

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2024-90-3-62-69>

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ УКЛАДКИ АРМИРОВАНИЯ ВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА НЕОДНОРОДНОСТЬ ЛОКАЛИЗАЦИИ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ МЕТОДОМ ТЕРМОУПРУГОГО ОТКЛИКА

© **Расим Султанович Ахметханов**

Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Россия, 101990, Москва, Малый Харитоньевский пер. д. 4;
e-mail: mibsts@mail.ru

*Статья поступила 26 июня 2023 г. Поступила после доработки 31 июля 2023 г.
Принята к публикации 28 августа 2023 г.*

Цель работы — исследование влияния направления армирования композиционного материала относительно циклической нагрузки на неоднородность распределения напряжений тепловым методом неразрушающего контроля за счет термоупругого эффекта. Данный метод широко применяется во всех отраслях промышленности для контроля элементов конструкции и в исследовательских работах. Степень неоднородности напряжений используется при выборе коэффициентов запаса прочности, необходимых для обеспечения безопасности технических объектов. В проведенном исследовании тепловым методом за счет термоупругого эффекта показана возможность оценки локального распределения напряжений по температурному полю объекта контроля. При этом температура упругого тела и механические напряжения связаны между собой линейно. Объекты исследования — ламинаты из композиционного материала, состоящего из волокнистого наполнителя (стекловолокна) с эпоксидной матрицей. Исследованы различные варианты укладки волокон по отношению к направлению нагрузки. Рассмотрены четыре варианта ламинатов: однослойные [0] и [90]; трехслойные [0]₃ и [90]₃. В работе использованы статистические данные и оценки коэффициентов вариации, методы кластеризации и усреднения по длине ламинатов значений распределения температуры по поверхности ламинатов. Получены числовые характеристики распределения локальных температур. Установлено, что их более однородное распределение происходит при армировании материала по направлению нагружения детали. Проведено сравнение интегральных и локальных характеристик распределения температур в образцах. Визуально отмечены отличия в локальном распределении температуры в зависимости от толщины ламината (однослойные и трехслойные). Нагрузка распределяется более равномерно при армировании в ее направлении, а также при увеличении количества слоев армирования. Результаты исследования показали, что выбор значения коэффициента безопасности, оценивающего уровень неоднородности напряжения, зависит от конструктивных особенностей ламинатов. В ходе эксплуатации изделий из композиционных материалов при наличии значительных накопленных повреждений, когда неравномерность их распределения усиливается, следует корректировать уровни коэффициентов безопасности.

Ключевые слова: коэффициент запаса прочности; термограмма; термоупругий отклик; температура; напряжение; деформация; неоднородность; коэффициент вариации.

ANALYSIS OF THE EFFECT OF THE DIRECTION OF REINFORCEMENT OF A FIBROUS COMPOSITE MATERIAL ON THE INHOMOGENEITY OF LOCALIZATION OF DEFORMATIONS AND STRESSES USING THE METHOD OF THERMOELASTIC RESPONSE

© **Rasim S. Akhmetkhanov**

A. A. Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, 4, Maly Kharitonevsky per., Moscow, 101990, Russia; e-mail: mibsts@mail.ru

Received June 26, 2023. Revised July 31, 2023. Accepted August 28, 2023.

The purpose of the article is to study the effect of the direction of reinforcement of a composite material relative to the cyclic load on the inhomogeneity of stress distribution by the thermal method of non-destructive testing using the thermoelastic effect. This method is widely used in all industries for the control

of structural elements and in research work. The degree of stress inhomogeneity is used when choosing the safety factors necessary to ensure the safety of technical objects. In this study, the thermoelastic effect is used to show the possibility of estimating the local distribution of stresses using the temperature field of the test object, proceeding from the linear relation between the temperature of the elastic body and mechanical stresses. The results of studying composite laminates (fibrous filler (fiberglass) with an epoxy matrix) with different laying of fibers with respect to the direction of loading are presented. Four laminate samples were considered: single-layer [0] and [90], three-layer [0]₃ and [90]₃. Statistical data and estimates of the coefficients of variation, methods of clustering and averaging over the length of the laminates the values of the temperature distribution over the surface of the laminates. The numerical characteristics of the distribution of local temperatures are obtained. It is shown that a more uniform distribution occurs when reinforcing is directed along the direction of the material loading. The integral and local characteristics of the temperature distribution in the samples are compared. The differences in the local temperature distribution depending on the laminate thickness were noted visually for single-layer and three-layer samples. A more uniform distribution of the load is also observed in the direction of reinforcement and with an increase in the number of reinforcement layers. The results obtained lead to the conclusion that the choice of the value of the safety factor, which evaluates the level of stress inhomogeneity, depends on the design features of the laminates. During operation of products made of composite materials in the presence of significant accumulated damage, when the uneven distribution of stresses increases, the levels of safety factors should be adjusted.

Keywords: safety factor; thermogram; thermoelastic response; temperature; stress; strain; inhomogeneity; coefficient of variation.

Введение

Цель статьи — оценка методом теплового контроля локального распределения температур в термограммах композиционного материала (полимера, армированного стекловолокном) с различной ориентацией армирующих волокон при циклической нагрузке на растяжение в пределах упругости. Задачей также являлось получение числовых характеристик зависимости термоупругого отклика от укладки армирующих волокон композиционного материала, характеризующих однородность прочностных свойств материала. Известно, что получаемый термоупругий отклик (термограмма) при нагружении материалов прямо пропорционален изменению локальных напряжений и деформаций.

При расчете деталей машин на прочность сравнивают фактические напряжения, возникающие в сечении, с некоторыми допускаемыми напряжениями, рассчитанными для данного материала и вида нагружения, т.е. $\sigma_{\text{ф}} \leq [\sigma]$, где $\sigma_{\text{ф}}$ — фактически действующее напряжение; $[\sigma]$ — допускаемое напряжение. Для определения допускаемых напряжений в машиностроении применяют дифференцированный и табличный методы.

При определении допускаемых напряжений и запасов прочности дифференциальным методом учитываются надежность материала, точность расчетных схем, действующие нагрузки, степень ответственности детали и другие факторы, определяющие условия ее работы. Например, допускаемые нормальные $[\sigma]$ и касательные $[\tau]$ напряжения при статических нагрузках рассчитывают по формулам

$$[\sigma] = \sigma_{\text{max}}/[S],$$

$$[\tau] = \tau_{\text{max}}/[S],$$

где σ_{max} и τ_{max} — предельные нормальные и касательные напряжения, при достижении которых рассматриваемая деталь выходит из строя из-за недопустимо большой остаточной деформации или разрушения; $[S]$ — нормированный коэффициент безопасности (запас прочности).

При постоянных нагрузках в качестве предельных напряжений σ_{max} и τ_{max} для деталей машин из пластических материалов принимают пределы текучести σ_{T} и τ_{T} , а деталей из хрупких материалов — пределы прочности (временное сопротивление) $\sigma_{\text{в}}$ и $\tau_{\text{в}}$.

Общий допускаемый коэффициент запаса прочности определяется следующим выражением:

$$[S] = [S_1][S_2][S_3],$$

где $[S_1]$ — коэффициент, учитывающий точность расчетной схемы, достоверность определения расчетных нагрузок и напряжений; $[S_2]$ — коэффициент, учитывающий качество материала и технологию получения, однородность механических свойств материалов; $[S_3]$ — коэффициент безопасности, включающий специфические требования безопасности.

При назначении коэффициентов запаса, а значит, и допускаемых напряжений, кроме перечисленных выше соображений, необходимо также учитывать и другие факторы:

- качество и степень однородности материала;
- долговечность и значимость сооружения или машины.

Повышение надежности элементов сооружений и деталей машин предъявляет высокие требования к проектным решениям, поскольку кон-

струкция должна быть достаточно прочной, а в необходимых случаях — жесткой и устойчивой, а также иметь наименьшие материалоемкость, трудоемкость изготовления и стоимость. В значительной мере эта задача может быть решена за счет рационального проектирования на основе современных методов прочностных расчетов. Задача актуальна и для композиционных материалов. Необходимость достижения прочностных и эксплуатационных свойств требует проектирования и разработки конструкционных и функциональных композитов с заданными характеристиками.

К числу наиболее перспективных следует отнести класс многофазных композиционных материалов со слоистой анизотропной структурой (СКМ). В связи с этим возникают задачи правильного выбора составляющих фаз композита, его структурных параметров, технологии получения, а также методик исследования и прогнозирования прочности [1 – 5].

Фундаментальной задачей анализа работы любой системы является определение распределения в ней внутренних напряжений и деформаций с учетом действующих на нее внешних сил. Известно, что процесс усталостного разрушения связан с эволюцией структуры материала. Усталостное разрушение представляет собой многоуровневый и разномасштабный кинетический процесс и характеризуется обязательным прохождением стадий образования различных субструктур, микротрещин, формированием макротрещин. Процесс разрушения происходит в результате взаимодействия объектов, имеющих разный масштабный уровень — от атомного до мезо- и макроскопического. Процесс усталостного разрушения является случайным. В этих стадиях проявляются свойства локализации деформации, а следовательно, напряжений.

Термоупругий анализ

Исследование локального распределения деформаций и напряжений можно проводить с помощью методов теплового контроля. В тепловых методах неразрушающего контроля используется такой показатель, как уровень тепловой энергии, распространяющейся в объекте контроля. Температурное поле поверхности объекта является источником информации об особенностях процесса теплопередачи, которые, в свою очередь, зависят от структуры материала, наличия внутренних или наружных дефектов.

При нарушении термодинамического равновесия объекта с окружающей средой на его поверхности возникает неоднородное температурное поле, характер которого позволяет по-

лучить информацию об интересующих свойствах объектов.

Используются различные методы анализа термограмм. Небольшие дефекты сложно обнаружить в изображениях термограмм. Их наличие можно оценить с помощью статистических данных распределения температуры в термограмме, методами сегментации, кластеризации и методами теории фракталов.

Рассмотрен волокнистый композиционный материал с различной структурой армирующих волокон. Исследованы локальные напряжения и деформации с помощью термоупругого отклика (тепловой контроль) [6 – 10]. В случае термоупругого отклика на нагружение связь температурных изменений линейная, что позволяет их легко пересчитывать в напряжения и далее — в деформации.

Локальное изменение деформации упругого тела вызывает перераспределение его температурного поля. При этом изменение поверхностной температуры упругого тела линейно зависит от суммы главных механических напряжений, что дает возможность измерять непосредственно механические напряжения. В этом состоит преимущество этого метода, поскольку большинство других методов основано на измерении деформаций, по которым определяются механические напряжения.

Термографический сигнал, по сути, является функцией среднего напряжения и механических свойств материала и зависит от величины модуля упругости.

Механические напряжения определяются термоупругим методом путем измерения параметров температурного поля исследуемого объекта с помощью чувствительных инфракрасных пирометров (тепловизоров), наиболее совершенные из которых имеют порог чувствительности 0,005 – 0,01 °С.

Таким образом, термоупругий эффект подразумевает линейную зависимость между изменением температура тела и напряженным состоянием при наличии адиабатических условий. При данном подходе рассматриваются свойства материала при постоянной температуре. Недостатком термоупругого метода является невозможность получения информации о компонентах и направлениях исследуемых деформаций, как отмечено ранее, поскольку изменение температуры пропорционально сумме главных деформаций и не зависит от их направления [10].

Метод также можно применять для измерения переменных механических напряжений, если изменение температуры за счет термоупругого эффекта относительно мало и может быть определено только выделением переменной составляющей теплового излучения на фоне обще-

го температурного поля исследуемого объекта. При этом относительное изменение температур не зависит от частоты механических напряжений, а определяется только свойствами материала и значениями механических характеристик.

Метод анализа термоупругих напряжений (АТН) в работах [7 – 10] определяется как надежное средство неразрушающей оценки остаточных напряжений в конструкциях. Он основан на небольших изменениях температуры, которые происходят, когда материал подвергается изменению упругой деформации ε , обычно называемому «термоупругим эффектом». Другими словами, при циклической нагрузке напряжения в конструкции вызывают соответствующие изменения температуры.

В композитном слоистом материале сумма основных деформаций связана с напряжениями следующим образом:

$$\varepsilon_x + \varepsilon_y = \frac{1 - \nu}{E}(\sigma_x + \sigma_y), \quad (1)$$

где E — модуль упругости; ν — коэффициент Пуассона.

Изменение температуры ΔT в поверхностном слое материала, вызванное деформацией, можно записать путем замены правого члена в уравнении (1):

$$\Delta T = -\frac{\alpha T}{\rho C_p}(\sigma_x + \sigma_y) = -\frac{\alpha T}{\rho C_p} \frac{E}{1 - \nu}(\varepsilon_x + \varepsilon_y), \quad (2)$$

где T — температура поверхности материала; ρ — плотность материала; C_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении; α — коэффициент тепловой отдачи. Изменение температуры ΔT связано с изменением первого инварианта напряжений.

Рассмотрим основные положения влияния структуры материала на локализацию напряжений [11]. Считается, что размер структурных элементов деформируемого тела определяет размеры зон локализации деформации и состояние вещества в этих зонах. На основании проведенного анализа экспериментальных и теоретических работ [12] сформулированы общие закономерности развития деформации:

1) локализация деформации — основной структурно-энергетический организующий элемент развития упругой деформации и пластического течения твердых тел;

2) локализация деформации формируется на различных структурных уровнях деформируемых твердых тел;

3) деформационные неравновесные процессы — самоорганизующееся резонансное состоя-

ние материала, его реакция на внешнее многофакторное воздействие.

Как отмечено ранее, все эти закономерности локального распределения деформаций в нагруженном объекте проявляются при тепловом контроле за счет термоупругого и термопластического эффектов, когда происходит превращение энергии механического деформирования в тепло. При накоплении повреждений в структуре материала распределение локальных деформаций (напряжений) изменяется, в дефектных местах температуры увеличиваются, следовательно, повышаются напряжения и деформации.

Обсуждение результатов

Использованные в экспериментах образцы СКМ изготавливали из однонаправленного материала, предварительно пропитанного эпоксидной смолой. Общие механические и физические свойства СКМ следующие [13]: модуль упругости $E = 20,0$ ГПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,15$; коэффициент теплоотдачи $\alpha = 10,59$ Вт/(м² · К).

Полимерная композиционная ткань представляет собой сборку длинных углеродных волокон, арамида (синтетического волокна с высокими параметрами плотности, устойчивого к перепадам температур) или волокон стекла либо их комбинации. Из этой ткани производят плоские листы с одним или несколькими слоями волокон. Слои скрепляются друг с другом путем механической блокировки волокон или с помощью вторичного материала — эпоксидной смолы. В однонаправленных тканях основная часть волокон расположена в направлении 0° (вдоль рулона), меньшая часть — в направлении 90° к длине рулона, волокна прямые, не перекрученные. Такая укладка волокон, удерживаемых эпоксидной смолой, позволяет получить высокие свойства материала.

В проведенных экспериментах фиксировали термограммы (рис. 1) [13] и общие деформации образцов по координатам x и y . Распределение температур в термограммах пропорционально упругим напряжениям и деформациям. Имеются значительные различия в распределении температур (ΔT), полученных от разных образцов, при этом ориентация поверхностного слоя и расположение слоев просматриваются на изображениях. Это указывает на то, что отклик, скорее всего, исходит от ортотропного слоя, поскольку ориентация волокон в поверхностном слое хорошо видна.

Термограммы свидетельствуют о различном изменении температур образцов СКМ[0] и СКМ[90], что связано с разной ориентацией поверхностных слоев. Термограммы становятся намного однородней с увеличением толщины ламината (трехслойные конструкции).

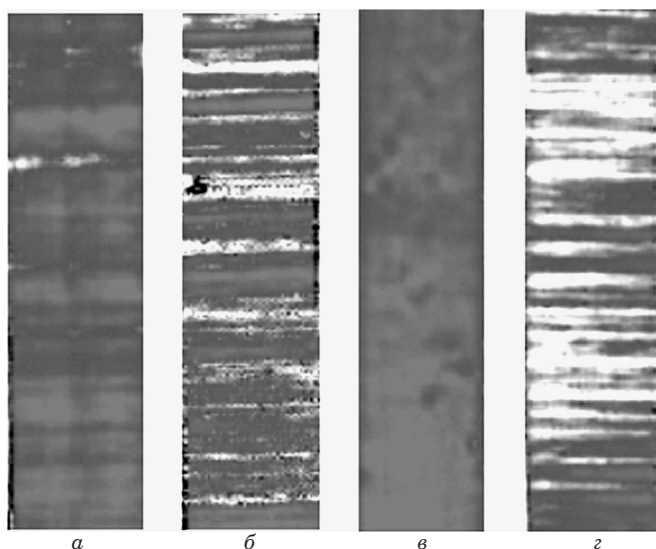


Рис. 1. Термограммы термоупругого отклика образцов от циклического нагружения в 10 Гц: *a* — СКМ[0]; *б* — СКМ[90]; *в* — СКМ[0]₃; *г* — СКМ[90]₃

Fig. 1. Thermograms of thermoelastic response of samples under 10 Hz cyclic loading: *a* — LAS[0]; *b* — LAS [90]; *c* — LAS [0]₃; *d* — LAS [90]₃

В табл. 1 представлены характеристики нагружения ламинатов, деформации и приращения температуры. Нагружение ламинатов подбирали таким образом, чтобы их деформации были одного порядка. Температурные изменения зависели от толщины ламината.

Поскольку нагрузка трехслойных ламинатов была увеличена примерно в три раза, их дефор-

мации и температурные значения не сильно отличались от таковых для однослойных ламинатов. При увеличении слоев деформация несколько падала. Деформации продольные и поперечные отличались незначительно для всех типов ламинатов. Температура изменялась от 0,097 до 1,35 К. Такой разброс связан с тем, что в более тонких ламинатах точнее определяется температура, связанная с термоупругим откликом.

Уровень температуры в численных процедурах анализа термограмм определяется градацией уровня серого оттенка пикселей в изображении. Поэтому далее будем рассматривать значения температур в этих единицах (от 0 до 255).

На рис. 2 приведены гистограммы распределения температур по тепловому полю пластин с различной структурой при одинаковой нагрузке. Они отличаются по статистическим характеристикам, которые приведены в табл. 2. Наиболее однородно распределение температур при нагружении ламината СКМ[0]₃, а самое неоднородное — при нагружении пластины СКМ[90]₃. Однородность оценивается по значению коэффициента вариации [14], который для ламината СКМ[0]₃ равен 11,80 %. Наибольший коэффициент вариации для ламината СКМ[90]₃ — 17,26 %. Увеличение слоев армирования в ламинате СКМ[90]₃ несколько повышает коэффициент вариации. Масштабную неоднородность и ее влияние на структуру температурного поля можно определить с помощью анализа мультифрактальных спектров [15 – 17].

Таблица 1. Характеристики нагружения, деформации и изменения температуры

Table 1. Characteristics of loading, deformation, and temperature changes

Образец	Нагрузка, кН	Деформация		Приращение температуры ΔT , К
		ϵ_x	ϵ_y	
СКМ[0]	0,55	0,001949	-0,000296	0,135
СКМ[0] ₃	1,55	0,001750	-0,000209	0,106
СКМ[90]	0,55	0,001993	-0,000312	0,125
СКМ[90] ₃	1,55	0,001750	-0,000209	0,097

Таблица 2. Статистические данные по распределению температуры в тепловом поле ламинатов

Table 2. Statistical data on the temperature distribution in the thermal field of laminates

Статистические данные	Вариант ламината			
	СКМ[0]	СКМ[90]	СКМ[0] ₃	СКМ[90] ₃
Среднеквадратическое отклонение	21,060	21,645	17,059	22,355
Математическое ожидание	131,149	129,285	144,544	129,465
Мода	130,0	118	163	115
Коэффициент вариации, %	16,05	16,74	11,80	17,26
Интервал разброса окрашенности пикселей	120	167	100	159
Отношение $T_{max}/M[T]$	1,49	1,47	1,28	1,83

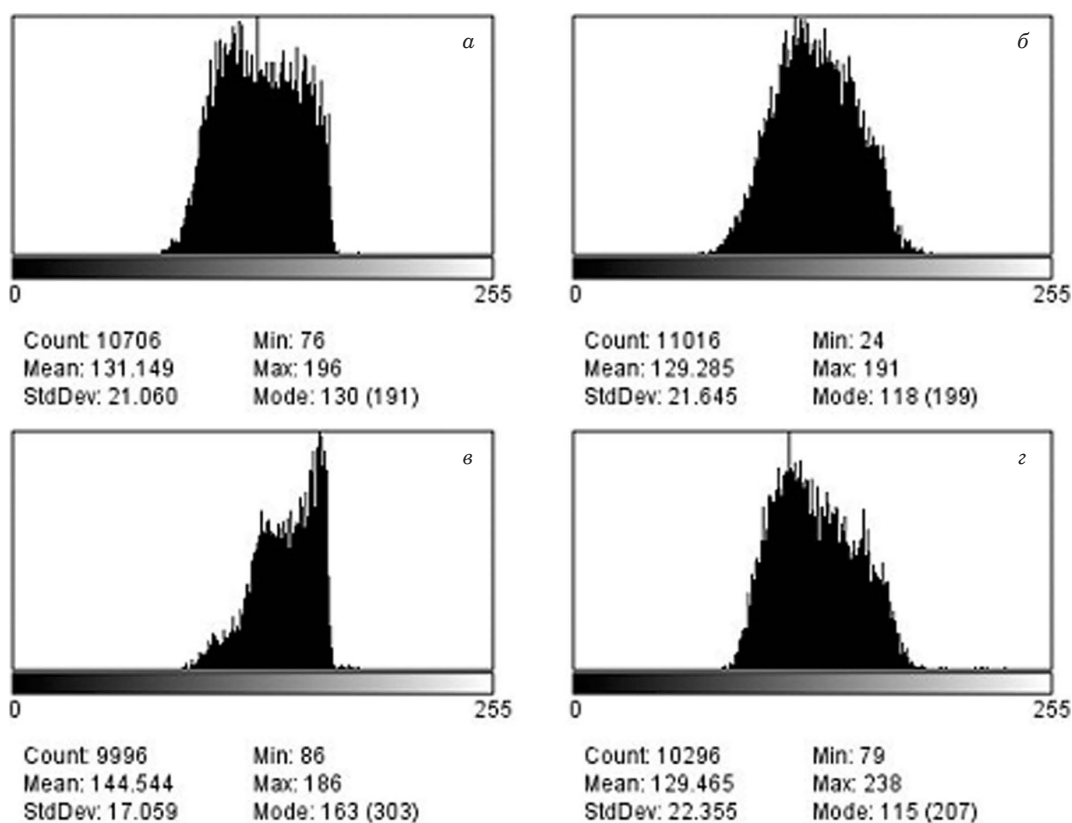


Рис. 2. Гистограммы распределения температуры в термограммах ламинатов: а — СКМ[0]; б — СКМ[90]; в — СКМ[0]₃; г — СКМ[90]₃

Fig. 2. Histograms of temperature distribution in thermograms of laminates: а — LAS[0]; б — LAS[90]; в — SCM[0]₃; г — LAS[90]₃

Для иллюстрации распределения локальных температур проведем кластеризацию термограмм методом K -средних [18]. Алгоритм основан на рассмотрении спектров, извлекаемых из объёмных данных (высота рельефа изображения). Алгоритм инициализируется случайным выбором K (заданное число кластеров) точек из имеющегося набора спектров в качестве центров кластеров. Затем применяется обычный двухстадийный алгоритм: каждая точка распределяется по кластерам таким образом, чтобы она принадлежала кластеру, центр которого будет ближе всего к ней, затем перемещаются центры кластеров. Результаты последней итерации возвращаются в виде изображения распределения кластеров по тепловому полю.

Для кластеризации термограмм выбрано 30 температурных уровней. Получено следующее количество кластеров для ламинатов согласно рис. 1, а–г — 25, 30, 22 и 24 соответственно. Наименьшее их число (22 кластера) получено для ламината СКМ[0]₃. При увеличении слоев в ламинатах появляются локальные островки с минимальным разбросом напряжения. Однослойные ламинаты разделены на мелкие кластеры с одинаковой температурой (25 и 30), тогда как

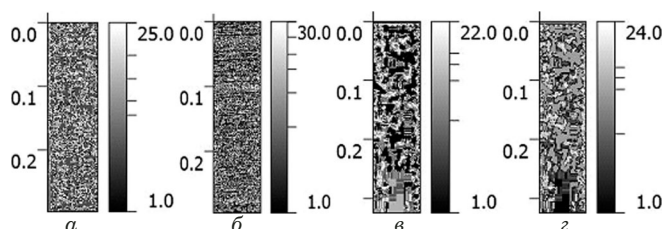


Рис. 3. Кластеризация методом K -средних распределения температур в ламинатах: а — СКМ[0]; б — СКМ[90]; в — СКМ[0]₃; г — СКМ[90]₃

Fig. 3. Clustering by the method of K -averages of temperature distribution in laminates: а — LAS[0]; б — LAS[90]; в — SCM[0]₃; г — LAS[90]₃

многослойные — на меньшее число (22 и 24) более крупных кластеров.

Рассмотрим локализацию температур (напряжений, деформаций) вдоль ламинатов, усреднив температуру по их ширине (по оси x). Значения температуры, как отмечалось ранее, определяются уровнем серого оттенка пикселей, поэтому заменены значениями от 0 до 1,0 ($p/255$), где p — текущая градация оттенка серого пикселей изображения (рис. 4). Наименьший разброс усредненной температуры характерен для ламината

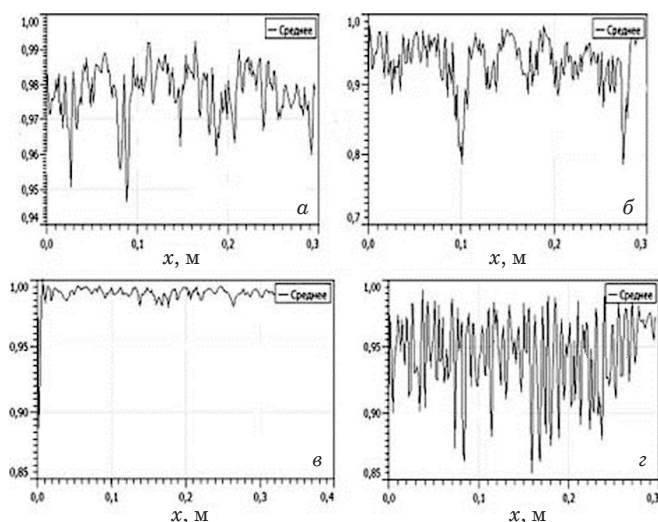


Рис. 4. Средняя относительная величина температуры (напряжения) ламинатов по длине: *a* — СКМ[0]; *b* — СКМ[90]; *c* — СКМ[0]₃; *z* — СКМ[90]₃

Fig. 4. Average relative temperature (stress) of laminates along the length: *a* — LAS[0]; *b* — LAS[90]; *c* — SCM[0]₃; *d* — LAS[90]₃

СКМ[0]₃. В табл. 3 приведены значения для средних величин напряжения.

Коэффициенты вариации, вычисленные по усредненным значениям, значительно (в разы) меньше коэффициентов, найденных без усреднения данных. При этом трехслойные ламинаты по усредненным значениям имеют более близкие коэффициенты вариации. Для ламината СКМ[0] эти коэффициенты значительно отличаются.

Закключение

Как видно из термограмм, приращения температуры ΔT , полученные для образцов ламинатов с различной ориентацией укладки относительно нагружения, отличаются. Значительно различаются термоупругие изменения температуры для образцов СР[0] и СР[90] — из-за различий в ориентации слоя укладки армирующего материала. Ориентация 0° слоев армирования приводит к более однородному распределению температур (напряжений).

Таблица 3. Усредненные значения температуры T в относительных значениях уровня градации серого оттенка пикселей изображения

Table 3. Average temperature values T in relative values of the grayscale level of image pixels

Образец	Усреднение по ширине образца			Усреднение по длине образца		
	Математическое ожидание	Среднеквадратическое отклонение	Коэффициент вариации, %	Математическое ожидание	Среднеквадратическое отклонение	Коэффициент вариации, %
СКМ[0]	0,9778	0,007756	0,97	0,9778	0,03073	3,142
СКМ[90]	0,9316	0,03648	3,90	0,9316	0,03037	3,295
СКМ[0] ₃	0,9896	0,00722	0,73	0,9896	0,005201	0,525
СКМ[90] ₃	0,9445	0,03007	3,20	0,9445	0,02431	2,572

Материал ламината, состоящего из нескольких слоев, наиболее однороден.

Полученные данные показывают, что при определении коэффициента запаса прочности, связанного с неоднородностью материала и технологией его изготовления, нужно ориентироваться на не интегральные характеристики σ_{\max} и τ_{\max} , а на локальные напряжения $\sigma_{\max i}$ и $\sigma_{\max i}$. Как показали приведенные числовые характеристики распределений локальных деформаций (напряжений), при близких значениях интегральных деформаций для всех ламинатов, измеренных датчиками, коэффициенты вариации оказались разными по величине.

Таким образом, при эксплуатации изделий в них накапливаются повреждения, что приводит к возникновению повышенных напряжений в области трещин и перераспределению локальных напряжений и деформаций, которые можно оценить с помощью тепловой диагностики в ходе эксплуатации. Это поможет определять текущее состояние конструкционного материала.

Финансирование

Работа выполнена при финансировании по гранту РФФ № 20-19-00769-П.

Конфликт интересов

Автор данной работы заявляет об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Татусь Н. А., Полилов А. Н., Власов Д. Д. Влияние отверстий на снижение прочности композитных образцов с различной укладкой волокон / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. Т. 88. № 4. С. 58 – 65. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-4-58-65
2. Тюменцев В. А., Фазлитдинова А. Г. Исследование структуры волокнистых углеродных материалов методом рентгеновской дифрактометрии / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 11. С. 31 – 36. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-11-31-36
3. Биткина О. В., Биткина Е. В. Анализ технологических остаточных напряжений, возникающих в многослойных композитных панелях с несимметричной структурой пакета композита по толщине / Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 4(2). С. 561 – 567.

4. Антонов В. М., Аль-Накди И. А. Влияние армирования на характер напряжений в песчаном основании / Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2020. Т. 20. № 1. С. 20 – 27.
5. Матвиенко Ю. Г., Васильев И. Е., Чернов Д. В. Исследование кинетики разрушения однонаправленного ламината с применением акустической эмиссии и видеорегистрации / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 11. С. 45 – 61. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-11-45-61
6. Нестерук Д. А., Вавилов В. П. Тепловой контроль и диагностика. Учебное пособие для подготовки специалистов I, II, III уровня. — Томск: Издательство ТПУ, 2007. — 104 с.
7. Мойсейчик А. Е., Мойсейчик Е. А. Основы теплового контроля несущих конструкций с использованием деформационного теплообразования / Неразрушающий контроль и диагностика. 2014. № 3. С. 3 – 19.
8. Мойсейчик А. Е. Исследование и разработка метода теплового неразрушающего контроля стальных конструкций на основе механизма деформационного теплообразования: дис. ... докт. техн. наук. — Новосибирск, 2018. — 377 с.
9. Robinson A. F., Dulieu-Barton J. M., Quinn S., et al. A Review of Residual Stress Analysis using Thermoelastic Techniques / 7th International Conference on Modern Practice in Stress and Vibration Analysis IOP Publishing. Journal of Physics: Conference Series. 2009. 181 (012029). — 8 p.
10. Daiki Shiozawa, Takahide Sakagami, Yu Nakamura, et al. Fatigue Damage Evaluation of Short Carbon Fiber Reinforced Plastics Based on Phase Information of Thermoelastic Temperature Change / Sensors. 2017. N 17. P 1 – 9.
11. Кенжалиев Б. К., Черноглазова Т. В., Мофа Н. Н. и др. Локализация пластической деформации и неравновесные структурно-деформационные превращения. — Алма-Аты: Издательство «Комплекс», 2004. — 271 с.
12. Панин В. Е., Егорушкин В. Е. Деформируемое твердое тело как нелинейная иерархически организованная система / Физическая мезомеханика. 2011. Т. 14. № 3. С. 7 – 26.
13. Sambasivam S. Quinn, Dulieu-Barton J. M. Identification of the source of the thermoelastic response from orthotropic laminated composites. School of Engineering Sciences, University of Southampton, Highfield, Southampton SO17 1BJ, United Kingdom. https://www.researchgate.net/publication/240641936_Identification_of_the_source_of_the_thermoelastic_response_from_orthotropic_laminated_composites [процитировано 11 апреля 2023].
14. Дюкина Т. О. Модифицированный коэффициент корреляции. Труды XIX Международной конференции «Аналитика и управление данными в областях с интенсивным использованием (DAMDID / RCDL'2017)», Москва, Россия, 2018. С. 10 – 13.
15. Павлов А. Н., Анищенко В. С. Мультифрактальный анализ сложных сигналов/ Успехи физических наук. 2007. Т. 177. № 8. С. 859 – 876.
16. Ахметханов Р. С., Шульженко А. А. Электропроводность и фрактальные свойства углеродных нитей / Проблемы машиностроения и надежности машин. 2019. № 6. С. 85 – 91.
17. Кабалдин Ю. Г., Аносов М. С., Шагагин Д. А. и др. Оценка устойчивости структурного состояния металлических материалов при их деформации на основе подходов нелинейной динамики и фрактального анализа / Успехи современной науки. 2016. Т. 4. № 9. С. 100 – 107.
18. Klapetek P., Nečas D., Anderson Ch. Руководство пользователя. wyddion. <http://gwyddion.net/download/user-guide/gwyddion-user-guide-en.pdf> [процитировано 11 апреля 2023]. P 58 – 65 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-4-58-65
2. Tyumentsev V. A., Fazlitdinova A. G. Investigation of the structure of fibrous carbon materials by X-ray diffractometry / Industr. Lab. Mater. Diagn. 2019. Vol. 85. N 11. P 31 – 36 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-11-31-36
3. Bitkina O. V., Bitkina E. V. Analysis of technological residual stresses arising in multilayer composite panels with an asymmetric structure of the composite package in thickness / Izv. Samar. NTs RAN. 2012. Vol. 14. N 4(2). P 561 – 567 [in Russian].
4. Antonov V. M., Al-Nakdi I. A. Influence of reinforcement on the nature of stresses in a sandy base / Vestn. Nauki Obrazov. Sev.-Zap. Rossii. 2020. Vol. 20. N 1. P 20 – 27 [in Russian].
5. Matvienko Yu. G., Vasiliev I. E., Chernov D. V. Study of the kinetics of destruction of a unidirectional laminate using acoustic emission and video recording / Industr. Lab. Mater. Diagn. 2019. Vol. 85. N 11. P 45 – 61 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-11-45-61
6. Nesteruk D. A., Vavilov V. P. Thermal control and diagnostics. Textbook for training I, II, III level specialists. — Tomsk: Izd. TPU, 2007. — 104 p. [in Russian].
7. Moiseichik A. E., Moiseichik E. A. Fundamentals of thermal control of load-bearing structures using deformation heat generation / Nerazrush. Kontrol' Diagn. 2014. N 3. P 3 – 19 [in Russian].
8. Moiseichik A. E. Research and development of a method of thermal non-destructive testing of steel structures based on the mechanism of deformation heat generation. Doctoral Thesis. — Novosibirsk, 2018. 377 p. [in Russian].
9. Robinson A. F., Dulieu-Barton J. M., Quinn S., et al. A Review of Residual Stress Analysis using Thermoelastic Techniques / 7th International Conference on Modern Practice in Stress and Vibration Analysis IOP Publishing. Journal of Physics: Conference Series. 2009. 181 (012029). — 8 p.
10. Daiki Shiozawa, Takahide Sakagami, Yu Nakamura, et al. Fatigue Damage Evaluation of Short Carbon Fiber Reinforced Plastics Based on Phase Information of Thermoelastic Temperature Change / Sensors. 2017. N 17. P 1 – 9.
11. Kenzhaliev B. K., Chernoglazova T. V., Mofa N. N., et al. Localization of plastic deformation and non-equilibrium structural deformation transformations. — Almaty: Izd. “Complex”. 2004. — 271 p. [in Russian].
12. Panin V. E., Egorushkin V. E. Deformable solid body as a nonlinear hierarchically organized system / Fiz. Mezomekh. 2011. Vol. 14. N 3. P 7 – 26 [in Russian].
13. Sambasivam S. Quinn, Dulieu-Barton J. M. Identification of the source of the thermoelastic response from orthotropic laminated composites. School of Engineering Sciences, University of Southampton, Highfield, Southampton SO17 1BJ, United Kingdom. https://www.researchgate.net/publication/240641936_Identification_of_the_source_of_the_thermoelastic_response_from_orthotropic_laminated_composites [accessed April 11, 2023].
14. Dyukina T. O. Modified correlation coefficient/ Proceedings XIX International “Analytics and data management in areas with intensive use (DAMDID/ RCDL'2017)”, Moscow, Russia, 2018. P. 10 – 13 [in Russian].
15. Pavlov A. N., Anishchenko V. S. Multifractal analysis of complex signals / Usp. Fiz. Nauk. 2007. Vol. 177. N 8. P 859 – 876 [in Russian].
16. Akhmetkhanov R. S., Shulzhenko A. A. Electrical conductivity and fractal properties of carbon threads / Probl. Mashinostr. Nadezhn. Mash. 2019. N 6. P 85 – 91 [in Russian].
17. Kabaldin Yu. G., Anosov M. S., Shatagin D. A. Evaluation of the stability of the structural state of metallic materials during their deformation based on approaches nonlinear dynamics and fractal analysis / Usp. Sovr. Nauki. 2016. Vol. 4. N 9. P. 100 – 107 [in Russian].
18. Klapetek P., Nečas D., Anderson Ch. User Guide. wyddion. <http://gwyddion.net/download/user-guide/gwyddion-user-guide-en.pdf> [accessed April 11, 2023].

REFERENCES

1. Tatus N. A., Polilov A. N., Vlasov D. D. Influence of holes on the strength reduction of composite specimens with different fiber placement / Industr. Lab. Mater. Diagn. 2022. Vol. 88. N 4.