*УДК 620.179.16*

# ВЫЯВЛЕНИЕ СКРЫТЫХ ДЕФЕКТОВ В КОМПОЗИЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ МЕТОДОМ СТОЯЧИХ ВОЛН

**© 2024 г. К.В. Федин[1,*], О.К. Марилов[2,**]**

*[1]ФГБУН ИНГГ им. А.А. Трофимука СО РАН,*
*Россия 630090 Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3*
*[2]ФГБОУ ВО «НГТУ», Россия 630073 Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20*
*E-mail: [*]FedinKV@ipgg.sbras.ru; [**]oleqmarilov@gmail.com*

Поступила в редакцию 29.11.2023; после доработки 07.04.2024
Принята к публикации 12.04.2024

В результате проведенных измерений методом стоячих волн были обнаружены скрытые дефекты внутри деталей стоп протезов для ног, изготовленных из композиционного материала. В ходе сравнения полученных амплитудно-частотных спектров целых образцов и образцов с дефектами по первым пикам, соответствующим первым изгибным модам волн, было выявлено, что значения резонансных частот дефектных образцов ниже относительно значений частот спектров целых образцов, что может говорить о том, что материал дефектных изделий может обладать пониженными значениями прочностных характеристик. Также при исследовании некоторых образцов было отмечено наличие дополнительных пиков, что говорит о появлении новых границ отражений, соответствующих появлению дефектов в исследуемых образцах. Получены карты амплитудных распределений в исследуемых образцах. Проведено предварительное сравнение с результатами исследования образцов прибором OmniScan X3 производства компании OLYMPUS, свидетельствующие о наличии повышенного количества границ отражений, а также повышенного содержания вспученностей, возникающих, вероятно, в процессе склейки изделий в дефектном образце в сравнении с более крепким образцом. Проведенный анализ подтверждает наличие возможности успешного применения метода стоячих волн как способа обнаружения скрытых дефектов в композиционном материале.

*Ключевые слова*: стоячие волны, скрытые дефекты, композиционный материал, протезы, система диагностики.

# DETECTION OF HIDDEN DEFECTS IN COMPOSITE MATERIAL USING THE STANDING WAVES METHOD

**© 2024 K.V. Fedin[1,*], O.K. Marilov[2,**]**

*[1]Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,*
*Russia 630090 Novosibirsk, Akademika Koptyuga Pr. 3*
*[2]Novosibirsk State Technical University, Russia 630073 Novosibirsk, Kirova str. 48*
*E-mail: [*]FedinKV@ipgg.sbras.ru; [**]oleqmarilov@gmail.com*

As a result of the measurements carried out using the standing waves method, the hidden defects were detected inside the prosthetic feet details made of composite material. When comparing the obtained amplitude-frequency spectra of intact samples and samples with defects based on the first peaks corresponding to the first bending wave modes, it was revealed that the values of the resonant frequencies of defective samples were lower relative to the frequency values of the spectra of intact samples. That observation indicated that the material of defective products might have reduced strength characteristics. Also, when studying some samples, the presence of additional peaks was noted, which indicated the appearance of new reflection boundaries corresponding to the appearance of defects in the research samples. Maps of amplitude distributions in the studied samples were obtained. A preliminary comparison was made with the results of examining samples using the OmniScan X3 device manufactured by OLYMPUS. The results obtained indicate the presence of an increased number of reflection boundaries, as well as an increased content of bulges, which probably arise during the process of gluing products in a defective sample in comparison with a stronger one. The analysis confirms the possibility of successfully using the standing waves method as a method for detecting hidden defects in composite material.

*Keywords*: standing waves, hidden defects, composite material, prostheses, diagnostic system.

**DOI:** 10.31857/S0130308224040028

## ВВЕДЕНИЕ

На этапе тестирования прочностных характеристик изделий при циклически повторяемой нагрузке на стопы протезов для ног, изготавливаемые из композиционного материала, существует проблема неоднородности получаемых результатов: ряд изделий ломается, выдерживая нагрузку в количестве ~ 1 000 000 повторений, ряд — на порядок меньше. Так как каждая конкретная деталь стоп изготавливается небольшими партиями из пластов, вмещающих в себя порядка 50 изделий, столь существенные различия в показателях выдерживаемой нагрузки на этапе тестирования на

прочность могут говорить о проблемах, существующих в технологической цепочке и приводящих к подобным неоднородностям в результатах.

Данная проблема может быть озвучена как проблема диагностики изделий на всех этапах их изготовления с целью выявления и локализации возможных дефектов и асимметрии в исследуемых характеристиках, визуально неразличимых невооруженным глазом, для обеспечения требований к качеству и безопасности их эксплуатации.

Дефекты, определяемые в композиционных материалах, могут включать в себя: трещины, расслоения, инородные включения, полости и т.д. Для обнаружения дефектов в композиционных материалах возможно использование различных методов неразрушающего контроля: акустические, оптические, тепловые, радиационные, магнитные и др. [1].

Например, теневой ультразвуковой метод неразрушающего контроля заключается в следующем: излучающий преобразователь подает волны на исследуемый объект контроля, проходя который, низкочастотные волны попадают на принимающий преобразователь, расположенный соосно с излучающим. Различают амплитудный и временной теневые методы прохождения. Амплитудный теневой метод основан на измерении амплитуды ультразвуковой волны, прошедшей через объект. Если на пути волны встречается дефект, амплитуда волны либо увеличивается, либо уменьшается, а также сопровождается появлением дополнительных значений резонансных частот, которым соответствуют характерные пики. Временной теневой метод основан на измерении времени, которое требуется ультразвуковой волне для прохождения через объект: если на пути волны есть дефект, то время прохождения увеличивается.

К преимуществам теневого ультразвукового метода можно отнести: высокую точность и чувствительность к дефектам, возможность проведения испытаний объектов без их разрушения или остановки производства, возможность проверки объектов в труднодоступных местах, однако могут возникнуть проблемы, связанные с невозможностью точно определить глубину залегания дефекта, необходимостью наличия специализированного оборудования и навыков использования [2, 3].

Оптикоакустический метод неразрушающего контроля основан на принципе преобразования акустической энергии в оптическую и обратно. Он включает в себя три основных этапа: генерация источником звука акустических волн, проникающие в исследуемый объект, преобразование акустической энергии в тепловую, что приводит к локальному изменению температуры, которое, в свою очередь, вызывает изменение показателя преломления материала, детектирование изменений показателя преломления оптической системой, вызванные акустическими волнами, и преобразование их в электрический сигнал. Либо, в свою очередь, используются лазерные импульсы для генерации акустических волн. В этих системах короткий лазерный импульс фокусируется на поверхности материала, и часть энергии импульса преобразуется в тепловую энергию, которая создает акустическую волну. Эта акустическая волна затем распространяется внутри материала и может быть обнаружена с помощью оптической системы, которая измеряет изменения показателя преломления, вызванные волной.

Оптикоакустический метод имеет ряд преимуществ: оптическая система позволяет точно определить местоположение дефекта, так как она может регистрировать изменения показателя преломления с высокой точностью, оптическая система может работать в широком диапазоне температур и влажности, что делает ее весьма универсальной, сюда также можно отнести отсутствие необходимости в прямом контакте с объектом, простоту использования и возможность интеграции с автоматизированными системами.

Но у этой системы есть и недостатки. Один из них — высокая стоимость оборудования. Кроме того, оптикоакустическая система требует определенных навыков и опыта для правильной настройки и использования [4, 5].

Термографический метод неразрушающего контроля основан на анализе инфракрасного излучения, испускаемого объектом контроля. Так как термография основана на принципе, что все объекты с температурой выше 0 К испускают тепловое излучение, существует и возможность регистрировать это излучение с помощью специального оборудования — инфракрасных камер, которые преобразуют инфракрасное излучение в видимое изображение.

С помощью термографического метода можно обнаруживать следующие дефекты: обрывы и неправильная укладка армирующих волокон, неоднородности в материале, вызванные некачественной пропиткой или образованием пузырьков воздуха, неравномерное распределение смолы или наполнителя, определение границ слоев, а также различные механические повреждения — все это влияет, в частности, на скорости распространения тепловых волн в дефектных и бездефектных областях исследуемого объекта.

Преимуществами термографического метода неразрушающего контроля являются его простота, быстрота и возможность проводить контроль в режиме реального времени. Однако этот метод может быть менее чувствительным по сравнению с другими методами, такими как ультразвуковая дефектоскопия, и требует определенных навыков и опыта при интерпретации полученных данных, а также необходимость обеспечения оптического доступа к поверхности исследуемого объекта [6, 7].

Радиационные методы неразрушающего контроля основаны на использовании ионизирующего излучения для получения информации о внутренней структуре и свойствах объектов контроля. К примеру, рентгеновская дефектоскопия основана на использовании рентгеновских лучей для просвечивания объектов и обнаружения внутренних дефектов, таких как трещины, поры и расслоения.

Принцип работы рентгеновской дефектоскопии заключается в том, что рентгеновские лучи проходят через материал и взаимодействуют с его атомами. Когда рентгеновская трубка генерирует пучок рентгеновских лучей, который проходит через исследуемый объект, то при наличии дефектов внутри объекта (трещины, поры, расслоения и т.д.) рентгеновские лучи будут по-разному поглощаться в разных местах объекта, что может быть зафиксировано с помощью детектора излучения, который преобразует их в электрический сигнал.

В композиционных материалах рентгеновская дефектоскопия обычно используется для проверки качества соединения между различными слоями материала, например, для обнаружения дефектов в соединениях между углеродными волокнами и полимерной матрицей, а также для обнаружения трещин и других дефектов. Если внутри объекта есть дефект, то лучи будут больше поглощаться в этом месте, чем в местах без дефекта из-за разницы плотностей или составов в сравнении с целой частью объекта.

Радиационные методы обладают высокой чувствительностью и позволяют обнаруживать дефекты размером до нескольких микрон. Однако они также имеют ряд недостатков, включая необходимость использования источников ионизирующего излучения, что требует специальных мер безопасности. Кроме того, радиационные методы могут быть неприменимы для контроля объектов, чувствительных к ионизирующему излучению, таких как электронные компоненты или оптические элементы [8, 9].

Метод вихревого неразрушающего контроля основан на регистрации вихревых токов, возникающих в объекте контроля под воздействием электромагнитного поля. Эти токи создают собственное магнитное поле, которое может быть измерено с помощью специального датчика.

Если в композиционном материале присутствует дефект, например трещина или расслоение, то интенсивность магнитного поля в этой области будет выше по сравнению с неповрежденной частью материала. Датчик может обнаружить это изменение и определить наличие дефекта. Для определения дефекта необходимо провести измерения магнитного поля на нескольких участках изделия. Если изменение поля на одном участке значительно превышает изменение на других участках, то это может указывать на наличие дефекта. Также можно провести сравнение с эталонным образцом, имеющим известные характеристики.

К преимуществам метода относятся: высокая скорость проведения контроля, возможность контроля изделий сложной формы, высокая чувствительность, но имеется ряд недостатков, из которых самым существенным является его поверхностность, также к ним относятся: ограничения по материалу, ограничения по размерам дефекта и сложность интерпретации результатов [10, 11].

В процессе развития метода, используемого, в частности в данной работе, выяснилось, что шумовые колебания могут нести полезную информацию. Ограниченные тела, как известно, характеризуются некоторым набором собственных частот. Если в среде присутствуют вынужденные гармонические колебания, то при совпадении их частоты с одной из собственных частот исследуемого объекта наблюдаются резонансные явления, которые могут быть использованы, например, для решения задач контроля и диагностики изделий из композиционного материала, где под воздействием шумов, если в них присутствуют спектральные составляющие, совпадающие с какимилибо собственными частотами объекта, в последнем может формироваться поле стоячих волн, частота каждой из которых совпадает с одной из собственных частот. Несмотря на относительно небольшую амплитуду этих волн, разработана методика, позволяющая выделять их из шумового поля [12—15].

Для исследования собственных колебаний деталей применялся метод, основанный на выделении стоячих волн из акустических шумов. Суть метода заключается в накоплении амплитудных спектров шумовых записей, в результате чего на усредненных спектрах появляются регулярные последовательности пиков, соответствующие стоячим волнам. Далее будут представлены резуль-

таты физического моделирования стоячих волн, формирующихся в изделиях из композиционного материала с дефектами и без под действием шумового поля.

Целью применения метода, основанного на стоячих волнах, является определение возможности диагностирования присутствия скрытых дефектов внутри композиционного материала. Целью также является показать, что с помощью предлагаемого метода можно в кратчайшие сроки обнаружить дефекты, сэкономив затрачиваемые на это ресурсы и время, а при их обнаружении целесообразно задействовать альтернативные методы контроля, изучая их более предметно.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБРАЗЦЫ

В качестве объектов исследования была задействована партия деталей стоп протезов для ног, изготовленная из композиционного материала. В качестве композиционного материала исследуемых деталей выступал армированный углеволокном препрег с эпоксидной смолой, в состав которой определенным образом была замешана суспензия с нанотрубками с целью увеличения прочностных характеристик изделия.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. В качестве источника акустических шумов использовалась акустическая колонка, генерирующая «белый шум». Амплитудно-частотная характеристика колонок по паспорту работает до 20 кГц. На рис. 2 можно увидеть степень неравномерности характеристики источника белого шума. Затем передвижной приемник, в основе которого задействуется диск из пьезокерамики ЦТС-19 диаметром 2 мм и толщиной 1 мм, регистрировал шумовое поле (рис. 3). Приемник перемещался по исследуемому объекту следующей «сеткой» измерений: 2 продольные дорожки с десятью точками проходились вдоль с шагом 2 см и 2 поперечные дорожки с тремя точками — с шагом 1 см (рис. 4). Время, затраченное на получение данных в каждой точке, не превышает 10 с. Сигналы с датчика подавались на один канал двухканального цифрового осциллографа В-421 затем в цифровом виде записывались на жесткий диск персонального компьютера для последующей обработки. Далее данные заносились в разработанный командой программное обеспечение, позволяющее получить картину амплитудного распределения по полученным спектрам. Также результаты сравнивались с картинами амплитудного распределения, полученными прибором OmniScan X3 производства компании OLYMPUS.

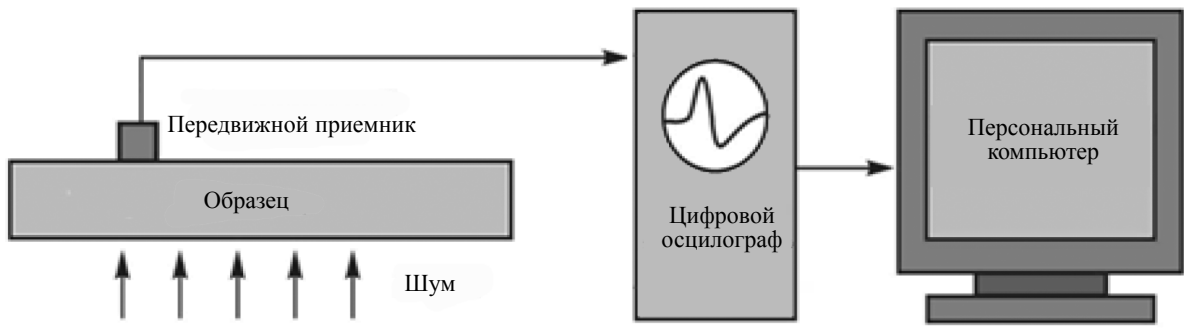


Рис. 1. Схема эксперимента.

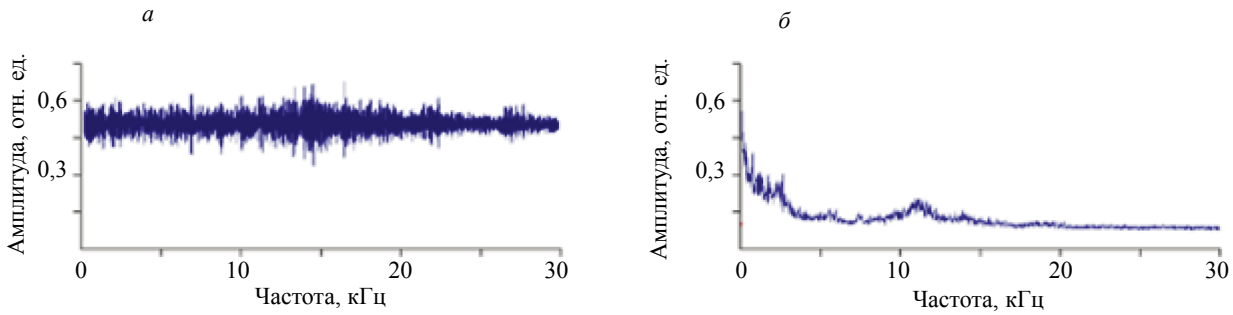


Рис. 2. Примеры амплитудных спектров электрических шумовых сигналов, подаваемых на образец (*а*), и шумовых акустических сигналов, зарегистрированных на поверхности образца (*б*).

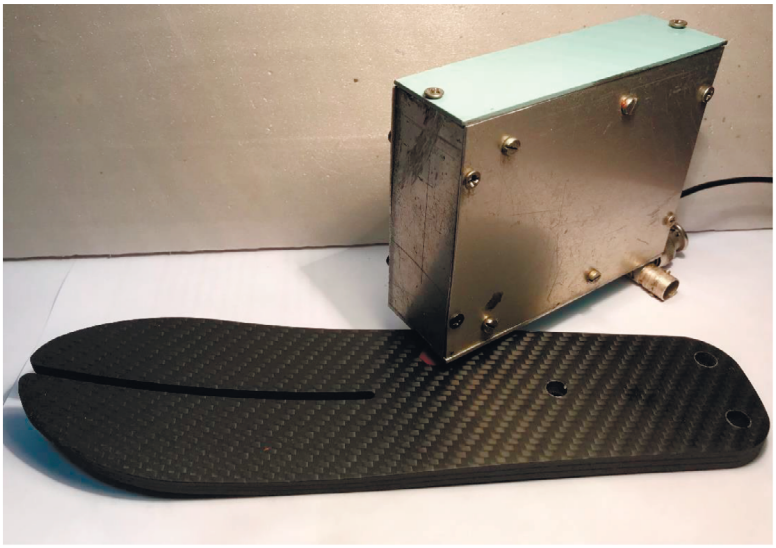

Рис. 3. Исследуемый объект (деталь стопы протеза) с пьезокерамическим датчиком.

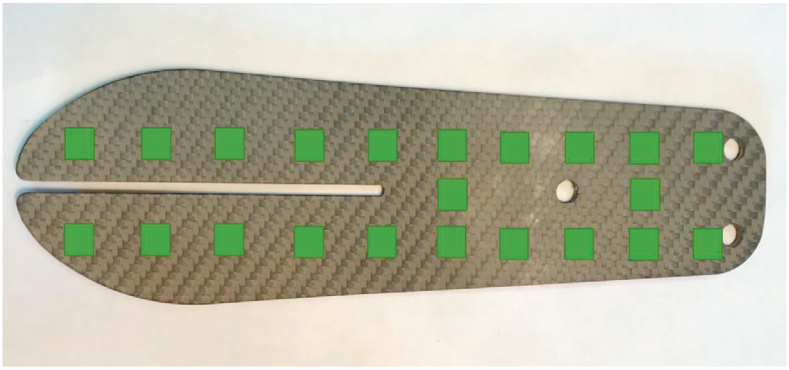

Рис. 4. «Сетка» измерений исследуемого объекта.

Метод диагностики стоячими волнами заключался в следующем:

1. Измерение целых образцов из партии:

а) регистрация шумовых записей на исследуемом объекте для выделения в них стоячих волн с использованием перемещаемого по «сетке» измерений пьезокерамического датчика;

б) разбиение шумовых записей на блоки по 65536 отсчетов (максимальное количество отсчетов в осциллографе В-421);

в) преобразование Фурье для каждого блока и усреднение полученных амплитудно-частотных спектров путем их суммирования.

2. Построение и сравнение суммарных спектров между собой с целью выявления смещения амплитудно-частотных спектров в качестве оценки однородности значений частот для целых образцов.

3. Создание трещины путем сдавливания одного целого образца тисками и изломом с помощью пассатижей до характерного хруста изделия, визуально трещина не наблюдалась.

4. Построение и сравнение суммарных спектров образца с трещиной и целого образца с целью выявления смещения амплитудно-частотного спектра и образования новых резонансных пиков в качестве оценки наличия дефектов.

5. Также повторение вышеупомянутой процедуры для образца в единичном экземпляре в качестве наглядного примера образования дополнительных значений резонансных частот при наличии дефекта в изделии. Здесь отметим, что «сетка» прохождения датчика была несколько иной ввиду различия геометрических размеров данного экземпляра с образцами из другой партии: две про-

дольные дорожки с девятью точками проходились вдоль с шагом 1 см и одна поперечная дорожка с тремя точками — с шагом 1 см.

6. Получение изображения амплитудного распределения в образце, представленном в единичном экземпляре, с оценкой размеров обнаруженных дефектов.

7. Получение изображения амплитудного распределения двух целых образцов прибором OmniScan X3 компании OLYMPUS и анализ полученной картины с целью оценки наличия возможности применимости метода стоячих волн в качестве системы обнаружения и диагностики скрытых дефектов и в качестве доказательства наличия дефектов типа нарушения сплошности в исследуемом композиционном материале.

8. Предоставление изображений дефектов непосредственно на образце, представленном в единичном экземпляре.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Далее в качестве информативных параметров, предлагаемых для контроля исследуемых объектов, будут рассмотрены амплитудно-частотные спектры и карты амплитудных распределений.

Отметим, что при постоянстве геометрических размеров, материала образцов, а также шумовых характеристик от партии к партии область возникновения пучностей стоячих волн будет проявляться на одних и тех же участках исследуемых образцов. Для локализации данных областей, в частности, и необходима вышеупомянутая «сеть» измерений. Следовательно, обозначив область пучностей для разных мод и установив в данную область считывающий пьезокерамический датчик, становится возможным получить данные с одной единственной точки, расположенной, к примеру, в центре исследуемого образца, на участке пучности стоячей волны, соответствующей первой изгибной моде, что значительно ускорит процедуру получения данных с целью локализации скрытых дефектов в крупных партиях образцов. Однако при наличии скрытых дефектов область пучностей может смещаться от образца к образцу в отдельно взятой партии. Поэтому для первого образца в отдельно взятой партии необходимо пройтись «сетью» измерений, локализуя данные области для, к примеру, первой и второй мод, а затем для последующих образцов в рамках отдельно взятой партии выделить три точки, соответствующие пучностям этих мод. Данная процедура позволяет существенно сократить процедуру получения данных до ~ 30 мин на партию из 50 деталей.

На рис. 5 приведены результаты получения амплитудно-частотных спектров для двух целых образцов. Наименования «целый_2» и «целый_3» соответствуют второму и третьему образцам, принадлежавших одной партии.

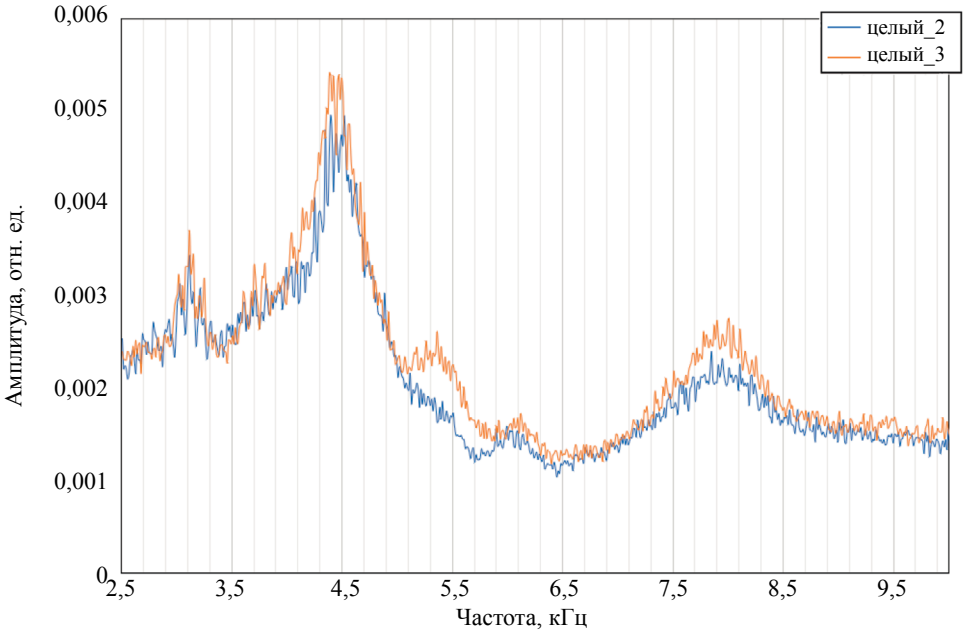


Рис. 5. Сравнение амплитудно-частотных спектров для двух целых образцов.

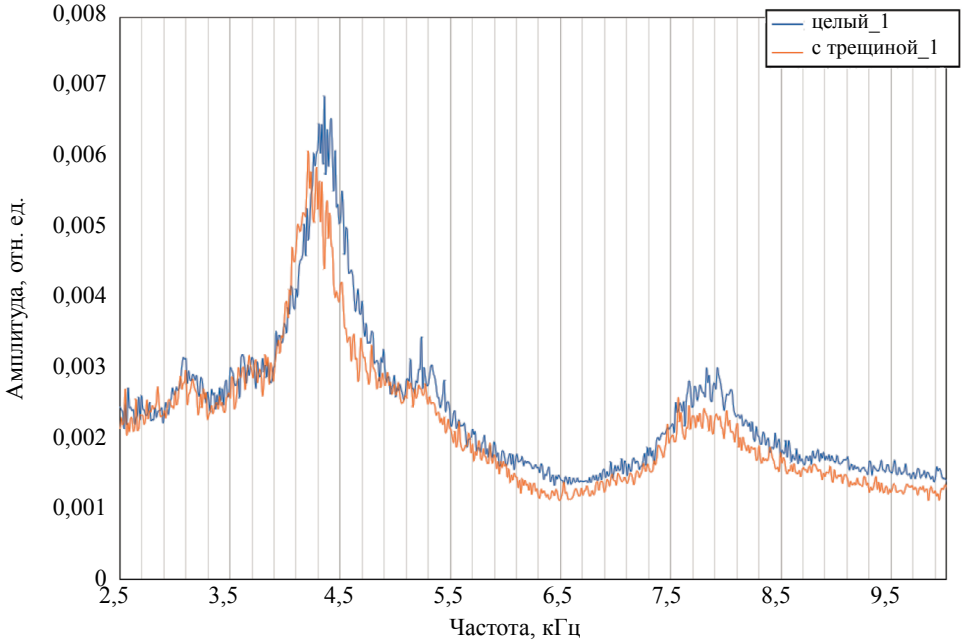


Рис. 6. Сравнение амплитудно-частотных спектров для целого образца и образца с трещиной.

На рис. 6 приведены результаты получения амплитудно-частотных спектров для целого образца и образца с трещиной. Наименования «целый_1» и «с трещиной_1» соответствуют первому образцу в целом состоянии и ему же, но с созданной трещиной, образец из той же партии, что и образцы, спектры которых показаны на рис. 5.

На рис. 7 приведены результаты получения амплитудно-частотных спектров для целого образца и образца с трещиной (единичный экземпляр).

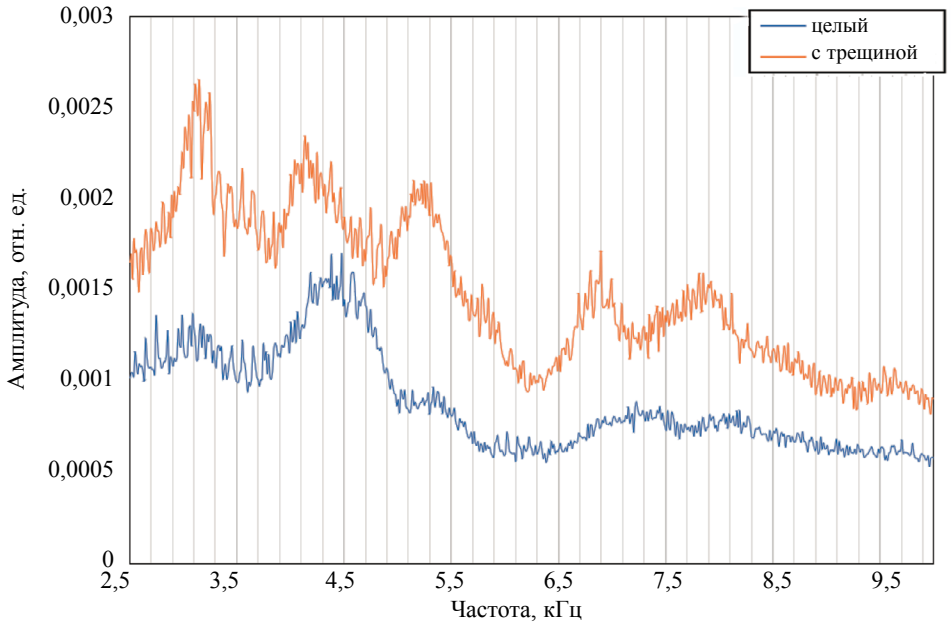


Рис. 7. Сравнение амплитудно-частотных спектров для целого образца и образца с трещиной (единичный экземпляр).

Далее была проведена следующая процедура: образец был разрезан вдоль правой продольной оси, согласно известной системе отсчета с целью наглядной демонстрации присутствия дефектов

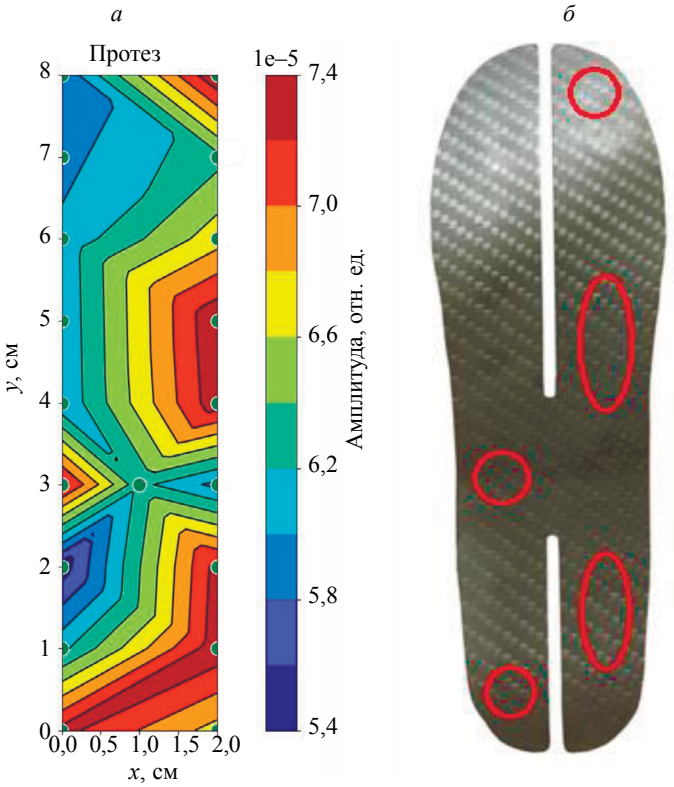


Рис. 8. Амплитудное распределение образца, представленного в единичном экземпляре: *а* — отображение областей с повышенными значениями амплитуд, соответствующих областям с дефектами в образце после излома; *б* — примерное отображение данных областей непосредственно на образце.

в исследуемом образце, т.к. до разрезания образца наличие данных дефектов не было доказано, поскольку после излома визуально они не наблюдались. Подчеркнем, что разрез был сделан вдоль правой стороны, поскольку, ссылаясь на карту амплитудного распределения на рис. 8, наибольшее содержание повышенных значений амплитудных напряжений можно было наблюдать именно с этой стороны. На рис. 10*а*—*г* представлены изображения образца после излома с визуально неразличимыми дефектами, а также с визуально различимыми дефектами вследствие процедуры разрезания.

На рис. 5 на примере сравнения суммарных спектров двух целых образцов можно увидеть разницу в высоте и ширине пиков, что может говорить о пониженной добротности и прочностных характеристиках одного образца в сравнении с другим. Однако можно предположить о таковых пониженных характеристиках у третьего образца по отношению ко второму, на что может указывать образование дополнительного пика, соответствующего проявлению дополнительной резонансной частоты вследствие возможного возникновения дополнительной границы отражения в третьем образце и отсутствующей во втором (между двумя явно видимыми пиками).

На рис. 6 на примере сравнения суммарных спектров целого образца и образца с трещиной можно сделать вывод, что смещение значений резонансных частот в меньшую сторону у одного из них может быть связано с тем, что данный образец обладает более низкой добротностью в сравнении с другим, что может указывать на то, что в объекте могут присутствовать дефекты, которые могут вызывать потери энергии, т.к. они могут приводить к увеличению потерь на трение, вибрации и т.п. и, как следствие, к пониженной прочности изделия.

На рис. 7, в свою очередь, на примере сравнения суммарных спектров целого образца и образца с трещиной в единичном экземпляре можно наблюдать возникновение дополнительных пиков, соответствующих резонансным частотам дефектного изделия, что говорит о появлении дополнительных границ отражения вследствие возникновения разрывов в его структуре.

По амплитудному распределению, изображенному на рис. 8, можно увидеть области повышенных значений амплитуд, которые могут указывать на проблемные области, в которых присутствуют скрытые дефекты. Размеры областей с наибольшими значениями амплитудных напряжений,

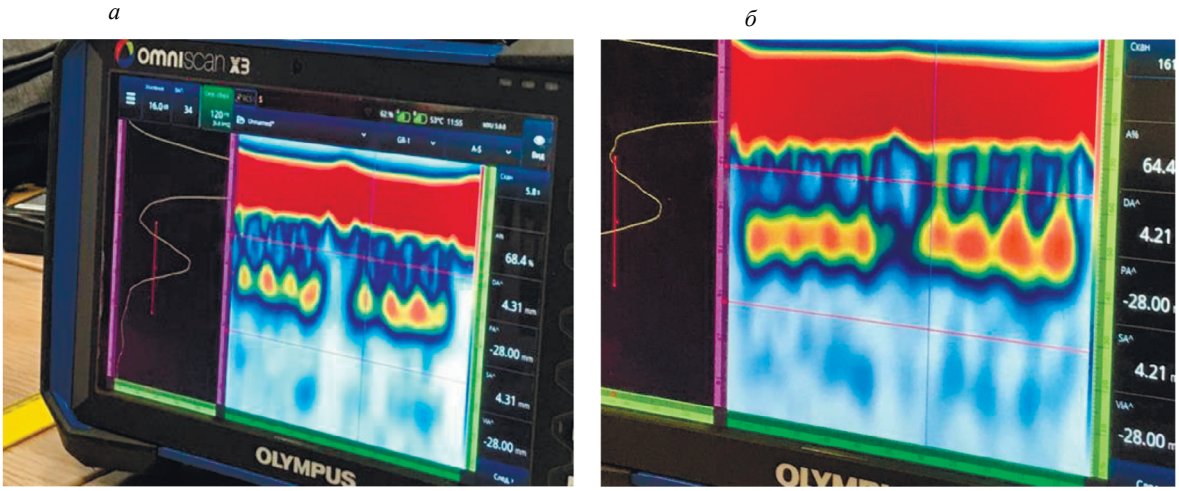


Рис. 9. Амплитудное распределение двух целых образцов, полученное прибором OmniScan X3 компании OLYMPUS: *а* — второй образец (более прочный); *б* — третий образец (менее прочный).

отмеченных красным цветом, могут говорить о размерах дефектов в исследуемом образце (порядка 1—2 см).

По амплитудному распределению, изображаемому на рис. 9, можно увидеть сравнение картин амплитудных распределений, где просматривалась пара из целых деталей стоп с одной партии: одна, как мы заведомо знали по анализу спектров, была наиболее крепкая из всех, одна — с трещиной:

– не обращая внимания на «мертвую зону» вверху картины можно сказать, что наиболее яркие области говорят о присутствии некоторых границ отражения в изделиях, причем интенсивность их выражения указывает на их больший размер и количество в менее крепком образце в сравнении с более крепким образцом;

– более обширная область синих зон внизу картины в менее крепком образце в сравнении с более крепким указывает на повышенное количество пузырей в первом, что скорее всего связано с образованием областей вспучивания в процессе склейки изделий.

На рис. 10*а*—*б* демонстрируется два изображения дефектного образца, полученного в результате процедуры излома (вид сверху и вид сбоку). Изображения приведены с целью указать на визуальную неразличимость дефектов.

На рис. 10*в*—*г* демонстрируется два изображения дефектного образца, полученного в результате процедуры излома и последующего разреза отрезным диском толщиной 1,2 мм (вид сверху и вид сбоку). На образце (вид сбоку) можно наблюдать дефекты, приблизительно локализованные в зонах согласно полученной карте амплитудных распределений на рис. 8.

## ВЫВОДЫ

В ходе исследований были проведены эксперименты по изучению композиционного материала с использованием метода стоячих волн. Целью работы было изучение возможности обнаружения дефектов в деталях стоп протезов для ног, изготовленных из композиционного материала, с помощью данного метода. В результате экспериментов было установлено, что амплитудно-частотные спектры композиционного материала имеют разное смещение в зависимости от наличия дефектов: значения резонансных частот дефектных образцов оказались ниже значений частот спектров целых образцов, что может говорить о том, что дефектный материал обладает пониженными показателями прочности. Также при исследовании некоторых образцов было отмечено наличие дополнительных резонансных пиков, что говорит о появлении новых границ отражений, соответствующих проявлению дефектов в исследуемых образцах.

Полученные карты амплитудных распределений указывают на возможность локализации дефектов в исследуемых образцах. Получение картин амплитудных распределений прибором OmniScan X3 производства компании OLYMPUS подтверждает присутствие в исследуемых

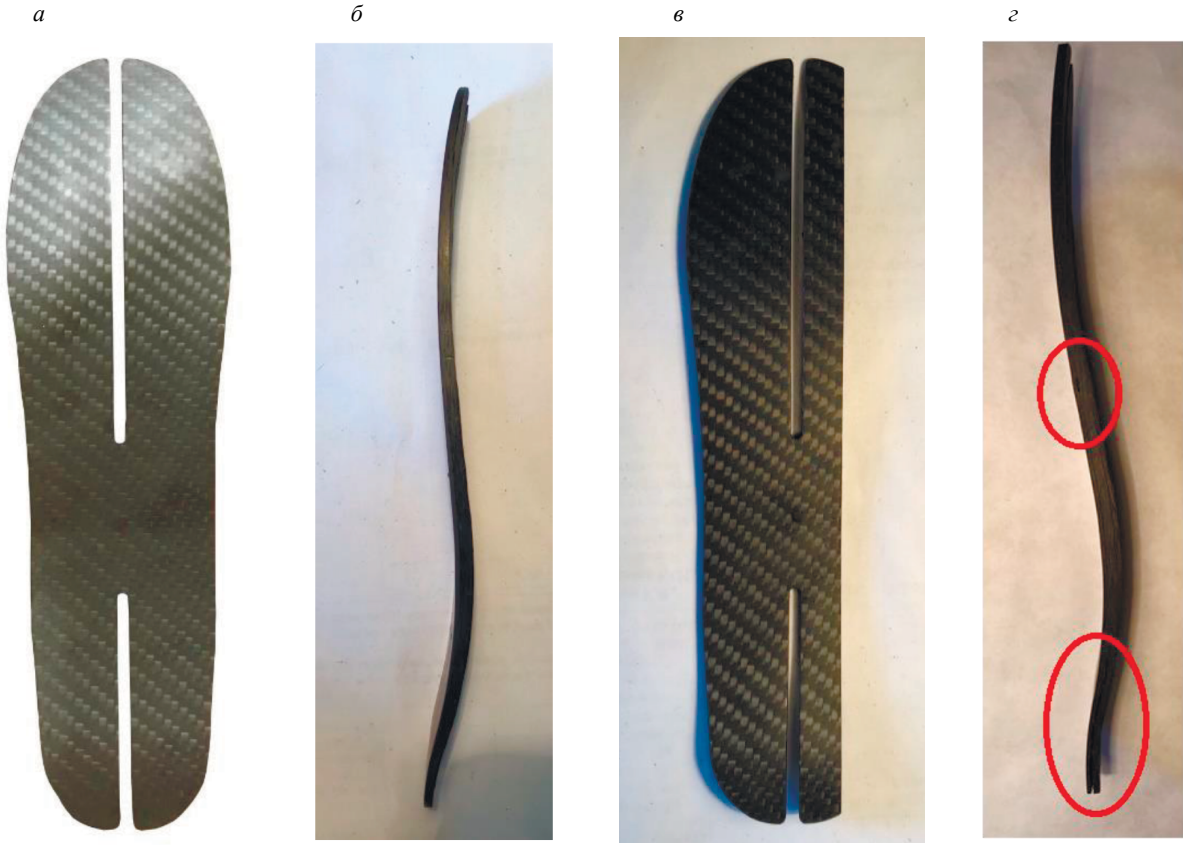


Рис. 10. Изображение образца: после излома с визуально неразличимыми дефектами (вид сверху) (*а*); после излома с визуально неразличимыми дефектами (вид сбоку) (*б*); после излома с визуально различимыми дефектами (вид сверху) (*в*); после излома с визуально различимыми дефектами (вид сбоку) (*г*).

образцах скрытых дефектов. Данные выводы могут говорить о возможности успешного применения метода стоячих волн в качестве альтернативного способа неразрушающего контроля изделий из композиционного материала, с помощью которого становиться возможным в кратчайшие сроки обнаружить и локализовать скрытые дефекты, сэкономив затрачиваемые на это ресурсы и время, а при их обнаружении целесообразно задействовать иные методы контроля, изучая их более предметно, в частности с целью выяснения характеристик искомых дефектов.

Полученные изображения после процедуры разреза дефектного образца наглядно демонстрируют присутствие в нем дефектов с приблизительной локализацией в зонах согласно карте амплитудных распределений.

Итак, для определения годности объекта целесообразно применить следующий подход: задействовать ультразвуковой прибор, который позволяет просмотреть произвольный набор деталей, к примеру, из 5-10 образцов из партии и убедиться, что образцы могут считаться в достаточной мере целыми. Затем определить точки на образце, как правило, пучности, в которых резонансная характеристика будет иметь максимальную амплитуду. Сравнить полученный спектр, где в качестве информативных параметров могут выступать значения частот и амплитуд, со спектром следующего образца, и если они совпадают (в пределах до 2 % по частоте и амплитуде по усмотрению производителя деталей), то данные образцы возможно считать идентичными.

Данный подход позволит быстро и точно определить, какой объект является годным, а какой подлежит замене или дополнительной проверке.

Работа была выполнена в рамках базового проекта FWZZ-2022-0017.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с настоящей работой.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Жарова Ю.А.* Обзор методов неразрушающего контроля изделий авиационной техники из полимерных композиционных материалов // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2014. № 1—1.

2. *Самуйлов А.О., Черепанов И.С.* Исследование полимерных композиционных материалов теневым методом неразрущающего контроля // Жизненный цикл конструкционных материалов. 2021. С. 239.

3. *Диков И.А., Бойчук А.С., Чертищев В.Ю., Далин М.А., Генералов А.С.* Опыт автоматизированного ультразвукового контроля монолитных и сотовых конструкций из ПКМ // Цифровые технологии, моделирование и автоматизация процессов неразрушающего контроля в аэрокосмической отрасли. Проблемы и перспективы внедрения. 2021. С. 157—180.

4. *Бойцов Б.В., Васильев С.Л., Громашев А.Г., Юргенсон С.А.* Методы неразрушающего контроля, применяемые для конструкций из перспективных композиционных материалов // Труды МАИ. 2011. № 49.

5. *Соколовская Ю.Г., Подымова Н.Б., Карабутов А.А.* Лазерный оптико-акустический метод количественной оценки пористости углепластиков на основе измерения их акустического импеданса // Акустический журн. 2020. Т. 66. № 1. С. 86—94.

6. *Моод З.У., Вавилов В.П., Ариффин А.К.* Ультразвуковая инфракрасная термография в неразрушающем контроле (обзор) // Дефектоскопия. 2016. № 4. С. 31—40.

7. *Вавилов В.П.* Тепловой неразрушающий контроль материалов и изделий (обзор) // Дефектоскопия. 2017. № 10. С. 34—57.

8. *Рассыхаева М.Д., Чабаненко А.В.* Новые технологии интеллектуальной дефектоскопии для аддитивного производства // Метрологическое обеспечение инновационных технологий. 2022. С. 112—113.

9. *Демидов А.А., Крупнина О.А., Михайлова Н.А., Косарина Е.И.* Исследование образцов из полимерных композиционных материалов методом рентгеновской компьютерной томографии и обработка томограмм с изображением объемной доли пористости // Труды ВИАМ. 2021. № 5 (99).

10. *Булыгин Н.Н.* Современные неразрушающие методы контроля ответственных изделий // Актуальные направления научных исследований для эффективного развития АПК. 2020. С. 211—214.

11. *Гусева Д.В., Морозов В.В.* Сравнительный анализ методов дефектоскопии композиционных материалов // XXV Туполевские Чтения (Школа молодых ученых). 2021. С. 355—358.

12. *Колесников Ю.И., Федин К.В., Каргаполов А.А., Еманов А.Ф.* О диагностике состояния конструктивных элементов сооружений по шумовому полю (по данным физического моделирования) // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2012. № 1. С. 3—11.

13. *Федин К.В., Каргаполов А.А., Колесников Ю.И.* Влияние щелевидных дефектов на поле стоячих волн, формирующихся в закрепленной балке под действием акустических шумов // Интерэкспо ГеоСибирь. 2012. Т. 1. № 2. С. 88—92.

14. *Колесников Ю.И., Федин К.В., Каргаполов А.А., Еманов А.Ф.* О диагностировании потери устойчивости опор трубопроводов по акустическим шумам // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2012. № 4. С. 59—67.

15. *Федин К.В., Климонтов В.В.* Способ определения плотности костной ткани на основе выделения стоячих волн из микросейсм периферического скелета / Патент РФ № 2750976. 2021.

## REFERENCES

1. *Zharova Yu.A.* Review of methods for non-destructive testing of aircraft products made of polymer composite materials (in Russian) // Aktual'nyye problemy gumanitarnykh i yestestvennykh nauk (Current problems in the humanities and natural sciences). 2014. No. 1—1. P. 34—38.

2. *Samuilov A.O., Cherepanov I.S.* Research of polymer composite materials using the shadow method of non-destructive testing (in Russian) // Zhiznennyy tsikl konstruktsionnykh materialov (Life cycle of structural materials). 2021. P. 239.

3. *Dikov I.A., Boychuk A.S., Chertishchev V.Yu., Dalin M.A., Generalov A.S.* Experience in automated ultrasonic control of monolithic and cellular structures from PCM (in Russian) // Tsifrovyye tekhnologii, modelirovaniye i avtomatizatsiya protsessov nerazrushayushchego kontrolya v aerokosmicheskoy otrasli. Problemy i perspektivy vnedreniya (In Digital technologies, modeling and automation of non-destructive testing processes in the aerospace industry. Problems and prospect for implementation). 2021. P. 157—180.

4. *Boytsov B.V., Vasiliev S.L., Gromashev A.G., Yurgenson S.A.* Non-destructive testing methods used for structures made of advanced composite materials (in Russian) // Trudy MAI (Proceedings of MAI). 2011. No. 49. P. 70.

5. *Sokolovskaya Yu.G., Podymova N.B., Karabutov A.A.* Laser optical-acoustic method for quantitative assessment of the porosity of carbon fiber reinforced plastics based on measuring their acoustic impedance (in Russian) // Akusticheskij zhurnal (Journal of Acoustics). 2020. V. 66. No. 1. P. 86—94.

6. *Mohd Z.U., Vavilov V.P., Ariffin A.K.* Ultrasonic infrared thermography in non-destructive testing (review) (in Russian) // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2016. No. 4. P. 31—40.

7. *Vavilov V.P.* Thermal non-destructive testing of materials and products (review) (in Russian) // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2017. No. 10. P. 34—57.

8. *Rassykhaeva M.D., Chabanenko A.V.* New intelligent flaw detection technologies for additive manufacturing (in Russian) // Metrologicheskoye obespecheniye innovatsionnykh tekhnologiy (In Metrological support of innovative technologies). 2022. P. 112—113.

9. *Demidov A.A., Krupnina O.A., Mikhailova N.A., Kosarina E.I.* Study of samples made of polymer composite materials using X-ray computed tomography and processing of tomograms depicting the volume fraction of porosity (in Russian) // Trudy VIAM (Proceedings of VIAM). 2021. No. 5 (99). P. 105—113.

10. *Bulygin N.N.* Modern non-destructive methods for control of critical products (in Russian) // Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy dlya effektivnogo razvitiya APK (Current areas of scientific research for the effective development of the agricultural industry). 2020. P. 211—214.

11. *Guseva D.V., Morozov V.V.* Comparative analysis of methods for defectoscopy of composite materials (in Russian) // XXV Tupolevskiye chteniya (Shkola molodykh uchenykh) (XXV Tupolev Readings (School of Young Scientists)). 2021. P. 355—358.

12. *Kolesnikov Yu.I., Fedin K.V., Kargapolov A.A., Yemanov A.F.* On diagnostics of the state of structural elements of structures based on the noise field (according to physical modeling data) (in Russian) // Journal of Mining Science. 2012. No. 1. P. 3—11.

13. *Fedin K.V., Kargapolov A.A., Kolesnikov Yu.I.* The influence of slot-like defects on the field of standing waves formed in a fixed beam under the influence of acoustic noise (in Russian) // Interexpo Geo-Siberia. 2012. V. 1. No. 2. P. 88—92.

14. *Kolesnikov Yu.I., Fedin K.V., Kargapolov A.A., Yemanov A.F.* On diagnosing loss of stability of pipeline supports based on acoustic noise (in Russian) // Journal of Mining Science. 2012. No. 4. P. 59—67.

15. *Fedin K.V., Klimontov V.V.* A method for determining bone tissue density based on the isolation of standing waves from microseisms of the peripheral skeleton (in Russian) / RU Patent No. 2750976. 2021.