренной методики определения предела выносливости конструктивных элементов из слоистого углепластика со свободными отверстиями в рамках термографического метода, а также получении экспериментальных данных об усталостной прочности и чувствительности к концентрации напряжений таких элементов в условиях многоцикловой усталости.

Исследуемые образцы

Методика исследования предусматривает проведение испытаний на многоцикловую усталость в двух типов образцов из углепластика. Первый – тип А – стандартный образец в виде прямоугольной пластины шириной $b = 25$ мм по ГОСТ Р 57143-2016 с накладками для крепления в захватах испытательной машины (рисунок 1а). Второй тип образцов – прямоугольная пластина шириной b=36 мм с открытым отверстием (рис. 1, *b*) по ГОСТ Р 57569-2017. Образцы второго типа В1 и В2 имели два варианта отверстий: В1 диаметром $d = 4$ мм и В2 – $d = 8$ мм. Все образцы были вырезаны из одной пластины толщиной $h = 2{,}2$мм, изготовленной по технологии RTM

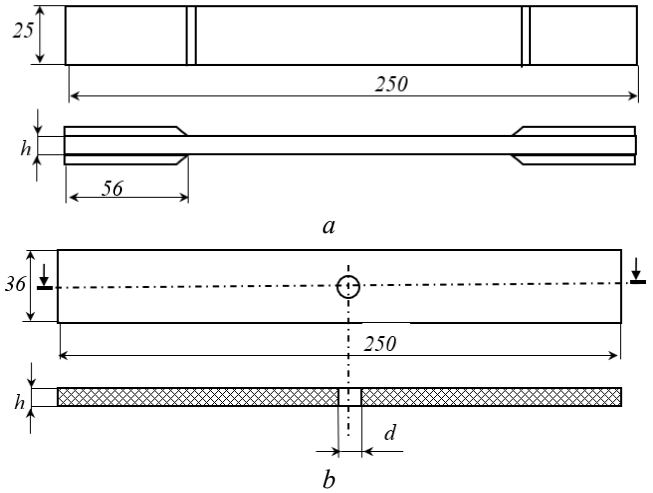


Рис. 1. Исследуемые образцы: образец типа А без отверстия (*a*) и тип В1, В2 с отверстиями (*b*)
Fig. 1. Samples under study: type A sample without a hole (*a*) and type B1, B2 with holes (*b*)

(технология на основе пропитки армирующего материала эпоксидным связующим) из углепластика на основе равнопрочной ткани из углеволокна волокна Zhongfu SYT45S-3K (Китай). Толщина слоя 0,55 мм, количество слоев – 4. Схема укладки [0/90/0/90].

Исследование напряженно-деформированного состояния образца из ПКМ с отверстием при квазистатическом нагружении

На первом этапе было проведено исследование напряженно-деформированного состояния образцов с отверстием типа В1 при квазистатическом нагружении.

Исследование проводились методом цифровой корреляции изображений (digital image correlation, DIC) в Центре экспериментальной механики Пермского национального исследовательского политехнического университета с использованием уникальной научной установки (УНУ) «Комплекс испытательного и диагностического оборудования для исследования свойств конструкционных и функциональных материалов при сложных термомеханических воздействиях» (http://ckp-rf.ru/usu/501309/) на базе электромеханической испытательной машины Instron 5882. Нагружение образцов поводились по схеме одноосного растяжения в соответствии с ГОСТ 33375-2015.

В соответствии с методом цифровой корреляции изображений на лицевую поверхность образца наносили контрастное мелкодисперсное покрытие. Перемещения и деформации на поверхности образца регистрировались с помощью бесконтактной оптической видеосистемы VIC-3D и метода DIC. Видеозапись осуществлялась с помощью камеры Prosilica GE4900 50 мм с разрешением 16 МП. Максимальная скорость записи составляла 1 кадр в 3 с. В качестве критерия корреляции для математической оценки соответствия цифровых изображений использовался критерий нормированной суммы квадратов разностей. В ходе постобработки, выполняемой с помощью системы VIC-3D, компоненты деформации рассчитывались с использованием тензора конечных

деформаций в лагранжевом представлении. Дополнительный программный модуль «виртуальный экстензометр» (VE) (рис. 2, *a*) позволял рассчитывать продольную деформацию ε_y, поперечную деформацию ε_x, сдвиговую деформацию ε_{xy} и строить кривую напряжение-деформация. Размеры подмножества и шага выбирались в соответствии с условиями съемки и составляли 21 (подмножество) и 3 (шаг) пикселей. Более подробно методика описана в работе [36].

Полученная диаграмма деформирования для двух образцов с отверстием диаметром 4 мм представлена рис. 2, *b*. Она линейна практически до самого разрушения при напряжении 500 МПа.

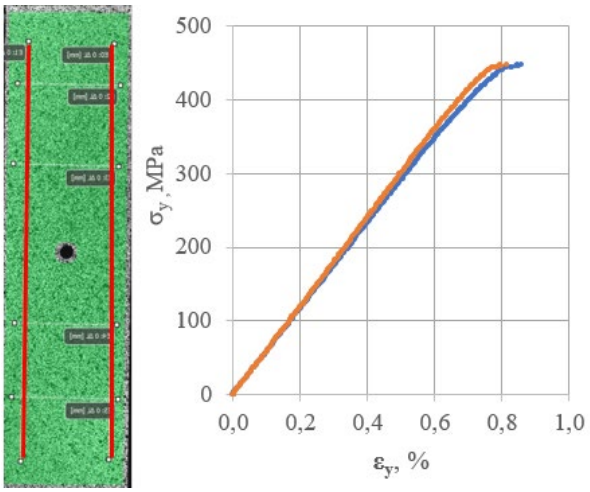


Рис. 2. Положение виртуального экстензометра (красные линии) на поверхности образца (*a*) и диаграмма деформирования для двух образцов с отверстием диаметром 4 мм (*b*)

Fig. 2. Position of the virtual extensometer (red lines) on the surface of the sample (*a*) and deformation diagram for two samples with a 4 mm diameter hole (*b*)

Поля деформаций на поверхности образца показаны на рис. 3. В зоне концентрации напряжений вблизи отверстия нормальные деформации ε_y максимальны на границе отверстия в поперечном сечении, проходящем через его центр. Они на порядок больше деформаций ε_x. Коэффициент концентрации деформаций ε_y составляет K_ε=1,51:

$$K_\varepsilon = \varepsilon_{ymax}/\varepsilon_{y0}, \quad (1)$$

где ε_{ymax} - максимальное значение ε_y , ε_{y0} – значение ε_y на удалении от отверстия.

Следует отметить, что фактическое значение K_ε несколько выше, что связано с особенностями метода DIC, который позволяют определить значения деформаций только на удалении порядка 1мм от границы отверстия.

Зоны концентрации сдвиговых деформаций ε_{xy} вблизи отверстия и имеют *X*-образную форму (см. рис. 3). Их максимальные значения приблизительно в три раза меньше максимальных деформаций ε_y.

В рамках исследования концентрации напряжений был проведен расчетный анализ напряженно-деформированного состояния образца в упругой статической постановке методом конечных элементов (КЭ). Форма и размеры КЭ-модели соответствовали форме и размерам образца с отверстием диаметром 4 мм. Использовалась модель многослойного материала, которая учитывала количество слоев армирующей ткани и углы их укладки. Материал каждого слоя считался упругим ортотропным, характеристики упругости слоя $E_1 = E_2 = 63$ GPa, G12 = 4,5GPa, $\nu_{12} = 0{,}05$. КЭ модель включает в себя 39000 элементов. Граничные условия соответствовали закреплению образца в испытательной машине; нагружение – равномерное растяжение вдоль оси образца (ось *y*).

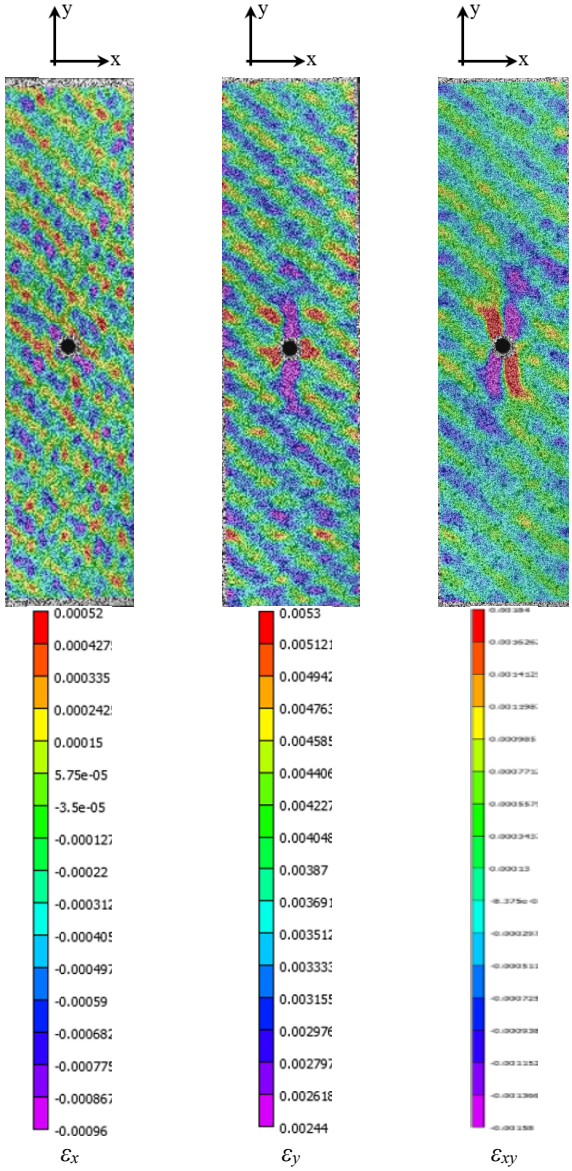


Рис. 3. Поля деформаций на поверхности образца

Fig. 3. Fields of deformations on the sample surface

На рис. 4 приведено расчетное поле нормальных напряжений. Видно, что на краю отверстия имеет место значительный градиент напряжений. Теоретический коэффициент концентрации напряжений, определенный как отношение максимального напряжения σ_y к напряжению в пластине без отверстия составил α_σ=5,37:

$$\alpha_\sigma = \sigma_{ymax}/\sigma_{y0}, \quad (2)$$

где σ_{ymax} – максимальное значение σ_y, σ_{y0} – значение σ_y в пластине без отверстия.

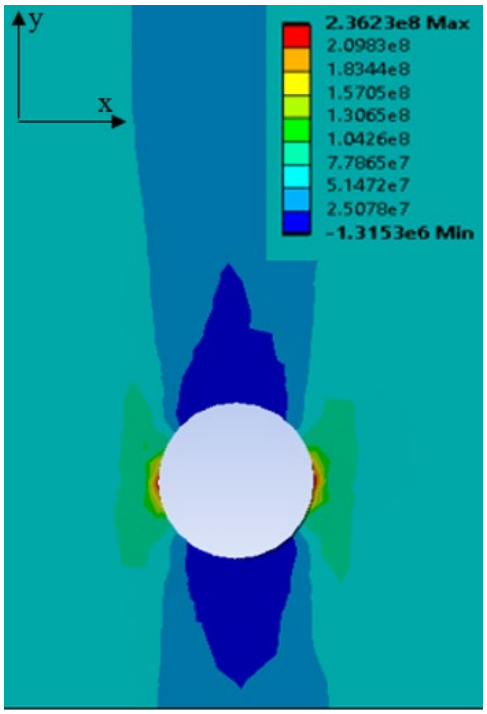


Рис. 4. Поле напряжений σ_y (расчет МКЭ)
Fig. 4. Stress field σy (FE calculation)

Полученный методом DIC коэффициент концентрации деформаций K_ε=1,51 значительно меньше, что свидетельствует о низкой чувствительности материала к концентрации напряжений при статическом нагружении.

Методика испытаний по определению предела выносливости

Исследование проводись в Лаборатории динамической прочности авиационных двигателей Пермского национального исследовательского политехнического университета. Разработка методики исследования состояла в выборе оборудования и схемы нагружения образцов, зоны на поверхности образца для регистрации температуры с учетом неравномерности поля температур, обусловленной концентрацией напряжений. Кроме того, в рамках разработки методики выбираются параметр нагрева, используемый для определения предела выносливости, а также количество и параметры блоков нагружения (амплитуда, количество циклов в блоке). В работе [38] разработана основанная на подходе IRT методика ускоренной оценки предела выносливости ПКМ применительно к образцам без концентраторов напряжений. Предложены элементы методики обработки результатов, позволяющие повысить точность получаемых данных. Применение IRT метода для определения характеристик сопротивления многоцикловой усталости типовых конструктивных элементов из ПКМ при неоднородных полях деформаций рассмотрено в работах [39–42].

Исследование проводили на экспериментальной установке на базе испытательной машины электрорезонансного типа RUMUL Testronic-50 (рис. 5). Нагружение образцов осуществлялось в цикле «растяжение-растяжение» с коэффициентом асимметрии R = 0,1. Испытания проводили при комнатной температуре и влажности 50 %.

В процессе испытаний реализуется «мягкий» цикл нагружения: задается и автоматически поддерживаются статическая и динамическая нагрузка на образец. Частота наргужения поддерживается в процессе испытаний также автоматически таким образом, чтобы колебательная система «испытательная машина – образец» находилась в состоянии резонанса. Частота нагружения для исследуемых образцов составляла около 50 Гц. Регистрируется текущая частота и амплитуда нагрузки, текущее число циклов нагружения.

Образец закреплялся в оснастке испытательной машины таким образом, чтобы обеспечить оптический доступ для контроля теплового состояния. Для регистрации поля температуры на поверхности образца в процессе испытаний и выявления очагов разрушения в настоящей работе использовалась прецизионная инфракрасная камера NEC TH9100 WR ProNew со спектральным диапазоном 8…14 мкм и матрицей 320*240 пикселей, чувствительность 0,02°C. Расстояние от камеры до объекта исследования около 30 см.

Для снижения погрешностей термографии температура в помещении поддерживается постоянной в течение всего времени испытаний, принимаются меры для исключения влияния посторонних источников инфракрасного излучения путем их экранирования. Поверхность образца перед испытаниями покрывается черной

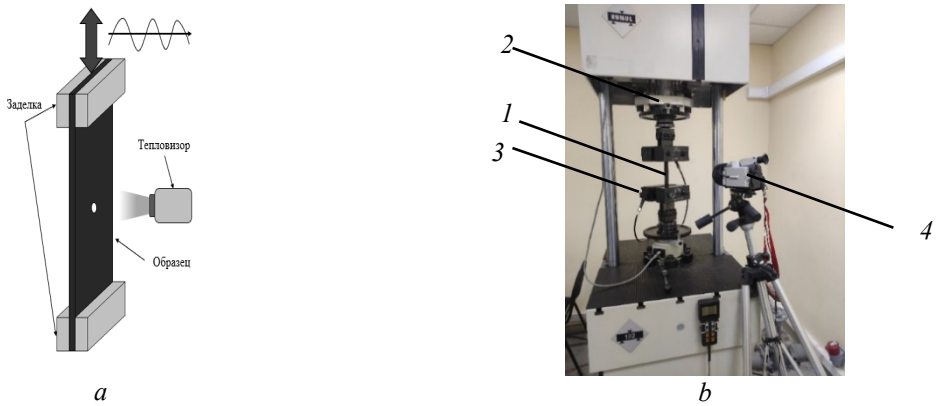


Рис. 5. Схема (*a*) и внешний вид (*b*) экспериментальной установки: *1* – исследуемый образец, *2* – испытательная машина Testronic-50, *3* – гидравлические захваты, *4* – инфракрасная камера
Fig. 5. Diagram (*a*) and appearance (*b*) of the experimental setup: *1* – test sample, *2* – Testronic-50 testing machine, *3* – hydraulic clamps, *4* – infrared camera

матовой краской. Коэффициент излучения принят 0,93 по справочным данным [37].

В настоящей работе для определения предела выносливости образцов используется метод инфракрасной термографии. Идея метода заключается [21; 22] в регистрации поля температуры на поверхности образца при его нагружении последовательностью блоков изменяющегося по гармоническому закону переменного напряжения с амплитудой σ_{max} (рис. 6). В пределах блока параметры нагрузки поддерживаются постоянными. Напряжение σ_{max} в каждом последующем блоке увеличивается. Когда оно достигает предела выносливости, диссипация энергии резко увеличивается вследствие активизации процессов усталостного разрушения, повышается температура на поверхности образца, которая регистрируется с помощью инфракрасной камеры. По резкому повышению температуры, определяют предел выносливости.

В рамках разработки методики определения предела выносливости образцов был проведен предварительный эксперимент по циклическому нагружению образца с отверстием типа В1 с регистрацией поля температуры на его поверхности. Образец нагружали несколькими блоками с постоянным значением максимального напряжения в цикле σ_{max}.

Типичная серия термограмм образца в конце различных блоков нагружения представлена на рис.7. Видно, что в зоне концентрации напряжений вблизи отверстия саморазогрев при циклическом нагружении значительно активнее, чем на удалении от отверстия. По мере увеличения относительного максимального напряжения в цикле $\hat{\sigma} = \sigma_{max}/\sigma_в$ ($\sigma_в$ – предел прочности) неоднородность поля температур выражена более заметно.

На рис. 8, *a*, показано типичное поле температур вблизи контура отверстия в конце блока нагружения. Зона повышенной температуры имеет характерную *X*-образную форму. Зоны повышенных сдвиговых деформаций ε_{xy}, определенные экспериментально методом цифровой корреляции изображений и КЭ расчетом, (рис. 8, *b*, *c*) имеют такую же форму. Это позволяет предположить, что в рассматриваемом варианте схемы армирования именно деформации сдвига определяют интенсивность источника тепловыделения и процесс накопления усталостных повреждений. С учетом неравномерности поля температур, обусловленной концентрацией напряжений, это определяет выбор зоны А на поверхности образца (рис. 8, *a*) для регистрации температуры при определении предела выносливости IRT методом.

На рис. 9 приведены зависимости приращения температуры $\theta = T\text{-}T_0$ (T и T_0 – текущая и начальная температуры) в зоне А на поверхности образца типа В1 от числа циклов нагружения в пределах одного типичного блока при различных значениях относительного максимального напряжения в блоке $\hat{\sigma}$. По мере циклической наработки температура быстро возрастает и постепенно стабилизируется, когда тепловыделение уравновешивается теплоотводом с поверхности образца. Для определения предела выносливости в качестве индикаторов нагрева используется один из четырех параметров: осредненные по области А и максимальные значения скорости повышения температуры $\dot{\theta}$ в начале блока и повышения температуры на стадии стабилизации θs (рис. 9). По зависимостям этих параметров от максимального динамического напряжения в блоке σ_{max} в соответствии с процедурой IRT метода определяется предел выносливости.

В работе [38] на примере образцов из углепластика без отверстий показано, что все 4 параметра дают практически одинаковые значения предела выносливости. Это позволяет подчинить выбор параметра-индикатора технике эксперимента. С точки зрения точности параметры, осредненные по области А представляются более предпочтительными, так как они в меньшей степени подвержены влиянию возможных смещений камеры и смещений зоны нагрева в ходе эксперимента. Определение скорости повышения температуры в начале блока позволяет накапливать меньше усталостных повреждений и за счет этого при необходимости увеличить число блоков. Кроме того, снижается время на проведение эксперимента. Исходя из этих соображений далее в качестве индикатора саморазогрева используется скорость повышения температуры в начале блока, осредненная по области А.

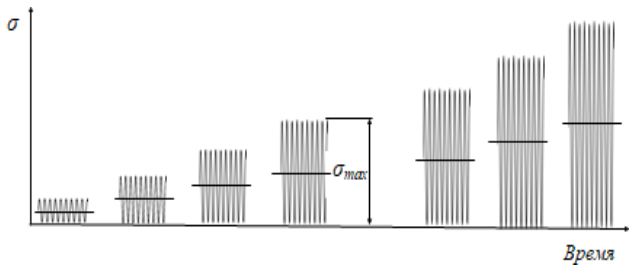


Рис. 6. Блочное нагружение образца

Fig. 6. Block loading of the sample

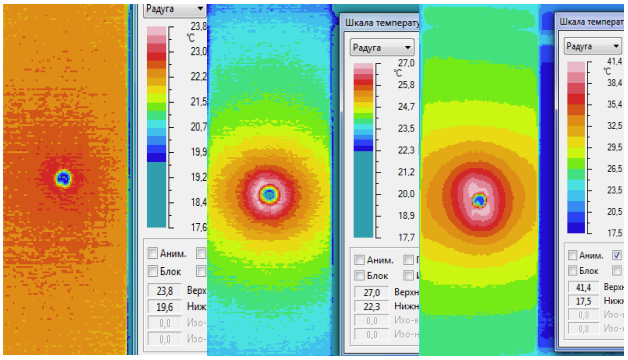


Рис. 7. Пример термограмм на поверхности образца в конце блоков нагружения при различных значениях относительного напряжения $\hat{\sigma}$

Fig. 7. Example of thermograms on the sample surface at the end of the loading blocks at different values of relative stress $\hat{\sigma}$

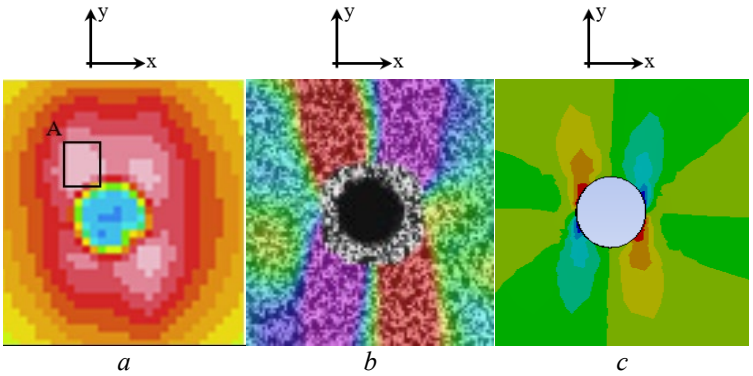


Рис. 8. Поле температур на поверхности образца вблизи отверстия (*a*) и характер поля сдвиговых деформаций ε_{xy}: метод цифровой корреляции изображений (*b*) и КЭ расчет (*c*)

Fig. 8. Temperature field on the sample surface near the hole (*a*) and the nature of the shear strain field ε_{xy}: digital image correlation method (*b*) and FE calculation (*c*)

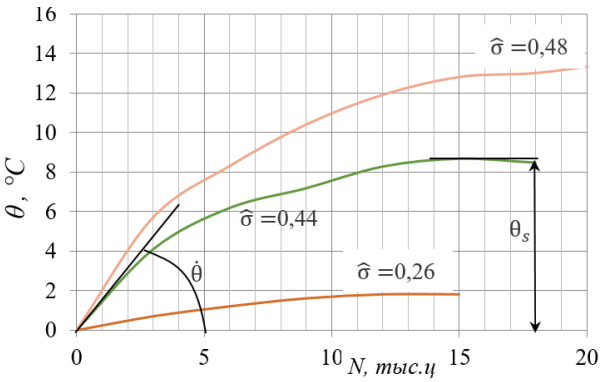


Рис. 9. Зависимость температуры в зоне концентрации на поверхности образца от циклической наработки при различных значениях относительного напряжения $\hat{\sigma}$

Fig. 9. Dependence of the temperature in the concentration zone on the surface of the sample on the cyclic workload at different values of the relative stress $\hat{\sigma}$

Блочное нагружение образца включало в себя 9–12 блоков. Амплитуды напряжений увеличивались от блока к блоку в диапазоне $(0{,}1\ldots0{,}5)\sigma_в$ Продолжительность каждого блока нагружения 3000-6000 циклов была выбрана таким образом, чтобы надежно зарегистрировать скорость возрастания температуры в области А в начале блока. После каждого блока нагружения делается перерыв для охлаждения образца до исходной температуры.

Более подробно методика ускоренного определения предела выносливости изложена в работах [38 – 42].

Результаты и их обсуждение

Для трех партий образцов типов А, В1 и В2 была проведена серия экспериментов по определению предела выносливости с применением метода инфракрасной томографии. В каждой партии было испытано по 2 образца. Скорость возрастания температуры в области А в начале блока $\dot{\theta}$ каждый раз определяли на базе циклической наработки 3000 и 6000 циклов. На рисунке 10 показаны в качестве примера зависимости $\dot{\theta}$ от относительного максимального напряжения в цикле нагружения $\hat{\sigma}$ для одного из образцов каждого типа. Предел выносливости в соответствии с идеей термографического метода определяется как абсцисса точки пересечения линейных аппроксимаций правой и левой ветвей этих зависимостей.

Полученные таким образом пределы выносливости, осредненные по двум образцам каждой партии, приведены в таблице. Расхождение предела выносливости между образцами одного типа по коэффициенту вариации составляет до 6%.

Эффективный коэффициент концентрации напряжений в исследованных образцах составил K_σ=1,11 – 1,14:

$$K_\sigma = \sigma_{0,1}/\sigma_{0,1отв}, \quad (3)$$

где $\sigma_{0,1}$ – предел выносливости для образа без отверстия, $\sigma_{0,1отв}$ – предел выносливости для образа с отверстием

Коэффициент чувствительности к концентрации напряжений, определенный как [3; 4]:

$$q = (K_\sigma - 1)/(\alpha_\sigma - 1), \quad (4)$$

составил q = 0,025.

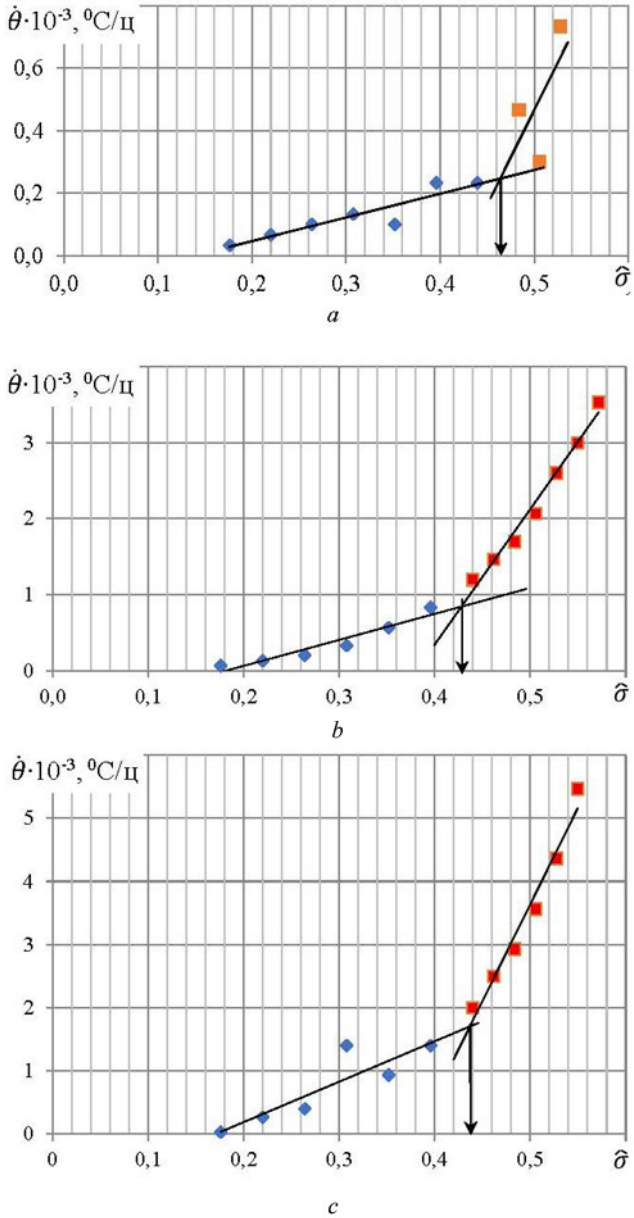


Рис. 10. Определение предела выносливости образцов типа А (*a*), В1 (*b*), В2 (*c*)

Fig. 10. Determination of the endurance limit of type A (*a*), B1 (*b*), and B2 (*c*) samples

Пределы выносливости и эффективные коэффициенты концентрации напряжений для исследованных образцов

Fatigue limits and effective stress concentration factors of samples

Тип образца	$\hat{\sigma}_{0,1}$	Коэффициент вариации, %	K_σ	α_σ	q
А – без отверстия	0,474	1.34	–	–	–
В1 – с отверстием d = 4 мм	0,427	0,99	1,11	5,37	0,025
В2 – с отверстием d = 8 мм	0,417	6,01	1,14	–	–

Таким образом, наличие отверстия незначительно снижает предел выносливости образцов из углепластика с рассмотренной схемой армирования. Слабая чувствительность к концентрации напряжений при усталостном нагружении у образцов из слоистых углепластиков с открытым отверстием и разными схемами армирования установлена в работах [10; 11; 14; 15].

На рис. 11 приведены фотографии зоны концентрации напряжений образца с отверстием диаметром 4 мм до и после усталостного разрушения. Размер отверстия соизмерим с характерным размером структурной неоднородности исследуемого материала, что позволяет предположить наличие влияния масштабного фактора на чувствительность к концентрации напряжений влияния. В работе [43] установлено влияние масштабного фактора на статическую прочность слоистого стеклопластика. Применительно к рассмотренному в настоящей работе материалу влияние масштабного фактора на чувствительность к концентрации напряжений в условиях многоцикловой усталости требует дополнительного исследования.



Рис. 11. Фотографии зоны концентрации напряжений образца с отверстием диаметром 4 мм до и после усталостного разрушения

Fig. 11. Photos of the stress concentration zone of a 4 mm diameter hole sample before and after fatigue failure

Заключение

В настоящей работе для исследования влияния концентрации напряжений на сопротивление многоцикловой усталости слоистого углепластика применяется метод инфракрасной термографии. Разработана методика ускоренной оценки предела выносливости образцов со свободным отверстием. Методика предполагает блочное циклическое нагружение образца с регистрацией поля температуры саморазогрева на его поверхности. Объектом исследования является изготовленный по технологии RTM углепластик на основе равнопрочной ткани из углеволокна с эпоксидным связующим.

Разработка методики состояла в выборе оборудования, количества, амплитуды и продолжительности блоков, зоны и параметров регистрации температуры, методики обработки результатов.

Проведен анализ полей температуры саморазогрева образцов в процессе циклического нагружения. Методом цифровой корреляции изображений получены поля деформаций на поверхности образца вблизи отверстия. Установлено, что наиболее активный саморазогрев происходит в Х-образной зоне вблизи отверстия, где максимальны сдвиговые деформации. Это свидетельствует об интенсивном накоплении усталостных повреждений в этой зоне в рассматриваемом углепластике.

Получены экспериментальны данные о пределах выносливости образцов с отверстием при одноосном растяжении с коэффициентом асимметрии цикла R=0,1. Эффективные коэффициенты концентрации напряжений в исследованных образцах с отверстиями диаметром 4 мм и 8 мм составил K_σ=1,11 – 1,14. Коэффициент чувствительности к концентрации напряжений составил q=0,025. Таким образом установлено, что для исследованного углепластика характерна низкая чувствительность к концентрации напряжений, наличие отверстия незначительно снижает предел выносливости образцов из углепластика с рассмотренной схемой армирования.

Разработанная методика ускоренной оценки влияния концентрации напряжений на сопротивление многоцикловой усталости углепластика методом инфракрасной термографии позволяет многократно снизить количество испытываемых образцов и продолжительность испытаний по сравнению с традиционными усталостными испытаниями с получением кривой усталости.

Библиографический список

1. Полилов А.Н., Татусь Н.А. Биомеханика прочности волокнистых композитов // М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2018. – 328 с.

2. Ендогур А.И., Кравцов В.А. Идеология проектирования авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов // Труды МАИ. – № 81. – 2015. – С.1-13.

3. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.П. Справочник по сопротивлению материалов // «Наукова Думка». – Киевм. – 1975. – 704 с.

4. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин // Справочник. М., Машиностроение. – 1979. – 702 с.

5. Ермаков И.С., Сухомлинов Л.Г., Шиврин М.В. Численный анализ распределения напряжений вокруг круговых отверстий в тонких ортотропных упругих пластинах при одноосном положении // Космонавтика и ракетостроение. – 2020. – № 1 (112). – С. 59-68.

6. Горбачев В. И., Некрасов В. В.. Концентрация напряжений в слоистой плоскости с эллиптическим вырезом // Чебышевский сборник. – 2023. – т. 24. – вып. 1. – с. 253–263. DOI: 10.22405/2226-8383-2023-24-1-253-263

7. Полилов А.Н. Механизмы уменьшения концентрации напряжений в волокнистых композитах // Прикладная механика и техническая физика. – 2014. – Т. 55. – № 1. – с.187 – 197.

8. Лешков Е.В., Сапожников С.Б. Экспериментальное исследование прочности гибридных полимерных композитов с концентратором напряжений // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. – 2020. – Т.1. – С. 108-118.

9. Strungar E. M., Wildemann V. E. Inelastic deformation and destruction of fiber-laminated polymer composites in stress concentration zones// Frattura ed Integrità Strutturale. – 53. – 2020. – p. 406-416.

10. Mirzaei A.M., Mirzaei A.H., Shokrieh M.M., Sapora A., Cornetti P. Fatigue life assessment of notched laminated composites: Experiments and modelling by Finite Fracture Mechanics // Composites Science and Technology. – 2024. – V.246. – P. 110.

11. Kawai M, Shiratsuchi T. Vanishing notch sensitivity approach to fatigue life prediction of notched cross-ply CFRP laminates at room temperature // Journal of Composite Materials. – 2012. – V.46(23). – P.2935-2950. doi:10.1177/0021998311434790

12. Broughton W.R., Gower M.R.L., Lodeiro M.J., Pilkington G.D., Shaw R.M. An experimental assessment of open-hole tension–tension fatigue behaviour of a GFRP laminate // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – Volume 42. – Issue 10. – 2011. – P. 1310-1320

13. Mortazavian S., Fatemi A. Effects of mean stress and stress concentration on fatigue behavior ofshort fiber reinforced polymer composites // Fatigue Fract Engng Mater Struct. – 2016. – V.39. – P. 149–166.

14. Tsai K.-H., Chiu C.-H., Wu T.-H. Fatigue behavior of 3D multi-layer angle interlock woven composite plates // Composites Science and Technology. – 2000. – P.241–248

15. Dai S., Cunningham P., Marshall S., Silva C. Open hole quasi-static and fatigue characterization of 3D woven composites // Composite Structures. – 2015. – V.131. – P.765-774.

16. Jen Y.-M., Wang Y.-C. Stress concentration effect on the fatigue properties of carbon nanotube/epoxy composites// Composites: Part B 43 (2012) 1687–1694

17. Strungar, E. M., Wildemann, V. E., Inelastic deformation and destruction of fiber-laminated polymer composites in stress concentration zones // Frattura ed Integrità Strutturale. – V. 53. – 2020. – P. 406-416

18. Strungar E.M., Lobanov D.S., Chebotareva E.A., Kochneva Y.V., Mechanical behavior of fiber-glass plastic with hole pattern using digital image correlation and acoustic emission methods // Fracture and structural integrity. – V. 68. – 2024. – P.63-76.

19. Татусь Н.А., Полилов А.Н., Власов Д.Д. Влияние отверстий на снижение прочности композитных образцов с различной укладкой волокон//Заводская лаборатория // Диагностика материалов. – Т.88. – №4. – 2022. – С.58-65. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-4-58-6

20. Полилов А.Н., Татусь Н.А. Принципы совершенствования структуры композитных изделий, основанные на изучении биотехнологий и биоматериалов // Вестник МГСУ. – 2021. – Т. 16. – С. 1191–1216. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.9.1191-1216

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.P. Infrared thermographic scanning of fatigue in metals // Nuclear Engineering and Design. – 1995. – V.158. – P.363-376.

23. Zaeimi M, De Finis R, Palumbo D, Galietti U. Fatigue limit estimation of metals based on the thermographic methods: A comprehensive review // Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. – 2024. – 47(3). – P. 611-646. doi:10.1111/ffe.14206

24. Wei, W.; He, L.; Sun, Y.; Yang, X. A Review of Fatigue Limit Assessment Using the Thermography Based Method // Metals. – 2024. – 14. – P. 64-70. https://doi.org/10.3390/met14060640

25. Aijia L, 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. – V. 272. – 2021. – p. 114-124

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

27. Изюмова А.Ю., Вшивков А.Н., Прохоров А.Е., Плехов О.А., Balasubramaniam V. Исследование эволюции источников тепла в процессе упруго-пластического деформирования титанового сплава ОТ4-0 на основе контактных и бесконтактных измерений // Вестник ПНИПУ. – Механика. – 2016. – № 1. – С. 68-81.

28. Zhao A., Xie J., Zhao Y., Liu C., Zhu J., Qian G., Wang S., Hong Y. Fatigue limit evaluation via infrared thermography for a high strength steel with two strength levels // Engineering Fracture Mechanics. – V. 268. – 2022. – P.108-120.

29. Fan J., Guo X., Wu C., Zhao Y., Guo Q. Stress assessment and fatigue behavior evaluation of components with defects based on the finite element method and lock-in thermography // J.Mechanical Engineering Science. – 2015. – V. 229(7). – P.1194–1205

30. Bale J., Valot E., Polit O., Bathias C., Monin M., Soemardi T. Thermal phenomenon of glass fibre composite under tensile static and fatigue loading // Journal of Mechanical Engineering and Sciences. – 2017. – V 11. – p.27-69

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

32. Karama M. Determination of the fatigue limit of a carbon/epoxy composite using thermographic analysis // Struct. Control Health Monit. – 2011. – V. 18. – P. 781–789

33. Eder M.A., Sarhadi A., Chen X. A novel and robust method to quantify fatigue damage in fibre composite materials using thermal imagine analysis // International Journal of Fatigue. – V. 150. – 2021

34. Pothnis J.R., Hajagolkar A.K., Anilchandra A.R., Das R., Gururaja S. Open-hole fatigue testing of UD-GFRP composite laminates containing aligned CNTs using infrared thermography // Composite Structures V.324. – 2023

35. Giorgi M., Nobile R. Palano F. kf Evaluation in GFRP Composites by Thermography // Appl. Sci. – 2021. – V. 11. https://doi.org/10.3390/app11115200

36. Третьякова Т.В., Душко А.Н., Струнгарь Е.М., Зубова Е.М., Лобанов Д.С. Комплексный анализ механического поведения и процессов разрушения образцов пространственно-армированного углепластика в испытаниях на растяжение // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2019. – № 1. – С. 173-183. DOI: 10.15593/perm.mech/ 2019.1.15.

37. Кутателадзе С.С., Боришанский В.М. Справочник по теплопередаче. Госэнергоиздат. – 1959. – 416с.

38. Соломонов Д.Г.; Нихамкин М.Ш. Ускоренная оценка предела выносливости полимерных композиционных материалов методом инфракрасной термографии // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2025. – №2 (91). – с.76-84.

39. Нихамкин М.Ш., Соломонов Д.Г., Экспресс-оценка усталостной прочности композитных фланцев методом инфракрасной термографии // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2024. – № 4. – С. 26-35.

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

41. Соломонов Д.Г.; Нихамкин М.Ш. Ускоренная оценка усталостной прочности конструктивных элементов из полимерных композиционных материалов // Конструкции из композиционных материалов. 2023. Вып. 1 (169)

42. Solomonov D.; Nikhamkin M Accelerated assessment of the fatigue strength of structural elements made of composites using infrared thermography // Structural Integrity Procedia 00 (2024)

1. Strungar, E. M., Wildemann, V. E., Inelastic deformation and destruction of fiber-laminated polymer composites in stress concentration zones // Frattura ed Integrità Strutturale. – V. 53. – 2020. – P. 406-416.

References

1. Polilov A.N., Tatus N.A. Biomekhanika prochnosti voloknistyh kompozitov // M.: FIZMATLIT. – 2018. – 328 s.

2. Endogur A.I., Kravcov V.A. Ideologiya proektirovaniya aviacionnyh konstrukcij iz polimernyh kompozicionnyh materialov // Trudy MAI. – № 81. – 2015. – S.1-13.

3. Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveev V.P. Spravochnik po soprotivleniyu materialov // «Naukova Dumka». – Kievm. – 1975. – 704 s.

4. Birger I.A., Shorr B.F., Iosilevich G.B. Raschet na prochnost' detalej mashin // Spravochnik. M., Mashinostroenie. – 1979. – 702 s.

5. Ermakov I.S., Suhomlinov L.G., Shivrin M.V. Chislennyj analiz raspredeleniya napryazhenij vokrug krugovyh otverstij v tonkih ortotropnyh uprugih plastinah pri odnoosnom polozhenii // Kosmonavtika i raketostroenie. – 2020. – № 1 (112). – S. 59-68.

6. Gorbachev V. I., Nekrasov V. V. Koncentraciya napryazhenij v sloistoj ploskosti s ellipticheskim vyrezom // Chebyshevskij sbornik. – 2023. – t. 24. – vyp. 1. – s. 253–263. DOI: 10.22405/2226-8383-2023-24-1-253-263

7. Polilov A.N. Mekhanizmy umen'sheniya koncentracii napryazhenij v voloknistyh kompozitah // Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika. – 2014. – T. 55. – № 1. – s.187 – 197.

8. Leshkov E.V., Sapozhnikov S.B. Eksperimental'noe issledovanie prochnosti gibridnyh polimernyh kompozitov s koncentratorom napryazhenij // Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika, vysokie tekhnologii i innovacii. – 2020. – T.1. – S. 108-118.

9. Strungar E. M., Wildemann V. E. Inelastic deformation and destruction of fiber-laminated polymer composites in stress concentration zones// Frattura ed Integrità Strutturale. – 53. – 2020. – p. 406-416.

10. Mirzaei A.M., Mirzaei A.H., Shokrieh M.M., Sapora A., Cornetti P. Fatigue life assessment of notched laminated composites: Experiments and modelling by Finite Fracture Mechanics // Composites Science and Technology. – 2024. – V.246. – P. 110.

11. Kawai M, Shiratsuchi T. Vanishing notch sensitivity approach to fatigue life prediction of notched cross-ply CFRP laminates at room temperature // Journal of Composite Materials. – 2012. – V.46(23). – P.2935-2950. doi:10.1177/0021998311434790

12. Broughton W.R., Gower M.R.L., Lodeiro M.J., Pilkington G.D., Shaw R.M. An experimental assessment of open-hole tension–tension fatigue behaviour of a GFRP laminate // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – Volume 42. – Issue 10. – 2011. – P. 1310-1320

13. Mortazavian S., Fatemi A. Effects of mean stress and stress concentration on fatigue behavior ofshort fiber reinforced polymer composites // Fatigue Fract Engng Mater Struct. – 2016. – V.39. – P. 149–166.

14. Tsai K.-H., Chiu C.-H., Wu T.-H. Fatigue behavior of 3D multi-layer angle interlock woven composite plates // Composites Science and Technology. – 2000. – P.241–248

15. Dai S., Cunningham P., Marshall S., Silva C. Open hole quasi-static and fatigue characterization of 3D woven composites // Composite Structures. – 2015. – V.131. – P.765-774.

16. Jen Y.-M., Wang Y.-C. Stress concentration effect on the fatigue properties of carbon nanotube/epoxy composites// Composites: Part B 43 (2012) 1687–1694

17. Strungar, E. M., Wildemann, V. E., Inelastic deformation and destruction of fiber-laminated polymer composites in stress concentration zones // Frattura ed Integrità Strutturale. – V. 53. – 2020. – P. 406-416

18. Strungar E.M., Lobanov D.S., Chebotareva E.A., Kochneva Y.V., Mechanical behavior of fiber-glass plastic with hole pattern using digital image correlation and acoustic emission methods // Fracture and structural integrity. – V. 68. – 2024. – P.63-76.

19. Tatus N.A., Polilov A.N., Vlasov D.D. Vliyanie otverstij na snizhenie prochnosti kompozitnyh obrazcov s razlichnoj ukladkoj volokon//Zavodskaya laboratoriya // Diagnostika materialov. – T.88. – №4. – 2022. – S.58-65. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-4-58-6

20. Polilov A.N., Tatus' N.A. Principy sovershenstvovaniya struktury kompozitnyh izdelij, osnovannye na izuchenii biotekhnologij i biomaterialov // Vestnik MGSU. – 2021. – T. 16 – S. 1191–1216. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.9.1191-1216

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.P. Infrared thermographic scanning of fatigue in metals // Nuclear Engineering and Design. – 1995. – V.158. – P.363-376.

23. Zaeimi M, De Finis R, Palumbo D, Galietti U. Fatigue limit estimation of metals based on the thermographic methods: A comprehensive review // Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. – 2024. – 47(3). – P. 611-646. doi:10.1111/ffe.14206

24. Wei, W.; He, L.; Sun, Y.; Yang, X. A Review of Fatigue Limit Assessment Using the Thermography Based Method // Metals. – 2024. – 14. – P. 64-70. https://doi.org/10.3390/met14060640

25. Aijia L, 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. – V. 272. – 2021. – p. 114-124

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

27. Izyumova A.Yu., Vshivkov A.N., Prohorov A.E., Plekhov O.A., Balasubramaniam V.. Issledovanie evolyucii istochnikov tepla v processe uprugo-plasticheskogo deformirovaniya titanovogo splava OT4-0 na osnove kontaktnyh i beskontaktnyh izmerenij // Vestnik PNIPU. – Mekhanika. – 2016. – № 1. – S. 68-81.

28. Zhao A., Xie J., Zhao Y., Liu C., Zhu J., Qian G., Wang S., Hong Y. Fatigue limit evaluation via infrared thermography for a high strength steel with two strength levels // Engineering Fracture Mechanics. – V. 268. – 2022. – P.108-120.

29. Fan J., Guo X., Wu C., Zhao Y., Guo Q. Stress assessment and fatigue behavior evaluation of components with defects based on the finite element method and lock-in thermography // J.Mechanical Engineering Science. – 2015. – V. 229(7). – P.1194–1205

30. Bale J., Valot E., Polit O., Bathias C., Monin M., Soemardi T. Thermal phenomenon of glass fibre composite under tensile static and fatigue loading // Journal of Mechanical Engineering and Sciences. – 2017. – V 11. – p.27-69

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

32. Karama M. Determination of the fatigue limit of a carbon/epoxy composite using thermographic analysis // Struct. Control Health Monit. – 2011. – V. 18. – P. 781–789

33. Eder M.A., Sarhadi A., Chen X. A novel and robust method to quantify fatigue damage in fibre composite materials using thermal imagine analysis // International Journal of Fatigue. – V. 150. – 2021

34. Pothnis J.R., Hajagolkar A.K., Anilchandra A.R., Das R., Gururaja S. Open-hole fatigue testing of UD-GFRP composite laminates containing aligned CNTs using infrared thermography // Composite Structures V.324. – 2023

35. Giorgi M., Nobile R. Palano F. kf Evaluation in GFRP Composites by Thermography // Appl. Sci. – 2021. – V. 11. https://doi.org/10.3390/app11115200

36. Tretyakova T.V., Dushko A.N., Strungar' E.M., Zubova E.M., Lobanov D.S. Kompleksnyj analiz mekhanicheskogo povedeniya i processov razrusheniya obrazcov prostranstvenno-armirovannogo ugleplastika v ispytaniyah na rastyazhenie // Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika. – 2019. – № 1. – S. 173-183. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.1.15.

37. Kutateladze S.S., Borishanskij V.M. Spravochnik po teploperedache. Gosenergoizdat. – 1959. – 416s.

38. Solomonov D.G.; Nihamkin M.Sh. Uskorennaya ocenka predela vynoslivosti polimernyh kompozicionnyh materialov metodom infrakrasnoj termografii // Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. – 2025. – №2 (91). – s.76-84.

39. Nihamkin M.Sh., Solomonov D.G., Ekspress-ocenka ustalostnoj prochnosti kompozitnyh flancev metodom infrakrasnoj termografii // Vestnik PNIPU. Mekhanika. – 2024. – № 4. – S. 26-35.

40. Solomonov D.G., Sazhenkov N.A., Konev I.P., Toropicina A.V., Nihamkin M.Sh. Zakonomernosti ustalostnogo razrusheniya tipovogo kompozitnogo flanca // Vestnik PNIPU. Mekhanika. – 2023. – № 3. – S. 145–153.

41. Solomonov D.G.; Nihamkin M.Sh. Uskorennaya ocenka ustalostnoj prochnosti konstruktivnyh elementov iz polimernyh kompozicionnyh materialov // Konstrukcii iz kompozicionnyh materialov. 2023. V. 1 (169)

42. Solomonov D.; Nikhamkin M Accelerated assessment of the fatigue strength of structural elements made of composites using infrared thermography // Structural Integrity Procedia 00 (2024)

43. Strungar, E. M., Wildemann, V. E., Inelastic deformation and destruction of fiber-laminated polymer composites in stress concentration zones // Frattura ed Integrità Strutturale. – V. 53. – 2020. – P. 406-416.

Финансирование. Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030»
Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Вклад авторов равноценен.

Funding. The research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the strategic academic leadership program "Priority 2030".
Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.
The authors' contributions are equal.