



Федеральное государственное унитарное предприятие
«Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,
Государственный научный центр Российской Федерации



(НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ)

**XVI Всероссийская конференция по испытаниям
и исследованиям свойств материалов «ТестМат»
по тематике: «Неразрушающий контроль и техническая
диагностика в авиационной промышленности»,
посвященная 115-летию со дня рождения д.т.н.,
профессора, члена-корреспондента АН СССР Алексея
Тихоновича Туманова**

Материалы конференции

05 апреля 2024 г.

Электронное издание

Москва

2024

УДК 620.1

ББК 30.3

Н54

Редакционная коллегия:

В.В. Антипов, д.т.н. заместитель генерального директора по науке;
М.А. Горбовец, к.т.н., начальник Испытательного центра; Е.В. Николаев
к.т.н., заместитель начальника Испытательного центра

Н54 Неразрушающий контроль и техническая диагностика в авиационной промышленности:

материалы XVI Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат» (г. Москва, 05 апреля 2024 г.), [Электронный ресурс] / НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ. – М.: НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ, 2024. – 256 с. : ил. – ISBN 978-5-905217-93-7. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Систем. требования: Intel Pentium; 1,3 ГГц и выше; Windows 7/10; Adobe Reader 6.0 и выше; дисковод CD-ROM. – Загл. с экрана.

Основные тематические направления конференции:

- технологии неразрушающего контроля полуфабрикатов, деталей, конструкций и покрытий в аэрокосмической отрасли;
- цифровые технологии неразрушающего контроля;
- перспективы внедрения искусственного интеллекта и нейронных сетей в процессы неразрушающего контроля;
- автоматизация процессов неразрушающего контроля;
- использование математического моделирования для разработки технологий и средств неразрушающего контроля;
- оценка вероятности обнаружения дефектов и вопросы достоверности результатов неразрушающего контроля;
- адаптация к условиям ухода западных поставщиков дефектоскопических материалов и оборудования;
- средства и технологии неразрушающего контроля физико-механических свойств, состава, структуры и напряженно-деформированного состояния материала;
- вопросы стандартизации и методического обеспечения неразрушающего контроля;
- обучение, аттестация, сертификация в области неразрушающего контроля.

УДК 620.1

ББК 30.3

ISBN 978-5-905217-93-7

© НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ, 2024

Организационный комитет

(НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ)

Председатель:

М.А. Горбовец – к.т.н., начальник Испытательного центра

Заместители председателя:

Е.В. Николаев – к.т.н., заместитель начальника Испытательного центра

Члены организационного комитета:

Е.Б. Кочемасова – начальник управления «Корпоративные коммуникации»;

А.С. Генералов – к.т.н., начальник лаборатории № 622 «Лаборатория неразрушающих методов контроля» ;

И.А. Диков – заместитель начальника лаборатории по науке № 622 «Лаборатория неразрушающих методов контроля»;

А.Н. Головков – начальник сектора лаборатории № 622 «Лаборатория неразрушающих методов контроля»;

М.А. Далин – начальник сектора лаборатории № 622 «Лаборатория неразрушающих методов контроля»;

А.А. Демидов – начальник сектора лаборатории № 622 «Лаборатория неразрушающих методов контроля»;

В.С. Шитиков – начальник сектора лаборатории № 622 «Лаборатория неразрушающих методов контроля»;

Л.В. Прохорова – начальник отдела № 812 «Реклама и выставочная деятельность»;

И.Ю. Смирнова – заместитель начальника отдела № 812 «Реклама и выставочная деятельность»;

Д.С. Трушин – начальник сектора отдела № 812 «Реклама и выставочная деятельность»;

А.В. Бабин – ведущий специалист по связям с общественностью отдела № 867 «Связи с общественностью»;

Д.В. Жунаев – ведущий специалист отдела № 812 «Реклама и выставочная деятельность».

СОДЕРЖАНИЕ

Исследование методом компьютерной томографии образцов из композиционных и биологических материалов 8

профессор, д.т.н. В.И. Митряйкин, Е.В. Кротова, к.т.н. Т.А. Зайцева, к.ф.-м.н. О.А. Саченков

К вопросу о цифровой трансформации НК 18

к.т.н. Д.И. Галкин, д.т.н. А.Г. Ефимов

Нетривиальные задачи, решаемые методом рентгеновской компьютерной томографии 23

А.А. Демидов, д.т.н. Е.И. Косарина

Цифровые технологии в практико-ориентированной подготовке дефектоскопистов радиационного неразрушающего контроля 28

к.т.н. В.С. Кувшинников, профессор, д.т.н. Е.Е. Ковшов, Д.Ф. Казаков

Приемы повышения полноты и чувствительности автоматизированного иммерсионного ультразвукового контроля заготовок роторных деталей авиационных двигателей 40

И.С. Краснов, М.А. Далин, С.И. Яковлева, А.А. Зародова

Разработка методов компьютерной томографии для оценки механических и структурных свойств материалов под нагрузкой 55

к.ф.-м.н. О.А. Саченков, Н.В. Харин, К.Н. Акифьев, Е.О. Стаценко, П.В. Большаков

Оценка напряженно-деформированного состояния с помощью вихретокового метода неразрушающего контроля 62

С.С. Пичугин, В.С. Шитиков

Численно-цифровой подход для моделирования методом конечных элементов на основе данных цифрового двойника 70

О.В. Герасимов, Д.Э. Хамзин, к.ф.-м.н. О.А. Саченков

Неразрушающий контроль отливок из магниевых сплавов методом цифровой радиографии 89

А.В. Смирнов, д.т.н. Е.И. Косарина

Исследование трещиностойкости металлических материалов методом компьютерного зрения 89

А.Д. Монахов, к.т.н. Н.О. Яковлев

Развитие цифровой радиографии «ПАО «ОДК-Сатурн» 103

М.Б. Кель, А.С. Крупышев

Целесообразность разработки и применения СППР на базе уравнения Винера-Хопфа в процессы неразрушающего контроля в аэрокосмической отрасли 110

О.Д. Бибииков, к.т.н. О.Р. Волкова

Тепловой неразрушающий контроль полимерных композиционных материалов: разработки томского политехнического университета 116

к.т.н. А.О. Чулков, В.П. Вавилов

Неразрушающий контроль полых ячеистых конструкций 127

к.т.н. Р.В. Сафиуллин, член-корреспондент РАН, профессор, д.т.н. Р.Р. Мулюков, А.Р. Сафиуллин

Адаптация к условиям ухода западных поставщиков иммерсионных пьезоэлектрических преобразователей, используемых при автоматизированном ультразвуковом контроле 140

к.т.н. З.Е. Некалин

Ультразвуковой контроль радиусных зон монолитных конструкций из углепластика фазированными решетками 154

к.т.н. А.С. Бойчук, И.А. Диков, к.т.н. А.С. Генералов

Опыт применения волоконно-оптических датчиков в криогенном металлокомпозитном топливном баке для контроля целостности конструкции при изготовлении и испытаниях.....167

д.т.н. А.А. Склезнев, к.т.н. А.Н. Рыков

К вопросу прогнозирования динамики развития дефектов композитных конструкций перспективных авиационных комплексов.....179

В.В. Яковлева, А.П. Мишачёв, С.А. Хижняк

Контроль высоты поверхностных трещин в керамических элементах конструкций летательных аппаратов с помощью ультразвуковых волн 184

А.А. Филатов, к.т.н. А.В. Терёхин, д.т.н. С.И. Минин, Д.И. Чулков

Ультразвуковая томография металлических и полимерных композитных конструкций на основе коэффициентной обратной задачи 193

к.т.н. В.Ю. Чертищев

Акустоупругие характеристики тонких металлических пластин при одноосном нагружении 208

Ю.В. Гладышева, М.В. Малых, к.т.н. Р.Р. Исхужин, А.А. Узких, д.т.н. В.Н. Борисов

Информационная энтропия в задаче исследования повреждения материала с помощью метода акустической эмиссии 222

Г.М. Кононов, профессор, д.т.н. Г.А. Бигус, А.Б. Счастливцев

Исследование неоднородностей в композиционных конструкциях с применением метода спекл-интерферометрии: теория, методика и практическое применение 234

К.Д. Илларионов, Е.А. Прилипко, Н.В. Турбин, А.А. Больших

Влияние параметров магнитопорошкового контроля на выявление дефектов в деталях изделий аэрокосмической отрасли 244

И.С. Леднев, Е.А. Ходакова

УДК 620.1: 678.8

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ ОБРАЗЦОВ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ И БИОЛОГИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Е.В. Кротова¹; Т.А. Зайцева¹, к.т.н.;

О.А. Саченков¹, к.ф.-м.н.; В.И. Митряйкин¹, д.т.н.

COMPUTED TOMOGRAPHY EXAMINATION OF COMPOSITE SAMPLES AND BIOLOGICAL MATERIALS

Krotova Ekaterina¹, Zaitseva Tatiana¹,

Sachenkov Oskar¹, V.I. Mitryakin¹

kati_mit@mail.ru, tanechaGA@mail.ru, 4works@bk.ru, vmitryaykin@bk.ru

¹*Казанский Национальный Исследовательский Технический Университет им А. Н. Туполева – КАИ*

¹*Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI*

Аннотация

В работе представлены методы автоматизации дефектоскопии изделий из композиционных и биологических материалов на основе данных компьютерной томографии и методов математического моделирования. В работе рассмотрена постановка задачи о растяжении полосы с вырезом из неоднородного материала. Зона неоднородности предполагается, что локализована около отверстия. Рассматривалась задача о напряженно-деформированном состоянии в зависимости от двух безразмерных параметров. Первый безразмерный параметр характеризовал зону неоднородности, второй – соотношение модулей Юнга материалов. В результате была определена диаграмма для пересчета максимальных напряжений. На практике полученные результаты могут быть использованы для оценки снижения прочности изделий с вырезом на основе сканирования компьютерным томографом.

Ключевые слова:

методы неразрушающего контроля, численное моделирование, компьютерная томография, дефект материала

Annotation and keywords

Вводная часть

Развитие технологии изготовления композиционных материалов позволяет существенно повысить технические характеристики изделий. Однако методы расчета на прочность таких изделий существенно сложнее,

так как приходится учитывать не только особенности материалов, но и возможные локальные дефекты. В связи с этим интерес к методам расчета материалов с анизотропными свойствами возрастает [1–3]. Один из передовых подходов исследования неоднородных материалов связан с использованием данных компьютерной томографии. В этом случае имеется информация о параметрах и распределении материала в пространстве, что позволяет локализовать и учитывать явные и неявные дефекты. Такой подход нашел распространение не только в механике композитов [4–7], но и в области биомедицины [8].

В настоящее время существуют подходы, которые позволяют производить расчеты на основе данных компьютерной томографии [9–12], и даже производить проектирование в окружении изделия с учетом конкретного распределения материала [12, 13]. Однако, несмотря на существующий уровень развития таких методов, на практике все еще существуют точки роста. Так, наиболее трудоемкая часть большинства подходов – это первичная обработка компьютерной томографии. Чаще всего это классификация и сегментация данных, поиск дефектов на зашумленных данных. В настоящей работе представлен подход, позволяющий снизить трудозатраты при дефектоскопии изделия и локализации существующего дефекта.

Материалы и методы

Метод КТ основан на измерении ослабления рентгеновского излучения, проходящего через материалы различной плотности. В результате взаимодействия с материалами изначальный пучок рентгеновского излучения ослабляется по закону:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\mu x}, \quad (1)$$

где μ – линейный коэффициент ослабления, x – глубина проникновения, Φ_0 – поток начального рентгеновского излучения, Φ – поток рентгеновского излучения после ослабления средой. Линейный коэффициент ослабления вычисляется по следующей формуле:

$$\mu = \mu_k + \mu_{нк} + \mu_{\phi}, \quad (2)$$

где μ_k – вклад когерентного рассеяния (без изменения длины волны), $\mu_{нк}$ – вклад некогерентного рассеяния (с изменением длины волны), μ_{ϕ} – вклад фотоэффекта.

Необходимо отметить, что рентгеновское излучение ослабляется в зависимости от количества атомов материала, через которые данный поток проходит. Поэтому, если сжать исследуемое тело в H раз вдоль продольной оси, то ослабление пучка не измениться, так как число атомов материала не меняется, а просто уменьшится размер тела в H раз.

$$\mu_1 x_1 = \mu_2 x_2 = \mu_2 \frac{x_1}{H}, \quad (3)$$

$$x_2 = \frac{x_1}{H}, \quad (4)$$

$$\mu_1 = \frac{\mu_2}{H}. \quad (5)$$

Это приводит к изменению линейного коэффициента ослабления в зависимости от плотности. В свою очередь линейное ослабление изучаемого материала удобно нормировать относительно дистиллированной воды. Такая нормировка называется шкалой Хаунсфилда (#СТ). Значение #СТ для исследуемого материала вычисляется по формуле:

$$\#СТ = \frac{\mu_x - \mu_{\text{вода}}}{\mu_{\text{вода}} - \mu_{\text{воздух}}} \times 1000, \quad (6)$$

где $\mu_{\text{вода}}$ – линейный коэффициент ослабления воды, $\mu_{\text{воздух}}$ – линейный коэффициент ослабления воздуха, μ_x – линейный коэффициент ослабления исследуемого материала.

Таким образом, зная значения числа Хаунсфилда для идеального изделия, можно обнаружить изменения в плотности изучаемого объекта и сделать выводы о наличии или отсутствии дефектов. На снимках КТ плотность вещества обозначается градацией серого цвета: чем плотнее вещество, тем менее насыщеннее серый используется для его прорисовки, и наоборот. Данную зависимость можно увидеть на (рис. 1), где более плотный материал выделен красными окружностями.

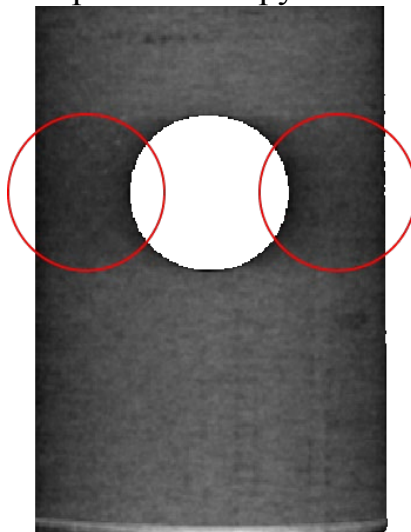


Рис. 1. КТ разреза крепления с дефектом, кругами выделены участки дефекта – материал с другой плотностью

Из множества эмпирических исследований [14, 15] была выявлена некоторая зависимость между числами Хаунсфилда и оптической плотностью, упругими константами, предельным напряжением. Данные зависимости можно записать в следующем виде:

$$\rho = a_\rho + b_\rho \cdot \#СТ, \quad (7)$$

$$E = a_E \rho^{b_E}, \quad (8)$$

$$[\sigma] = a_\sigma \rho^{b_\sigma}, \quad (9)$$

где коэффициенты a , b с соответствующими индексами определяется из эксперимента.

Рассмотрим подробнее метод сегментирования данных. Пусть бездефектным изделием называется крепление, изготовленное из одного материала с модулем Юнга E_1 , тогда крепление с дефектом называется изделие, изготовленное из двух материалов с модулями Юнга E_1 и E_2 .

Так как во время сканирования изделий при помощи КТ возникает большое количество артефактов из-за несовершенства образца и материалов, наблюдаются флуктуации значения $\#CT$. Поэтому для определения наличия дефектов было принято решение исследовать какое-то среднее значение. Для этого использовались нормализованные гистограммы значений $\#CT$ (рис. 2).

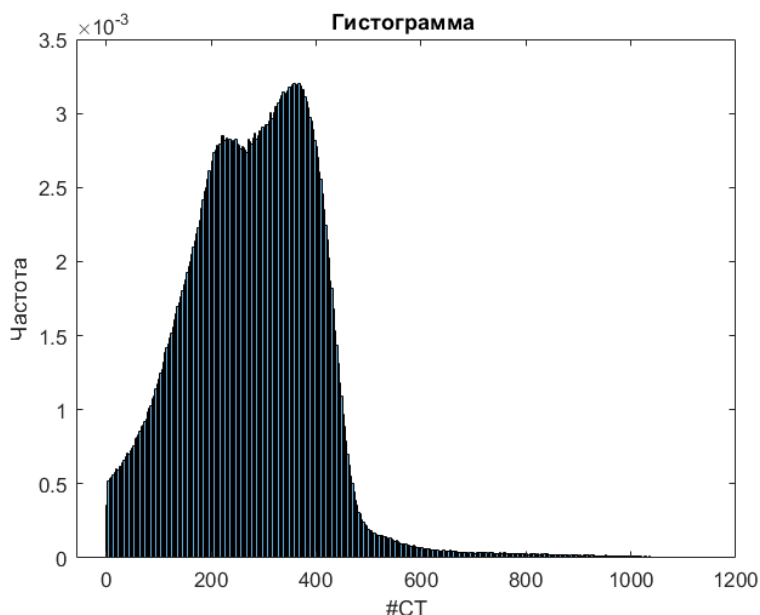


Рис. 2. Гистограмма крепления с дефектом

На гистограмме явным образом выделяются два пика, каждый из которых отвечает за материал определенной плотности, формула (7). Плотности пересчитываются в модули Юнга по формуле (8) (рис. 3).

Таким образом, наличие второго пика говорит нам о том, что по определению, введенному в начале, в исследуемом креплении наблюдается дефект.

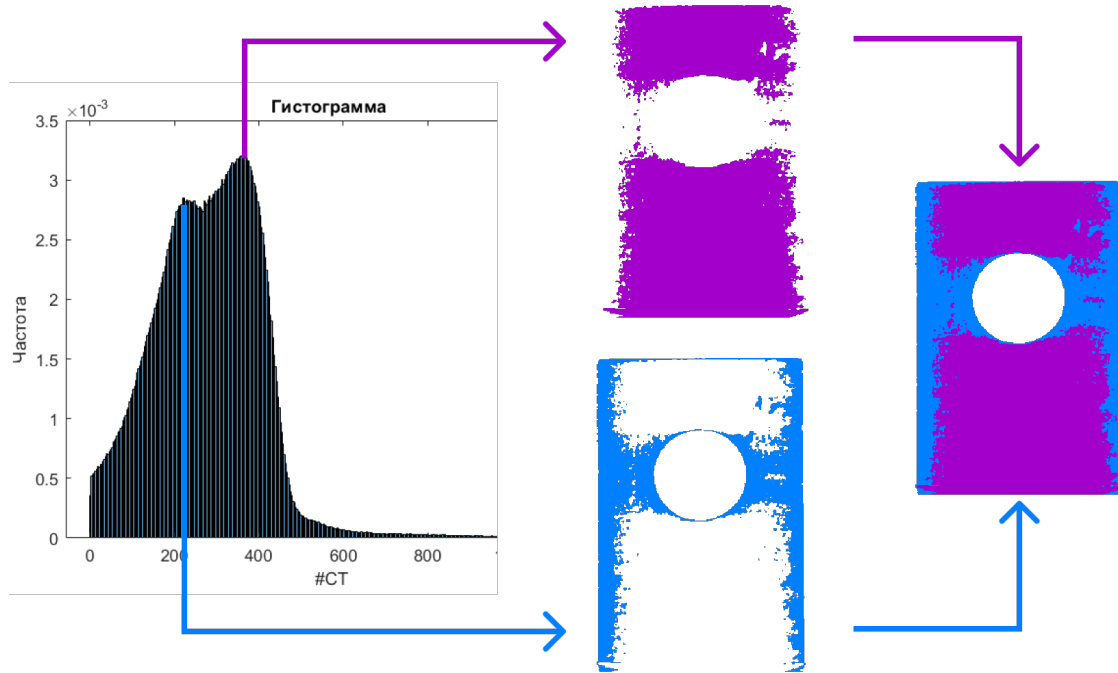


Рис. 3. Левый пик – материал с меньшей плотностью, правый пик – материал с большей плотностью (дефект)

После выявления дефекта, проводилось моделирование нагружения крепления (рис. 4).

В качестве разрешающего уравнения используется уравнение равновесия:

$$\nabla \cdot \tilde{\sigma} = 0, \quad \forall x \in V, \quad (10)$$

Чтобы связать перемещения с напряжениями, используется формула Коши:

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{1}{2}(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T), \quad \forall x \in V, \quad (11)$$

в свою очередь напряжения связываются с деформациями через закон Гука:

$$\tilde{\sigma} = \varphi(\vec{x}) \cdot \tilde{\tilde{E}} : \tilde{\varepsilon}, \quad \forall x \in V, \quad (12)$$

где

$$\varphi(\vec{x}) = \begin{cases} \lambda, & x_2 \in [-\beta 2R, \beta 2R] \\ 1, & x_2 \notin [-\beta 2R, \beta 2R] \end{cases}, \quad \forall x \in V, \quad (13)$$

Статические и кинематические граничные условия соответственно имеют следующий вид:

$$\vec{u}(x_1, -L) = 0, \quad \forall x_1 \in [-W, W], \quad (14)$$

$$\vec{\sigma} \cdot \vec{n} = P \frac{x_2}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2}} \cdot \vec{n}, \quad \vec{x} \in x_1^2 + x_2^2 = R^2, x_2 \geq 0, \quad (15)$$

$$\vec{n} = \frac{(x_1, x_2)}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2}}. \quad (16)$$

Во время моделирования варьировались следующие параметры P , λ , β , где

$$\lambda = \frac{E_1}{E_2} = \left(\frac{\#CT1}{\#CT2} \right)^{b_E}, \quad (17)$$

$$\beta = \frac{H}{2R}. \quad (18)$$

Поставленная задача решалась при помощи метода конечных элементов (МКЭ) в программе Ansys. Так как задача представляла собой задачу о плосконапряженном состоянии, то использовался восьми узловой конечный элемент с квадратичной аппроксимацией в плосконапряженной постановке (PLANE183).

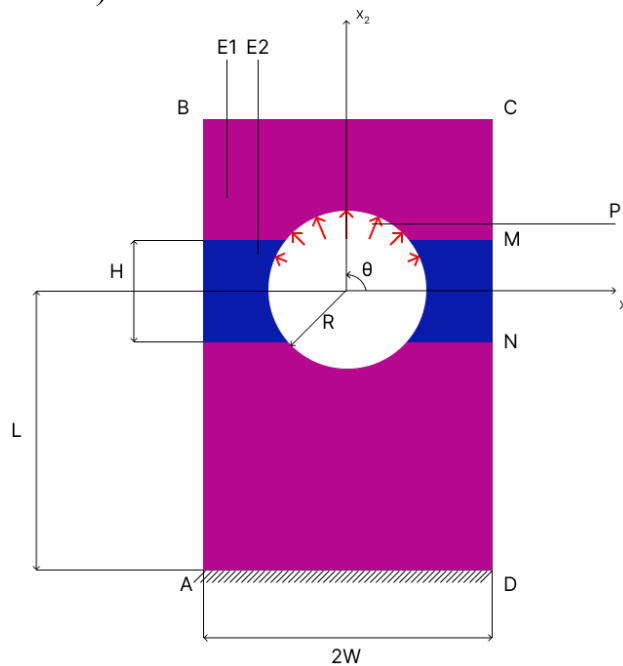


Рис. 4. Расчетная схема

Результаты

Введенные параметры варьировались в диапазонах, которые представлены в табл. 1.

Таблица 1
Пространство решений

Параметры	Минимальное значение	Максимальное значение	Шаг варьирования
P	50, Н	250, Н	50, Н
λ^{-1}	0.5	2	0.1
H	1, см	30, см	1, см

Результаты моделирования показали, что при различных параметрах наибольшее значение первое главное напряжение всегда достигает на правом и левом полукольце отверстия (рис 5).

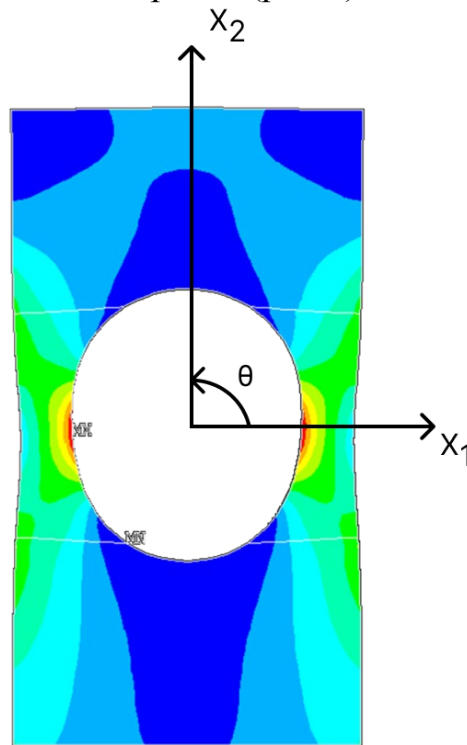


Рис. 5. Характерное напряженно деформированное состояние модели

Так как задача симметричная относительно оси x_2 в дальнейшем рассматривается только правое полукольцо отверстия.

Во время моделирования нагружения варьировались три параметра P , λ , β , где P – это прикладываемая сила к верхнему полукольцу отверстия. Поэтому необходимо было проверить гипотезу о том, что варьирования параметров не влияют на положение и направление максимального значения первого главного напряжения. Для проверки гипотезы были построены зависимости распределения значения первого главного напряжения относительно угла θ , а также проверялось направление первого главного напряжения. Всего было проведено 2320 моделирований с различными параметрами P , λ , β .

Выводы

Из полученных зависимостей можно сделать вывод, что изначально предполагаемая гипотеза оказалась верна, так как положение точки, в которой достигался максимум первого главного напряжения, всегда находилась в окрестности $\theta = 0$. А направление всегда составляло примерно 90 градусов, максимальные отклонения составляло 0.14 градуса.

Обработка данных из проведенных экспериментов позволила получить график зависимости напряжения $\sigma = \sigma(\lambda, \beta)$, который

нормализован относительно случая $\sigma = \sigma(1, \beta)$ (рис. 6). Так же черными полосами отмечены случаи, когда $E_1 = E_2$ и $H = 2R$.

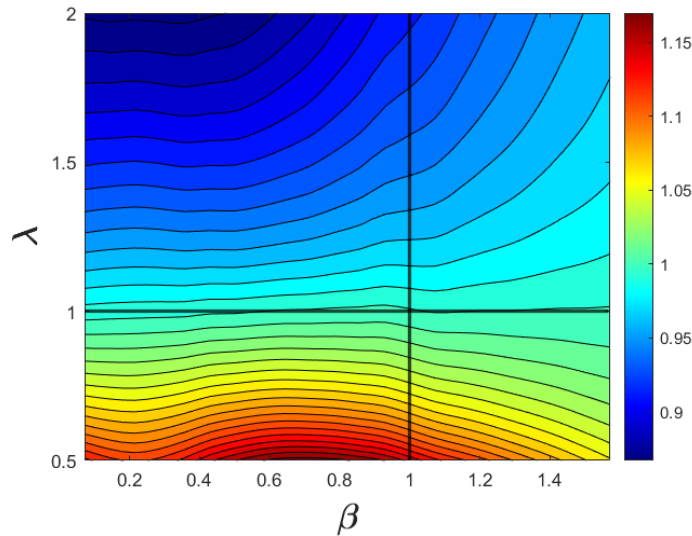


Рис. 6. Зависимость первого главного напряжения относительно параметров λ и β , нормализованная относительно первого главного напряжения, когда $\lambda=1$

Полученные зависимости показывают, что дефект может как положительно, так и негативно сказываться на несущей способности изучаемого крепления. Положительным эффектом будем называть уменьшение относительного значения первого главного напряжения, отрицательным его возрастание. Таким образом, значение σ уменьшается и увеличивается при увеличении и уменьшении значения λ соответственно. При $\lambda = 1.5$ значение σ уменьшилось на 5–7 %, при $\lambda = 2$ значение σ уменьшилось на 10–15 %. Влияние коэффициента β не столь очевидно. При $\lambda = 1 \div 1.25$ и $\beta = 0 \div 1$ отношение H к $2R$, которое равняется β , никак не сказывается на несущей способности изделия. Но с уменьшением λ при значениях $\beta = 0 \div 0.25$ наблюдается увеличение значения первого главного напряжения до 10 %, при $\beta = 0.25 \div 0.7$ до 15 %, а затем при $\beta = 0.9$ и выше вновь до 10 %.

Исследование выполнено при финансовой поддержке, выделяемой Казанскому федеральному университету по государственному заданию в сфере научной деятельности, проект № FZSM-2023-0009.

Список литературы

1. Харин Н.В., Воробьев О.В., Бережной Д.В., Саченков О.А. Методика построения репрезентативной модели по данным компьютерной томографии. Вестник ПНИПУ. Механика, 2018, т. 3, с. 95–102, doi: 10.15593/perm.mech/2018.3.10.
2. Schwen L.O., Wolfram U., Wilke H.-J., Rumpf M. Determining Effective Elasticity Parameters of Microstructured Materials. 15th Workshop on the Finite Element Method in Biomedical Engineering, 2008, pp. 41–62.

3. Kayumov R.A. Structure of nonlinear elastic relationships for the highly anisotropic layer of a nonthin shell. *Mech. Compos. Mater.*, 1999, vol. 35, no. 5, pp. 409–418, doi: 10.1007/BF02329327.

4. Kasiviswanathan V., Arockiarajan A. Analytical, numerical and experimental studies on effective properties of layered (2-2) multiferroic composites. *Sens. Actuator.*, 2015, vol. 236, pp. 380–393.

5. Mohammadi Shah M., Komeili M., Phillion A.B., Milani A.S. Toward better understanding of the effect of fiber distribution on effective elastic properties of unidirectional composite yarns. *Comput. Struct.*, 2016, vol. 163, pp. 29–40.

6. Vilchevskaya E., Sevostianov I. Effective elastic properties of a particulate composite with transversely-isotropic matrix. *Int. J. Eng. Sci.*, 2015, vol. 94, pp. 139–149.

7. Vahterova Y.A., Min Y.N., Effect of shape of armoring fibers on strength of composite materials. *TURCOMAT*, 2021, vol. 12 (2), pp. 2703–2708, doi: 10.17762/turcomat.v12i2.2295.

8. Vanlenthe G., Hagenmuller H., Bohner M., Hollister S., Meinel L., Muller R. Nondestructive micro-computed tomography for biological imaging and quantification of scaffold–bone interaction in vivo. *Biomater.*, 2007, vol. 28, no. 15, pp. 2479–2490, doi: 10.1016/j.biomaterials.2007.01.017.

9. Viceconti M., Qasim M., Bhattacharya P., Li X. Are CT-Based Finite Element Model Predictions of Femoral Bone Strengthening Clinically Useful? *Curr. Osteoporos. Rep.*, 2018, vol. 16, no. 3, pp. 216–223, doi: 10.1007/s11914-018-0438-8.

10. Semenova E., Gerasimov O., Koroleva E., Ahmetov N., Baltina T., Sachenkov O. Automatic Processing and Analysis of the Quality Healing of Derma Injury. *Biomechanics in Medicine and Biology*, 2019, vol. 831, pp. 107–113, doi: 10.1007/978-3-319-97286-2_10.

11. Silva-Henao J., Synek A., Pahr D.H., Reisinger A.G. Selection of animal bone surrogate samples for orthopaedic screw testing based on human radius CT-derived bone morphology. *Med. Eng. Phys.*, 2022, vol. 103, pp. 103786, doi: 10.1016/j.medengphy.2022.103786.

12. Донник А.М., Коссович Л.Ю., Оленко Е.С. Поведение сегмента грудного отдела позвоночника при оскольчатом переломе позвонка до и после хирургического лечения. *Биомеханический эксперимент. Российский журнал биомеханики*, 2022, т. 26, № 1, с. 25–39, doi: 10.15593/RzhBiomeh/2022.1.02.

13. Маслов Л.Б., Дмитриук А.Ю., Жмайло М.А., Коваленко А.Н. Исследование прочности эндопротеза тазобедренного сустава из полимерного материала. *Российский журнал биомеханики*, 2022, № 4, с. 19–33, doi: 10.15593/RzhBiomeh/2022.4.02.

14. Акулич А.Ю., Акулич Ю.В., Денисов А.С. Экспериментальное определение разрушающих касательных напряжений трабекулярной

костной ткани головки бедра человека. Российский журнал биомеханики, 2010, Т. 14, № 4, с. 7–16.

15. Акулич Ю.В., Акулич А.Ю., Денисов А.С., Шайманов П.С., Шулятьев А.Ф. Уточнение индивидуальной зависимости модуля упругости трабекулярной костной ткани от объемного содержания матрикса. Российский журнал биомеханики, 2014, Т. 18, № 2, с. 158–167.

УДК 620.179.1

К ВОПРОСУ О ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ НК

Д.И. Галкин¹, к.т.н.; А.Г. Ефимов¹, д.т.н.

ON THE ISSUE OF DIGITAL TRANSFORMATION OF NDT

Ph.D. D.I. Galkin¹, D.Sc. A.G. Efimov¹

galkin@niiin.ru, efimov@niiin.ru

¹АО «НИИИИИ МНПО «Спектр»

¹JSC NIIIN MNPO Spektr

Аннотация

В статье определены основные элементы цифровой инфраструктуры данных неразрушающего контроля, создание которой является необходимым условием цифровой трансформации в данном направлении.

Показано, что формирование цифровой инфраструктуры позволит использовать «скрытый» потенциал неразрушающего контроля и повысить его эффективность как для производства, так и для эксплуатации авиационной техники.

Ключевые слова:

цифровая трансформация, неразрушающий контроль, интернет вещей, индустрия 4.0

Annotation

The article defines the main elements of the digital infrastructure of non-destructive testing data, the creation of which is a necessary condition for digital transformation in this direction.

It is shown that the formation of a digital infrastructure will make it possible to use the "hidden" potential of non-destructive testing and increase its efficiency both for the production and operation of aviation equipment.

Keywords:

digital transformation, non-destructive testing, Internet of things, industry 4.0

В настоящее время многие производственные компании переключились на внедрение разнообразных цифровых систем, но явной отдачи от этих инвестиций пока нет. При этом оставшиеся «без присмотра» фундаментальные проблемы в цехах остаются нерешенными [1]. Так дело обстоит и в неразрушающем контроле (НК). Инновации в этой сфере психологически воспринимаются сразу, а внедряются со значительной задержкой, так как персонал вынужден руководствоваться действующими техническими нормативными правовыми актами (ТНПА) и нести личную ответственность за последующую безопасность эксплуатируемого оборудования, качество и правильность выполненных

работ. Поэтому любые не проверенные и не формализованные в нормативной документации для применения методы и технологии НК недопустимы [2]. В этой связи, ответственность за внедрение цифровых решений как основы всей четвертой промышленной революции должен взять на себя основной интересант по НК, в полной мере осознающий потенциальный эффект от цифровой трансформации.

Традиционно НК применяется для оценки соответствия продукции требованиям ТНПА. Результатом проведения НК является протокол, в котором фиксируется вывод о соответствии/не соответствии объекта контроля требованиям конкретных регламентирующих документов. При этом большая часть информации о наличии несложностей (допустимых), получаемой при проведении НК, не вносится в отчетные документы и не может быть использована для оценки динамики развития поврежденности в процессе жизненного цикла изделий. Отсутствие системы упорядоченного хранения данных НК также делает затруднительным применение методик по совместной обработке результатов, получаемых разными методами НК. Однако, основной проблемой НК, без решения которой не целесообразно предпринимать попытки анализа данных, является отсутствие эффективных инструментов оценки их качества. Часто недостоверная информация по результатам НК обусловлена сознательным упрощением технологии контроля, неправильной настройкой оборудования и трактовкой требований НТД, функциональной зависимостью специалистов НК от служб, для которых приоритетным является соблюдение сроков реализации проектов [статья]. Данных отклонений можно избежать, если открыть (для основного интересанта работ по НК) объективные сведения о всех этапах проводимого НК и часть из них сделать недоступными для редактирования исполнителем работ.

Таким образом, цифровая трансформация неразрушающего контроля возможна при условии создания цифровой инфраструктуры, составными элементами которой являются: модернизированные средства НК (устройства интернета вещей), реализующие передачу данных НК в соответствии с утвержденным атрибутивным составом, «умные» стандарты НК, цифровая платформа для хранения данных НК, сервисы по верификации и обработке результатов НК. Только в этом случае возможности НК, соответствующие текущему уровню развития науки и технологии, могут быть использованы для повышения культуры производства продукции авиационного назначения, а также эффективности и безопасности эксплуатации авиационной техники.

На первом этапе основному интересанту работ по НК в авиационной отрасли необходимо разработать и утвердить требования к атрибутивному составу данных НК, соответствие которому позволит использовать их в рамках единой цифровой инфраструктуры. В перечень данных должны входить сведения об объекте контроля (наименование, характеристики,

местоположение, НТД), специалисты НК, времени и месте проведения контроля, данные о средствах НК (в том числе, сведения о проверке работоспособности), режимы настройки, значения измеренных параметров оборудования при выявлении дефектов. Передача данных по протоколу позволит проводить их обработку с использованием стороннего (не связанного с производителем оборудования) программного обеспечения, обеспечить прослеживаемость измерений и подготовить результаты для последующей верификации поступающих данных НК путем сравнения с требованиями НТД [3].

После этого разработчики средств НК на основе имеющихся решений создадут инструменты по сбору данных при проведении контроля и их последующей передаче [4] в неизменяемом универсальном формате в ЦОД. Для большинства современных цифровых приборов (как ручных, так и автоматизированных) это потребует лишь незначительной модернизации.

Одновременно с этим необходима разработка «умных» стандартов, которые обеспечат сравнение поступающих данных с требованиями ТНПА. По сути, «умный» стандарт – это программный код, содержащий алгоритмы определения параметров контроля и критериев отбраковки, регламентированные конкретным нормативным документом. «Умные» стандарты обеспечат верификацию данных НК для того, чтобы в ЦОД поступали только корректно собранные и упорядоченные данные. Дополнительной возможностью станет применение «умных» стандартов в качестве цифрового ассистента при выборе (определении) параметров контроля и отбраковки в соответствии с требованиями нормативных документов, регламентирующих технологию контроля и критерии отбраковки.

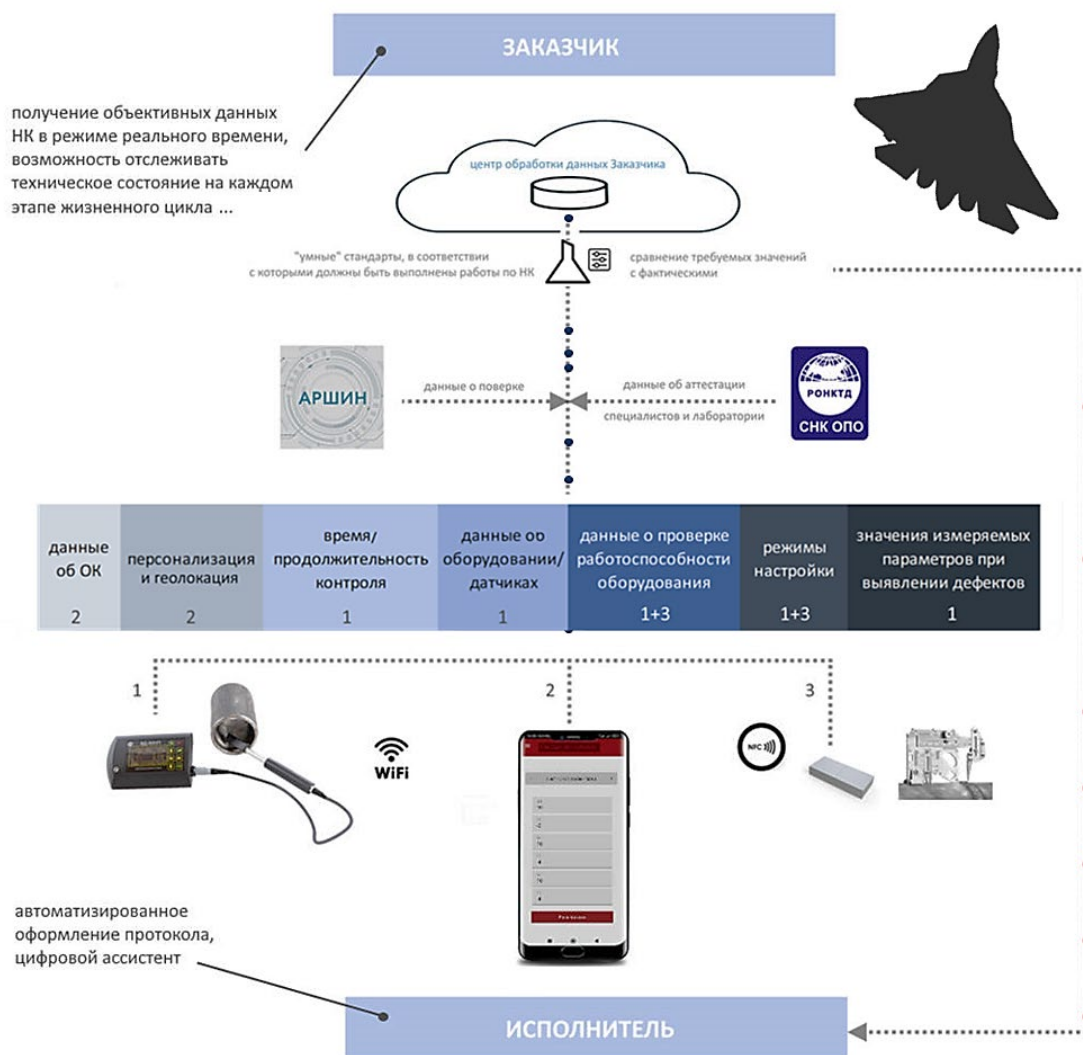
Подключение к цифровой инфраструктуре через API данных о сертифицированных специалистах/лабораториях, сведениях о поверке оборудования (ФГИС Росстандарта «Аршин») позволит на входе в ЦОД максимально эффективно провести фильтрацию данных и минимизировать поступление необъективной информации [4].

Наличие в ЦОД структурированных данных НК, «привязанных» к конкретным объектам, сделает возможным создание программных сервисов по их анализу в режиме реального времени. Сбор информации от различных типов первичных преобразователей (датчиков) и ее передача в ЦОД позволят уйти от обработки результатов контроля непосредственно на месте проведения работ. Анализ всех накопленных об объекте данных будет проводиться с целью выявления новых зависимостей между измеряемыми параметрами и состоянием объекта контроля на основе алгоритмов обработки больших данных и облачных вычислений.

Накопленные данные НК можно будет также применять на всех уровнях проектирования, производства и эксплуатации для перехода от

неразрушающего контроля к мониторингу состояния изделий, инженерных объектов, технологических процессов и экологических систем. Отдельной составляющей использования данных НК являются системы поддержки управленческих решений в отношении выбора поставщиков/подрядчиков, определения оптимальной технологии производства и режимов эксплуатации [5].

В настоящий момент на базе аппаратных и программных решений АО «НИИИИИ МНПО «Спектр» проводится тестирование основного функционала по сбору данных и верификации данных НК в процессе его проведения. Модель реализованной системы приведена на рисунке.



Реализация сбора и верификации данных НК в соответствии с универсальным протоколом: 1 – средство НК, 2 – Android-устройство, 3 – настроечный образец / мера / средство НК без возможности получения результатов контроля в цифровом виде

Решение, представленное на рисунке, включает в себя: IoT приборы НК, «умные» стандарты, применяемые в качестве цифрового ассистента, и серверное приложение для удаленного мониторинга, сбора данных и управления средствами неразрушающего контроля по протоколу TCP/IP.

Масштабирование данного решения сначала на отдельные

предприятия, а затем на отрасль в целом, позволит:

1. Минимизировать влияние «человеческого фактора» на результаты НК и повысить уверенность в качестве НК изделий авиационной техники, а также обеспечить упорядоченное хранение объективных данных НК.
2. Повысить эффективность процессов технической эксплуатации за счет внедрения риск-ориентированных подходов и предиктивной аналитики при оценке надежности авиационной техники (на основании данных о развитии дефектов в элементах конструкций и степени поврежденности материалов в процессе эксплуатации).
3. Получить объективную статистику по дефектности при производстве изделий, что позволит сделать вывод о целесообразности и способах совершенствования технологии изготовления
4. Значительно сократить срок адаптации новых специалистов НК за счет цифровых ассистентов и четкой регламентации их действий, оценка которых происходит на программном уровне.
5. Сократить время проведения НК за счет автоматизации процесса оформления отчетной документации

Список литературы

- [1] Сясько В.А. NDE 4.0. Итог десятилетия // Территория NDT, № 4. 2022. С. 30–42.
- [2] Крень А., Дендик М., Иванов В. Индустрия 4.0: трансформации в неразрушающем контроле // Наука и инновации, № 2. 2019. С. 28–32.
- [3] Галкин Д.И., Ефимов А.Г., Чесалов А.Ю. Перспективы создания цифровой инфраструктуры данных в НК // Территория NDT, № 1. 2024. С. 62–65.
- [4] Повышение эффективности производства и эксплуатации за счет формирования цифровой экосистемы неразрушающего контроля / Галкин Д.И. / Состояние и основные направления развития сварочного производства ПАО "Газпром". Тезисы XI Отраслевого совещания. пос. Развилка, 2022. С. 34.
- [5] Перспективы развития приборостроения в неразрушающем контроле / Сясько В.А., Галкин Д.И. / В сборнике: Инновации в топливно-энергетическом комплексе и машиностроении (ТЭК-2022). сборник трудов III Международной научно-практической конференции. Кемерово, 2022. С. 136–140.

УДК 620.179.16

НЕТРИВИАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ, РЕШАЕМЫЕ МЕТОДОМ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

А.А. Демидов¹

THE NON-TRIVIAL PROBLEMS OF RADIATION MONITORING SOLVED BY METHOD OF X-RAY COMPUTER TOMOGRAPHY

A.A. Demidov¹

lagazz@yandex.ru

¹*Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ)*

¹*Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute» (NRC «Kurchatov institute» - VIAM)*

Аннотация

Дано определение уникального метода компьютерной томографии, который представляет собой симбиоз радиографического радиоскопического и радиометрического методов радиационного неразрушающего контроля. Показаны преимущества рентгеновского томографии, прежде всего информативность, а также возможность определить качество сложных изделий, недоступных для прочих методов неразрушающего контроля. Показаны ограничения томографического контроля, препятствующие его широкому распространению в промышленности.

Приведено описание нескольких сложных объектов ответственного назначения, для которых обязательно проведение неразрушающего контроля. Однако ни один из методов контроля принципиально не может быть реализован. Показано, что рентгеновская компьютерная томография конкретно для каждого из объектов не только обнаруживает дефекты в труднодоступных зонах, но определяет их местонахождение, размеры и общее количество. Приведенные примеры бесспорно доказывают высокую информативность рентгеновской компьютерной томографии.

Ключевые слова.

рентгеновская компьютерная томография, реконструкция изображения, аддитивная технология, сварка, дефект

Summary

The definition of a unique computed tomography method is given, which is a symbiosis of radiographic radioscopic and radiometric methods of radiation non-destructive testing. The advantages of X-ray tomography are shown, primarily informative, as well as the ability to determine the quality of complex products that are inaccessible to other non-destructive testing methods. The limitations of tomographic control that prevent its widespread use in industry are shown.

The description of several complex objects of responsible purpose, for which non-destructive testing is mandatory, is given. However, none of the control methods can be implemented in principle. It is shown that X-ray computed tomography specifically for each of the objects not only detects defects in hard-to-reach areas, but determines their location, size and total number. These examples undoubtedly prove the high informative value of X-ray computed tomography.

Keywords:

X-ray computer tomography, image reconstruction, the additive technology, welding, defect

I. Введение

Развитие новых технологий производства авиационных материалов, таких как аддитивные технологии или создание полимерных композиционных материалов, сопровождается возникновением специфических дефектов, которые необходимо обнаруживать методами неразрушающего контроля. Широко распространенный в производстве летательных аппаратов рентгенографический неразрушающий контроль оказывается не эффективен из-за недоступности к некоторым зонам объектов контроля по причине их сложной формы. Зачастую другие виды неразрушающего контроля неприменимы к таким объектам. Внедрение в неразрушающий контроль рентгеновской компьютерной томографии (РКТ) позволяет решить эти задачи [1, 2].

II. Возможности и ограничения метод рентгеновской компьютерной томографии

Рентгеновская компьютерная томография – уникальный метод радиационного вида неразрушающего контроля. Его особенность заключается в том, что он представляет собой симбиоз радиографического, радиометрического и радиоскопического методов радиационного контроля. Посредством РКТ, с одной стороны, возможно качественное обнаружение аномалий в контролируемом объекте, с другой стороны, их измерение. Поскольку рентгеновское томографическое изображение трехмерно, то по сравнению с радиографией объем полезной информации об объекте контроля значительно больше. Сочетание перечисленных

методов делает рентгеновскую компьютерную томографию, с одной стороны универсальной, с другой стороны, сложной и весьма трудоемкой [3].

Рентгеновская компьютерная томография – достаточно дорогой метод неразрушающего контроля, отличающийся невысокой производительностью. Его основным преимуществом является высокая информативность результатов. Для ее оценки необходима разработка и внедрение количественных характеристик, позволяющих оценить качество и точность результатов томографии. Для изображения, в том числе томографического, мерой полезной информации являются контраст, четкость и ОСШ [4–6]. Контраст – разница уровней серого между фоновым и аномальным участками изображения. Четкость (пространственное разрешение) характеризуется тем, что на изображении отдельно различимы близко расположенные мелкие элементы. При воспроизведении мелких элементов контраст их изображения из-за шумовых процессов снижается иногда настолько, что они становятся неразличимы. В программном обеспечении РКТ предусмотрены опции, которые дают возможность обеспечить получение объемного изображения ОК и получить информацию о его состоянии в любом сечении.

III. Компьютерная томография сложных объектов, недоступных другим методам

НК (примеры)

1. Фланец из титанового сплава, выполненный по аддитивной технологии. Проведение стопроцентного рентгеновского контроля с использованием радиографической пленки требуется как минимум шесть экспозиций: три экспозиции на цилиндрическую часть и три экспозиции на собственно фланец, причем в мертвой зоне остаются острые клинья на цилиндрической части объекта и галтель в зоне перехода от фланца к цилиндрической части [7, 8]. Метод рентгеновской компьютерной томографии дает возможность получения изображения в конкретном сечении.

2. Ампулы представляют собой две полусферы из жаропрочного сплава, сваренные между собой электронно-лучевой сваркой на подложке из вольфрама. Для традиционной пленочной радиографии такая задача принципиально не выполнима. Радиационное изображение подложки из вольфрама с высоким коэффициентом ослабления рентгеновского излучения делает невидимым изображение сварного шва, выполненного из жаропрочного сплава с коэффициентом ослабления излучения значительно ниже [9–11].

3. Вал из титанового сплава, армированный углеродными волокнами. Это – уникальная возможность рентгеновской компьютерной томографии,

так как получение подобной информации методом традиционной рентгенографии принципиально невозможно [8, 12].

4. Контроля сварных соединений темплетов. Рентгеновская компьютерная томография фрагмента контрольного сварного соединения показала преимущество перед радиографией, предоставив информацию о размерах дефектов и об их местоположении в многослойном сварном шве [13–15].

IV. Заключение

Итак, РКТ обладает уникальной возможностью стопроцентного контроля объектов сложной формы. Однако, одной из основных проблем, которая требует проведения исследований и затрудняет внедрение метода РКТ в производственную практику, являются:

- дефицит томографических систем в целом и их отдельных составляющих, как например источников излучения, а также их высокая стоимость и металлоемкость;
- отсутствие нормативных документов, регламентирующих применение РКТ
- отсутствие общепринятых подходов или утвержденной процедуры оценки информативности результатов РКТ;
- необходимость квалифицированного персонала, эксплуатирующего системы РКТ.

Литература

1. ASTM E 1695. Standard Test Method for Measurement of Computed Tomography (CT) System Performance, 2020. 13 p.
2. 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. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 27.08.2022) DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-105-113.
3. Крупнина О.А., Косарина Е.И., Михайлова Н.А., Демидов А.А. Информативность результатов контроля изделий из металлических материалов методом рентгеновской компьютерной томографии // Вестник МЭИ. 2023. № 1. С. 155–165. DOI: 10.24160/1993-6982-2023-1-155-165.
4. Ингачева А.С., Шешкус А.В., Чернов Т.С., Лимонова Е.Е., Арлазаров В.В. Рентгеновский Компьютерный томограф – новый инструмент в распознавании // Труды ИСА РАН. 2018. Спецвыпуск, С. 90–95.

5. Krumm M., Kasperl K., Franz M. Reducing Non-linear Artifacts of Multi-material Objects in Industrial 3D Computed Tomography // NDT & E International. 2008. Vol. 41. No. 4. P. 242–251.
6. Трофимов О.Е., Лихачев А.В. Сравнение некоторых алгоритмов томографической реконструкции в конусе лучей // Сибирский журнал индустриальной математики. 2008. Т.11. № 3. С.126–134.
7. Сироткин О. С. Современное состояние и перспективы развития аддитивных технологий // Авиационная промышленность. 2015, № 2. С. 22–25
8. Шишковский И. В. Основы аддитивных технологий высокого разрешения. СПб.: Питер, 2015. 348 с.
9. Крылов С.А., Егоров Е.В., Макаров А.А., Дружнов М.А. Освоение лигатур на основе хрома при выплавке жаропрочных никелевых сплавов и сталей // Труды ВИАМ. 2021 № 1 (95). Ст. 02. (дата обращения 26.08.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-13-22.
10. Кузьмина Н.А. Ростовые структурные дефекты в монокристаллах никелевых жаропрочных сплавов// Авиационные материалы и технологии 2022 № 3. С.15–26 (дата обращения 01.09.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-15-26.
11. Чернышов, Г.Г. Основы теории сварки и термической резки металлов. М.: Академия, 2010. 208 с.
12. Ильин А.А., Колпачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник. М.: ВИЛС–МАТИ, 2009. 520 с.
13. Каблов Е.Н., Бунтушкин В.П., Базылева О.А. Высокотемпературные конструкционные материалы на основе алюминидов // 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007. Юбилейный научно-технический сборник / под общ. ред. Е.Н. Каблова, М.: ВИАМ, 2007. С. 65–69
14. Моисеенко, В. П. Материалы и их поведение при сварке. М.: Феникс, 2009. 304 с.
15. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Свиридов А.В., Грибков М.С. Особенности электронно-лучевой сварки жаропрочных сплавов ЭИ698 ВД и ЭП178-ИД со сталью 45 // Труды ВИАМ. 2020. № 9 (91). Ст. 01. (дата обращения 12 .08.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-9-3-14.

УДК 004.946:620.179.152:378.046.4

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ ПОДГОТОВКЕ ДЕФЕКТОСКОПИСТОВ РАДИАЦИОННОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

В.С. Кувшинников¹, к.т.н.; Е.Е. Ковшов¹, д.т.н.; Д.Ф. Казаков¹

DIGITAL TECHNOLOGIES IN PRACTICE-ORIENTED TRAINING OF RADIATION NON-DESTRUCTIVE TESTING FLAW DETECTORS

V.S. Kuvshinnikov¹, Can. of Sci. (Engineering); E.E. Kovshov¹, Dr. of Sci. (Engineering), Professor; D.F. Kazakov¹

KuvshinnikovVS@atomrus.ru; KovshovEE@atomrus.ru; KazakovDF@atomrus.ru

¹*Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторский институт монтажной технологии – Атомстрой» (АО «НИКИМТ – Атомстрой»)*

¹*Joint Stock Company «Research and Development Institute of Construction Technology – Atomstroy» (JSC «NIKIMT – Atomstroy»)*

Аннотация

Целью исследования является разработка прикладного программного обеспечения с VR-технологией для увеличения числа подготавливаемых специалистов (дефектоскопистов) по радиационному неразрушающему контролю за счёт снижения удельной нагрузки на радиографические лаборатории при сохранении объёмов практических занятий, приобретаемых компетенций и формируемых профессиональных навыков. Исследованы физические и технологические аспекты, выполнены моделирование, алгоритмизация и программная реализация VR-симулятора. Приведены результаты апробации с интеграцией практических занятий в VR-симуляторе промышленной радиографии.

Ключевые слова

моделирование, цифровые технологии, виртуальная реальность, программный симулятор, рентгеновское изображение

Abstract

The aim of the research is to develop applied software with VR technology to increase the number of trained specialists (flaw detectors) in radiation non-destructive testing by reducing the specific load on radiographic laboratories while maintaining the volume of practical training, acquired competencies and formed professional skills. The physical and technological aspects are investigated, modeling, algorithmization and software implementation of the VR simulator are performed. Testing results with the

integration of practical exercises in the VR simulator of industrial radiography are presented.

Keywords

modeling, digital technologies, virtual reality, software simulator, X-ray image

Введение

Развитие отраслей промышленного производства связано с планомерным процессом усовершенствования известных методов контроля, а также с созданием и развитием новых видов и методов неразрушающего контроля, требующих инновационных подходов к обучению. В настоящее время вычислительная техника надёжно зарекомендовала себя, как полезный и эффективный инструмент в образовании. Мировая практика наглядно демонстрирует, что на сегодняшний день применение информационных технологий весьма актуально в обучении персонала различным рабочим и инженерным профессиям [1, 2].

Образовательные технологии в последние годы развиваются в направлении цифровизации, повышения доступности и удобства для их конечных потребителей. Это прежде всего связано с тем, что на рынке труда спрос на специалистов того или иного профиля динамично меняется, что обуславливает повышение их квалификации и профессиональной переподготовки с применением практико-ориентированного обучения по различным образовательным программам. Под доступностью понимается минимизация времени, затрачиваемого на освоение образовательной программы с одновременной минимизацией материальных затрат.

Цифровые тренажёры на основе виртуальной реальности позволяют существенно расширить перечень решаемых при обучении задач и улучшить качество усвоения материала, задействуя зрительную, слуховую (аудиальную) и двигательную (моторную) память. Таким образом очевиден потенциал применения VR-технологий в программах подготовки технических специалистов для специальностей, сопряженных с профессиональной опасностью и высокими требованиями к компетенциям и трудовым навыкам сотрудников.

Неразрушающий контроль (НК) играет важную роль в современном промышленном комплексе. В настоящее время технологии неразрушающего контроля активно модернизируются и обновляются в рамках концепции NDT 4.0 [1]. Совершенствование технического оснащения специалистов не может происходить отдельно от усовершенствований в программах их подготовки и переподготовки. В процессе исследований выявлен ряд недостатков широко распространённого аудиторного метода обучения НК [1].

В ходе обучения и контроля знаний, как правило, используются образцы, выполненные в металле и физическое, действующее технологическое оборудование. При этом основной задачей является повышение эффективности обучения и контроля знаний обучающегося за счет сокращения материальных и временных затрат на весь цикл обучения, благодаря использованию, в первую очередь, цифровых образовательных ресурсов в виде подготовленных и загруженных в персональный ЭВМ дидактических материалов, цифровых двойников объектов контроля и технологического оборудования для их неразрушающего контроля в VR-среде.

Радиационный контроль (РК) – один из самых распространённых видов неразрушающего контроля в сфере машиностроительного производства и атомной энергетики [1–3]. В связи с этим в качестве приоритетного, с точки зрения образования в VR-среде, рассматривался радиационный вид неразрушающего контроля с радиографическим способом получения первичной информации, как один из наиболее востребованных и широко применяемых в промышленности (рис. 1).

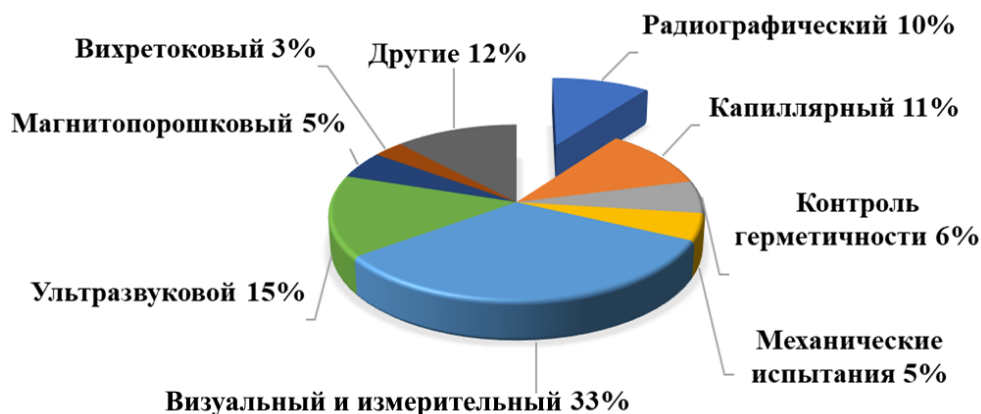


Рис. 1. Востребованность в аттестации по НК, РК и другим методам испытаний [1]

Немаловажно, что в отличие от методов визуального и измерительного, ультразвукового контроля, радиографический метод, использующий ионизирующее излучение, несет больше угроз для здоровья человека и окружающей среды, что затрудняет увеличение практической составляющей образовательного процесса и накладывает возрастные ограничения на обучаемых.

Методика исследования

Одну из составных частей цифровой образовательной среды, предназначенной для обучения и повышения квалификации специалистов НК, составляет система управления обучением, как функциональная часть цифровой образовательной среды. Среди её задач – обеспечение учащихся и преподавателей возможностью удалённого доступа к образовательным

ресурсам и сервисам. Преподаватели также получают более удобный контроль за усвоением материала и успеваемостью обучаемых, эффективный инструмент для онлайн семинаров и лекционных занятий. Платформа упрощает учёт результатов аудиторных и лабораторных занятий, включая практику в AR/VR-лабораториях. Согласно данным опроса, применение цифровых образовательных сред в задачах обучения стало на сегодняшний день объективной реальностью [1].

Планомерный перевод образовательного процесса на цифровой формат связан с трансформацией учебных планов и программ. В ходе проведённого исследования сформулированы требования к переработке ряда методических и дидактических материалов. Для подготовки специалистов к аттестации по радиационному виду НК подготовлена новая образовательная программа, в которой из 10-ти практических занятий 7 включают работу в виртуальной среде тренажёра промышленной радиографии. Сегодня технологии виртуальной и дополненной реальности находят применение не только в части теории, но и в практике НК [1, 2]. Начиная со знакомства с технологией виртуальной реальности, обучаемым демонстрируются цифровые двойники объектов контроля и вспомогательного оборудования, предлагается возможность самостоятельного выполнения ряда специально разработанных тренировочных заданий, закрепляющих теоретическую часть по мере прохождения всего курса подготовки.

В состав виртуальной РК-лаборатории [1] входят объекты, предназначенные для получения практического опыта при работе с цифровыми и плёночными детекторами. Это – цифровые двойники рентгеновской аппаратуры, объектов неразрушающего контроля, объектов фотолаборатории, РГ-шаблонов, маркеров, индикаторов чувствительности, негатоскопов, денситометров и чувствительных детекторов.

Таким образом с помощью VR-системы в виде симулятора решается задача проведения практических занятий в помещении, оборудованном системой виртуальной реальности (виртуальной лаборатории). При этом в полной мере могут быть оценены такие важные аспекты действий обучаемого, как: соблюдение корректной и безопасной последовательности работ при выполнении контроля; корректный выбор индикаторов и маркеров; правильный выбор схемы контроля объекта; корректное размещение и позиционирование, как объекта контроля, так и источника рентгеновского излучения; соблюдение требований правил безопасности при работе с излучателями ионизирующего излучения; контроль соблюдения требований к срокам поверки оборудования; и другие аспекты, влияющие на эффективность и безопасность труда, а также – успешное прохождение аттестационных испытаний.

VR-симулятор направлен на предоставление доступной практики при переобучении специалистов согласно новым требованиям и

стандартам нормативно-технической документации, например, стандартам серии ISO [1].

Практическое занятие в виртуальной РГ-лаборатории проходит в несколько этапов.

На предварительном этапе составляется новая или изучается ранее разработанная маршрутно-операционная и/или технологическая карта, осуществляется выбор контролируемого образца, рентгеновского аппарата, схема контроля объекта (рис. 2).



Рис. 2. Выбор контролируемого образца [1]

Подготовительный этап включает определение таких параметров, как напряжение, ток анода и время экспозиции. Вручную (с использованием моторной памяти) проводится размещение виртуального объекта контроля, маркеров и индикаторов, настройка штатива рентгеновского аппарата (рис. 3).

В ходе подготовительного этапа обучаемый демонстрирует знания теории и практику работы с технической документацией по объекту контроля, рентгеновскому аппарату и детектору, умение выбрать сочетание параметров и рассчитать время экспозиции в соответствии со схемой контроля.

Далее проводится экспонирование с получением изображения на виртуальном детекторе, а, в случае использования фотопленки в качестве виртуального аналогового детектора, требуется взаимодействие с виртуальной проявочной машиной.



Рис. 3. Элементы настройки экспозиции [1]

При этом контролируется режим химической обработки фотоматериала, проверяется неукоснительное соблюдение техники безопасности при работе с объектами повышенной опасности и травматизма. Пример индикатора закрытия рентгенозащитной двери приведен на рис. 4.



Рис. 4. Индикаторы соблюдения требований безопасности [1]

На заключительном этапе оцениваются количественные и качественные характеристики полученного изображения с применением вспомогательного оборудования – негатоскопа и денситометра, выполняется расшифровка результатов рентгенограммы. При контроле качества рентгенограммы особое внимание уделяется контрастности полученного изображения, показателям оптической плотности на участках расчётной контролируемой толщины образца, а также общей различающей способности полученного снимка (рис. 5).

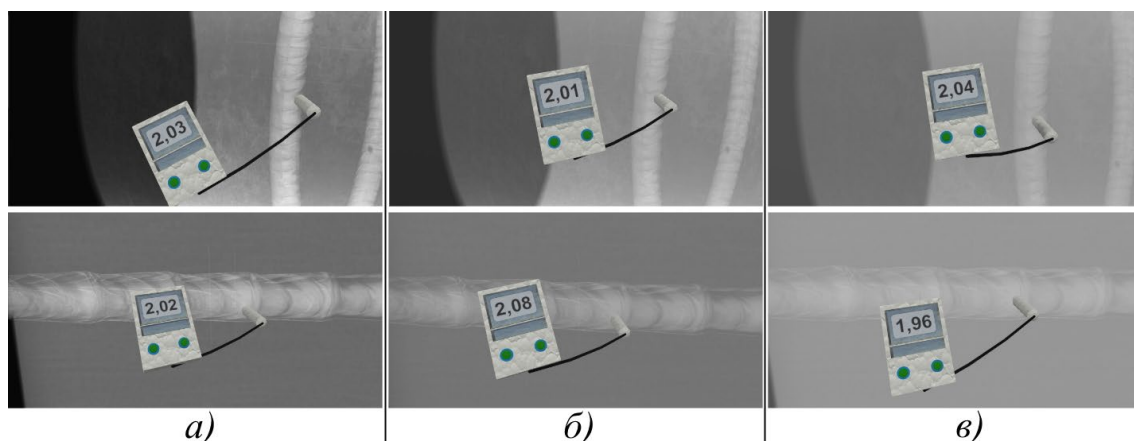


Рис. 5. Оценка оптической плотности участка смоделированных в VR-среде рентгенограмм с проволочными индикаторами чувствительности [1]

На рис. 5 показано влияние настроек рентгеновского аппарата на качественные и количественные характеристики получаемого изображения, представлены образцы стыковых сварных соединений двух типов: плоские и кольцевые. Напряжение, анодный ток и время экспозиции устанавливаются в соответствии с номограммой и параметрами технологической карты аппарата для следующих случаев: рекомендуемое напряжение (рис. 5, а), нижний предел напряжения (рис. 5, б), верхний предел напряжения (рис. 5, в).

Следует отметить, что для получения требуемых количественных и качественных характеристик рентгенограммы обучаемый выполняет расчет параметров экспонирования в соответствии с нелинейными характеристиками детекторов, определяемыми в лабораторных условиях и приводимыми в нормативной и технической документации. Ошибки в разработке технологической карты, выборе схемы контроля или в настройке параметров экспонирования проявляются на этапе контроля качества рентгенограммы. Для того, чтобы обучаемый получил представление о последствиях наиболее распространённых ошибок, VR-симулятор оснащён функцией генерации реалистичных радиографических снимков.

Экспериментальная часть

Формирование изображения производится на основе физически достоверных закономерностей [2] средствами среды интерактивной машинной графики (рис. 6) с использованием программ-шейдеров.

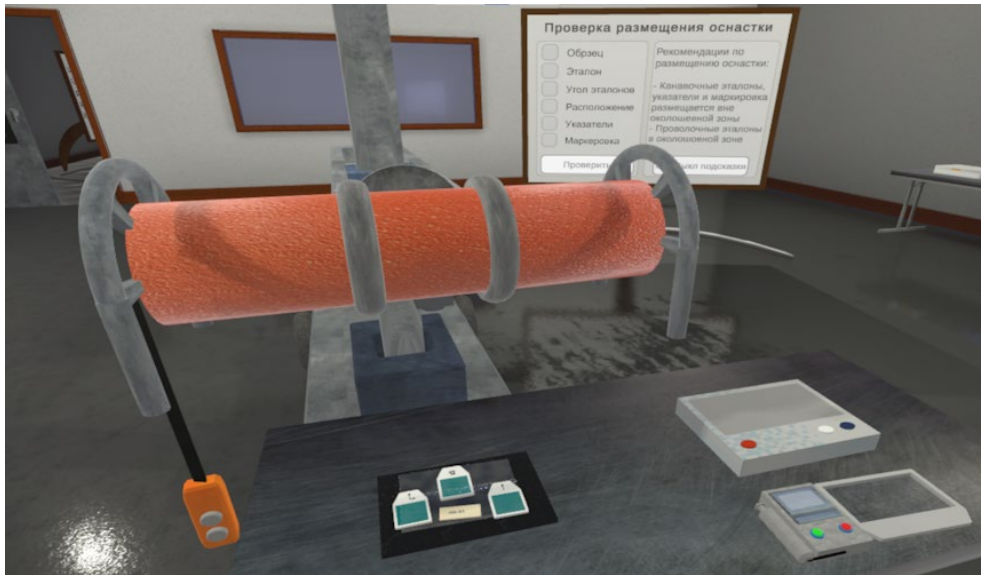


Рис. 6. Организация рабочего стола виртуальной лаборатории РК [1]

В результате поэтапной обработки вершин и фрагментов изображения производится оценка интенсивности прошедшего излучения по формуле (1).

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot \delta}, \quad (1)$$

где I , I_0 – выходная и начальная интенсивности рентгеновского излучения, e – число Непера, μ – линейный коэффициент ослабления материала, δ – толщина материала [2].

Ослабление интенсивности рентгеновских лучей в материале объекта контроля связано с несколькими процессами: с истинным поглощением фотонов (фотоэлектрический эффект), с рассеянием (когерентное и некогерентное) и с парным взаимодействием. Зависимость коэффициента ослабления от энергии частицы описывается нелинейной немонотонной функцией (рис. 9) [2]. Линейный коэффициент ослабления выводится из массового коэффициента ослабления (рис. 9) [2] по формуле (2).

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}, \quad (2)$$

где μ – линейный коэффициент ослабления материала, ρ – плотность материала.

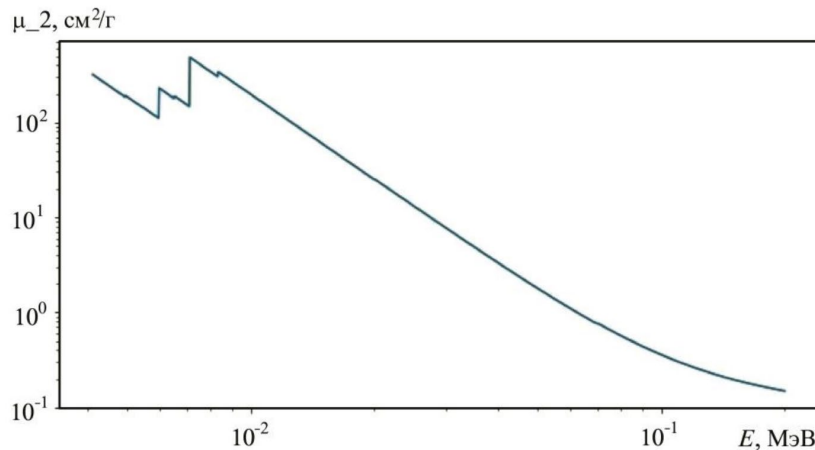


Рис. 9. Зависимость коэффициента массового ослабления от энергии частицы [2]

Доза, поглощенная чувствительными зернами пленки или пикселями чувствительно матрицы цифрового плоскостанельного детектора, зависит от предварительно вычисляемой по формуле (3) интенсивности действующего излучения.

$$E = I \cdot t \cdot \frac{F_N^2}{F^2}, \quad (3)$$

где t – продолжительность экспозиции, F_N – номинальное фокусное расстояние, F – фактическое фокусное расстояние.

По оценочной поглощённой дозе на участке носителя изображения определяется яркость для цифровых плоскостанельных детекторов или величина полученной оптической плотности для аналоговых плёночных детекторов на основе зависимости (4).

$$D = \frac{k}{1 + e^{-\lg(E) \cdot a}} + b, \quad (4)$$

где D – оптическая плотность, k – коэффициент поглощения плёнки, E – уточнённая экспозиция, a – коэффициент контрастности плёнки, b – коэффициент чувствительности плёнки.

Благодаря используемой образовательной технологии, обучаемым предоставляется реалистичный опыт проверки качества рентгенограмм, осуществляемый путем оценки различимости изображений проволоочных или канавочных индикаторов чувствительности, а также контрастности с применением цифровых двойников негатоскопа и денситометра.

При симуляции работы с гибким детектором и внешним источником излучения возникает задача дискретизации детектора на конечное число сегментов. Во-первых, для удобства решения задачи введем следующее ограничение-допущение: дискретизация выполняется на одинаковые плоские прямоугольные участки вдоль одной из осей детектора, рассматриваемой в данном контексте, как ширина детектора. Данное

упрощение позволяет гарантировать, что любой отдельный участок может быть представлен, как стандартный прямоугольный участок для проецирования изображения. Это обосновывается тем, что, согласно схемам контроля [3], детектор изгибается исключительно вокруг произвольной прямой, параллельной одной из его границ, что позволяет сохранить прямоугольную форму участков. Изгиб детектора равномерен, и при разбиении формируются участки равных размеров.

На рис. 10 приведена схема динамической декомпозиции модели гибкого детектора, изменяющая число участков разбиения в зависимости от радиуса изгиба детектора.

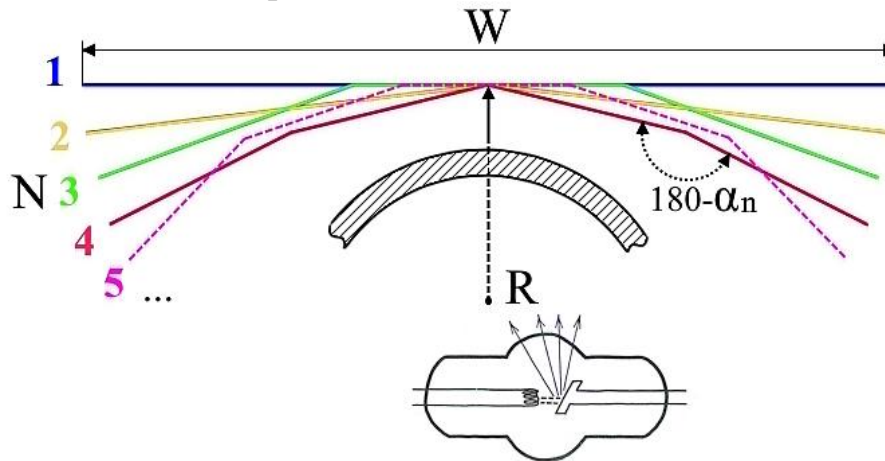


Рис. 10. Динамическая декомпозиция модели гибкого детектора

Из рис. 10 видно, что по мере уменьшения радиуса число сегментов N растет от единицы при $R \rightarrow +\infty$ до $N_{\max}$ при $R = W/2\pi$, где W – ширина детектора, $N_{\max}$ зависит от выбранных правил дискретизации и влияет на точность приближения к непрерывной кривой, а с учетом принятых допущений – к окружности.

При этом угол между соседними сегментами составит α_n . Удобнее всего руководствоваться максимально допустимым углом α_m , величины которого будет достаточно для слитного восприятия ракурса соседних участков изображения.

Расчет числа сегментов для декомпозиции выбирается исходя из радиуса поверхности ОК, на которую накладывается детектор, и максимальной величины угла α_n , равной α_m , в соответствии с формулой (5):

$$N = \left\lceil \tan\left(\frac{180-\alpha_m}{2}\right) \frac{W}{2R} \right\rceil, \quad R \leq \frac{W}{2\pi}, \quad (5)$$

где W – ширина детектора, R – радиус изгиба, α_m – максимально допустимый угол между соседними сегментами.

Путём экспериментов и опытной эксплуатации установлено, что значение $\alpha_m = 6$ град является достаточным для формирования визуально слитного изображения как в учебных, так и в демонстрационных целях.

При этом получаются цифровые 3D-модели детекторов – плоского (а), выпуклого (б), вогнутого (в), которые представлены на рис. 11.

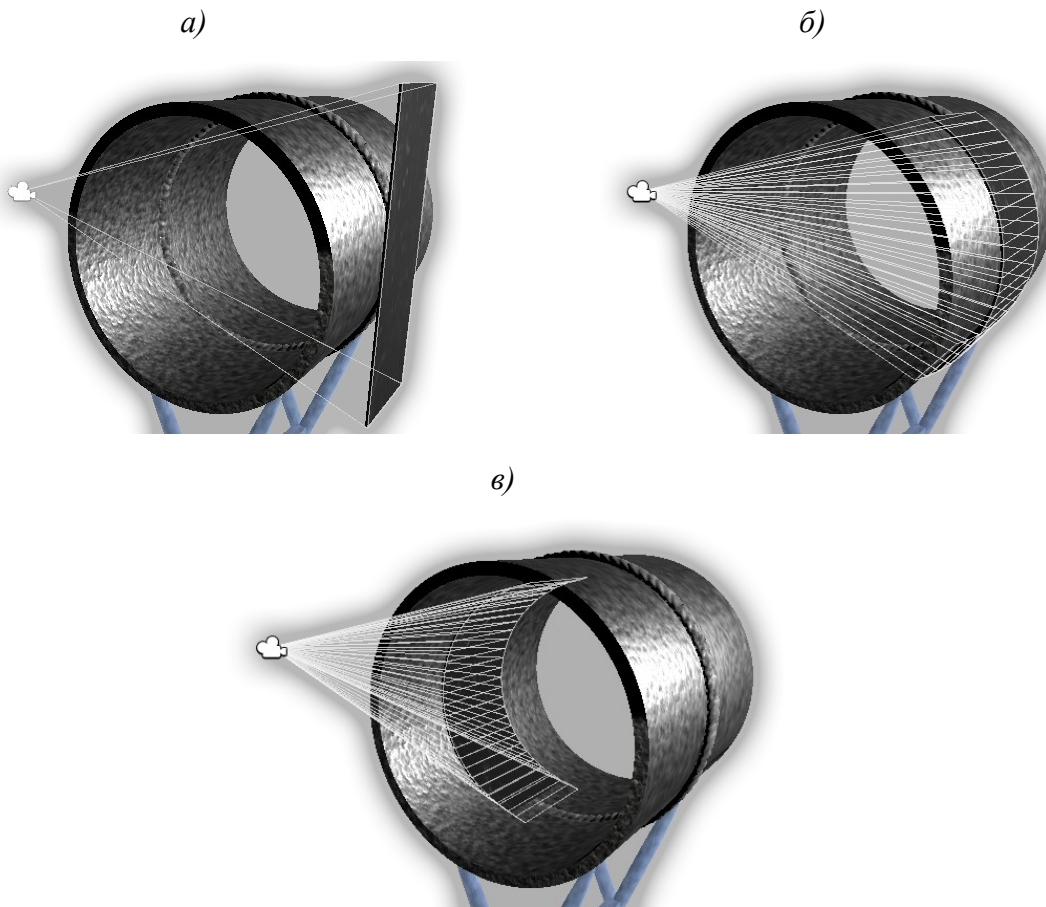


Рис. 11. Модели цифровых двойников плоского детектора

Выводы и рекомендации

Технологии цифровых двойников в настоящее время успешно развиваются и находят свое применение на всех этапах жизненного цикла изделия от его конструкторско-технологического моделирования до производства и эксплуатации, включая его неразрушающий контроль и техническую диагностику.

Совокупность цифровых средств дистанционного и виртуального обучения позволяют увеличить число обучаемых специалистов без материальных и временных затрат на оборудование и сертификацию дополнительных лабораторий, а также повысить средний уровень подготовки специалистов (дефектоскопистов) и обеспечить отрасли промышленности достаточным количеством подготовленных кадров в условиях наращивания объемов производства и эксплуатируемых объектов.

Разработанное и протестированное программно-аппаратное решение в совокупности с результатами научных исследований позволяет судить о

возможности применения и направлениях развития цифровой образовательной системы с VR-средой для других видов и методов НК.

Литература

1. Кувшинников В.С., Ковшов Е.Е. Подготовка специалистов по радиационному виду неразрушающего контроля с применением цифровых технологий // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 4. С. 54–69.

2. Kuvshinnikov V., Kovshov E. Models and Basic Algorithmization for VR Simulator of the Industrial Radiography Method // 2022 4th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). – IEEE, 2022. pp. 561–566. DOI: 10.1109/SUMMA57301.2022.9973985.

3. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод. Технические требования: ГОСТ 7512–82. - Введ. 1984-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1983. 18 с.

УДК 620.179.16

**ПРИЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ПОЛНОТЫ И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ИММЕРСИОННОГО
УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ ЗАГОТОВОК РОТОРНЫХ
ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

И.С. Краснов¹, М.А. Далин¹, С.И. Яковлева¹, А.А. Зародова¹

**THE WAYS OF INCREASING AUTOMATED ULTRASONIC
INSPECTION COMPLETENESS AND SENSITIVITY OF JET ENGINES
ROTATING PARTS' FORGINGS**

I.S. Krasnov¹, M.A. Dalin¹, S.I. Yakovleva¹, A.A. Zarodova¹

uzk@viam.ru

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ)

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute» (NRC «Kurchatov institute» - VIAM)

Аннотация

Доклад посвящен проблемам совершенствования ультразвукового метода неразрушающего контроля применительно к заготовкам дисков турбин и компрессоров газотурбинных авиационных двигателей.

Реферат

Возросшие требования разработчиков газотурбинных авиационных двигателей к полноте, чувствительности и надёжности ультразвукового контроля заготовок ответственных деталей приводят к необходимости изыскания новых приёмов и техник иммерсионного автоматизированного

ультразвукового контроля, не описанных в отечественной отраслевой нормативной документации. В докладе описан ряд перспективных приёмов, опробованных специалистами НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ при проведении выходного контроля продукции собственного малотоннажного производства. Раскрыты основные проблемы, связанные с применением описанных приёмов, и предложены способы их решения.

Ключевые слова:

неразрушающий контроль, ультразвуковые методы, иммерсионный метод, заготовка диска, фокусированный преобразователь

Abstract:

This report is dedicated to problems of ultrasonic inspection improvement of gas turbine engine forgings.

Essay:

Increasing requirements of aviation gas turbine engines' designers to completeness, sensitivity and reliability of the ultrasonic testing of critical parts' forgings lead to the need of the research of new ultrasonic immersion testing methods which were not described in domestic manuals. Some prospective methods which were tested by VIAM specialists during final inspection of own small-scale production are described in the report. Main problems which are related to the use of described methods are covered and the ways of their solving are offered.

Keywords:

nondestructive testing, ultrasonic technique, immersion technique, forging, focused transducer

Роторные детали газотурбинных двигателей (ГТД), такие как диски турбины и компрессора, валы и цапфы, представляют собой тела вращения и изготавливаются из жаропрочных никелевых и титановых сплавов, а также специальных сталей. Эти ответственные детали работают в условиях высоких статических и циклических нагрузок, в связи с чем к ним предъявляются высокие требования по отсутствию в их материале внутренних производственных дефектов – включений, трещин, других несплошностей. Для исключения попадания таких дефектов в готовую деталь, их заготовки в обязательном порядке проходят ультразвуковой контроль (УЗК). Чувствительность контроля заготовок из жаропрочных сплавов соответствует выявлению плоскодонного отражателя диаметром 1,5 – 2,0 мм, из титановых – ПДО Ø0,8 мм.

До недавнего времени УЗК заготовок роторных деталей ГТД проводился по отраслевым методикам ПИ 1.2.032-77, МК 256-40-80, МР40-5/86Д. Эта документация не содержит требований обеспечения прозвучивания всего объёма чистовой детали в заготовке. Вместо этого, предписывается вводить ультразвуковые колебания с плоских торцевых поверхностей «в зонально доступных местах», то есть, где это физически возможно. Допускается часть материала готовой детали оставить непроконтролированной (рис. 1). Ручной контроль допускается и регламентируется процесс его проведения.

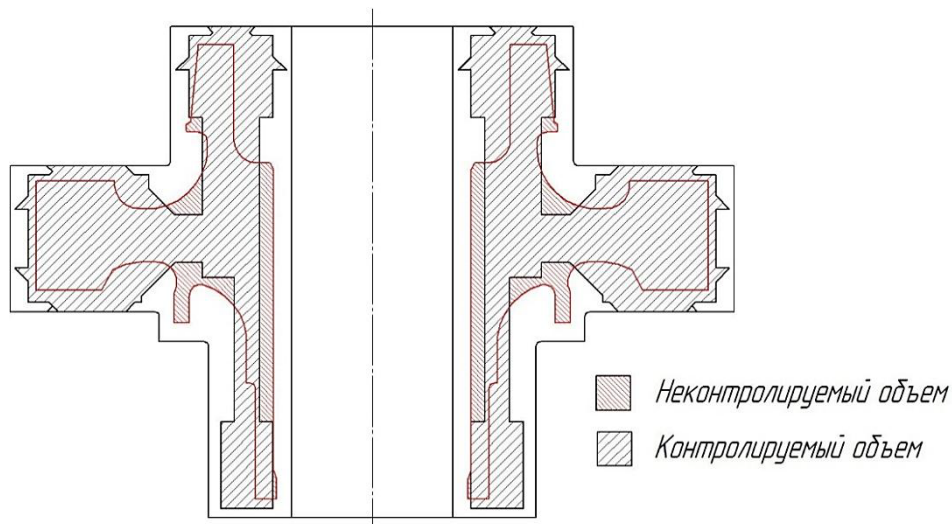


Рис. 1. Объем контроля заготовки в соответствии с действующими нормативными документами

Для обеспечения безопасной эксплуатации авиационных ГТД в «Нормах летной годности двигателей воздушных судов» [1] введено требование «оценивать возможность разрушения детали в пределах одобренного ресурса от дефектов в материале, дефектов, внесенных при изготовлении и эксплуатации». Если такая оценка не проведена – данный тип двигателя не пройдет сертификацию и не может быть допущен к применению в гражданских самолётах. Существует несколько разрешенных методик такой оценки, и наиболее современная из них, предусматривает подтверждение назначенного ресурса основных деталей (в первую очередь роторных деталей из титановых и никелевых сплавов) путем расчета вероятности их разрушения в эксплуатации, в том числе и из-за внутренних дефектов, не выявленных при неразрушающем контроле.

Если ресурс детали, рассчитанный по новым сертификационным требованиям, оказался меньше, чем требуемый по техническому заданию ресурс двигателя, РЦ АП 33.70 предлагает:

- повторное проектирование детали;
- изменение материала;
- улучшение технологии производства материала;
- улучшение технологии изготовления детали;
- улучшение методов контроля в процессе производства и эксплуатации;
- уменьшение величины установленного ресурса.

Улучшение методов контроля стало одним из способов достижения высоких показателей ресурса при сертификации новых двигателей. Разработчики двигателей требуют повышать эффективность УЗК заготовок роторных деталей. Основные требования это:

- повышение чувствительности контроля, вплоть до чувствительности, эквивалентной выявлению плоскодонного отражателя диаметром 0,2 мм;
- контроль в объеме 100 % чистового контура детали в заготовке;
- исключение ручного контроля и полный переход на автоматизированный, для исключения человеческого фактора в процессе контроля (замена ручного УЗК на полностью автоматизированный для основных и особоответственных деталей ГТД на большинстве предприятий осуществлена).

Стоит отметить, что ранее, из-за отсутствия требований к полноте контроля, не существовало даже чётких критериев отнесения той или иной зоны на сечении заготовки к проконтролированному материалу. В настоящее время мы, основываясь на требованиях специалистов АО «ОДК-Авиадвигатель», во всех выпускаемых НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ документах ввели такой критерий – за проконтролированный объем считается только тот объем, который просканирован центральным лучом пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП). Требование по УЗК 100 % чистового контура детали в заготовке сопровождается очевидными проблемами с формой заготовки, так как изначально формируется полный цикл изготовления детали, в том числе штамповой оснастки и формы заготовки под термообработку, изменение которых может привести к ухудшению прокаливаемости и уменьшению коэффициента использования материала. Также нецелесообразно уменьшать размер зерна материала для повышения его контролепригодности, так как это может снизить некоторые физико-механические свойства сплавов.

Ужесточающиеся требования разработчиков двигателей потребовали применения новых подходов к разработке технологий ультразвукового контроля роторных деталей ГТД. Часть таких подходов была заимствована из зарубежного опыта, часть разработана самостоятельно. Ниже описаны несколько приёмов, опробованных и использующихся в настоящее время специалистами НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ при УЗК продукции собственного производства.

Одним из известных способов повышения чувствительности контроля является применение фокусированных преобразователей. При обычном (конвенциональном) иммерсионном УЗК фокусированным ПЭП ультразвуковые волны фокусируются на поверхности заготовки, то есть расстояние от торца ПЭП до поверхности ввода ультразвуковых колебаний равен номинальному фокусному расстоянию ПЭП. Отношение сигнал/структурный шум при этом сильно падает с глубиной. Из-за этого для проведения контроля заготовок в сечениях большой толщины на требуемой высокой чувствительности применяется мультizonный (послойный) контроль фокусированными преобразователями, что позволяет увеличить отношение сигнал/шум в ограниченной зоне фокусировки (рис. 2). Изменяя расстояние от торца ПЭП до поверхности ввода ультразвуковых колебаний, можно перемещать по глубине объекта контроля фокальную зону ПЭП, обладающую наименьшим объемом импульса, но при этом обладающую наибольшей интенсивностью. При этом строб автоматической сигнализации о дефекте (строб АСД) устанавливается таким образом, чтобы регистрация эхо-сигналов осуществлялась только в зоне, в которой находится фокальная зона преобразователя.

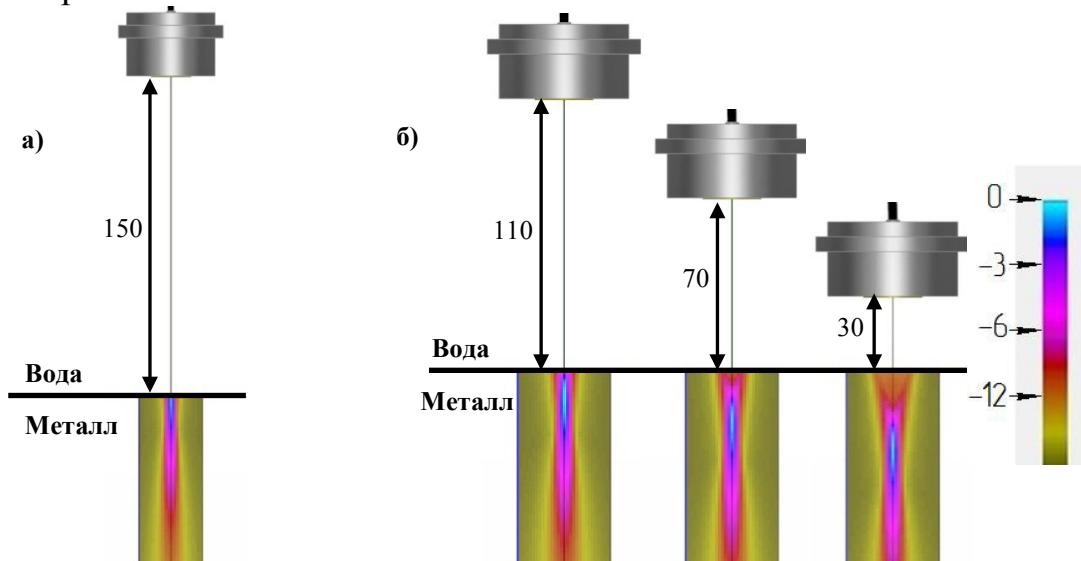


Рис. 2. Поле фокусированного ПЭП, с фокусным расстоянием по воде 150 мм, при: а) фокусировке в поверхность; б) при мультizonном контроле при различных путях по воде

Основной проблемой при проведении мультizonного контроля являются уступы и переходы на заготовке. Так как за проконтролированный объем считается только тот объем, который проконтролирован центральным лучом ПЭП, необходимо увеличивать отступы от краев поверхностей ввода, так как с уменьшением расстояния по воде увеличивается размер ультразвукового пучка на поверхности ввода (рис. 3). Из-за этого могут возникнуть участки, контроль которых будет невозможен продольными волнами, или область контроля будет незначительно мала.

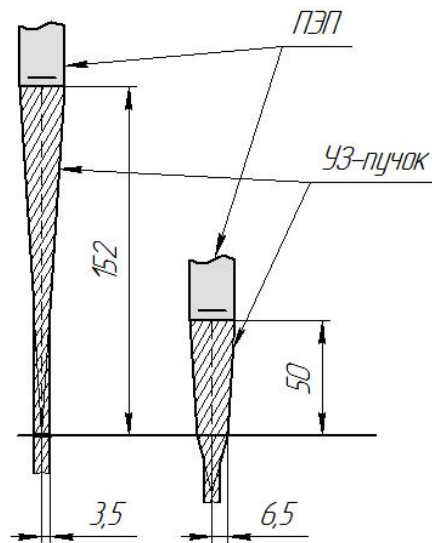


Рис. 3. Изменение ширины ультразвукового пучка на поверхности ввода при изменении пути по воде

Для увеличения объема контроля предлагается проводить контроль продольными волнами, вводимыми под углом к поверхности. Были проведены расчеты в специализированном программном обеспечении, которые показали, что при вводе продольных колебаний под углами падения до 5° к поверхности ввода падение абсолютной чувствительности составит менее 1 дБ. Углы ввода при этом, в зависимости от скорости продольных волн в материале заготовки, составляют до 20° . Главным недостатком такого контроля является высокая трудоемкость, при таком способе ввода контроль только с одной поверхности на глубины до 40 мм может занять до 12 проходов (рис. 4).

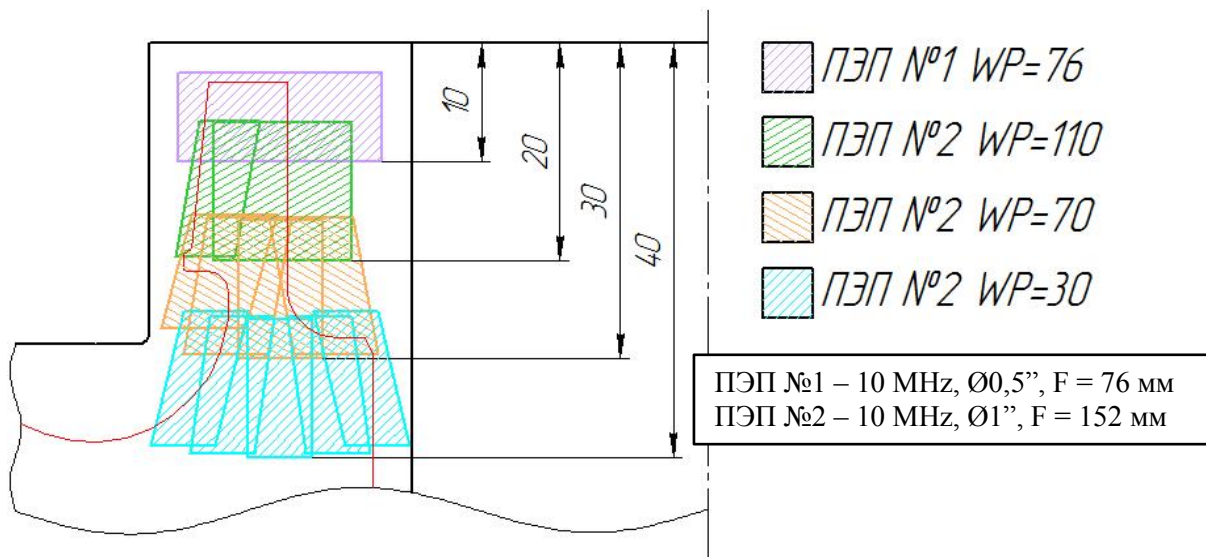


Рис. 4. Мультизонный контроль с вводом продольных колебаний с углами ввода до 20°

С целью снижения трудоёмкости контроля, сильно выросшей в связи с частым разбиением зон контроля по глубине, и с вводом продольных колебаний под наклоном к поверхности, для мультизонного контроля взамен примененного контроля с линейным сканированием под различными углами предлагается применять угловое сканирование с неподвижной точкой ввода (секторное сканирование). При таком способе, центральный луч ПЭП всегда направлен в одну точку (здесь и далее имеется в виду точка на сечении заготовки, которая является круговой линией на поверхности заготовки), и ввод ультразвуковых колебаний осуществляется при неизменном расстоянии по воде (рис. 5).

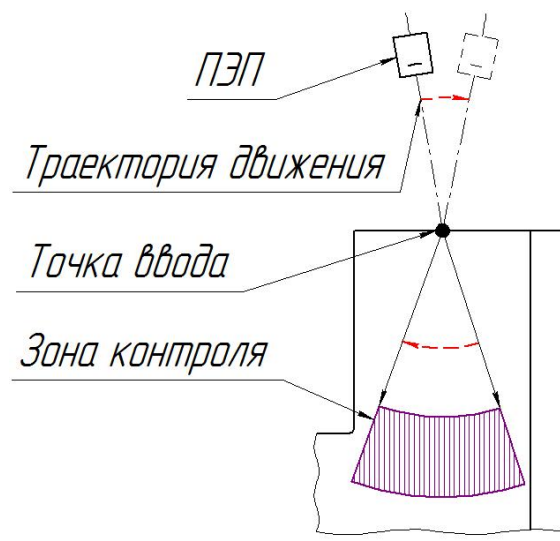


Рис. 5. Траектория движения ПЭП при секторном сканировании

Такой способ позволяет увеличить производительность, а также повысить полноту контроля, за счет того, что даже если ширина ультразвукового пучка на поверхности будет близка к ширине полки, будет возможно проведение контроля по всей ширине заготовки (рис. 6).

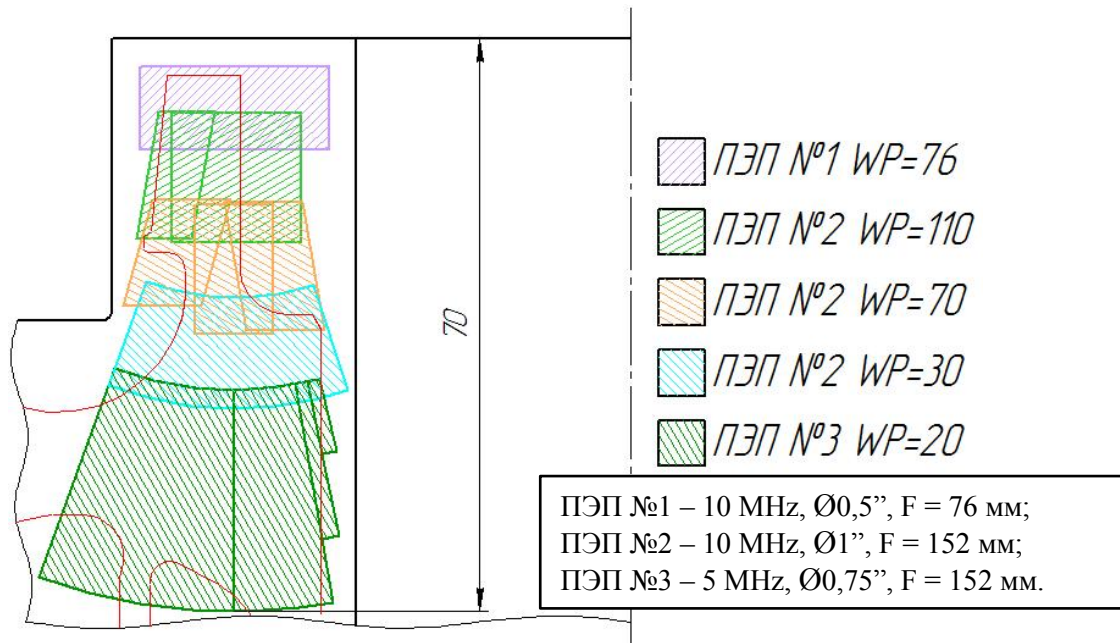


Рис. 6. Схема контроля с использованием секторного сканирования

Также, для повышения полноты возможно проведение контроля с вводом колебаний с криволинейных поверхностей (рис. 7). Конвенциональный контроль со стороны наружных и внутренних цилиндрических и конических поверхностей позволяет перекрыть зоны, которые затруднены для контроля с плоских торцевых поверхностей для обеспечения 100 % полноты контроля. Однако при контроле заготовок с вводом ультразвуковых колебаний с криволинейных поверхностей абсолютная и предельная чувствительность контроля снижаются. Главный недостаток такого контроля – необходимость изготовления огромного количества настроечных образцов, под каждый радиус кривизны. Альтернатива образцам – вводить поправки, рассчитанные в специальном программном обеспечении, но для этого необходимо провести верификацию полученных результатов на образцах.

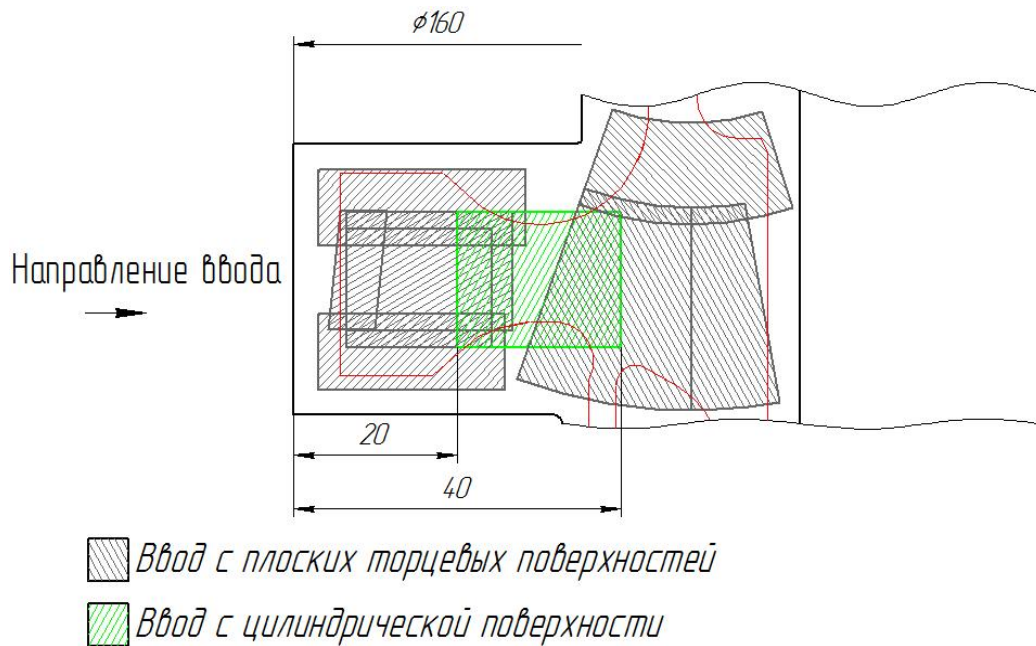


Рис. 7. Схема контроля с вводом ультразвуковых колебаний с выгнутой цилиндрической поверхности

Однако, такой способ контроля хорошо работает только для цилиндрических поверхностей большого радиуса кривизны, и только при фокусировке в поверхность. При контроле заготовок с вводом ультразвуковых колебаний с криволинейных поверхностей абсолютная и предельная чувствительность контроля снижаются. Причиной снижения чувствительности при преломлении сферически сфокусированных пучков цилиндрической поверхностью заготовки является несоответствие глубин, на которых расположен акустический фокус пучка в осевом сечении и в сечении, поперечном к оси вращения заготовки. Это несоответствие приводит к снижению положительного влияния фокусировки. Аналогией этого эффекта в оптике является астигматизм. На рис. 8 приведено сравнение полей сфокусированного ПЭП, с фокусным расстоянием 150 мм, в осевом и поперечном сечениях при различных путях по воде. На рисунке видно, что чем меньше путь по воде, тем больше расфокусировка в поперечном направлении. В связи с этим, без дополнительных приспособлений, контроль с цилиндрических поверхностей на больших глубинах на высокой чувствительности затруднителен.

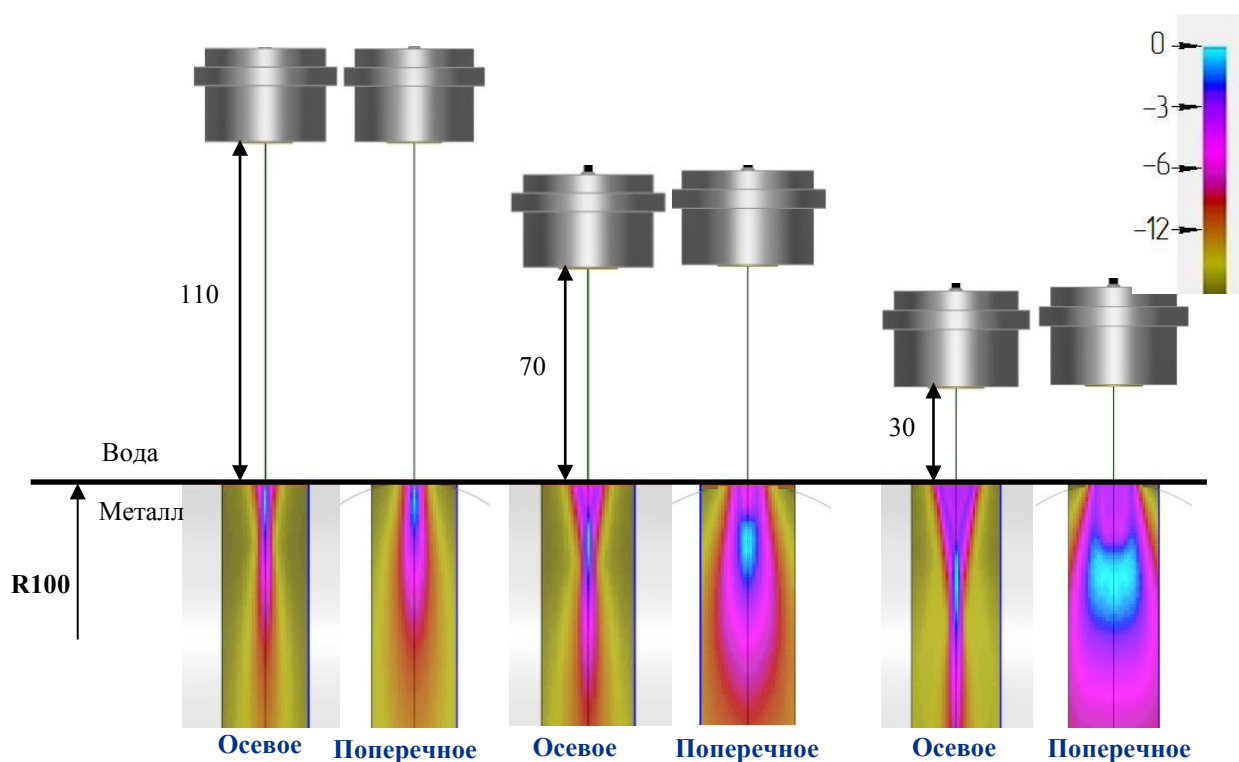


Рис. 8. Поля сфокусированного ПЭП, с фокусным расстоянием 150 мм, при вводе колебаний с цилиндрической поверхности R100, в осевом и поперечном сечениях при различных путях по воде

Еще один способ повысить полноту контроля – контроль с вогнутой поверхности центрального отверстия заготовок (рисунок 9).

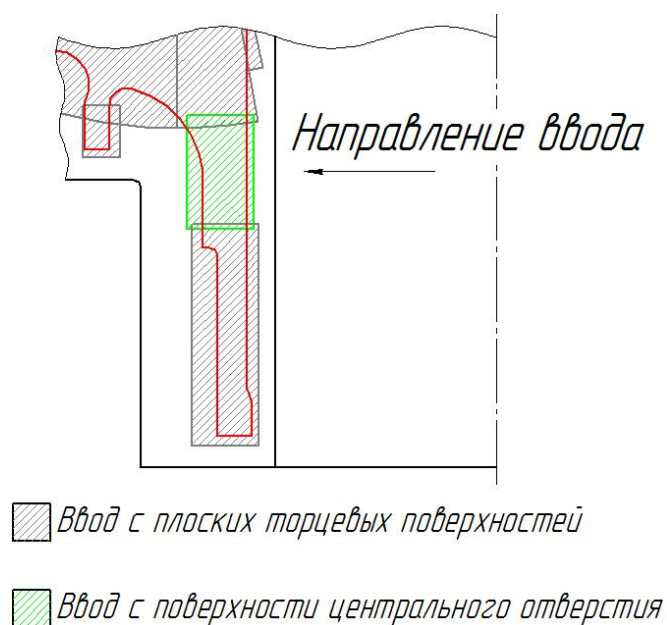


Рис. 9. Схема контроля с вводом ультразвуковых колебаний с поверхности центрального отверстия заготовки

При иммерсионном контроле заготовок дисков, обычным способом ввода ультразвуковых колебаний с поверхности центрального отверстия небольшого диаметра является установка преобразователя на угловом переходнике, позволяющем не размещать весь манипулятор автоматизированной установки в отверстии. Для отверстий меньшего диаметра возможно применение акустических зеркал, преломляющих акустическую ось ультразвукового преобразователя на 90° . Важно отметить, что все серийно выпускаемые акустические зеркала имеют плоскую отражающую поверхность и не вносят никаких изменений в формируемый преобразователем ультразвуковой пучок, кроме его разворота на 90° .

По аналогии с контролем с вводом ультразвуковых колебаний с выпуклой цилиндрической поверхности происходит расфокусировка пучка в двух взаимоперпендикулярных плоскостях (рисунок 10), что не позволяет проводить контроль даже на небольших глубинах.

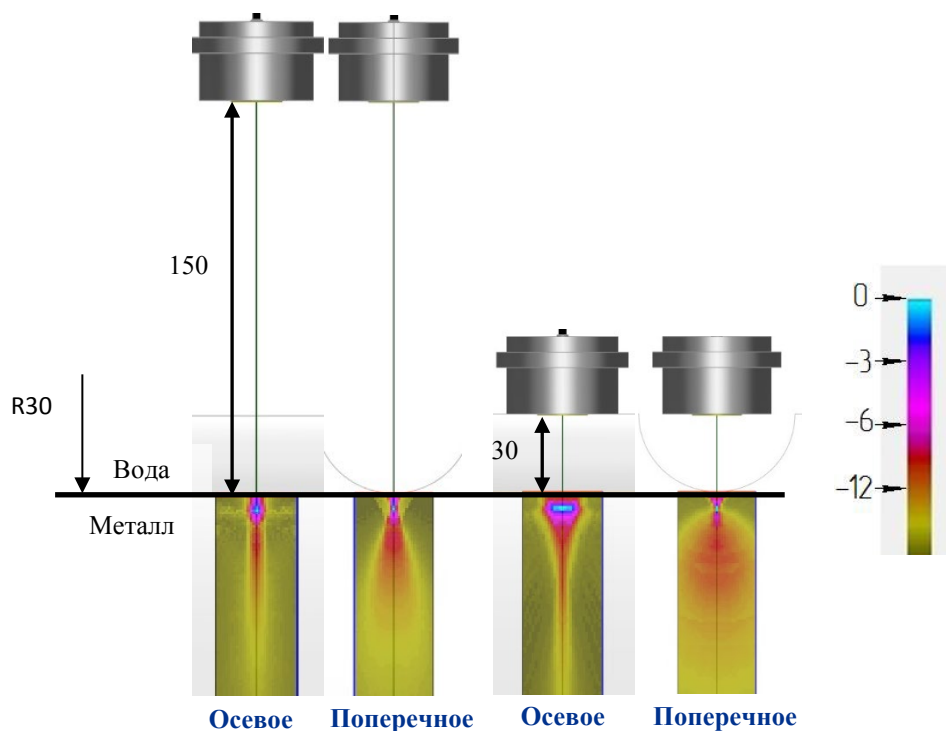


Рис. 10. Схема контроля с вводом ультразвуковых колебаний с поверхности центрального отверстия заготовки

Для компенсации негативного влияния кривизны поверхности ввода может быть использовано акустическое зеркало с криволинейной поверхностью [2], его пример приведен на рис. 11.

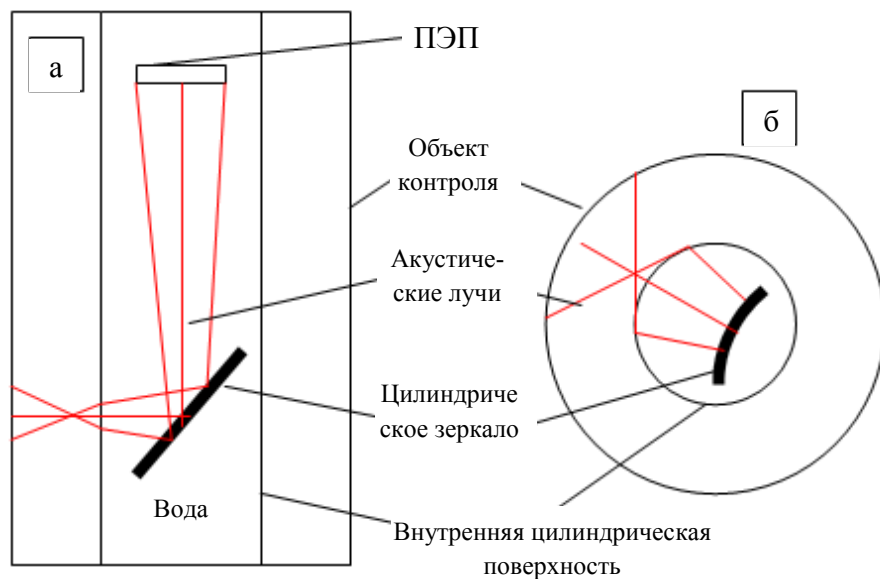


Рис. 11. Схема длиннофокусного аксиально расположенного ПЭП с цилиндрическим выпуклым зеркалом из [2]: а) осевое сечение; б) сечение, перпендикулярное к оси вращения заготовки

Хотя в [2] предлагается использовать зеркало с цилиндрической поверхностью, несложные геометрические построения показывают, что для того, чтобы в различных по высоте поперечных сечениях преломленный луч был сфокусирован на одной глубине, форма поверхности зеркала должна быть конической, с вертикальной осью конуса. В самом деле, предположим, что преобразователь несфокусированный. Тогда в каждом поперечном (сагиттальном) сечении волновой фронт отраженного от цилиндрического зеркала ультразвукового излучения будет представлять собой дугу эллипса. Ось цилиндра наклонена, поэтому нижние (по рис. 11, а) лучи апертуры пучка упадут на поверхность центрального отверстия заготовки с большей кривизной волнового фронта, чем верхние. Вогнутая цилиндрическая поверхность заготовки сфокусирует эти лучи в линию, но эта линия будет наклонна к оси заготовки. В случае сферически сфокусированного пучка, это приведёт к искажению сферической фокусировки (верхние и нижние сагиттальные пучки лучей сфокусируются на разной глубине) и, как следствие, снижению чувствительности. Безусловно, цилиндрическое зеркало позволит снизить негативное влияние криволинейной поверхности, по сравнению с плоским зеркалом, но не так эффективно, как коническое.

Коническое зеркало с вертикальной осью, независимо от расстояния между осью вращения детали и осью конуса, для несфокусированного датчика будет во всех перпендикулярных оси заготовки сечениях формировать волновые фронты в виде дуг окружности с центром на оси

конуса, т. е. сформируется пучок с цилиндрическим волновым фронтом с вертикальной осью, совпадающей с осью конуса. Соответственно, внутренняя цилиндрическая поверхность будет фокусировать этот пучок в линию, параллельную поверхности. В случае сферически сфокусированного пучка, лучи соберутся в фокальную область минимально возможного сечения, что обеспечит наилучшую чувствительность контроля.

Данные выводы подтверждаются результатами геометрических построений в специализированном программном обеспечении для моделирования, ход ультразвуковых лучей в приближении геометрической оптики, показан тёмно-зеленым (рис. 12).

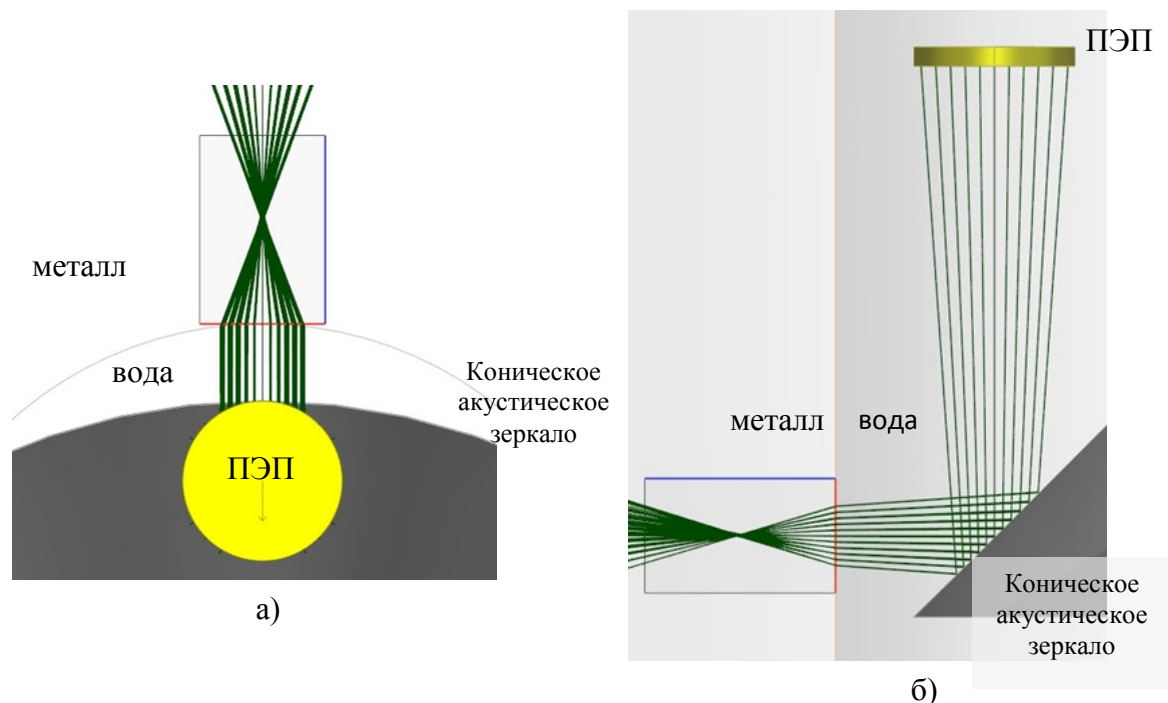


Рис. 12. Ход лучей в приближении геометрической оптики: а) сечение, перпендикулярное к оси вращения заготовки, б) осевое сечение

Было проведено математическое моделирование процесса распространения ультразвуковых колебаний. Модель ультразвукового преобразователя была задана путём задания его соответствующих параметров и характеристик, включая замеренный на реальном ПЭП импульсный отклик системы «ПЭП-электрический тракт дефектоскопа». Акустическое зеркало было задано как конус с углом раствора 90° . Путь по воде был задан как сумма расстояний от датчика до зеркала и от зеркала до поверхности детали (рис. 13). Положение акустической оси датчика относительно края зеркала было выбрано таким образом, чтобы поток

лучей полностью отражался от зеркала и при этом габариты зеркала и ПЭП исключали их касание поверхности заготовки.

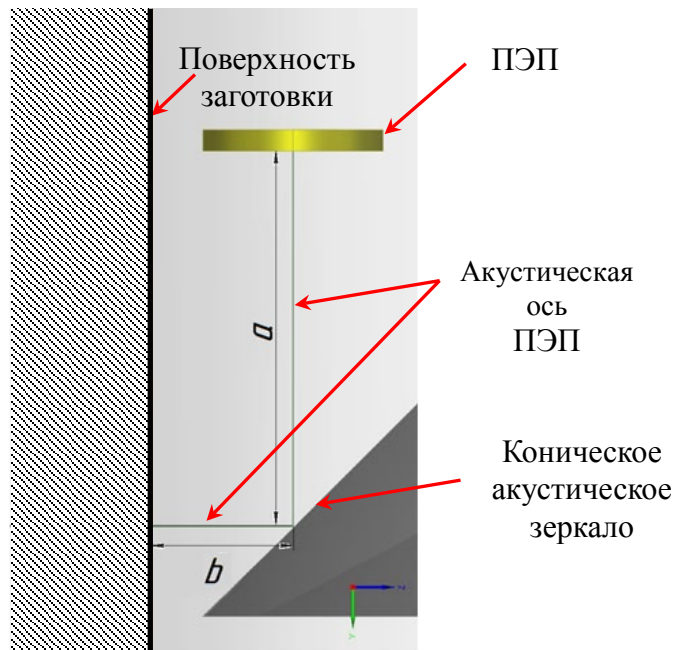


Рис. 13. Модель с коническим зеркалом

По результатам моделирования был разработан эскиз оснастки и изготовлено зеркало (рис. 14).



Рис. 14. Коническое акустическое зеркало

Показанное на рис. 14 коническое зеркало обеспечивает прибавку предельной чувствительности в зоне контроля 5–15 мм на 2 дБ.

Ещё одним способом повысить чувствительность контроля при высокой амплитуде структурных шумов материала является повышение уровня фиксации дефекта (высоты строба АСД) относительно уровня браковки. Старая документация на ультразвуковой контроль заготовок дисков турбин и компрессоров ГТД, как правило, требовала устанавливать строб АСД на 6 дБ ниже уровня браковки. Однако, при автоматизированном контроле, при выполнении ряда условий и введении дополнительных процедур замера параметров ПЭП, возможна установка строба лишь на 2 дБ ниже уровня браковки. Это в ряде случаев позволяет исключить ложные срабатывания АСД из-за структурных шумов без снижения номинальной чувствительности и надёжности контроля.

Описанные в докладе приёмы позволили удовлетворить высоким требованиям заказчиков к полноте и чувствительности УЗК заготовок роторных деталей ГТД и ГТУ, выпускаемых собственным малотоннажным производством НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. В частности, при УЗК ряда заготовок сложной формы, изготавливаемых из гранулируемого никелевого сплава ЭП741НП, удалось добиться чувствительности, соответствующей выявлению контрольного отражателя диаметром 0,4 мм в 100 % объёма чистовой детали.

Рассмотренные способы не лишены недостатков. За исключением секторного сканирования, все они в той или иной мере увеличивают время, затрачиваемое на контроль одной заготовки. В частности, автоматизированный контроль одной из заготовок, на которой были реализованы все перечисленные способы повышения полноты и чувствительности контроля, занимает более 12 ч рабочего времени. Также следует иметь в виду, что, из-за усложнения операции ультразвукового контроля, повышаются требования к квалификации персонала, проводящего контроль.

Литература

1. Авиационные правила. Часть 33. Нормы летной годности двигателей воздушных судов. МАК, ОАО «Авиаиздат». 2012. С. 7–11.
2. Alex Karpelson. "Bi-curved" Ultrasonic Transducers. The e-Journal of Nondestructive Testing - ISSN: 1435-4934 May 2006 • Issue Vol. 11 No.5.

УДК 620.1: 678.8

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ МЕХАНИЧЕСКИХ И СТРУКТУРНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ПОД НАГРУЗКОЙ

Н.В. Харин¹; К.Н. Акифьев¹; Е.О. Стаценко¹;
П.В. Большаков²; О.А. Саченков¹, к.ф.-м.н.

¹*Казанский федеральный университет*

²*Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева—КАИ;*

DEVELOPMENT OF COMPUTED TOMOGRAPHY METHODS FOR ASSESSING MECHANICAL AND STRUCTURAL PROPERTIES OF MATERIALS UNDER LOAD

Kharin Nikita, Akifyev Kirill, Statsenko Evgeny,
Bolshakov Pavel, Sachenkov Oskar

nik1314@mail.ru, kirill.akifyev@mail.ru, e.statsenko@yahoo.com,
bolshakov-pavel@inbox.ru, 4works@bk.ru

¹ *Kazan Federal University*

² *Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev;*

Аннотация

Развитие композиционных материалов и изделий со сложной внутренней структурой ставят вопрос о развитии экспериментальных методов для определения напряженно-деформированного состояния. Стандартные экспериментальные методы, применимо к образцам с негомогенной внутренней структурой, не позволяют получить полную картину о внутренних изменениях материала при нагружении. В данном исследовании представлена методика исследования пористости образцов рентгеновским компьютерным томографом при одноосном сжатии. С этой целью была изготовлена специальная оснастка, позволяющая нагружать образец внутри томографа, отдельно была разработана методика проведения испытаний. Оснастка позволяет не только передавать осевое усилие сжатия, но и фиксировать соответствующую величину нагрузки. Для иллюстрации методики были спроектированы и изготовлены с помощью аддитивных технологий образцы для испытаний. Данные томографии обрабатывались согласно разработанной методике. В результате были получены поля перемещений образцов, величины пористости, объемной деформации и их распределение по образцу для каждого шага нагружения.

Ключевые слова:

компьютерная томография, напряженно-деформированное состояние, пористость, поры с жидкостью, неоднородные материалы, эксперимент

Вводная часть

Развитие композиционных, сложно структурированных материалов и изделий ставят вопрос о развитии экспериментальных методов определения напряженно-деформированного состояния (НДС). Неравномерность и неомогенность внутренней структуры ограничивают результаты, получаемыми стандартными экспериментальными методами, и не дают полной картины о работе материала или изделия. Более того, наличие внутренних дефектов, локальная потеря устойчивости могут значительным образом повлиять на получаемые результаты.

Широкое распространение получило использование электро-тензометрических датчиков [1, 2]. Данный метод относится к контактным методам и основан на определении напряжений и деформаций в наружных слоях детали с помощью тензодатчиков, усилителей и регистрирующей аппаратуры. Тензодатчик приклеивается к поверхности исследуемого образца и работает как резистор, при этом поверхностные деформации приводят к изменению площади поперечного сечения резистора, что в свою очередь изменяет электрическое сопротивление. Но при этом метод обладает и недостатками, а именно: трудоемкость установки при большом количестве датчиков, большое количество отходящих проводов от тензодатчиков, чувствительность к электрическим и тепловым помехам. Так же к минусам можно отнести локальность оценки НДС, то есть предварительно для установки датчиков необходимо выяснить интересующие места, такие как: зоны образования трещин, зоны концентрации напряжений.

Одним из наиболее распространённых современных методов оценки внутренней структуры материала является компьютерная томография (КТ), рентгеновская компьютерная томография (РКТ), в частности. Множество исследований направлено на разработку методов исследования структуры материала по данным компьютерной томографии [3, 4]. Среди них можно выделить методы, основанные на некоторых осредненных величинах (определение пор по числу Хаунсфилда) и методы, основанные на восстановлении геометрии (сегментация) [5–7]. Во время процесса сканирования на РКТ измеряется затухание рентгеновского луча при его прохождении через материал образца. Когда параллельный монохроматический рентгеновский пучок проходит через вещество с одинаковой плотностью и одинаковым атомным номером, он экспоненциально затухает. Линейный коэффициент затухания μ определяется как относительное уменьшение интенсивности

рентгеновского излучения на единицу длины этого материала. Как правило, линейный коэффициент затухания нормализуется к коэффициенту стандартного материала (например, воды или воздуха).

Материалы и методы

Для исследования внутренней структуры образцов, под действием внешней нагрузки, была спроектирована и изготовлена специальная оснастка. Для интерпретации и анализа получаемых результатов была сформулирована методика проведения эксперимента. Была разработана установка для проведения эксперимента, на которую получен патент на изобретение [8].

Для исследования внутренней структуры и механических свойств были спроектированы типовые образцы с порами [9]. Изготовление образцов производилось на фотополимерном 3D принтере. Было спроектировано и изготовлено шесть образцов: один сплошной, два со сферическими порами, три с эллиптическими порами. Подробнее геометрия образцов и метод их изготовления описаны в параграфе 2.4. Изготовленные образцы подвергались предварительной подготовке, согласно параграфу 2.3. Затем образец помещался в разработанное устройство. Устройство вместе с образцом фиксировались в патроне РКТ. В ходе экспериментов каждый образец нагружался, и производилась съемка. Полученные в результате экспериментов данные обрабатывались, согласно описанной ниже методике, для последующего анализа [10,11].

Перед проведением эксперимента производилась предварительная подготовка образца. На поверхность каждого образца наклеивалась регулярная сетка из медной проволоки диаметром 90 микрон. Узлы сетки выполняют роль реперных точек. Материал проволоки подобран таким образом, чтобы была возможность легко контрастировать сетку от материала исследуемого образца на полученной компьютерной модели. Малый диаметр сечения проволоки позволял при анализе данных пренебречь жесткостью медной сетки в процессе нагружения.

Для проведения эксперимента необходимо установить устройство с испытуемым образцом в патрон томографа. Для динамометра отмечается нулевая линия нагрузки, замеряется расстояние между верхней и нижней, производится контроль позиционирования исследуемой зоны и установки таким образом, чтобы исследуемая зона находилась в поле сканирования приемника излучателя рентгеновского излучения. После этого производится первое сканирование исследуемого образца компьютерным томографом. На следующем шаге производится последовательная затяжка четырех гаек для передачи осевого усилия на исследуемый образец. После затяжки гаек определяется перемещение верхней крышки и определяется показание динамометра, после чего производится повторное сканирование. Каждый образец подвергается 3-ем шагам нагружения. Затягивание гаек

производится непосредственно в томографе, что обеспечивает постоянное позиционирование образца относительно экрана.

Сканирование образцов было выполнено с применением микро-/нанофокусной системы рентгеновского контроля для компьютерной томографии и 2D-инспекции Phoenix V|tome|X S240 в лаборатории рентгеновской компьютерной томографии Института геологии и нефтегазовых технологий Казанского (Приволжского) федерального университета. Система оснащена двумя рентгеновскими трубками: микрофокусной с максимальным ускоряющим напряжением 240 кВ, мощностью 320 Вт и нанофокусной с максимальным ускоряющим напряжением 180 кВ, мощностью 15 Вт. Для первичной обработки данных и создания объёмной (воксельной) модели образца на базе рентгеновских снимков (проекций) используется программное обеспечение `datos|x reconstruction`.

В результате проведения серии экспериментов были получены данные: перемещения верхней поверхности образца, прикладываемая сжимающая осевая нагрузка и внутренняя структура исследуемого образца (PKT модель). Полученные данные подвергались последующей обработке.

Спроектированные образцы представляют собой упорядоченный набор физических объемов: в продольном направлении 10, в поперечном – 3х3. Физический объем представляет собой куб с ребром 8 мм, в который вписана сфероидальная пора, наполненная жидкостью. Геометрия поры определяется двумя безразмерными параметрами: λ , β и ϕ . Где λ – отношение наименьшей полуоси к наибольшей (b/a), β – отношение удвоенной наибольшей полуоси к ребру куба ($2a/h$), а ϕ – угол направления наибольшей полуоси. Зная геометрические размеры, можно найти проектную пористость p_0 (соотношение объема поры и объема элемента-куба). Изготовление образцов производилось с помощью аддитивных технологий. Был использован фотополимерный принтер ANYCUBIC Photon Mono X, в качестве материала была использована фотополимерная смола Anycubic Colored UV Resin.

Результаты

В рамках исследования были испытаны образцы, описанные в разделе материалы и методы. Результаты, полученные для сплошного образца, не противоречат известным моделям и представлениям и служат, в большей мере, подтверждением работоспособности метода. Поэтому основной акцент в обсуждении сделан на образце № 2. Образец, как было описано ранее, представляет из себя пористую конструкцию, поры были заполнены флюидом – фотополимерной смолой, проектная пористость составляет 11 %. Геометрия поры представляет собой сфероидальную форму со следующими геометрическими соотношениями: отношение наименьшей полуоси к наибольшей (b/a) составляет 0.54, отношение

удвоенной наибольшей полуоси к ребру куба ($2a/h$) составляет 0.73 и угол наклона ϕ равен 0° . Размер ребра вокселя был равен 0.0807 мм.

Здесь и далее результаты приведены для внутренней сетки для следующих шагов нагружения: 0-ой шаг нагружения соответствует начальному положению образца без приложенной силы (0 Н), 1-ый шаг соответствует нагружению силой 1440 Н, 2-ой шаг соответствует нагружению силой 4104 Н, 3-ий шаг соответствует нагружению силой 6739 Н.

Отметим, что для первых двух активных шагов нагружения распределение поля полных перемещений равномерно. На последнем шаге нагружения отмечаются локальные максимумы перемещений на нижнем слое. Стоит отметить, что между третьим и четвертым шагом нагружения происходила потеря устойчивости образца. По причине потери устойчивости возникают изгибные составляющие перемещений, что и приводит к неравномерности поля перемещений в продольном направлении. Возникновение потери устойчивости можно объяснить наличием пор, заполненных флюидом, которые ведут себя как абсолютно жесткие включения, так как поры заполнены несжимаемой жидкостью.

Неравномерность пористости в элементах на нулевом шаге испытаний, связана с дефектами изготовления и погрешностями при сегментации. Однако пористость всего образца незначительно отличалась (относительное отклонение порядка 8 %) от проектной.

Осреднённые по объёму величины объёмной деформации, напротив, имеют большие размахи, что указывает на неравномерность их распределения. При этом наблюдается возрастание абсолютных величин объёмной деформации вплоть до третьего шага нагружения, после которого абсолютные величины объёмной деформации падают. А значит, объёмы физических объёмов возвращаются к первоначальным значениям. Распределение пористости и объёмной деформации по шагам нагружения подтверждают гипотезу о влиянии несжимаемой жидкости и дополняют объяснения возрастания пористости при нагружении.

Выводы

В работе были спроектированы и изготовлены экспериментальные образцы, для каждого проведены испытания на сжатие. Испытания проводились согласно авторской методике. Испытания образца со сфероидальными порами с жидкостью показали возрастание величины пористости при нагружении. Анализ объёмной деформации позволил объяснить этот факт. Авторы выдвигают гипотезу, что при нагружении объём поры с жидкостью остается постоянным, но объём материала вокруг поры уменьшается. Что и приводит к увеличению величины расчетной пористости. Авторами планируется провести эксперименты аналогичных образцов с различной геометрией пор. Так же авторы планируют

теоретически изучить механизм нагружения материала с закрытыми порами с флюидами, дать оценки напряженно-деформированного состояния, критической силы потери устойчивости. Стоит отметить, что разработанное устройство и методы демонстрируют практическую применимость для экспериментального исследования пористых неоднородных образцов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке, выделяемой Казанскому федеральному университету по государственному заданию в сфере научной деятельности, проект № FZSM-2023-0009.

Список литературы

1. Pastor M., Trebuna F., Lengvarsky P., Bocko J. Possibility of using of tensometry in deformation analysis in areas with sudden change of geometry // American Journal of Mechanical Engineering. 2016. Vol. 4. № 7. pp. 363–367. doi: 10.12691/ajme-4-7-23.
2. Mocanu C., Pohilca A., Moise L., Tudose D. Comparative Studies on the Behaviour of Flat Panels Made of GRP Under Static and Dynamic Loads // Materiale Plastice. 2021. Vol. 58. № 4. pp. 222–237. doi: 10.37358/MP.21.4.5548.
3. Bolshakov P.V., Sachenkov O.A. Destruction simulation for the inhomogeneous body by finite element method using computed tomography data // Russian Journal of Biomechanics. 2020. Vol. 24. № 2. pp. 248–258. doi: 10.15593/RZhBiomeh/2020.2.12.
4. Kharin N.V., Gerasimov O.V., Bolshakov P.V., Khabibullin A.A., Fedyanin A.O., Baltin M.E., Baltina T.V., Sachenkov O.A. Technique for determining the orthotropic properties of the bone organ according to computer tomography // Russian Journal of Biomechanics. 2019. Vol. 23. № 3. pp. 395–402. doi: 10.15593/RJBiomech/2019.3.11.
5. Mao L., Liu H., Zhu Y., Zhu Z., Guo R., Chiang F. 3D strain mapping of opaque materials using an improved digital volumetric speckle photography technique with X-ray microtomography // Applied Sciences (Switzerland). – 2019. Vol. 9. № 7. pp. 1418. doi: 10.3390/app9071418.
6. Mao L., Zuo J., Yuan Z., Chiang F.-P. Full-field mapping of internal strain distribution in red sandstone specimen under compression using digital volumetric speckle photography and X-ray computed tomography // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2015. Vol. 7. № 2. pp. 136–146. doi: 10.1016/j.jrmge.2015.01.003.
7. Li B., Zhang G., Ma W., Liu M., Li A. Damage mechanism of sandstones subject to cyclic freeze–thaw (FT) actions based on high-resolution computed tomography (CT) // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2022. Vol. 81. № 9. pp. 374. doi: 10.1007/s10064-022-02872-z.
8. Пат. 2755098 Российская Федерация, МПК G01N23/046 (2018.01) Устройство для определения структуры материала или образцов при

одноосном сжатии и способ его использования / Саченков О.А., Большаков П.В., Герасимов О.В., Стаценко Е.О., Акифьев К.Н - № 2021103527; заявл. 12.02.2021; опубл. 13.09.2021.

9. Sachenkov O.A., Gerasimov O.V., Koroleva E.V., Mukhin D.A., Yaikova V.V., Akhtyamov I.F., Shakirova F.V., Korobeynikova D.A., Chzhi H. Building the inhomogeneous finite element model by the data of computed tomography. Russian Journal of Biomechanics, 2018, Vol. 22, No. 3, pp. 291–303. doi: 10.15593/RJBiomeh/2018.3.05.

10. Hafiz D.A., Bayumy A.B.Y., Sheta W.M., Hanan A.H. Interest point detection in 3D point cloud data using 3D Sobel-Harris operator. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2015, Vol. 29, No. 7, pp. 1555014. doi: 10.1142/S0218001415550149.

11. Sipiran I., Bustos B. Harris 3D: A robust extension of the Harris operator for interest point detection on 3D meshes. Visual Computer, 2011, Vol. 27, No. 11, pp. 963-976. doi: 10.1007/s00371-011-0610-y.

\

УДК 620.179

**ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
С ПОМОЩЬЮ ВИХРЕТОКОВОГО МЕТОДА
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ**

В.С. Шитиков¹; С.С. Пичугин¹

**ESTIMATION OF STRESS-STRAIN STATE BY EDDY CURRENT
METHOD OF NONDESTRUCTIVE TESTING**

V.S. Shitikov¹, S.S. Pichugin¹

admin@viam.ru, Viam-dma@mail.ru

¹*Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ)*

¹*Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute» (NRC «Kurchatov institute» - VIAM)*

Аннотация

Проведено экспериментальное опробование оценки уровня остаточных напряжений в образце из титанового сплава с помощью вихретокового метода неразрушающего контроля. Представлена конструкция технологической оснастки для нагружения образцов с заданной нагрузкой. Был разработан и изготовлен вихретоковый накладной преобразователь для оценки остаточных напряжений

Реферат

Остаточные напряжения – механические напряжения, которые остаются внутри материала после изготовления или возникают в процессе эксплуатации. Остаточные напряжения могут оказывать существенное влияние на технические свойства материалов и элементов конструкций. Поэтому анализ остаточных напряжений является обязательным этапом

при проектировании деталей и элементов конструкций и оценке их надежности в реальных условиях эксплуатации. В докладе описывается опробование вихретокового метода неразрушающего контроля для оценки уровня механических напряжений.

Ключевые слова:

неразрушающий контроль, вихретоковый контроль, остаточные напряжения, тензометри, вихретоковый накладной преобразователь

Abstract

Experimental testing of estimation of residual stress level in a titanium alloy sample by means of eddy current method of nondestructive testing is carried out. The design of technological tooling for loading samples with a given load is presented. An eddy current clamp-on transducer for residual stress evaluation was designed and manufactured.

Essay

Residual stresses can be defined as stresses that remain within a material after the material has been manufactured and processed in the absence of external forces. Residual stresses can have a significant impact on the technical properties of materials and structural components. Therefore, residual stress analysis is an obligatory step in the design of parts and structural elements and the assessment of their reliability under real operating conditions. The report describes the testing of the eddy current method of non-destructive testing to assess the level of mechanical stresses.

Keywords:

nondestructive testing, eddy current testing, residual stresses, strain gauges, eddy current overhead probe

Повышение требований к надежности деталей авиационной техники (АТ), внедрение новых материалов и технологий при их производстве приводят к необходимости точно характеризовать напряженно-деформированное состояние (НДС) материала на отдельных областях детали. В частности существует ряд задач по оценке уровня остаточных напряжений (ОН) в конструкциях и отдельных узлов деталей АТ, например, после операций сварки или механического упрочнения поверхности. Остаточные напряжения – это механические напряжения,

остающиеся в материале после того как внешние нагрузки и воздействия были сняты.

Методы неразрушающего контроля (НК) для оценки НДС основываются на косвенной оценке по параметрам, которые связаны с механическими напряжениями [1, 2]. Среди них наибольшее распространение получил рентгеновский метод дифракции, который основан на регистрации интенсивности дифрагированного в заданном направлении рентгеновского излучения и углов дифракции. К преимуществам данного метода относят: наличие специализированного оборудования, разработанного непосредственно для оценки уровня ОН, в том числе существуют и серийно выпускаются автоматизированные системы контроля, метод рентгеновской дифракции стандартизован международным нормативным документом [3], метод обладает высокой точностью, а узлы системы измерения имеют нормируемые метрологические характеристики, позволяющие производить оценку погрешности измерений. Однако данный метод ограничен в измерении только поверхностных ОН, в зависимости от свойств объекта контроля (ОК) глубина слоя составляет 20–50 мкм. Зачастую поверхностный слой не позволяет сделать вывод о НДС детали.

Также распространен ультразвуковой метод оценки ОН в различных материалах объекта контроля. Скорость распространения упругих колебаний в ОК изменяется в зависимости от приложенных нагрузок, исходя из этого делают вывод о НДС объекта контроля. Ввиду того, что скорость распространения волн в материале измеряется как время прохождения волны через известное расстояние, то полученные данные дают информацию, которая усреднена по всему пути распространения ультразвуковой волны. Следовательно, при оценке ультразвуковым методом сильно ограничены возможности выделения информации об отдельных участках ОК, а вклад изменения от напряжений (в том числе и значительных) локализованных на малой области прохождения упругих колебаний может быть неразличим на фоне изменений свойств по всей длине пути.

Электропотенциальный метод – метод, который основан на измерении изменении удельной электрической проводимости материала при пропускании через него электрического тока. Электропроводность материала ОК связана с длиной свободного пробега электрона, которая определяется тепловым рассеянием и рассеянием, вызванным столкновениями электронов с нарушениями периодичности кристаллической решетки металла. Изменения электропроводности зависит от этих нарушений, которые в свою очередь связаны с НДС [4].

Ограничением данного метода является необходимость электрического контакта между датчиком и ОК.

Для измерения изменений проводимости материала также может быть применен вихретоковый метод НК. Метод основан на анализе взаимодействия электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, которые наводятся полем возбуждающей катушкой в электропроводящем ОК. В отличие от электропотенциального данный метод бесконтактен, однако из-за сложности анализа связи свойств ОК с сигналом преобразователя, метод не распространен для оценки уровня ОН.

Для экспериментальной оценки механических напряжений вихретоковым методом была сконструирована оснастка для нагружения образцов в форме диска, внешний вид разработанной оснастки показан на рисунке. Оснастка состоит из: цилиндра (1), в который помещается образец (3), и прижимного цилиндра (2), который, путем вкручивания в (1), обеспечивает заданную нагрузку. Через отверстие 4 возможно проведение исследований с помощью различных датчиков. [5].

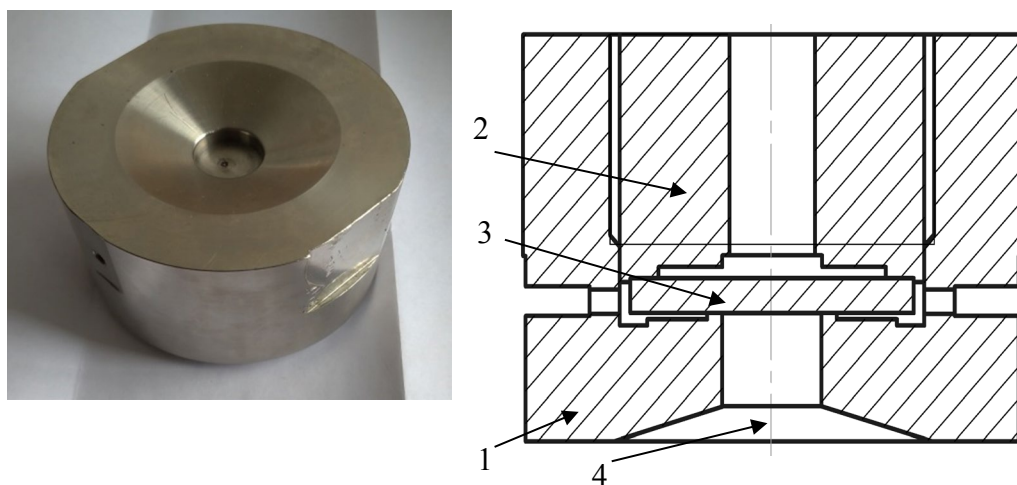


Рис. 5. Внешний вид и конструкция разработанной оснастки
1 – емкость ОК, 2 – прижимной цилиндр, 3 – ОК, 4 – отверстие под датчики

Для определения корреляции поворота прижимного цилиндра с механическими напряжениями в образце и построения соответствующей градуировочной кривой были проведены тензометрические испытания. Изменение значения сопротивления при увеличении деформации измерялось с помощью четвертьмостовой схемы, показанной на рис. 2.

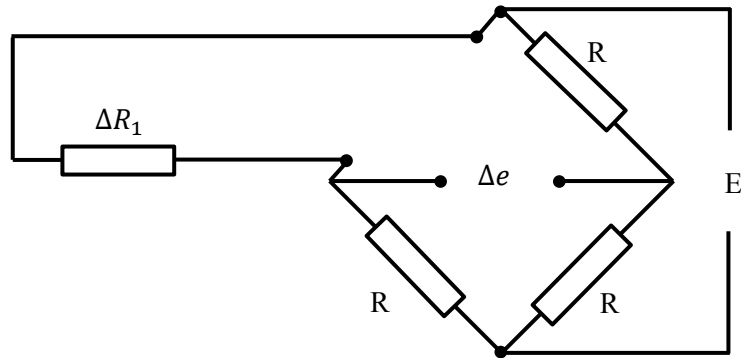


Рис. 6. Четвертьмостовая схема подключения тензорезистора

Электрическое напряжение на выходе тензорезистора связано со значением сопротивления тензорезистора формулой:

$$\Delta e = \frac{E}{4} \times \frac{\Delta R_1}{R}, \quad (1)$$

где E – напряжение возбуждения, ΔR_1 – изменение сопротивления, вызванное деформацией ε , R – постоянный резистор, Δe – напряжение на выходе

Из рисунка 3 следует, что механические напряжения на поверхности образца связаны с углом поворота цилиндра при углах поворота более 5° . Полученная зависимость позволяет по углу поворота без тензорезистора судить о напряжениях в образце.

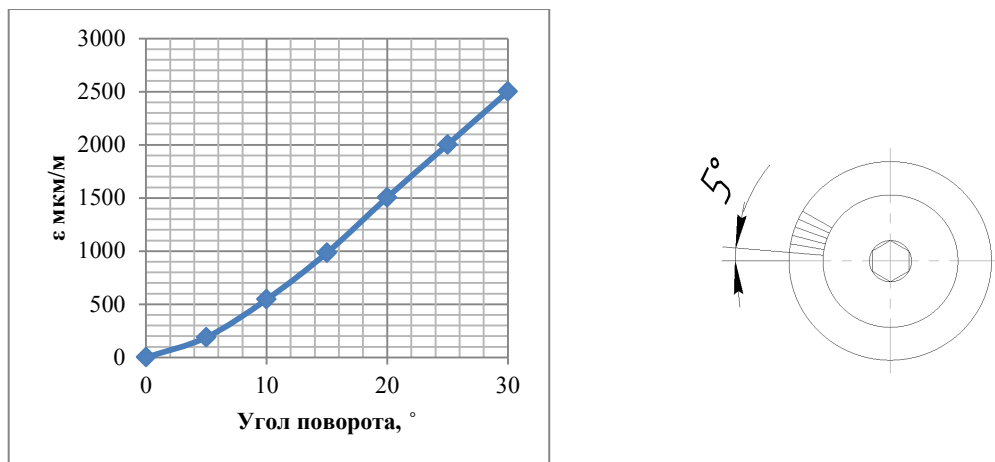


Рис. 3. Зависимость деформации от угла поворота.

Остаточные напряжения приводят к изменению проводимости объекта контроля не более чем на 2 %. Для контроля малых изменений

проводимости используется дифференциальный вихретоковый преобразователь. Дифференциальный вихретоковый преобразователь – преобразователь, основанный на измерении разности сигналов между катушками. К преимуществам данного преобразователя относится высокая чувствительность к изменению измеряемого параметра. Для определения оптимального расстояния между катушками было проведено численное моделирование преобразователя [6]. По итогам численного моделирования был разработан и изготовлен преобразователь. На рис. 4 представлена его конструкция, а также итоги моделирования.

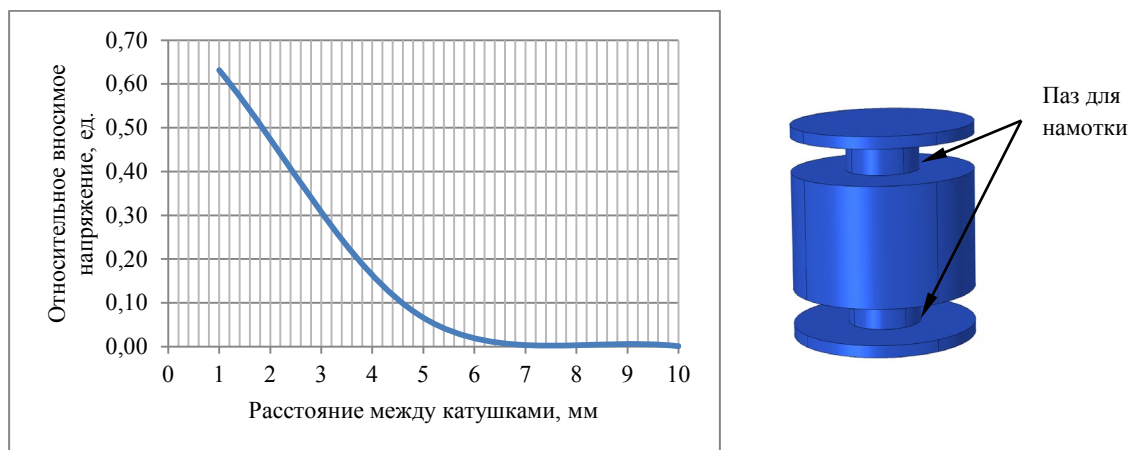


Рис. 4. Результаты моделирования и конструкция преобразователя.

Для выбора оптимальной частоты возбуждающего тока была получена зависимость чувствительности данного преобразователя к изменению проводимости образца от частоты. На рис. 5 показана зависимость приращения вносимого напряжения, вызванного увеличением проводимости на 0,05 МСм/м от частоты возбуждения тока преобразователя.

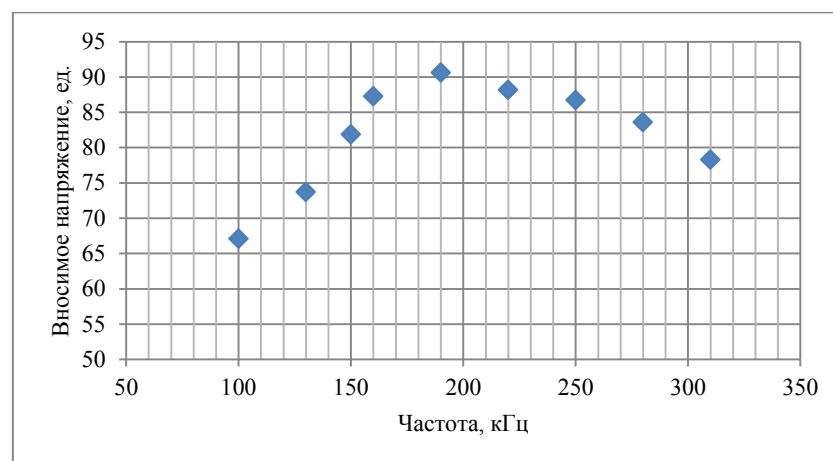


Рис. 5. Зависимость вносимого напряжения от частоты возбуждающего тока

Из данных рис. 5 следует, что диапазон частот от 160 до 220 кГц соответствует максимальной чувствительности к изменению электрической проводимости.

Эксперименты проводились в оснастке, изображенной на рис. 1, образцы нагружались по разметке, нанесенной ранее, параллельно с этим снимались данные с дефектоскопа, полученная зависимость показана на рис. 6. Частота возбуждающего тока выбрана 190 кГц (см. рис. 5). По полученной зависимости, можно сделать вывод о линейном изменении вносимого напряжения в упругой области.

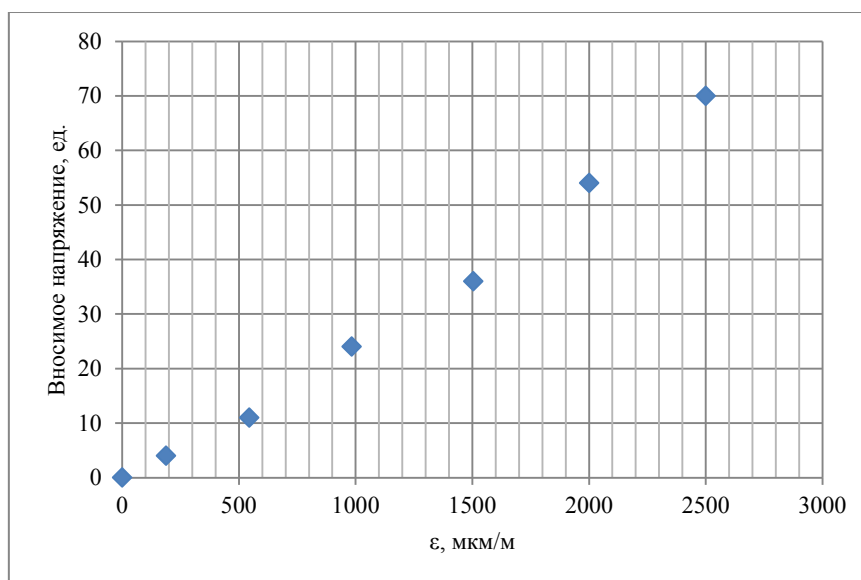


Рис. 6. Зависимость сигнала с дефектоскопа от величины деформации ϵ

Многие практические задачи оценки напряженно-деформированного состояния не могут быть решены интегральной оценкой проводимости и сводятся к построению распределения свойств по глубине. Так как глубина проникновения вихревых токов определяется частотой тока возбуждения, то теоретически возможна вариация чувствительности к свойствам различных слоев изменением частоты. Изменение частоты может достигаться как за счет применения импульсного возбуждения, так и за счет качания частоты генератора.

В настоящее время не существует отработанных и применяемых на практике методик вихретокового контроля, позволяющих построить распределение остаточных напряжений по глубине в материале объекта контроля.

Выводы:

1. Разработана и изготовлена оснастка для контролируемого нагружения образцов для проведения экспериментальных исследований.
2. Был разработан и изготовлен вихретоковый преобразователь для оценки уровня напряжений.
3. Проведено экспериментальное опробование оценки напряжений в образце из титанового сплава ВТ6 с помощью вихретокового метода контроля, в результате которого была показана эффективность данного метода.

Список источников

1. Пичугин С.С., Шитиков В.С., Головков А.Н. Неразрушающие методы оценки остаточных напряжений // Труды ВИАМ. 2024. № 1 (131). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI:10.18577/2307-6046-2024-0-1-101-112.
2. Rossini N.S., Dassisti M., Benyounis K.Y., Olabi A.G. Methods of measuring residual stresses in components (Review) // Materials and Design. 2012. No. 35. P. 572–588. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.08.022.
3. DSF/PrEN 15305. Non-destructive testing – Test method for Residual Stress by X-ray diffraction. Irish: European Standard Working Document, 2005. P. 88.
4. Кекало И.Б. Физические свойства металлов. Раздел: Электрические свойства. Лабораторный практикум. М., 1998. 139 с.
5. Шитиков В.С., Пичугин С.С., Кудинов И.И. Анализ возможностей оценки остаточных напряжений вихретоковым методом неразрушающего контроля // Электрометаллургия. 2024. №2. С. 22-28. DOI: 10.31044/1684-5781-2024-0-2-22-28.
6. Шитиков В.С., Кодак Н.П. К возможности оценки степени коррозионных поражений вихретоковым методом контроля // Труды ВИАМ. 2021. № 5 (99). С. 96–104. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI:10.18577/2307-6046-2021-0-5-96-104.

УДК 539.37/531

ЧИСЛЕННО-ЦИФРОВОЙ ПОДХОД ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

О.В. Герасимов¹; Д.Э. Хамзин¹; О.А. Саченков², к.ф.-м.н.

A NUMERICAL-DIGITAL APPROACH FOR FINITE ELEMENT MODELING BASED ON DIGITAL TWIN DATA

Oleg Gerasimov¹, Danil Khamzin¹, Oskar Sachenkov²

valeriy.karasikov@gmail.com, kde1260@gmail.com, 4works@bk.ru

¹*Казанский федеральный университет*

²*Казанский федеральный университет, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева—КАИ*

¹*Kazan Federal University*

²*Kazan Federal University, Kazan National Research Technical University named after. A.N. Tupolev—KAI*

Аннотация

Численное моделирование элементов неомогенной среды оказывается одним из актуальных направлений в области механики сплошных сред. Наибольшее развитие получили подходы, основанные на совместном применении методов неразрушающего контроля и численного моделирования. В данной работе предлагается к рассмотрению методика численного моделирования элементов пористой структуры на основе данных их компьютерной томографии. Целью работы выступало описание методики статического расчёта элементов пористой структуры на основе пространственного распределения материала. Численные расчёты определяли поле перемещений и напряжённо-деформированного состояния. Достоверность полученных данных устанавливалась на основе распределения ошибки энергии по напряжениям. Валидация результатов выполнялась по данным натурного эксперимента.

Ключевые слова:

неомогенные среды, методы неразрушающего контроля, численное моделирование, компьютерная томография, пористые структуры

Abstract

Numerical modeling of elements of an inhomogeneous medium turns out to be one of the current trends in the field of continuum mechanics. The most developed approaches are those based on the combined use of non-destructive testing methods and numerical modeling. This paper proposes for consideration

a technique for numerical modeling of elements of a porous structure based on their computed tomography data. The purpose of the work was to describe the methodology for static calculation of elements of a porous structure based on the spatial distribution of the material. Numerical calculations determined the field of displacements and stress-strain state. The reliability of the obtained data was established on the basis of the energy error distribution over stresses. Validation of the results was carried out using data from a full-scale experiment.

Keywords:

inhomogeneous media, non-destructive testing methods, numerical modeling, computed tomography, porous structures

Вводная часть

Цифровое прототипирование представляет собой процесс восстановления цифровой копии рассматриваемого объекта. В качестве исходных данных выступают значения, полученные путём проведения сканирования исследуемой области. Результатом такой процедуры выступает изображение объекта. Одним из подходов к получению подобных снимков является проведение компьютерной томографии [1, 2, 3, 4]. Для каждого объекта создаётся индивидуальный массив значений, позволяющий извлекать информацию о распределении механических характеристик [5]. Численные методы, основанные на применении данных компьютерной томографии, соответствуют методам неразрушающего контроля [6, 7] и позволяют производить расчёт интересующей области с точностью, зависящей от чувствительности и разрешающей способности сканирующего устройства [8, 9].

Проведение широкого спектра исследований показало, что единицы Хаунсфилда для некоторого объёма среды могут быть интерпретированы в качестве оптической плотности материала [10] и даже пересчитаны в соответствующие значения упругих постоянных и предельных напряжений с использованием следующих соотношений [11]:

$$\rho(\{r\}) = a_{\rho} + b_{\rho} HU_n(\{r\}), \quad (1)$$

$$E(\{r\}) = a_E \rho^{b_E}(\{r\}), \quad (2)$$

$$[\sigma(\{r\})] = a_{\sigma} \rho^{b_{\sigma}}(\{r\}), \quad (3)$$

где коэффициенты a и b с соответствующими индексами определяются из натурных экспериментов или заимствуются из существующей литературы и могут варьироваться в зависимости от вида исследуемой структуры.

Одним из наиболее распространённых методов обработки изображений выступает бинаризация исходного массива данных согласно некоторому заранее заданному порогу, величина которого определяется соответствующим алгоритмом [12]. Применение такого преобразования значений в случае исследования негомогенных сред позволяет

сепарировать интересующие фазы материала и устанавливать им в соответствие эффективные механические свойства.

Восстановление изображения трёхмерных физических объектов на основе проведения компьютерной томографии предполагает создание массива данных, значения которого представляют собой некоторую усреднённую по соответствующему микрообъёму величину проницаемости среды [13]. Наиболее распространённой формой наименьшей единицы изображения выступает воксел, представляющий собой прямоугольный параллелепипед. В связи с этим моделирование образцов из негомогенных материалов в трёхмерной постановке может быть основано на построении сетки, каждый элемент которой является выпуклым шестигранником. С алгоритмической точки зрения наиболее подходящим оказывается гексагональный восьмиузловой трёхмерный изопараметрический конечный элемент с линейной аппроксимацией геометрии и поля перемещений.

Материалы и методы

Используя функции формы N для каждого i -го узла в локальной системе координат (ξ, η, ζ) текущего конечного элемента, аппроксимация перемещений внутри соответствующей ему области может быть определена в следующем виде:

$$\{\delta\} = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta, \zeta) \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{Bmatrix} \quad (4)$$

где u , v и w – компоненты вектора перемещений в глобальной системе координат (x, y, z) , 8 – количество узлов конечного элемента, а функции формы определяются выражением:

$$N_i(\xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{8}(1 + \xi \cdot \xi_i)(1 + \eta \cdot \eta_i)(1 + \zeta \cdot \zeta_i) \quad (5)$$

В матричной форме равенство (5) представимо в виде:

$$\{\delta\} = [N(\xi, \eta, \zeta)] \{\delta^E\} \quad (6)$$

где $[N(\xi, \eta, \zeta)]$ – матрица функций формы конечного элемента, а $\{\delta^E\}$ – вектор перемещений в соответствующих ему узлах.

Компоненты векторов деформаций и напряжений были переписаны в нотации Фойгта. Тогда на основе соотношений связи между деформациями и перемещениями вектор деформаций в текущем узле конечного элемента может быть записан в виде:

$$\{\varepsilon\} = [B(\xi, \eta, \zeta)] \{\delta\} \quad (7)$$

где $[B(\xi, \eta, \zeta)]$ – матрица дифференцирования.

В случае описания образцов из негомогенных материалов матрица упругих постоянных может быть представлена в виде:

$$[D(\{r\})] = [D] \cdot \omega(\{r\}) \quad (8)$$

где $[D]$ – матрица упругости для элементарной единицы материала («чистый» образец), $\omega(\{r\})$ – скалярная функция, определяющая негомогенные свойства среды. В силу существования экспериментально установленной зависимости между единицами шкалы Хаунсфилда и механическими параметрами материала, значения такой функции могут применяться в качестве весов численного интегрирования.

Результирующее представление матрицы жёсткости конечного элемента тогда примет вид [14]:

$$[K^E] = \int_{-1}^1 [B(\xi, \eta, \zeta)]^T [D] [B(\xi, \eta, \zeta)] |J(\xi, \eta, \zeta)| \omega(\{r(\xi, \eta, \zeta)\}) d\xi d\eta d\zeta \quad (9)$$

где $|J(\xi, \eta, \zeta)|$ – определитель Якоби для преобразования координат.

Рассмотрение линейных изотропных материалов предполагает определённую зависимость полученного решения от величины прикладываемого воздействия. В этом случае расчёты, проводимые кинематическим нагружением моделей, построенным по данным сканирования методом взвешенного интегрирования, позволяют восстанавливать значения модуля упругости Юнга и касательных модулей для образцов неоднородной структуры. Более того, тензор упругости, используемый при вычислении матрицы жёсткости конечного элемента, также устанавливает линейную зависимость относительно модуля упругости Юнга (касательного модуля) материала:

$$[D(E)] = k_{[D]} E, \quad (10)$$

$$[K^E([D])] = k_{[K^E]} [D] \quad (11)$$

где $[D]$ – тензор упругих постоянных, E – модуль упругости Юнга (касательный модуль) изотропного материала и $[K^E]$ – матрица жёсткости конечного элемента сетки.

Дальнейший алгоритм основывается на проведении натурального эксперимента над образцом и получении соответствующего графика разрушения в осях перемещение-усилие [15]. Линейность численной модели позволяет проводить расчёты для одной из точек, соответствующих диапазону перемещений из физического эксперимента, аппроксимируя значения в остальных точках прямой линией. Таким образом, проведение вычислений позволяет определить соотношение между действительной величиной возникающего усилия, полученного из эксперимента, и моделируемой – определяемой численным расчётом. Искомая величина модуля упругости Юнга (касательного модуля), при

фиксированном значении коэффициента Пуассона, может быть определена аналогичным отношением к исходному значению:

$$k = \frac{F_{act}}{F_{eq}} \quad (12)$$

$$E_{matl} = kE_{init} \quad (13)$$

где F_{eq} – эквивалентное усилие, получаемое численным моделированием, F_{act} – действительная реакция, определяемая физическим испытанием, E_{matl} и E_{init} – истинный (соответствующий изотропному материалу) и исходный модули упругости Юнга (касательные модули), соответственно.

Коэффициент отношения полученных результатов может быть определён на основе тангенса угла наклона касательной для соответствующих графиков:

$$k = \frac{\tan(\beta_i)}{\tan(\alpha)} \quad (14)$$

где β_i – угол наклона касательной для i -го линейного участка диаграммы разрушения (каждому линейному участку соответствует отдельное значение параметра материала), α – угол наклона касательной для решения, полученного численным моделированием.

Результаты

Численное моделирование костного органа проводилось на конечно-элементных сетках различной степени дискретизации: физический размер конечных элементов в направлении каждой координатной оси компьютерной томографии составлял 10 и 5 мм, что соответствовало 20 и 40 конечным элементам на стороне выделенной области. Построение расчётных сеток выполнялось методом фильтрации: удалялись конечные элементы, содержание костного материала в которых оказывалось ниже 5 % [16, 17].

Кинематические граничные условия с наибольшей степенью достоверности соответствовали натурному эксперименту. Перемещения узлов верхней и нижней поверхности дистальных участков костного органа фиксировались в направлении трёх декартовых координатных осей Ox , Oy и Oz . Схема нагружения приведена на рис. 1. Концевые части фиксировались в перемещениях на внешних гранях. Посередине образца прикладывалась кинематическая нагрузка. В качестве исходных параметров материала принимались следующие величины: модуль упругости Юнга – 1 ГПа, коэффициент Пуассона – 0.3. Для возможности сопоставления результатов, полученных на основе численного моделирования и путём проведения натурального испытания, в качестве кинематического нагружения принимались перемещения, равные 1, 2 и 3 мм, соответственно. Время вычислений варьировалось в пределах 15 минут для каждой расчётной сетки.

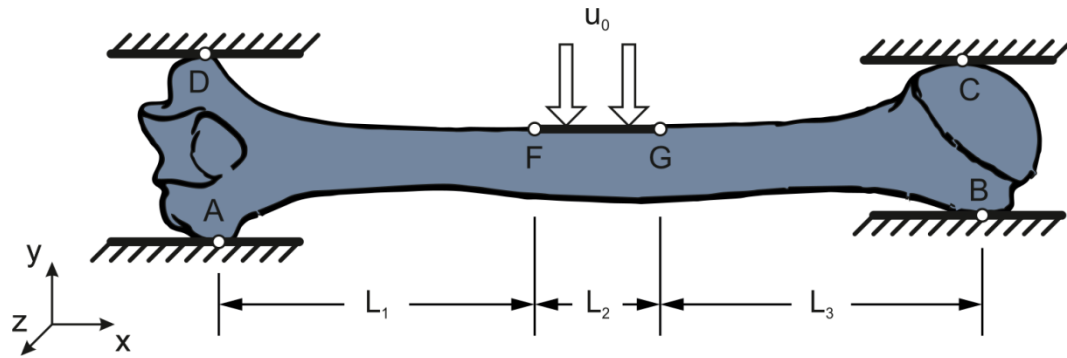


Рис. 1. Схематическое представление органа трубчатой кости в условиях действия граничных условий, соответствующих испытанию на поперечный изгиб

Рассмотрим полную диаграмму нагружения образца с выделением соответствующих линейных участков для первой модели. На рис. 2 представлен график (отмечен жёлтым цветом), соответствующий перемещениям индентора до механического разрушения костного органа.

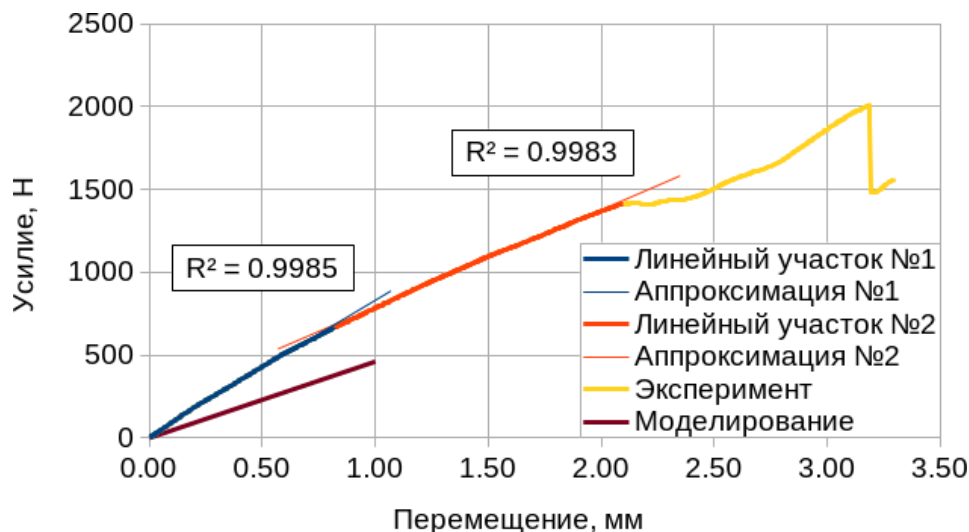


Рис. 2. Диаграмма нагружения образца, определённая в диапазоне, предшествующем образованию трещины (20 конечных элементов в направлении каждой координатной оси)

Синим и оранжевым цветом отображены первый и второй линейные участки, в диапазоне которых может быть проведено исследование упругих механических параметров образца: каждый из них имеет аппроксимацию полиномом первой степени. Выделение подобных диапазонов и аппроксимация соответствующих значений могут быть реализованы автоматически. Коричневым цветом выделено решение, основанное взвешенном интегрировании.

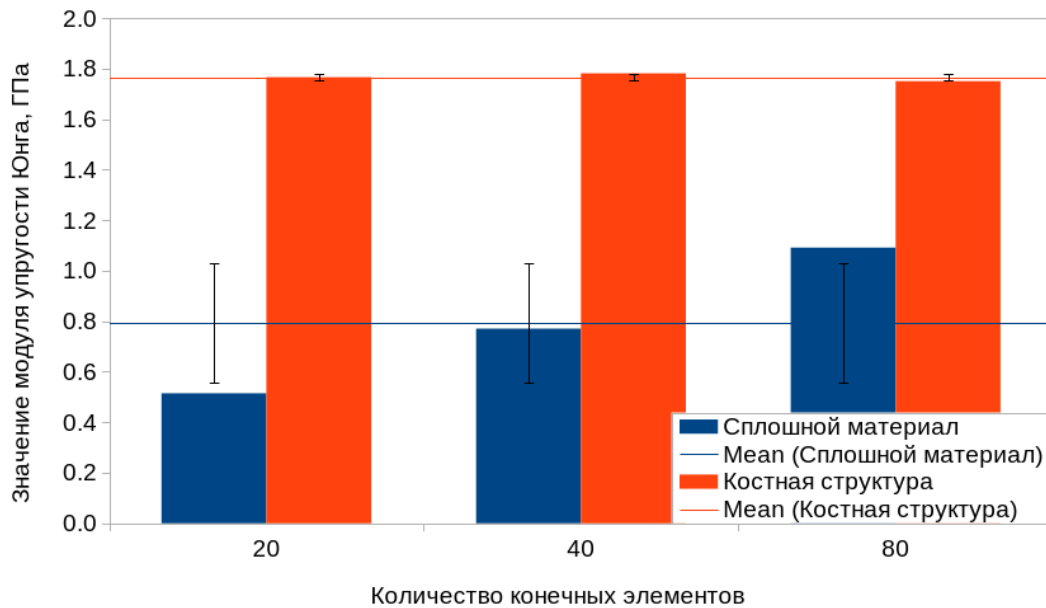


Рис. 3. Влияние размера расчётной сетки на значения модуля упругости Юнга, соответствующие первому линейному участку

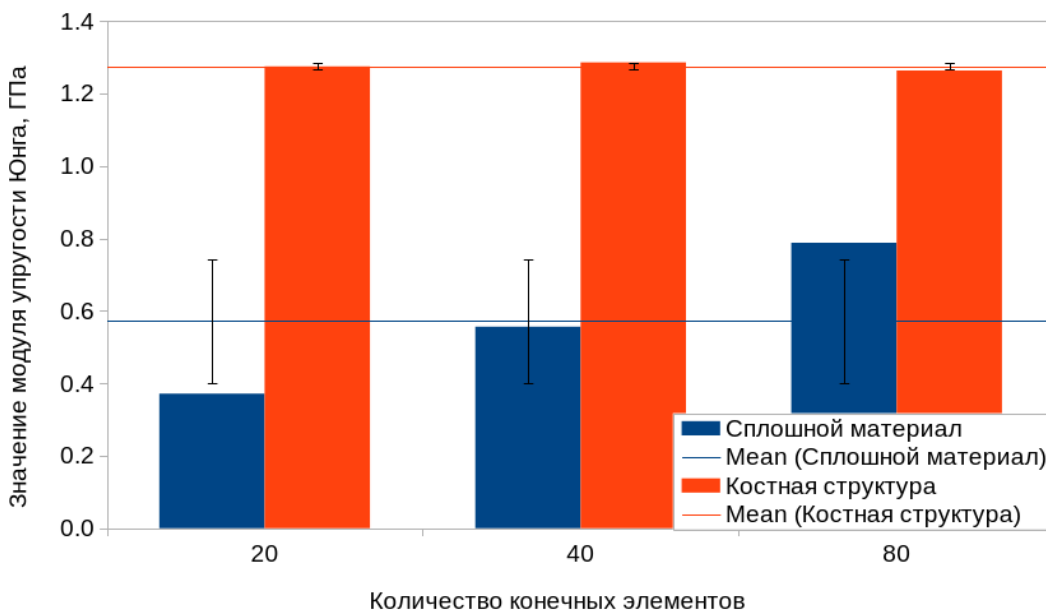


Рис. 4. Влияние размера расчётной сетки на значения касательного модуля, соответствующие второму линейному участку

Результирующие значения механических параметров, полученные на основе данных для первого и второго линейных участков, представлены на рис. 3 и 4. Полученные характеристики, представленные для вычислений на основе материала костной структуры, варьируются в пределах 2 % и соответствуют истинным значениям модуля упругости Юнга и касательного модуля. Наличие погрешности в результатах может быть объяснено неточностью приложения граничных условий, а также влиянием сходимости сеточного метода.

Выводы

Результаты показали, что применение функции бинаризации к данным компьютерной томографии пористых образцов позволяет получить достоверные результаты. В этом случае перемещения в узлах конечного элемента обуславливаются не только механическими свойствами, но также и пространственным распределением материала. Предложенный подход позволяет неявно учитывать структурные особенности материала на основе взвешенного интегрирования локальной матрицы жёсткости. Реализация расчётов на основе такого метода предполагает меньшие вычисления относительно существующих подходов. При этом разработан метод для решения обратной задачи с целью определения механических характеристик неоднородного образца.

Исследование выполнено при финансовой поддержке, выделяемой Казанскому федеральному университету по государственному заданию в сфере научной деятельности, проект № FZSM-2023-0009.

Список литературы

1. Otsu N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms // Trans. Syst. Man Cybern. 1979. Vol. 9, No. 1. P. 62–66. DOI: 10.1109/TSMC.1979.4310076.
2. Li, W., Jian, Y., Zhou, X., Wang, H. In situ tensile damage characterization of C/C composites through X-ray computed tomography and digital volume correlation // Ceramics International. 2022. doi: 10.1016/j.ceramint.2022.11.231.
3. Shi, D., Zhang, B., Liu, C., Wang, L., Yang, X., Luo, R. In-situ study on compressive behaviors of different types of 3D SiC/SiC composites using X-ray computed tomography and digital image correlation // Journal of Materials Research and Technology. 2023. Vol. 22. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.12.178.
4. Bagirov, A., Suvarly, P., Ogaryov, E., Yeltsin, A., Mininkov, D., Tagizade, A. Multislice computed tomography in the complex assessment of deformities of long tubular bones of the lower extremities: prospective cohort study // N.N. Priorov Journal of Traumatology and Orthopedics. 2023. Vol. 29. P. 269–277. DOI: 10.17816/vto111559.
5. Nina O., Morse B., Barrett W. A recursive Otsu thresholding method for scanned document binarization // WACV. 2011. P. 307–314. DOI: 10.1109/WACV.2011.5711519.
6. Zheng X., Chen T.-T., Jiang X., Naito M., Watanabe I. Deep learning-based inverse design of three-dimensional architected cellular materials with the target porosity and stiffness using voxelized Voronoi lattices // STAM. -- 2022. - Vol. 24. DOI: 10.1080/14686996.2022.2157682.
7. Харин Н.В., Герасимов О.В., Большаков П.В., Хабибуллин А.А., Федянин А.О., Балтин М.Э., Балтина Т.В., Саченков О.А. Методика определения ортотропных свойств костного органа по данным

компьютерной томографии // Российский журнал биомеханики. 2019. Т. 23, №3. С. 460–468. DOI: 10.15593/RzhBiomeh/2019.3.11.

8. Gerasimov O.V., Kharin N.V., Fedyanin A.O., Bolshakov P.V., Baltin M.E., Statsenko E.O., Fadeev F.O., Islamov R.R., Baltina T.V., Sachenkov O.A. Bone Stress-Strain State Evaluation Using CT Based FEM // Front. Mech. Eng. 2021. Vol. 7. P. 688474. DOI: 10.3389/fmech.2021.688474.

9. Воробьев О.В., Семёнова Е.В., Мухин Д.А., Стаценко Е.О., Балтина Т.В., Герасимов О.В. Конечно-элементная оценка деформированного состояния по данным компьютерной томографии // Вестник ПНИПУ. Механика. 2021. № 2. С. 44–54. DOI: 10.15593/perm.mech/2021.2.05.

10. Young, P., Beresford-West, T., Coward, S., Notarberardino, B., Walker, B., Abdul-Aziz, A. An efficient approach to converting three-dimensional image data into highly accurate computational model // Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences. 2008. Vol. 366. P. 3155-3173. DOI: 10.1098/rsta.2008.0090.

11. Choi, S., Park, Y.-K., Kim, J.H., Moon, H., Kwon, W.-K., Ham, C. Clinical Importance of Hounsfield Unit in Computed Tomography of Sub-Axial Cervical Vertebral Body // Asian Journal of Pain. 2022. Vol. 8, No. 2. DOI: 10.35353/ajp.2022.00059.

12. Андреев Ю.С., Гурьянова О.А., Пухова Е.А. Методы гистограммных преобразований и контроля в процессах полиграфического воспроизведения изображений // Информация: передача, обработка, восприятие. 2016. С. 68–80.

13. Саченков О.А., Герасимов О.В., Королева Е.В., Мухин Д.А., Яикова В.В., Ахтямов И.Ф., Шакирова Ф.В., Коробейникова Д.А., Хань Х.Ч. Построение негомогенной конечно-элементной модели по данным компьютерной томографии // Российский журнал биомеханики. 2018. Т. 22. № 3. С. 332–344.

14. Герасимов О.В., Бережной Д.В., Большаков П.В., Стаценко Е.О., Саченков О.А. Построение механической модели элементов гетерогенной среды на основе численно-цифрового алгоритма обработки данных компьютерной томографии // Российский журнал биомеханики. 2019. Т. 23. № 1. С. 87–97. DOI: 10.15593/RJBiomech/2019.1.10.

15. Герасимов О.В., Рахматулин Р.Р., Балтина Т.В., Саченков О.А. Определение механических свойств костной ткани численно-цифровым методом на основе данных компьютерной томографии // Российский журнал биомеханики. 2023. Т. 27, № 3. С. 53–66. DOI: 10.15593/RzhBiomech/2023.3.04.

16. Frey, P.J. Generation and adaptation of computational surface meshes from discrete anatomical data // Int. J. Numer. Meth. Engng. 2004. Vol. 60. P. 1049–1074. DOI: 10.1002/nme.992.

17. Cremers, D., Rousson, M., Deriche, R. A review of statistical approaches to level set segmentation: Integrating color, texture, motion and shape // International Journal OJ Computer Vision. 2006. Vol. 72. P. 195–215.

УДК 620.179

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ОТЛИВОК ИЗ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ ЦИФРОВОЙ РАДИОГРАФИИ

А.В. Смирнов¹; Е.И. Косарина¹, д.т.н.

NON-DESTRUCTIVE TESTING OF CASTINGS FROM MAGNESIUM ALLOYS BY METHOD DIGITAL RADIOGRAPHY

Alexei V. Smirnov¹; Ekaterina I. Kosarina¹

admin@viam.ru

¹*Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ)*

¹*Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute» (NRC «Kurchatov institute» - VIAM)*

Аннотация

Доклад посвящен проблемам внедрения цифровых технологий в процесс рентгеновского неразрушающего контроля отливок из магниевых сплавов. Переход от традиционной радиографии с использованием радиографической пленки к цифровой радиографии оправдан лишь в том случае, если качество цифрового изображения не хуже качества радиографического изображения на снимке.

Реферат

Для магниевых сплавов, широко используемых в авиастроении, характерными дефектами являются микрорыхлота, структурная неоднородность, линии течения, червоточины, заполненные эвтектикой, окисные плены. Проведены испытания и сравнительный анализ эталонных образцов шкал микрорыхлот магниевых сплавов на цифровых детекторных системах и их пленочных аналогах.

Ключевые слова:

рентгенограмма, цифровое изображение, детектор, базовое пространственное разрешение, отношение сигнал/шум

Abstract

The report is devoted to the problems of introducing digital technologies into the process of X-ray non-destructive testing of castings from magnesium alloys. The transition from traditional radiography using radiographic film to

digital radiography is justified only if the quality of the digital image is no worse than the quality of the radiographic image in the image.

Essay

For magnesium alloys, widely used in aircraft construction, characteristic defects are microlooseness, structural heterogeneity, flow lines, wormholes filled with eutectic, and oxide films. Tests and comparative analysis of reference samples of micro-looseness scales of magnesium alloys were carried out on digital detector systems and their film analogues.

Keywords:

radiograph, digital image, detector, basic spatial resolution, signal-to-noise ratio

1. Введение

Для магниевых сплавов, широко используемых в авиастроении, характерными дефектами являются микрорыхлота, структурная неоднородность, линии течения, червоточины, заполненные эвтектикой, окисные пленки [1]. Степень допустимости каждого из перечисленных дефектов зависит от их размеров и количества в объеме контролируемого объекта.

Основным видом неразрушающего контроля отливок из магниевых сплавов является радиационный, в частности его радиографический метод с использованием в качестве детектора радиографической пленки [2]. Процесс контроля состоит из экспонирования при оптимальном режиме, получения радиографического снимка, его расшифровки и выдачи заключения о качестве отливки по результатам радиографического контроля. В свое время специалистами ВИАМ был разработан целый ряд эталонных рентгеновских снимков фрагментов отливок из магниевых сплавов с изображением перечисленных дефектов [3]. При расшифровке рентгенограмм дефектоскопист в обязательном порядке использует эталонные рентгенограммы, помогающие определить вид того или иного дефекта и степень его распространения в объекте контроля. Такая практика существует за рубежом. Наличие снимков с изображением типовых дефектов действительно помогает оценить качество контролируемой отливки, так как легче обнаружить и оценить аномалию, имея перед собой образ конкретного дефекта.

Микрорыхлота – опасный дефект, появление которого связано с разрушением изделия по граням кристаллических образований. Классифицируют микрорыхлоту по степеням (сильная, средняя и слабая) в зависимости от размеров ее рассредоточенности в отливке. Эталонные снимки служат для определения степени микрорыхлоты [1, 3]. Наибольшую трудность вызывает оценка степени микрорыхлоты, поскольку этот вид дефекта на рентгеновском снимке выглядит не контрастно. На снимке микрорыхлота выглядит как не контрастные и

неравномерные несколько более темные зоны изображения отливки (обычно из сплавов на основе магния) разнообразной формы. Аналогично происходит оценка качества отливки и по другим дефектам [4].

Такой способ оценки качества ответственных объектов в эпоху цифровизации архаичен, обладает целым рядом недостатков, включая субъективность, высокую себестоимость получения рентгенограмм и потребность обновления эталонных снимков через каждые три года, тем более, что в настоящее время остро стоит вопрос перехода от пленочной радиографии к цифровой в применении матричных детекторов, при которой эталонные снимки, выполненные на радиографической пленке просто непригодны [5]. Переход от пленочной радиографии к цифровой диктует создание эталонных цифровых изображений [6]. Проведенные в ВИАМ исследования в области создания цифровых рентгеновских изображений микрорыхлоты показали обнадеживающие результаты. Этот факт имеет глубокую физическую подоснову из-за особенности цифрой радиографии. В цифровой радиографии существует возможность получения высокого контраста, даже, если объект неконтрастен по своей природе. С другой стороны, при использовании ЦДС изображения мелких дефектов получаются нечеткими из-за его (изображения) пиксельной природы. Микрорыхлота же имеет рассредоточенный по всему объему отливки характер, ее площадь захватывает большое количество пикселей [6, 7].

Современные ЦДС (плоскопанельный детектор с размером пикселя 100 мкм АЦП 16 бит, микрофокусный рентгеновский аппарат с размером фокусного пятна в диапазоне 6–170 мкм, с мощностью трубки 300 Вт при 225 кВ) позволяют представить альбом в цифровом варианте. Прогресс развития ЦДС настолько стремителен, что в ближайшем будущем следует ожидать их внедрения в производство авиационной и другой техники. Переход на цифровую радиографию при контроле отливок из магниевых сплавов позволит исключить трудоемкое тиражирование эталонных радиографических снимков, позволит снизить трудоемкость и себестоимость процесса [8].

Качество любого изображения, в том числе, выполненного на радиографической пленке и представленного на экране монитора цифрового, определяется тремя свойствами: контрастом, четкостью (нерезкостью), отношением сигнал/шум (ОСШ). Зависимость этих свойств при формировании цифрового изображения посредством матричных детекторов и оптического изображения на радиографической пленке от режимов, параметров контроля и прочих факторов неоднозначная [9].

2. Теоретический анализ качества изображения, выполненного на радиографической пленке и цифрового изображения, полученного посредством матричного детектора

2.1 Оптическое изображение на радиографической пленке

Оптический контраст радиографического изображения определяется следующей зависимостью: $K_o = K_{\text{рад}} \cdot G$, где $K_{\text{рад}} = \frac{\mu \cdot \delta}{B}$ – контраст радиационного изображения; μ – линейный коэффициент ослабления излучения материалом, см^{-1} ; δ – размер дефекта в направлении оси пучка излучения, см ; B – фактор накопления рассеянного излучения; G – средний градиент характеристической кривой радиографической пленки. Для получения высокого оптического контраста необходимо по возможности высокие значения $K_{\text{рад}}$ и G . Радиационный контраст $K_{\text{рад}}$ тем выше, чем больше линейный коэффициент ослабления излучения материалом μ , и тем меньше рассеянное излучение, количество которого показывает фактор накопления B . Полностью от рассеянного излучения нельзя избавиться, но его можно существенно снизить, используя защитные экраны, фильтры, маски. Линейный коэффициент ослабления излучения материалом μ тем выше, чем ниже энергия излучения (анодное напряжение). Эта зависимость представлена на рис. 1.

Примечание. Анодное напряжение U , кВ, численно равно 2/3 от энергии излучения E , кэВ.

Средний градиент характеристической кривой радиографической пленки G определяется классом пленочной системы. Для радиографической пленки класса С2 – $G=5,1$; для радиографической пленки класса С6 – $G=4,1$. Таким образом, условие получения высокого контраста оптического изображения: анодное напряжение выбирать по возможности минимальным, а класс радиографической пленки С2÷С4.

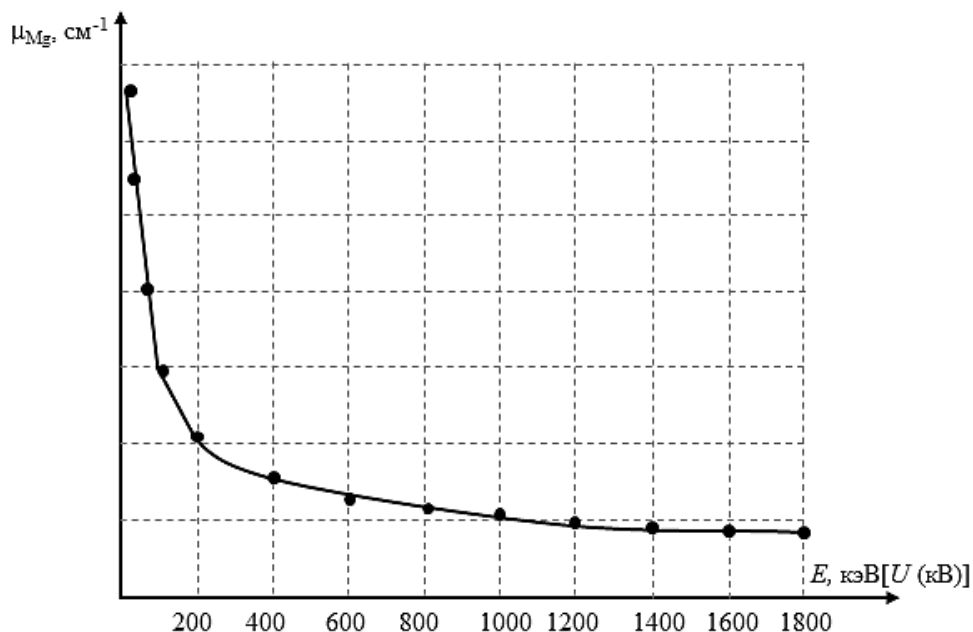


Рис. 1. Зависимость μ от энергии излучения (анодного напряжения)

Нерезкость изображения: $u_o = \sqrt{u_r^2 + u_c^2}$, u_o – общая нерезкость, мм; u_r – геометрическая нерезкость, мм; u_c – собственная нерезкость радиографической пленки, мкм. Геометрическая нерезкость: $u_r = \frac{\Phi \cdot a}{F - a}$, где Φ – размер фокусного пятна источника, мм; a – расстояние «объект–пленка», мм; F – расстояние «источник–пленка». Собственная нерезкость определяется размером микрокристаллов бромида серебра, поэтому $u_c \ll u_r$.

Отношение сигнал/шум (ОСШ). Для радиографических пленок ОСШ это отношение градиент/гранулярность $G/\sigma D$. Гранулярность σD определяется неравномерным распределением кристаллов в эмульс. слое и случайной длиной пробега электрона; для пленок классов С1-С6 размер $\sigma D = 0,014 \div 0,035$; а средний градиент: $G = 4 \div 5$, следовательно, $G/\sigma D = 100 \div 400$.

2.2 Цифровое изображение на мониторе ЦДС

Контраст цифрового изображения зависит от контраста радиационного изображения несколько иначе, чем оптический контраст снимка на пленке. Контраст радиационного изображения представляет собой сумму контраста полезного сигнала (дефекта) и контраста шума, который так же как и сигнал проходит и преобразуется электронной системой детектора. Поэтому анодное напряжение не следует выбирать слишком низким. Повышение контраста следует добиваться оптимальным количеством кадров при работе в режиме накопления [10]. Полезный сигнал и шум являются случайными сигналами, дефект, если он есть, отличается постоянством, а шум – стохастичностью, поэтому по большому количеству кадров контраст изображения дефекта усиливается, а контраст шумового сигнала уменьшается. При этом малоконтрастные дефекты можно изобразить с высоким контрастом.

Нерезкость цифрового изображения: $u_o = \sqrt{u_r^2 + u_c^2}$ $u_c = 2 \cdot SR_b^{\text{дет}}$, где $SR_b^{\text{дет}}$ – базовое разрешение детектора. Оно определяется размером пикселя 100–200 мкм, таким образом, u_c и u_r соизмеримы. Для воспроизведения мелких элементов необходимо увеличение, которое достигается соотношением расстояний: «объект–детектор» «объект–источник» [11].

Отношение сигнал/шум (ОСШ). Помимо шума радиационного изображения на ОСШ влияет собственный шум детекторной системы: Электроника детекторной системы производит **флуктуационные шумы**, которые складываются из:

- шума, порожденного флуктуациями объемной плотности электрического заряда в элементах электрических схем преобразователей;

– из-за хаотического теплового движения заряда, наличие темновых токов.

Отстройка от флуктуационных шумов предусмотрена в программном обеспечении (ПО) детектора [12].

Шумы квантования, возникновение которых связано с дискретизацией и количеством уровней серого (квантованием). Величина шума квантования представляет собой разность между исходным изображением и его дискретизированной и квантованной копией. Избавиться от шумов квантования можно только заменой детекторной системы [13] (рис. 2).

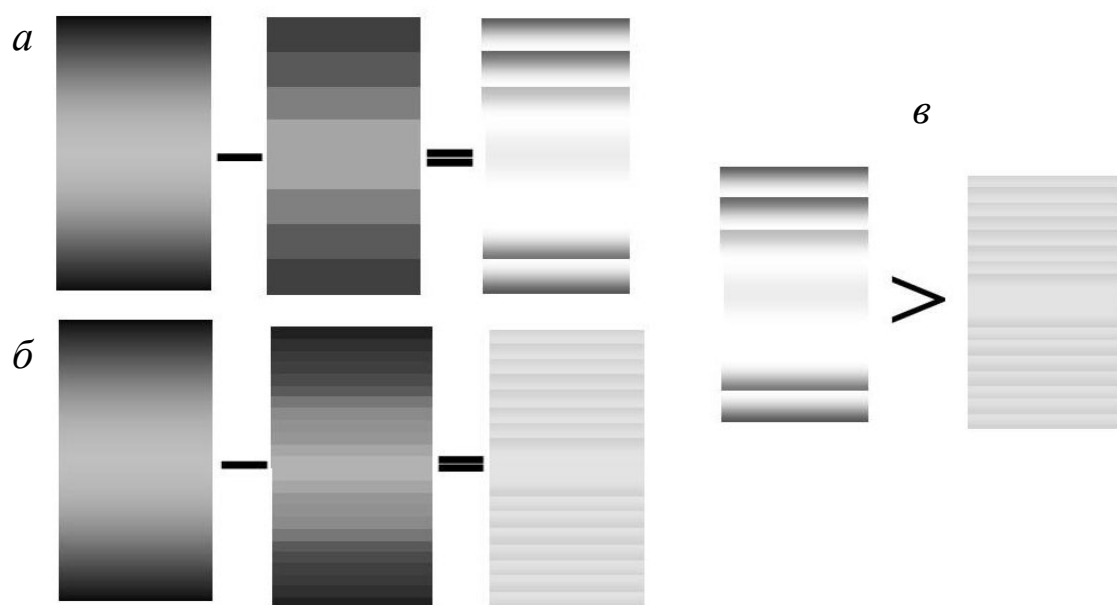


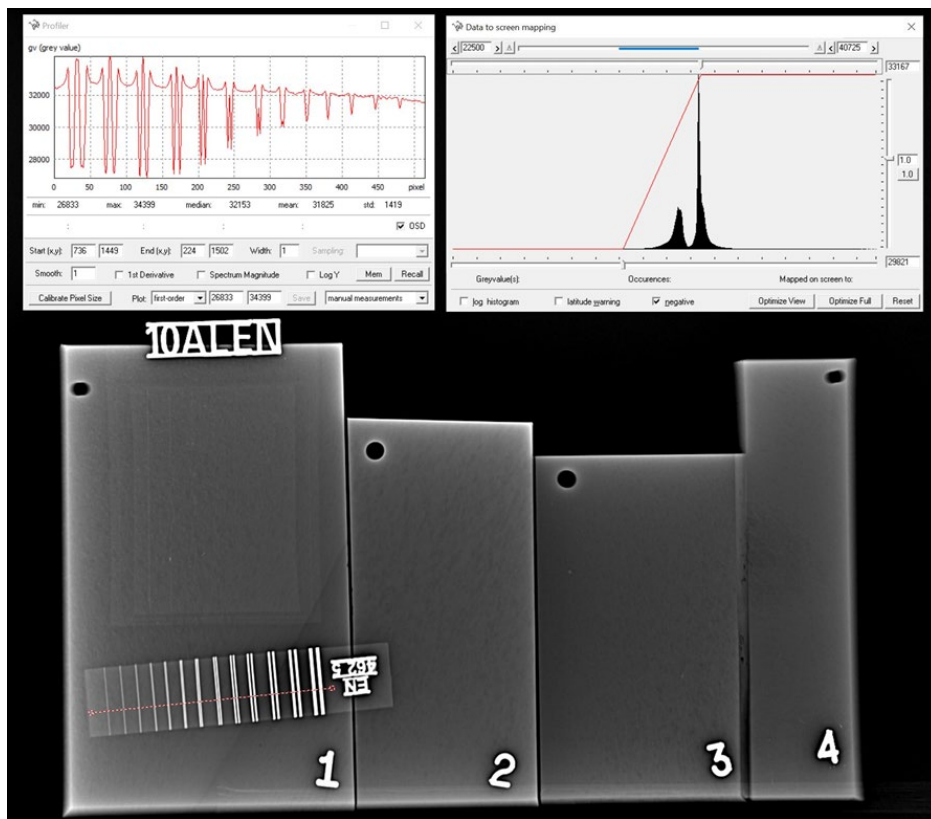
Рис. 2. Образование шумов квантования при низкой дискретизации (а) и при высокой дискретизации (б); сравнение шумов дискретизации (в)

3. Экспериментальные исследования по разработке эталонных цифровых снимков

При проведении экспериментов с целью получения эталонных цифровых изображений дефектов (микрорыхлоты, линий течения, неоднородности структуры, эвтектики и др.) был первоначально выбран критерий: цифровые снимки по своему качеству должны быть максимально приближены в радиографическом изображении на пленке.

При анодном напряжении 180 кВ и токе 1 мкА, опытным путем меняя регулировки: продолжительность кадра, число кадров накопления, геометрические параметры были получены цифровые изображения эталонных образцов (рис. 3). Анодное напряжение для получения цифровых изображений выше рекомендуемых ГОСТ 20426. При этом для образцов различных

а)



б)

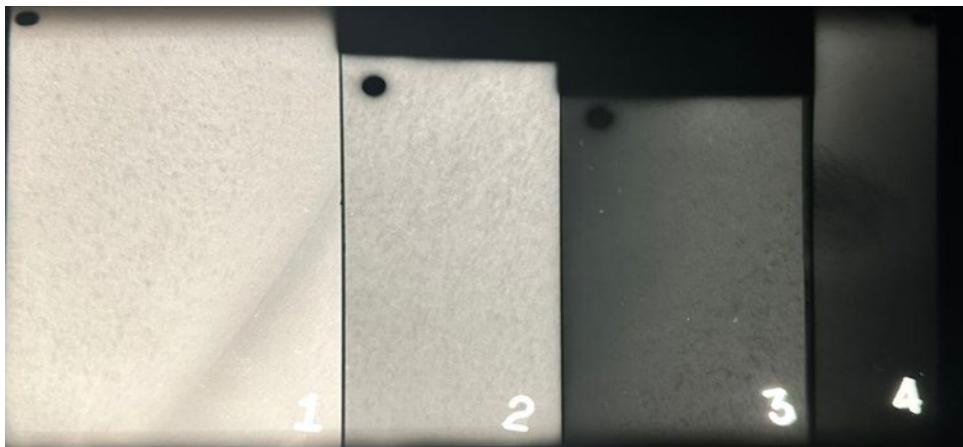


Рис. 3. Цифровые (а) и радиографические (б) изображения эталонных образцов из сплава на основе магния с дефектами: 1 – линия течения; 2, 3, 4 – микрорыхлота слабой степени

Анализ изображений показывает, что:

- контраст цифрового изображения линии течения практически совпадает с контрастом изображения этого дефекта на радиографическом снимке;

– контраст цифровых изображений микрорыхлоты слабой степени близок к радиографическим, хотя и незначительно ниже, микрорыхлота слабой степени является трудно выявляемым дефектом.

Заключение

При замене пленочной радиографии на цифровую при неразрушающем контроле отливок из магниевых сплавов был выбран критерий: качество цифровых изображений объектов контроля должно быть не хуже, чем радиографических.

Проведенный теоретический анализ качества радиографический и цифровых изображений показал, что ЦДС является источником собственных шумов, уровень которых намного выше собственных шумов пленочных систем. Поэтому регламент ГОСТ 20426 по выбору анодного напряжения неэффективен. Экспериментально установлено, что анодное напряжение выше на 30 %, чем при проведении пленочной радиографии.

Последующие экспериментальные исследования показали, что разработанные цифровые эталонные изображения по своему качеству близки к радиографическим.

Успешное внедрение ЦДС в неразрушающий контроль на производстве заключается в том, чтобы их адаптация на те, или иные объекты контроля проходила не эмпирически, путем проб и ошибок, а априори.

Литература

1. Каблов Е.Н., Кондрашов С.В., Мельников А.А., Щур П.А. Применение функциональных и адаптивных материалов, полученных способом 3D-печати (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 2. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 29.03.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-32-51.
2. Дуюнова В.А., Молодцов С.В., Леонов А.А., Трапезников А.В. Применение методов компьютерного моделирования при изготовлении сложноконтурной отливки // Труды ВИАМ. 2019. № 11. Ст.01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 19.04.2024). DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-11-3-11.
3. Терехин А.Л., Леонов А.А., Трофимов Н.В., Гриневич А.В. Особенности усталостного разрушения образцов сплава на основе магния // Труды ВИАМ. 2023. № 12. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 01.03.2024). DOI: 10.18577/2071-9140-2023-0-12.
4. Турбин Е.М., Уридия З.П., Мухина И.Ю., Крупнина О.А. Методы оценки качества отливок из магниевых сплавов в зарубежных и российских стандартах//Комментарии к стандартам, ТУ, сертификатам. 2015. № 12. С. 8–14.

5. Косарина Е.И., Уридия З.П., Демидов А.А., Смирнов А.В., Исаева Е.И. Особенности рентгенографического контроля отливок из магниевых сплавов системы магний–РМЗ–цирконий // В мире неразрушающего контроля. 2019. № 2. Т. 22. С. 38–40.

6. ГОСТ ISO 17636-2-2017. Неразрушающий контроль сварных соединений. радиографический контроль. Часть 2. Способы рентгено- и гаммаграфического контроля с применением цифровых детекторов . М. Стандартинформ, 2018. 53 с.

7. Косарина Е.И., Михайлова Н.А., Демидов А.А., Смирнов А.В. Теоретические аспекты при создании электронных эталонных рентгеновских снимков, содержащих количественную информацию // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 4. С. 87–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-87-94.

8. Славин А.В., Генералов А.С., Демидов А.А. Цифровые технологии в радиационном контроле изделий авиационной техники// В мире неразрушающего контроля. 2020. № 1. С. 64–69.

9. Камышанская И.Г. Постобработка цифровых рентгенограмм в практике рентгенолога // Медицинские технологии. 2017. Т. 21, № 1. С. 116–127.

10. Обидин М.В., Серебровский А.П. Очистка сигнала от шумов с использованием вейвлет-преобразования и фильтра Калмана // Информационные процессы. 2013. Т. 13. № 3. С. 198–205.

11. Лапшенков Е.М. Неэталонная оценка уровня шума цифрового изображения на основе гармонического анализа// Компьютерная оптика, 2012. Т. 36. № 3. С. 439–447.

12. Воскобойников Ю.Е. Вейвлет-фильтрации сигналов и изображений (с примерами в пакете MathCAD) / Ю.Е. Воскобойников; Новосиб. гос. архитектур.- строит. ун-т (Сибстрин). – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2015. 188 с.

13. Медведева Е.В. Цифровая обработка изображений в видеоинформационных системах/учебное пособие Е.В. Медведева; – Киров: ВятГУ, 2015. 107 с.

УДК 620.178.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

А.Д. Монахов¹, Н.О. Яковлев¹, к.т.н.;
В.В. Автаев¹, А.С. Ястребов¹

RESEARCH OF CRACK RESISTANCE OF METAL MATERIALS USING COMPUTER VISION

A.D. Monakhov¹, N.O. Yakovlev¹, Ph.D.;
V.V. Avtaev¹, A.S. Yastrebov¹

admin@viam.ru

¹*Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ)*

¹*Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute» (NRC «Kurchatov institute» - VIAM)*

Аннотация

В работе представлен алгоритм определения усталостной трещины по серии цифровых изображений поверхности образца металлического материала, зафиксированных в процессе усталостного нагружения. Описаны особенности реализации модели сверточной трехмерной нейронной сети с остаточными связями между трехмерными и двумерными слоями, а также процесса её обучения. Предложен алгоритм калибровки системы видеофиксации с использованием реперных меток в виде матричных штриховых кодов. Выполнено сравнение результатов использования алгоритма с типовыми испытаниями. Так кинетическая диаграмма разрушения, полученная с использованием нейросетевой модели, характеризуется большим объемом наблюдений, а также меньшим значением дисперсии ошибки аппроксимации результатов измерения.

Ключевые слова:

скорость роста трещины усталости, трещиностойкость, сверточная нейронная сеть, коэффициент интенсивности напряжений

Annotation

The paper presents an algorithm for determining a fatigue crack from a series of digital images of the surface of a metal material sample recorded during fatigue loading. The features of the implementation of a three-dimensional convolutional neural network model with residual connections between three-dimensional and two-dimensional layers, as well as the process of its training, are described. An algorithm for calibrating a video recording system using reference marks in the form of matrix bar codes is proposed. The results of using the algorithm were compared with standard tests. Thus, the kinetic diagram of destruction obtained using a neural network model is characterized by a large volume of observations, as well as a smaller value of the variance of the approximation error of the measurement results.

Keywords:

fatigue crack growth rate, crack resistance, convolutional neural network, stress intensity factor

Введение

В соответствии с принципами безопасной повреждаемости материалов и конструкций существует необходимость в исследовании закономерностей возникновения и развития повреждений [1–3]. Одним из наиболее опасных и трудно прогнозируемых дефектов является усталостное повреждение, как правило, приводящее к отказу или разрушению конструкции.

Под усталостным разрушением понимают разрушение материала в результате воздействия циклических нагрузок. Исследование характеристик усталости материалов проводят по результатам циклических испытаний, в том числе с контролем длины усталостной трещины [4–6]. Стандартизированы следующие способы контроля длины усталостной трещины: методом измерения разности потенциалов, с помощью фольговых датчиков, по измерению раскрытия трещины, а также визуально. Первые три из представленных выше способов требуют наличия специального оборудования, а также обеспечивают косвенное определение длины трещины. В то время как визуальный способ контроля основан на непосредственном измерении длины трещины, благодаря чему характеризуется своей универсальностью и простотой, однако требует постоянного присутствия оператора на протяжении всего испытания. Таким образом, целью данной работы является разработка алгоритма автоматизации визуального контроля длины усталостной трещины.

Существует несколько способов детекции усталостной трещины по изображению поверхности исследуемого объекта. Например, с помощью методов предварительной обработки цифровых изображений на основе

алгоритмов Брэдли, Кэнни, Собеля, преобразования Лапласа и др. проводят выделения контура трещины на контрастных изображениях [7–10]. Другой способ определения параметров разрушения материала – применение алгоритма корреляции цифровых изображений (КЦИ) [11–13]. Метод КЦИ основан на попеременном сравнении изображений друг с другом в процессе деформирования и требует нанесения на образец специальной спекл (пятнистой) структуры, а также предварительной калибровки измерительной системы [11–15]. Одним из наиболее, распространённых в последнее время, способов решения задач сегментации цифровых изображений является использование сверточных [16] нейронных сетей [17, 18]. Применение сверточной нейронной сети не требует предварительной пробоподготовки образца, а также нанесения контрастной или пятнистой структуры.

Сверточная нейронная сеть – это специальная архитектура искусственных нейронных сетей, которая была разработана на основе анализа биологических механизмов зрения. Сеть основана на применении операции свертки (скалярном произведении ядра свертки – фильтра и подматриц изображения) к каждому каналу цифрового изображения, в результате чего формируется новое изображение с выявленными признаками, характерными для этого фильтра – карта признаков. Существуют одномерные, двумерные и трехмерные сверточные слои. Количество фильтров, их размер и тип – параметры, которые определяют в архитектуре сети, а веса фильтров формируются в результате обучения.

Методы исследований

Ввиду того, что усталостная трещина не всегда различима на поверхности образца, а о ее наличии сигнализируют локальные возмущения поверхности в результате деформирования образца, определение длины трещины усталости в процессе испытаний на СРТУ проводили с помощью трехмерной сверточной нейронной сети. Такая архитектура нейронной сети позволяет проводить сегментацию усталостной трещины не по статичному изображению, а по их серии – пакету последовательно снятых изображений деформируемого образца. Соответственно, изменяющиеся во времени искажения поверхности образца вблизи трещины также будут сигнализировать о ее наличии и учтены для определения её геометрических параметров. Таким образом, использование трехмерной архитектуры будет способствовать повышению индекса истинно-положительных срабатываний алгоритма на начальных этапах испытаний на СРТУ.

Разработанная архитектура нейронной сети (табл. 1) и является адаптацией существующих архитектур [20–22]. Модель состоит из сужающегося пути, где происходит укрупнение карт признаков и расширяющегося пути, где происходит увеличение размерности карт

признаков до исходной размерности входных изображений. На каждом этапе укрупнения (уменьшения размерности) карт признаков происходит удвоение каналов, а на каждом этапе увеличения размерности – уменьшение каналов в два раза.

Блоки с номерами 1-4 включают в себя пары трехмерных сверточных слоев (*Conv3D*) с ядрами свертки $3 \times 3 \times 3$ и страйдом (шагом свертки) – 1. На четвертом блоке размерность, отвечающая за количество изображений в серии, вырождается, таким образом использование трехмерных сверточных слоев нецелесообразно. Соответственно, блоки с 5 по 11 включают пары двумерных сверточных слоев (*Conv2D*) с ядром свертки 3×3 и страйдом – 1. Использование двух и более сверточных слоев с малыми ядрами свертки подряд является распространенной практикой [21, 22] и способствует повышению скорости работы и обучение нейронной сети по сравнению с использованием одиночных слоев с большими ядрами свертки.

Так как, предполагается, что вершина усталостной трещины будет расположена ближе к центру изображения, то граничные эффекты, связанные с перекосом весов на краях изображений, не будут оказывать влияния на точность результатов определения трещины. Таким образом, необходимость в «полном» дополнении входов сверточных слоев отсутствует. Однако, для удобства проектирования нейронной сети был использован «одинаковый» режим дополнения (*padding - same*), в результате которого границы входных изображений дополняются нулями. Таким образом, в процессе свертки изменения размерности карт признаков не происходит.

После каждой пары слоев на сужающемся пути следует объединяющий по максимуму слой (*MaxPooling*), в результате которого происходит понижение дискретизации пространства признаков в два раза. Для возвращения к исходным размерам изображения на расширяющемся пути, после каждой пары сверточных слоев следует слой транспонированной свертки, в результате которого происходит повышение дискретизации пространства признаков в два раза. Таким образом, в модели нейронной сети использованы пять объединяющих слоев, в результате чего происходит уменьшение размерности карт признаков до 32 раз, а также пять слоев транспонированной свертки в результате чего происходит восстановление размерности карт признаков до размерности исходных изображений. После каждого объединяющего и восстанавливающего слоя также следует функции активации ReLU, которая обозначена черными стрелками. К выходному слою применяли логистическую (сигмоидальную) функцию активацию, в результате которой проводили нормализацию полученных ранее карт признаков.

Между входным и 11 блоками, 1 и 10, 2 и 10, 3 и 9, а также 4 и 8 существуют альтернативные связи – связи быстрого доступа [20], по

которым карты признаков, минуя более «глубокие» слои, попадают на вход к слоям с той же размерностью, что позволяет восстановить утраченные (или не терять) признаки в процессе обучения между входным и выходным изображениями.

Ключевой особенностью данной архитектуры нейронной сети является использование трехмерных сверточных слоев, а также использование связей быстрого доступа между трехмерными и двумерными слоями. Соответственно, для их совместного использования четырехмерные карты признаков были перестроены в трехмерные следующим образом: размерность типа (N, W, H, C) была перестроена в размерность (W, H, N×C), где N – количество изображений в серии, C – количество каналов, W – ширина изображения, H – высота изображения. Отсутствие полносвязного участка нейронной сети позволяет проводить детекцию усталостной трещины на изображениях с разрешением отличным от 640×480.

Таблица 1

Архитектура нейронной сети

№ блока	Тип сверточного слоя	Кол-во входных каналов	Кол-во выходных каналов	Функция активации, дополнительные слои	Размерность входного тензора
0	Вход	1	1	–	20×640×480×1
1	3D	1	4	ReLU, MaxPooling3d	10×320×240×4
2	3D	4	8	ReLU, MaxPooling3d	5×160×120×8
3	3D	8	16	ReLU, MaxPooling3d	2×80×60×16
4	3D	16	32	ReLU, MaxPooling3d	1×40×30×32
5	2D	32	64	ReLU, MaxPooling2d	20×15×64
6	2D	64	32	ReLU, ConvTranspose2d	40×30×32
7	2D	32	16	ReLU, ConvTranspose2d	80×60×16
8	2D	16 + 32	8	ReLU, ConvTranspose2d	160×120×8
9	2D	8 + 40	4	ReLU, ConvTranspose2d	320×240×4
10	2D	4 + 40	1	ReLU, ConvTranspose2d	640×480×1
11	2D	1 + 20	1	Sigmoid	640×480×1

Формирование обучающего набора данных проводили по результатам видеосъемки стандартных испытаний на СРТУ. Полученные видеофайлы продолжительностью не менее чем 2 часа были равномерно разбиты на пять пакетов по 20 кадров. Разметку изображений проводили выделением усталостной трещины на первом кадре каждого пакета, в

результате чего было сформировано отдельное изображение, где пиксели, соответствующие усталостной трещине, принимали значение 1, а остальные – 0. Размер обучающего набора данных составлял более 400 пакетов. Случайным образом из обучающего набора данных были сформированы тренировочная и тестовая выборки с количественным соотношением 4/1.

Процесс обучения нейронной сети проводили на тренировочной выборке методом стохастического градиентного спуска на основе адаптивной оценки моментов (*Adam*) до достижения 40 эпох обучения. Шаг обучения составлял 0,001, в качестве функции потерь была использована функция на основе индекса Жаккара. Распределение целевой метрики в процессе обучения приведено на рис. 1.

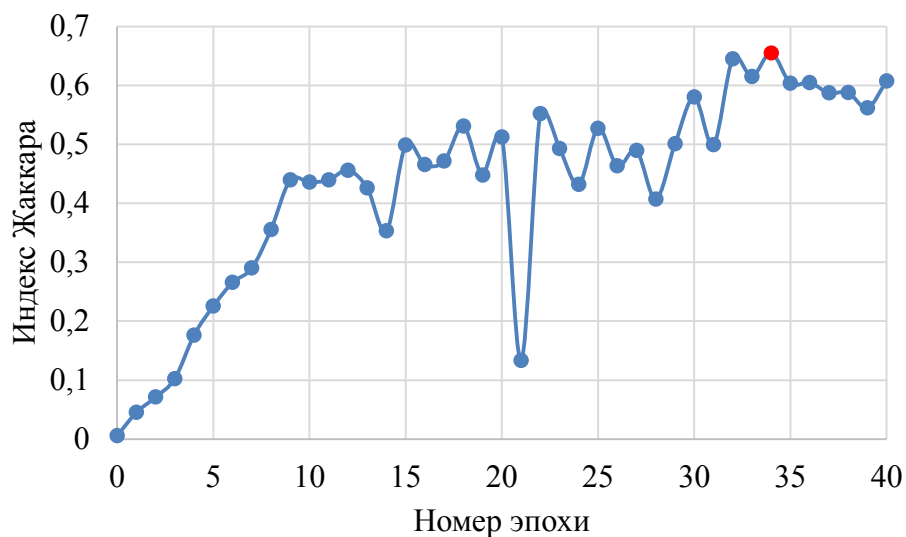


Рис. 1. Распределение целевой метрики от номера прохода по тренировочному набору (эпохи)

По графику, представленном на рис. 2, видно, что после 34 эпохи обучения повышение количества проходов не способствует повышению целевой метрики. Таким образом, за результат обучения модели были приняты наборы весов, которые соответствуют максимальному значению целевой метрики на тестовом наборе данных, т. е. на 34 эпохе обучения.

Количество выходных каналов выбирали по результатам обучения трех вариантов нейронных сетей, где: на первом блоке 16 выходных каналов и, соответственно, 256 на пятом блоке; 8 выходных каналов на первом блоке (128 – на пятом), и вариант, представленный в таблице 1, где на первом блоке 4 выходных канала. По результатам сравнения нейронных сетей, представленным в табл. 2, видно, что снижение количества выходных каналов, и как следствие – обучаемых параметров, не оказало существенного влияния значение целевой метрики, однако время

обработки одного пакета на GPU типа nVidia GTX 1660 снизилось до двух раз.

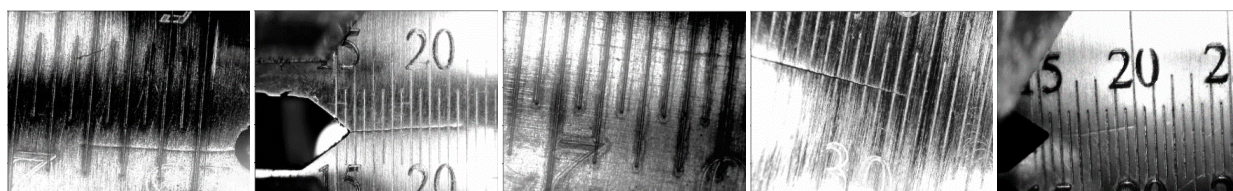
Таблица 2

Результаты обучения трех вариантов нейронных сетей

№ п/п	Количество каналов на первом слое	Значение индекса Жаккара	Количество обучаемых параметров	Время обработки одного пакета, мс
1	16	0,64	6888	563
2	8	0,67	3448	351
3	4	0,65	1728	284

Сравнение результатов определения усталостной трещины с помощью нейронной сети с размеченными вручную данными представлено на рис. 2. Наибольшая разница между целевыми (рис. 2, б) и предсказанными (рис. 2, в) картами трещин заключается в толщине результата сегментации усталостной трещины, что не оказывает влияния на результат определения ее длины.

а)



б)



в)



Рис. 2. Цифровые изображения образцов с трещинами (а), размеченные вручную карты трещин (б), результат определения усталостной трещины методом глубокого обучения (в)

Для определения физических размеров усталостной трещины по её цифровым изображениям рассчитывали масштабный коэффициент кадра.

Для этого на образец для испытаний вдоль направления роста усталостной трещины предварительно наносили матричные штрих коды (метки), с закодированными расстояниями от боковой грани каждого штрихкода до оси приложения нагрузки. Определение положения меток, а также их декодирование проводили с помощью модуля ArUco библиотеки компьютерного зрения OpenCV, нанесение меток проводили с помощью лазерного волоконного гравера. Для повышения вероятности детекции меток, их наносили как выше, так и ниже области предполагаемого роста трещины, а также таким образом, чтобы в кадр помещалось не менее пяти меток вдоль направления роста усталостной трещины (рис. 3).

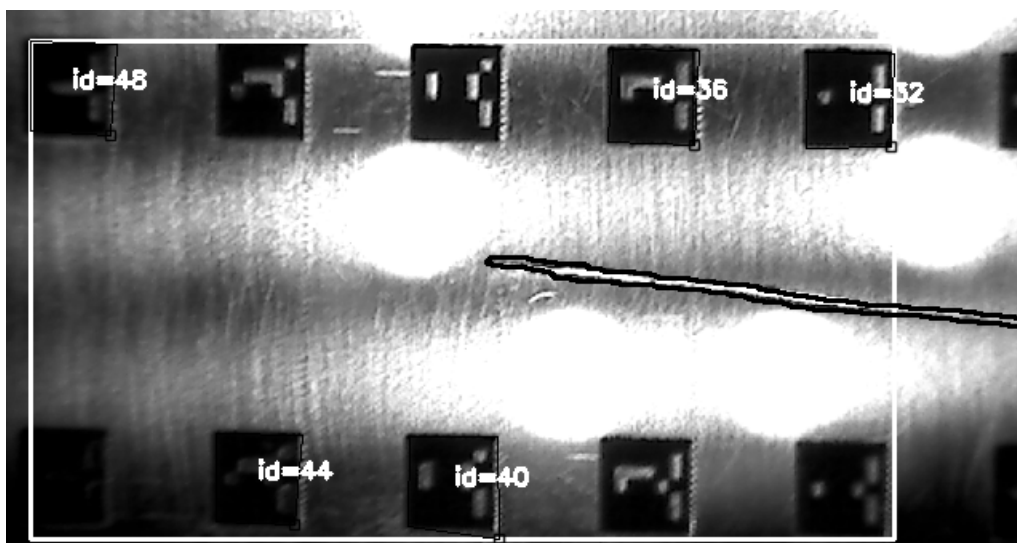


Рис. 3. Результаты определения усталостной трещины: 1 – контур зафиксированной усталостной трещины, 2 – калибровочные метки

Определив положение меток и закодированные в них значения расстояний до оси приложения нагрузки, определяли зависимость физических от цифровых размеров: полученные значения аппроксимировали с помощью линейной регрессионной модели. Таким образом, коэффициент наклона прямой соответствует масштабному коэффициенту кадра, коэффициент смещения прямой – начальному положению камеры относительно оси приложения нагрузки. Подставив значение проекции вершины усталостной трещины на горизонтальную ось в полученное соотношение, определяли длину усталостной трещины. Расположения меток относительно оси приложения нагрузки от их проекции на горизонтальную ось приведено на рис. 4.

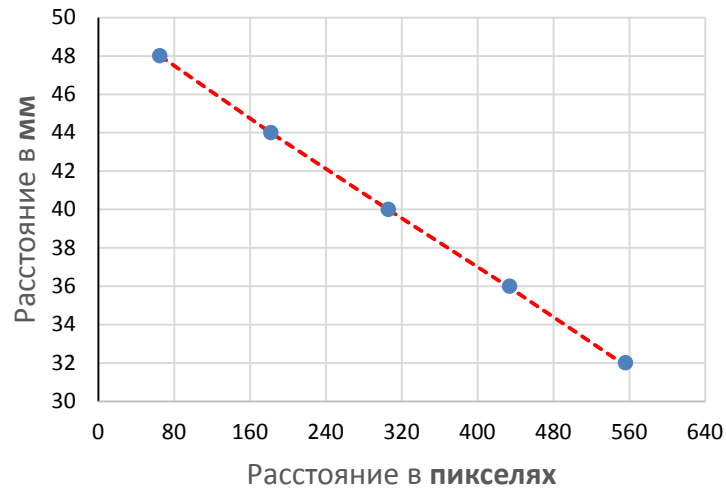


Рис. 4. Графическая зависимость физических и цифровых размеров

Испытание на СРТУ проводили на образце внецентренного растяжения из стали при частоте нагружения 5 Гц, коэффициенте асимметрии цикла 0,1 и постоянной нагрузке цикла, исходное значение размаха коэффициента интенсивности напряжений составляло $20 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$. Зависимость зарегистрированных длин усталостной трещины от количества циклов нагружений, приведена на рис. 5.

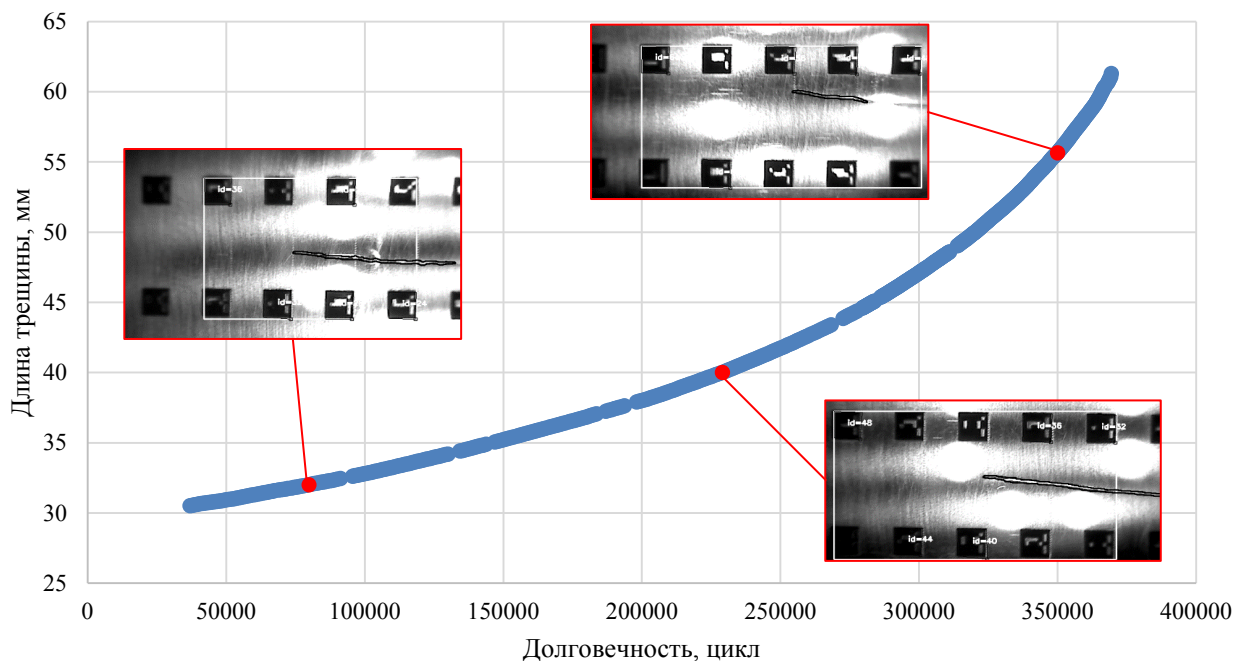
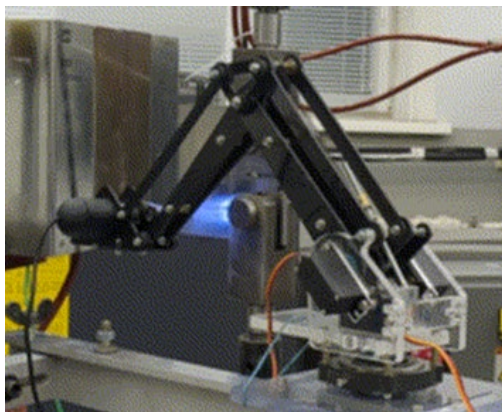
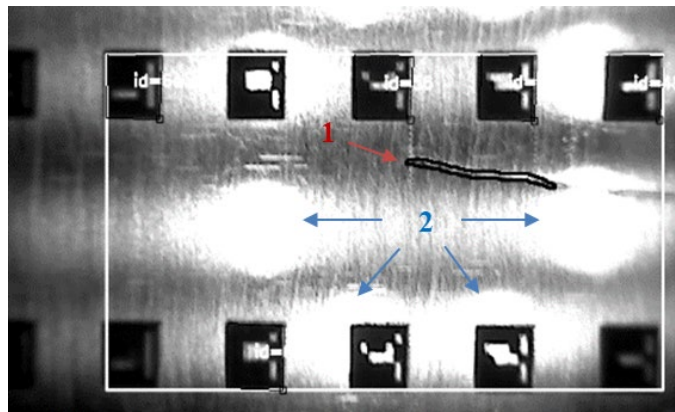


Рис. 5. Диаграмма зависимости длины трещины усталости от количества циклов нагружения

Смещение положения камер относительно поверхности образца, по мере прорастания трещины, проводили с помощью специальной моторизированной оснастки (рис. 6, а), управление которой осуществлялось оператором вручную. Причем, позиционирование камеры проводили таким образом, чтобы положение вершины усталостной трещины располагалось между областями засветки (рис. 6, б). Таким образом, для полной автоматизации алгоритма контроля СРТУ существует необходимость в разработке алгоритма позиционирования видеокамер относительно усталостной трещины, а также доработки системы подсветки с возможностью отключения отдельных ее элементов.



а)



б)

Рис. 6. Система позиционирования камеры (а) и результат позиционирования камер (б): 1 - вершина усталостной трещины, 2 - области засветки

Результаты и их обсуждения

Полученные распределения длины трещины от количества циклов нагружений, были пересчитаны в кинетические диаграммы разрушения (КДР) в соответствии с ОСТ 1 92127-90: значения длин усталостной трещины определяли посредством аппроксимации полиномом второй степени экспериментальных значений (представленных на рис. 5) в диапазоне $l_{i-n} \dots l_{i+n}$ (при $n=3$). Значения длин усталостных трещин были использованы для расчета их скорости роста и коэффициента интенсивности напряжений. КДР, определенную автоматическим контролем СРТУ (с применением нейросетевой модели) сопоставили с пятью КДР, полученными по результатам испытаний образцов из того-же материала, но при регистрации длины усталостной трещины визуальным контролем, диаграммы представлены на рис. 7.

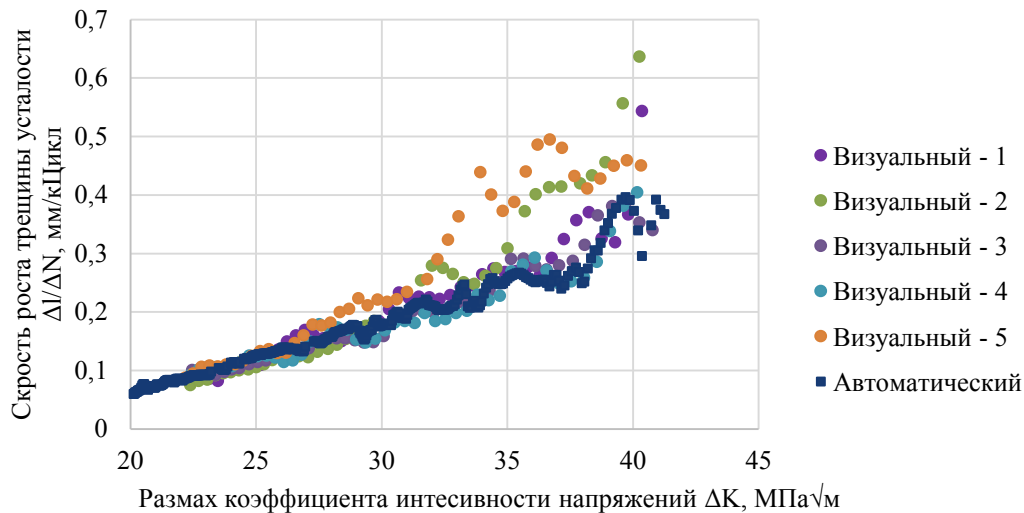


Рис. 7. Результаты расчета КДР компактного образца из стали

Как следует из рисунка 6, диаграммы зависимости «СРТУ dl/dN – размах КИН ΔK », полученные методами компьютерного зрения, характеризуются большим объемом данных по отношению к визуальному контролю, т.к. регистрация длины усталостной трещины происходит непрерывно в процессе испытания.

Оценку сходимости p КДР проводили по результатам проверки гипотезы о равенстве регрессий [23]. Были рассчитаны параметры разрушения m и C по модели Пэриса, определены суммы квадратов логарифмов ошибок SSE для каждой серии с количеством наблюдений n в каждой серии, а также дисперсия логарифма ошибки аппроксимации D . Аналогичный анализ проведен по данным, объединяющим в себя все шесть серий. Результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты определения параметров разрушения при испытании на СРТУ образца из стали

№ п/п	Метод контроля	Параметры регрессий				
		m	C	SSE	n	D
1	Визуальный – 1	2,734	-4,765	0,125	44	0,0029
2	Визуальный – 2	3,367	-5,688	0,058	44	0,0014
3	Визуальный – 3	2,422	-4,335	0,034	46	0,0008
4	Визуальный – 4	2,154	-3,939	0,065	45	0,0015
5	Визуальный – 5	3,071	-5,180	0,086	44	0,0020
6	Автоматический	2,317	-4,172	0,297	384	0,0008
7	Объединённая серия	2,488	-4,410	1,505	607	0,0011

Проверку гипотезы о равенстве k серий регрессий выполняли по F -критерию Фишера. В случае если F больше, чем 95 % квантиль F -распределения, то гипотеза о равенстве регрессий отвергается. Где F рассчитывали по следующему соотношению [23]:

$$F = \frac{SSE(R) - SSE(F)}{2(k-1)} + \frac{SSE(F)}{n-2k},$$

где $SSE(F)$ – сумма SSE всех для k серий регрессий;

$SSE(R)$ – сумма квадратов логарифмов ошибок для объединенной серии.

В таблице 4 представлены результаты проверки, т.к. неравенство $F > F_{n-2k}^{2(k-1)}$ не выполняется, то гипотеза о равенстве регрессионных моделей не отвергается.

Таблица 4

Результаты проверки гипотезы о равенстве регрессий

SSE(F)	SSE(R)	n	k	F	$F_{n-2k}^{2(k-1)}$
0,664	1,505	607	6	0,085	1,830

Заключение

Предложен алгоритм определения длины усталостной трещины по серии изображений деформированной поверхности образца, основанный на применении нейросетевой модели. По результатам проведения испытаний на СРТУ, показано, что КДР, полученная с помощью разработанного алгоритма, характеризуется большим объемом наблюдений (384 точек против 44-46) и меньшим значением дисперсии, по отношению к КДР, полученными визуальным контролем.

Для полной автоматизации процесса проведения испытаний на СРТУ существует необходимость в разработке алгоритма автоматического позиционирования видеокамер относительно вершины усталостной трещины, а также в доработки системы подсветки с возможностью отключения отдельных ее элементов.

Список использованных источников

1. Ерасов В.С., Нужный Г.А., Гриневич А.В. Об оценке повреждаемости металлических материалов методами механических испытаний // Деформация и разрушение материалов. 2015. № 3. С. 42–47.
2. Ерасов В.С., Орешко Е.И., Луценко А.Н. Повреждаемость материалов при статическом растяжении // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 4(37). С. 91–94. DOI 10.18577/2071-9140-2015-0-4-91-94.
3. Каблов Е.Н., Гриневич А.В., Славин А.В., Кабанов И.В., Громов В.И., Ампилогов А.Ю., Яковлев Н.О., Поляков А.Н., Якушева Н.А. Расчетные характеристики прочности сталей ВКС-9М и 300М // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. Т. 88, № 3. С. 51–60. DOI 10.26896/1028-6861-2022-88-3-51-60.
4. Каблов Е.Н., Путырский С.В., Яковлев А.Л., Крохина В.А., Наприенко С.А. Исследование сопротивления усталостному разрушению

штамповок из высокопрочного титанового сплава BT22M, изготовленных с заключительной деформацией в $(\alpha+\beta)$ - и β -областях // Титан. 2021. № 1(70). С. 26–33.

5. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Испытания на усталость металлических материалов (обзор) часть 1. Основные определения, параметры нагружения, представление результатов испытаний // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 4(61). С. 59–70. DOI 10.18577/2071-9140-2020-0-4-59-70.

6. Митраков О. В., Яковлев Н. О., Якушева Н. А., Гриневич А. В. Особенности разрушения стали 20ХГСН2МФА-ВД при испытании на вязкость разрушения // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 1(54). С. 49–56. DOI 10.18577/2071-9140-2019-0-1-49-56.

7. Chen C., Seo H., Jun C. H., Zhao Y. A potential crack region method to detect crack using image processing of multiple thresholding // Signal, Image and Video Processing. 2022. Vol. 16, no. 6, pp. 1673–1681.

8. Abdel-Qader I., Abudayyeh O., Kelly M. E. Analysis of edge-detection techniques for crack identification in bridges // Journal of Computing in Civil Engineering. 2003. Vol. 17(4), pp. 255–263.

9. Gao, H.L.; Shen, S.S.; Yun, Y. Fatigue crack length real time measurement method based on camera automatically tracking and positioning // Appl. Mech. Mater. 2012. Vol. 130. pp. 3111–3118.

10. Sun H., Liu Q., Fang L. Research on fatigue crack growth detection of M (T) specimen based on image processing technology // Journal of Failure Analysis and Prevention. 2018. Vol. 18. pp. 1010–1016.

11. Автаев В.В., Яковлев Н.О. Исследование статической трещиностойкости и сопротивления разрушению тонколистового алюминиевого сплава методом корреляции цифровых изображений // Деформация и разрушение материалов. 2020. № 2. С. 29–35.

12. Автаев В. В., Яковлев Н. О., Ерасов В. С., Подживотов Н. Ю. Определение положения вершины трещины методом корреляции цифровых изображений при испытаниях на статическую и циклическую трещиностойкость алюминиевых сплавов // Деформация и разрушение материалов. 2018. № 7. С. 30–38.

13. Дашкин А. Р., Автаев В. В., Яковлев Н. О. Исследование концентрации напряжений и ее влияние на усталостную долговечность алюминий-литиевого сплава 1441PT1 В сборнике: Современные достижения в области создания перспективных легких сплавов и покрытий для авиационной и космической техники: Материалы III Всероссийской научно-технической конференции, посвященной Дню космонавтики. 2022. С. 21–29.

14. Монахов А.Д., Гуляев М.М., Гладышева Н.Е., Коптельцева О.Ю., Автаев В.В., Яковлев Н.О., Гулина И.В. Применение метода корреляции цифровых изображений для построения диаграмм деформирования в

истинных координатах // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2023. Т. 29. № 3. С. 79–88. DOI 10.17073/0021-3438-2023-3-79-88.

15. Монахов А.Д., Яковлев Н.О., Автаев В.В., Котова Е.А. Разрушающие методы определения остаточных напряжений (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 9. Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 06.03.2024). DOI: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2021-0-9-95-104>.

16. Simonyan K., Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition // Proceedings of the International Conference on Learning Representations. 2015. ICLR 2015.

17. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Сibaев И.Г., Луценко А.Н., Шершак П.В. Алгоритмы машинного обучения (обзор) часть 1. Задачи классификации и регрессии. Линейные алгоритмы в машинном обучении. Применение алгоритмов машинного обучения для расчета прочностных характеристик материалов // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 3(68). Ст. 12. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения 29.02.2024). DOI 10.18577/2713-0193-2022-0-3-130-146.

18. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Сibaев И.Г., Луценко А.Н., Шершак П.В. Алгоритмы машинного обучения (обзор) часть 2. Метрики машинного обучения. Решающие деревья и ансамбли решающих деревьев. Алгоритм нейронной сети по прогнозированию свойств ферритно-мартенситной стали // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 4(69). Ст. 12. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения 29.02.2024). DOI 10.18577/2713-0193-2022-0-4-132-146.

19. LeCun Y., Boser B., Denker J.S., Henderson D., Howard R.E., Hubbard W., Jackel L.D. Backpropagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition // Neural Computation. 1989. Vol. 1(4). P.541–551.

20. Kaiming H., Xiangyu Z.; Shaoqing R., Jian S. Deep Residual Learning for Image Recognition // Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) - Las Vegas, NV, USA. 2016. P. 770–778. DOI:10.1109/CVPR.2016.90.

21. Simonyan K., Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. The International Conference on Learning Representations. 2015.

22. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation // Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015. Lecture Notes in Computer Science. Springer. 2015. Vol. 9351. P. 234–241.

23. Авиационный справочник. Расчетные значения характеристик авиационных металлических конструкционных материалов. АС1.1.М.001-2012. Выпуск 4. ОАК. М: ЦАГИ, 2012. 118 с.

УДК 620.179.152.1

РАЗВИТИЕ ЦИФРОВОЙ РАДИОГРАФИИ НА ПАО» ОДК-САТУРН»

А.С. Крупышева, М.Б. Кель

DEVELOPMENT OF DIGITAL RADIOGRAPHY AT UEC-SATURN

Aleksey Krupyshev, Margarita Kel

aleksei.krupyshev@uec-saturn.ru

ПАО» ОДК-Сатурн»

UEC-Saturn

Аннотация

В статье представлен опыт освоения и внедрения технологии цифрового контроля с использованием плоскопанельных детекторов, в различной конфигурации оборудования. При внедрении цифровых установок в серийный контроль основные трудности на этом этапе заключаются в решении задачи по долговременному хранению, идентификации изображений и их связь с метаданными, наличие квалифицированного персонала.

Annotation

The article presents the experience of mastering and implementing digital control technology using flat panel detectors, in various equipment configurations. When implementing digital installations in serial control, the main difficulties at this stage are to solve the problem of long-term storage, identification of images and their connection with metadata, and the presence of qualified personnel.

Цифровая радиография является развивающимся методом контроля качества материалов и изделий в различных отраслях промышленности. На сегодня цифровая радиография с применением плоскопанельных детекторов продемонстрировала наибольшую сходимость с контролем на рентгеновскую пленку. Плоскопанельные детекторы позволяют получать изображения высокого разрешения с минимальным уровнем шума, обеспечивая высокую контрастность и детализацию, добиваться радиографического изображения сопоставимого по отображению несплошностей в материале с изображением на рентгеновскую пленку. Кроме того, цифровая радиография предоставляет более широкие возможности для обработки и интерпретации изображений. С помощью специализированного программного обеспечения можно улучшить контрастность, изменить яркость и провести другие коррекции, что дает

возможность получить более информативные данные для анализа и принятия решений.

Плоскопанельные детекторы можно применять как самостоятельные единицы, заменяющие рентгеновскую пленку, при этом технология контроля будет аналогична технологии с использованием рентгеновской пленки.

В зависимости от производственной задачи и от конфигурации объектов контроля, для достижения требуемого качества изображения, с целью раскрытия зон, повышения производительности контроля требуются дополнительные, конструктивные элементы, комплектующие и, детекторы интегрируются в комплексные системы цифрового радиографического контроля. Кроме этого требования к автоматизации процесса контроля предполагает использование роботов и манипуляторов, в таком случае системы цифрового радиографического контроля уже можно отнести к категории автоматизированного контроля.

Необходимо сказать о специфике объектов контроля для цифровой радиографии именно в двигателестроительной отрасли. Первое – это разнообразие материалов, технологий, конфигураций и конструктивных особенностей объектов контроля. Очевидно, что для выполнения радиационного контроля деталей из жаропрочных материалов, в массовом производстве, и для радиационного контроля сварных соединений, в корпусных деталях, потребуются установки совершенно различной конфигурации. Цифровое изображение, полученное с отливки из титановых сплавов, будет отличаться от изображения отливок, полученных из стальных или жаропрочных сплавов. И так же потребует различную конфигурацию оборудования. Учитывая выше сказанное и пока еще высокую стоимость цифрового оборудования массовый переход от пленки к «цифре» экономически на целесообразен при всей очевидности преимуществ в цифровой радиографии в сравнении с традиционной радиографией. Хорошим решением для постепенного перехода от пленки к цифре было бы разделение объектов контроля на группы/классы по ответственности с точки зрения выявляемых дефектов именно при цифровой радиографии. При этом достигаемые показатели качества изображения для различных групп деталей должны быть разными. Это позволит переходить к «цифре» при решении простых задач, при этом использовать только детектор без дополнительного оборудования, в остальном технология остается прежней

На сегодня в ПАО «ОДК-Сатурн» применены следующие конфигурации установок:

1. Тип № 1. Источник излучения – детектор (горизонтальное положение). Без использования манипуляторов (рис. 1).

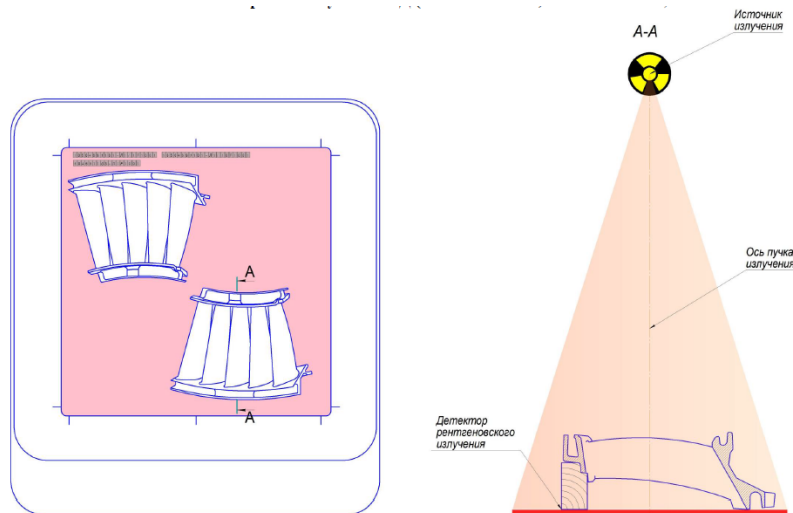


Рис. 1. Детектор (горизонтальное положение)

2. Тип № 2. Линейный детектор в жесткой связке с источником излучения. При контроле детектор размещается внутри объекта, источник излучения снаружи. Объект перемещается относительно стационарного детектора (рис. 2).



Рис. 2. Линейный детектор в жесткой связке с источником излучения

3. Тип № 3. Плоскопанельный детектор (вертикальное расположение) и источник излучения в неподвижном состоянии. Объект контроля перемещается, позиционируется относительно детектора с помощью робота–манипулятора.

4. Тип № 4. Плоскопанельный детектор (вертикальное расположение) снаружи объекта контроля, источник излучения внутри объекта контроля. Детектор и источник излучения не зависят в перемещении друг от друга. Объект контроля перемещается относительно детектора (рис. 3).

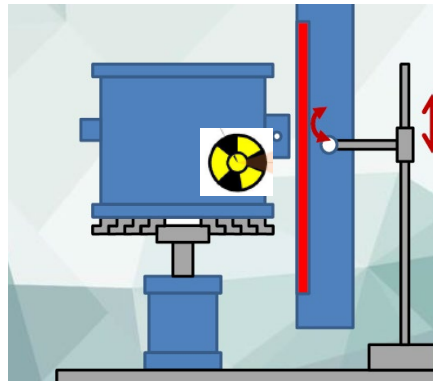


Рис. 3. Плоскостанельный детектор (вертикальное расположение)

Задача технологии с использованием систем цифрового контроля – получение качественного изображения, его расшифровка и отправка его на длительное хранение. При отработке технологии цифрового контроля с использованием выше перечисленных установок, выполнены задачи по получению качественного изображения, удовлетворяющего требованиям ГОСТ 17636 часть 2, исходя из поставленных перед контролем задач. Освоены инструменты по обработке изображения и проверке подтверждения качества изображения. Однако, при разработке системы долговременного хранения цифровых изображений, столкнулись с проблемой интеграции программных средств управления и обработки систем цифрового контроля с программными средствами предприятия. Учитывая, что поставщики систем цифрового радиографического контроля разные, то очевидно, что и программные средства отличаются друг от друга. Возникла необходимость решения следующих задач:

1. Разработка электронного архива с возможностью приема цифровых изображений с различных установок от разных программных средств.
2. Доработка программных средств цифровых установок с введением функции передачи цифровых изображений в электронный архив предприятия.
3. Необходимость разработки двух типов метаданных:
 - Метаданные для поиска изображений (информация по которой можно извлечь изображение из архива).
 - Метаданные проведенного контроля (какими средствами и параметрами достигнуто полученное изображение).
4. Доработка программных средств установок, обеспечивающих связь метаданных с цифровыми изображениями.
5. Разработка печатно – читаемого протокола с информацией по объекту контроля и параметрам, и средствам, по которым достигнуто изображение.

6. Доработка программных средств установок, обеспечивающих связь печатно – читаемого протокола с цифровыми изображением, с функцией создания его и отправки.

Для решения задач, связанных с отправкой на хранение цифровых изображений и интеграцией установок различных поставщиков оборудования в единую систему хранения, на предприятии были выполнены следующие шаги:

1. На базе имеющегося программного обеспечения ведения баз данных большого объема, служба ИТ-предприятия, разработала электронный архив с возможностью приема цифровых изображений от различных установок с различными программными средств. Разработанная система хранения способна адаптироваться к различной номенклатуре контролируемых изделий и включать в себя настройку баз данных для хранения различных метаданных, протоколов контроля с возможностью автоматического считывания информации с программных средств установок, что сводит к минимуму ручное заполнение контролером информации по контролю, и минимизирует риск ошибок.

2. Поставщиками оборудования доработаны программные средства установок, на предмет интеграции в электронный архив предприятия и автоматической передачей полученных на установке цифровых изображений, метаданных и протокола контроля, после расшифровки снимков контролером. Пользовательский интерфейс программных средств установок максимально упрощен, ручное заполнение информации об объекте контроля, режимах контроля сведено к минимуму.

3. Разработанные метаданные, хранящие в себе информацию для поиска полученных цифровых изображений и режимах контроля данного объекта, включают в себя подробную информацию о номере объекта контроля, его наименовании, дате контроля, заключении о годности и другой дополнительной информацией, которая в дальнейшем поможет сократить поиск изображений. Для анализа качества полученных изображений, метаданные включают в себя всю информацию о режимах контроля, а также на какой установке и в каком подразделении выполнен контроль. Дополнительно вся информация из метаданных автоматически генерируется в печатно – читаемый протокол, который связан с полученными изображениями и метаданными. Все это после расшифровки цифровых снимков формируется в единый документ и отправляется в систему хранения, с электронной подписью контролера.

4. После внедрения программных средств оборудования в нашу систему хранения, проведены опытные испытания и выполнена оптимизация работы системы хранения, чтобы убедиться в работоспособности программных средств и соответствии их требованиям предприятия.

В настоящее время электронный архив находится в режиме тестирования (опытная эксплуатация), возникают новые вопросы, требующие постоянного взаимодействия инженерно-технического персонала по радиографии со специалистами ИТ-подразделений.

Принято считать, что цифровая радиография является одним из видов радиационного контроля, и достаточно владеть основами радиографического метода контроля, чтобы внедрять его в серийный производственный контроль.

Однако начиная с подготовки технического задания на закупку оборудования, далее при внедрении технологии цифрового контроля, от инженерно-технического работника предприятия, занимающегося радиографией, требуются знания принципа получения радиационного изображения на цифровом детекторе, навыка работы с программными средствами, умение оценивать полученное изображение, и с помощью инструментов ПО, без потерь качества, добиваться наилучшей выявляемости (распознавания) дефектов. Кроме этого необходимо постоянно оценивать состояние оборудования, своевременно предотвращать возможные сбои, тем самым не допускать пропуска дефекта. Все это так же требует дополнительных знаний помимо традиционной радиографии.

Принципиальная разница между цифровой радиографией и пленочной в том, что процессы, формирующие изображение в рентгеновской пленке – стандартизованы, сенситометрические характеристики, заложенные в эмульсии классифицированной пленки, стабильно обеспечивают получение требуемого результата. В формировании изображения на цифровом детекторе задействованы множество различных факторов. Кроме факторов, оказывающих влияние на формирование изображения в пленочной радиографии, таких как геометрические факторы, режимы работы рентгеновского аппарата, добавляются параметры/характеристики самого детектора, факторы передачи изображения на монитор и сам монитор. Первоначально полученное изображение подвергается изменению (обработке фильтрами), и здесь требуется надежное ПО, знания и навык персонала, обеспечивающие получение улучшенного изображения без потерь полезной информации, тем самым гарантию выявления требуемого дефекта. Все это накладывает требования к квалификации персонала, разрабатывающего технологию цифрового контроля и эксплуатирующего установки.

Вывод:

Внедрение цифровых технологий в серийный контроль требует в первую очередь наличие компетентного персонала в этой области уже на стадии подготовки технического задания. Далее необходимо обеспечить

взаимодействие инженерно-технических работников занимающихся радиографией со службами ИТ-подразделений. В настоящее время актуально создание в подразделениях занимающихся неразрушающим контролем групп нацеленных на внедрение цифровых установок и другого оборудования работающего на базе программных средств, которые необходимо внедрять в текущую информационную структуру предприятия.

УДК 681.5.015.54: 62.506

**ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ СППР
НА БАЗЕ УРАВНЕНИЯ ВИНЕРА–ХОПФА В ПРОЦЕССЫ
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ В АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ
ОТРАСЛИ**

О.Д. Бибигов¹; О.Р. Волкова¹, к.т.н.

**THE EXPEDIENCY OF DEVELOPING AND APPLYING DSS BASED
ON THE WIENER–HOPF EQUATION IN NON-DESTRUCTIVE
TESTING PROCESSES IN THE AEROSPACE INDUSTRY**

O.D. Bibikov¹, O.R. Volkova¹

bibikov2112@gmail.com, orvsan@gmail.com

¹ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», г. Москва

Аннотация

В данной работе рассмотрено применение математических моделей на базе уравнения Винера-Хопфа для дальнейшей разработки и внедрения систем поддержки принятия решений в процессы неразрушающего контроля в аэрокосмической области

Ключевые слова:

моделирование, жизненный цикл изделия, сложные системы, неразрушающий контроль, экспериментальные данные

Annotation

This paper discusses the application of mathematical models based on the Wiener–Hopf equation for the development and implementation of decision-support systems in non-destructive testing (NDT) processes in the aerospace industry.

Keywords:

modeling, product lifecycle, complex systems, non-destructive testing (NDT), experimental data

Развитие аэрокосмической отрасли является одним из приоритетных направлений развития промышленности, экономики и торговли Российской Федерации. По состоянию на 2022 год около 20 % авиапарка пассажирской авиации России составляли отечественные воздушные суда. А к 2030 году общее число таких самолетов может превысить 80 %. Рост процента продукции собственного производства связан с

необходимостью импортозамещения для уменьшения степени экономической и технической зависимости от иностранных поставщиков и необходимости развития собственной промышленности и технологий производства в различных ключевых отраслях.

Так как аэрокосмическая отрасль связана с большими производственными и финансовыми затратами, а также сопряжена с большими рисками обеспечения безопасности перевозки пассажиров и грузов, к продукции выдвигаются высокие требования качества, закрепленные в соответствующих стандартах. Следование подобным стандартам необходимо соблюдать на протяжении всего жизненного цикла изделия. Это достигается благодаря использованию широкого спектра инструментов, и одним из таких являются методы и инструменты неразрушающего контроля (НК). Инструменты НК позволяют производить регулярный анализ и мониторинг состояния каждого судна, не выводя его из эксплуатации. А также методы НК проводятся на всех этапах производства основных деталей участвующих в конечном изделии. НК выполняют, используя визуально-оптический, ультразвуковой, капиллярный, вихретоковый, рентгеновский, магнитный и вибрационный методы и реализующие их средства. Обычно НК проводится ручными методами, что может приводить к субъективности интерпретации данных, что не допустимо в рамках обеспечения контроля качества. Согласно стандартам следует отдавать предпочтение способам контроля с помощью автоматизированных систем, сводящих к минимуму влияние «человеческого фактора» [1]. Одним из способов обеспечения качества продукции, исключая человеческий фактор может быть постоянное отслеживание и диагностика, в том числе и износа, на основе применения цифровых моделей контролируемого объекта, использующих априорные данные, которые собираются и обрабатываются в режиме реального времени с датчиков во время эксплуатации контролируемого судна.

Цифровые двойники, имеющие высокий уровень точности могут строиться, основываясь на моделях типа «белый ящик» и «черный ящик».

Применение математических моделей типа «белый ящик», основывающихся на решении краевых задач дифференциальных уравнений, подробно описывающих функционирование и взаимосвязи внутри систем с помощью метода конечных разностей или метода конечных элементов, связано с рядом проблем, а именно вычислительной сложностью построения подобных моделей. Так как в случае расчёта необходимо учитывать большое количество различных параметров самой системы, так и стохастических параметров, которые могут напрямую или косвенно влиять на процесс и соответственно результаты численных экспериментов. И не каждое предприятие может позволить себе иметь подобный вычислительный кластер в собственном распоряжении, а использование облачной инфраструктуры сопряжено с рисками нарушения

внутренней политики информационной безопасности присущей специализированным предприятиям аэрокосмической промышленности.

Данные особенности классических математических моделей и предприятий, производящих детали и аэрокосмические системы, подводят нас к необходимости применения альтернативных способов создания математических моделей, а именно к менее требовательным к вычислительной технике моделям типа «черный ящик». Подобные модели могут быть реализованы различными методами.

Из-за серийного производства и регулярного проведения мероприятий, связанных с оценкой и контролем технического состояния и исправности функционирования изделий, накапливается большое количество статистических априорных данных, служащих основой для разработки математических моделей и проведения численных экспериментов в вычислительной среде.

Одним из таких методов является идентификация объектов, базирующаяся на применении Винеровского подхода [2]: когда объекты реального мира, реализующие внутри себя различные динамические процессы, могут быть представлены прикладным классом динамических системы типа «вход-выход»:

$$y(t) = \sum_{j=1}^{\infty} G_j[h_j, x(t)], \quad (1)$$

где $G_j[h_j, x(t)]$ – ортогональный функционал Винера порядка j , $h_j(t, \tau_1, \dots, \tau_j)$ – ядро функционала Винера порядка j .

Стоит отметить, что подобные системы допускают активный эксперимент в условиях неопределенности (отсутствие полных априорных данных о работе самой системы внутри) [3, 4].

Основной целью задачи идентификации является определение импульсной переходной функции по известному входному и выходному сигналу. Импульсная переходная функция как раз-таки и позволяет прогнозировать поведение системы на тот или иной входной сигнал путём свёртки входного сигнала $u(t)$ и полученной импульсной характеристики системы $g(t)$

На данный момент каждое предприятие располагает достаточными вычислительными мощностями, не требующих дополнительных финансовых вложений, а также обладает собственным набором априорных данных, учитывающих в том числе и внешние факторы влияющие на ход испытания. В эти априорные данные входит информация об условиях, времени и активности эксплуатации, статистика возникновения дефектов и т.д. Что позволяет создавать гибкие модели, постоянно повышающие свою точность, за счет увеличения выборки данных, которая впоследствии постоянно сравнивается со значениями, получаемыми в ходе численных экспериментов.

Актуальная в нынешних условиях задача (оперативной) диагностики может решаться средствами метода сравнением ядер функционалов, полученных в реальном режиме эксплуатации динамической системы, с ядрами функционалов, рассчитанными для наилучших (оптимальных) режимов функционирования [5]. В этом случае достигается решение непараметрической диагностики. Для оценивания параметров целесообразно решать задачу идентификации, используя аналитические приближения ядер функционалов, в которых заведомо рассматривать только интересующие исследователя параметры или объективно важные для диагностики параметры. В частности, использование элементов модального анализа совместно с аппаратом нелинейных систем может вывести на качественно новые результаты в части оперативной диагностики и описания технических систем [6].

Эффективность применения оперативной диагностики с помощью сравнения ядер функционалов была подтверждена проведением исследований на стендовом оборудовании. В соответствии с Винеровским методом были зафиксированы реакции по всем регистрируемым реакциям и произведена идентификация системы автоматического регулирования газотурбинного двигателя.

Длительность эксперимента на испытательном стенде составляла 67 с при интервале дискретности по времени 0,125 с, что существенно меньше длительности экспериментов с применением характерных для обычных условий натурных испытаний исследуемой системы

Сравнительный анализ реакции системы автоматического регулирования газотурбинного двигателя при проведении натурального эксперимента и реакции модели газотурбинного двигателя, полученной с помощью ядер Винера, по четырем разным входам:

- частота вращения компрессора низкого давления;
- частота вращения компрессора высокого давления;
- температура газов за турбиной;
- степень расширения газа на турбине

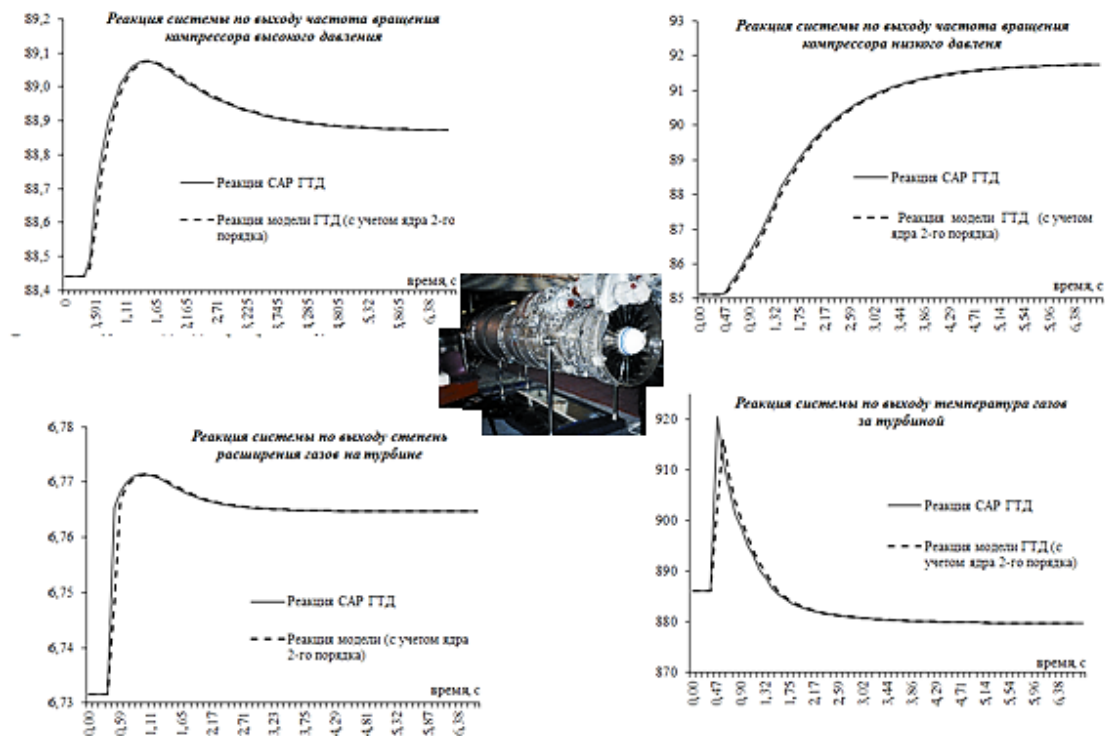
показал, что погрешность моделирования не превышает 3 % уже при уточнении модели ядром 2-го порядка.

Таблица 1

Погрешность моделирования реакции газотурбинного двигателя

Выход	Погрешность модели ГТД с учетом ядра 2-го порядка
Частота вращения компрессора высокого давления	1,5 %
Частота вращения компрессора низкого давления	1 %
Степень расширения газов за турбиной	1,5 %
Температура газа за турбиной	3 %

Графики соответствующих реакций по четырем выходам представлены на рисунке.



- Моделирование реакции ГТД

Основные выводы:

Небольшое отклонение (3 %) между полученными в ходе вычислительного эксперимента значениями построенной модели ГТД и фактически измеренными значениями натурного эксперимента определяет целесообразность создания и применения систем поддержки принятия решений. Получаемые предиктивные данные позволяют строить предположения и выдавать рекомендации о необходимости проведения более тщательного анализа конкретного элемента сложной технической системы и/или же рекомендации о необходимости проведения процедур технического обслуживания и ремонта конкретной единицы.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 58989-2020. Двигатели газотурбинные авиационные. Неразрушающий контроль основных деталей. Общие требования.
2. Винер Н. Нелинейные задачи в теории случайных процессов. – М. Изд-во иностранной литературы, 1961. 159 с.
3. Волков Н.В. Функциональные ряды в задачах динамики автоматизированных систем. М.: Янус-К., 2001. 100 с.
4. Коплярова Н.В. Алгоритм идентификации систем класса Винера // Сибирский аэрокосмический журнал. 2014. № 5 (57). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/algorithm-identifikatsii-sistem-klassa-vinera> (дата обращения: 24.02.2024).
5. Волкова О.Р. Интеллектуальная система оперативной диагностики, идентификации и моделирования технических систем на основе

временных рядов / О.Р. Волкова, П.В. Решетников // Вестник МГТУ "Станкин". 2012. № 1(19). С. 100–103.

6. Киренков В.В. Метод диагностирования состояния механических систем на основе модального анализа во временной области / В.В. Киренков, С.В. Гусаров, С.И. Досько, Н.В. Волков // Вестник МГТУ "Станкин". 2012. № 1 (19). С. 90–94. – EDN OZHACV.

УДК 620.179.13

**ТЕПЛОВОЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ПОЛИМЕРНЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ: РАЗРАБОТКИ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

А.О. Чулков¹, к.т.н.; В.П. Вавилов¹, д.т.н.

**THERMAL NON-DESTRUCTIVE TESTING OF COMPOSITE
MATERIALS: DEVELOPMENTS OF TOMSK POLYTECHNIC
UNIVERSITY**

A.O. Chulkov¹, PhD; V.P. Vavilov¹, Ds.

chulkovao@tpu.ru, vavilov@tpu.ru

¹ *National Research Tomsk Polytechnic University*

Аннотация

Описаны достижения Томского политехнического университета в области разработки устройств для проведения теплового неразрушающего контроля в «полевых» и лабораторных/цеховых условиях. Приведены преимущества и недостатки теплового контроля в сравнении с ультразвуковым и рентгеновским видами испытаний.

Ключевые слова:

тепловой неразрушающий контроль, полимерный композиционный материал, дефект, тепловой дефектоскоп, дефектоскопия

Abstract

The results obtained by Tomsk Polytechnic University in the development of experimental devices intended for active thermal nondestructive testing in laboratory/workshop and field conditions are presented. Advantages and drawbacks of thermal testing are described in comparison with ultrasonic and X ray inspection.

Keywords:

thermal nondestructive testing, polymer composite material, defect, thermal inspection unit, nondestructive evaluation

Реферат

Описаны зарубежные и отечественные устройства переносного и роботизированного типов, предназначенные для проведения активного теплового неразрушающего контроля материалов и изделий авиационной и ракетно-космической отраслей промышленности. Тепловые дефектоскопы

ориентированы на применение в «полевых» и лабораторных/цеховых условиях. Описаны преимущества и недостатки теплового контроля в сравнении с ультразвуковым и рентгеновским видами неразрушающих испытаний полимерных композиционных материалов, теплозащитных, жаропрочных и гидроизоляционных покрытий. Рассмотрено потенциальное применение теплового метода для неразрушающего контроля элементов беспилотных летательных аппаратов.

Введение

Тепловой неразрушающий контроль в России, в основном, известен как надежный инструмент технической диагностики ограждающих конструкций зданий и сооружений, а также проверки силового электрооборудования [1, 2]. За рубежом данный вид неразрушающего контроля на протяжении продолжительного времени является одним из основных в авиационной и ракетно-космической отраслях промышленности [3]. Имеется достаточное количество организаций и компаний по разработке и поставке тепловых дефектоскопов – устройств для проведения неразрушающего контроля, в основном, представляющих собой портативные и роботизированные системы [4–7].

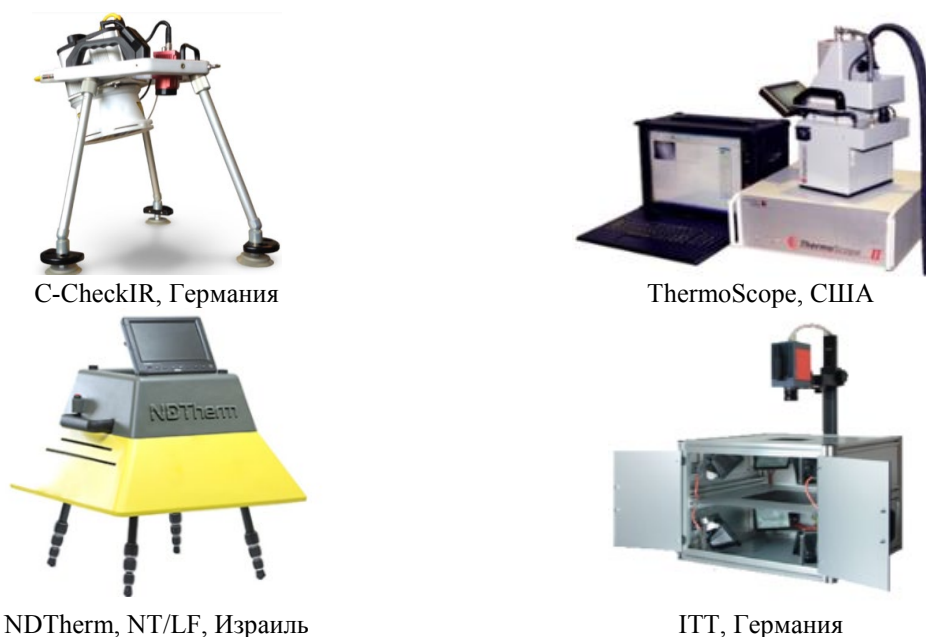
В России одной из наиболее активных научных групп, которые занимаются разработкой активного теплового контроля (ТК), начиная с 1974 года, является Лаборатория ТК Томского политехнического университета (ТПУ) [8, 9]. Предыдущие годы основным акцентом исследований данной научной группы являлись теоретическое обоснование механизмов передачи тепла в многослойных анизотропных структурах, разработка программного обеспечения для численного моделирования процедуры ТК, а также программных модулей, предназначенных для обработки результатов испытаний [10–12].

В последнюю декаду научная группа ТПУ ориентировалась на практическое применение ТК, в результате чего было разработано несколько модификаций тепловых дефектоскопов, представляющих собой устройства портативного типа, самодвижущиеся устройства и роботизированные комплексы [13–16]. Большинство разработанных устройств направлены на неразрушающий контроль изделий из полимерных композиционных материалов плоской и цилиндрической форм, а роботизированные установки ориентированы на контроль качества крупногабаритных изделий цилиндрической формы, а также изделий сложной геометрической формы. Помимо разработки устройств ТК в ТПУ выполнены разработки в области программного обеспечения, в том числе, автоматизированных программных модулей обработки данных, обеспечивающих снижение разброса результатов дефектоскопии по сравнению с обработкой в ручном режиме [17–19].

В настоящей работе кратко описаны установки ТК, разработанные в ТПУ. Показаны результаты контроля изделий из полимерных композиционных материалов, в том числе, крупногабаритных, с использованием портативных тепловых дефектоскопов и устройств сканирующего типа.

1 Портативные и роботизированные тепловые дефектоскопы для контроля качества авиационных композитов: зарубежный опыт

Как отмечено выше, активный ТК является обязательным видом неразрушающих испытаний аэрокосмической техники в США и Западной Европе. Передовыми компаниями, ведущими разработки в области данного метода являются Thermal Wave Imaging (США) и Automation Technology (Германия). Данные компании разработали устройства портативного использования, например, ThermoScope и C-CheckIR, а также стационарные установки для работы в лабораторных условиях, например, Project IR TM от ThermoScope [4, 5]. Помимо упомянутой аппаратуры, известно устройство производства фирмы Orgal (Израиль), которые до введения санкций были доступны на российском рынке [6]. Внешний вид перечисленный выше систем активного ТК приведен на рис. 1.



C-CheckIR, Германия

ThermoScope, США

NDTherm, NT/LF, Израиль

ITT, Германия

Рис. 1. Зарубежные системы активного ТК полимерных композиционных материалов авиационной и ракетно-космической техники

Для контроля качества композитных изделий сложной геометрической формы известны роботизированные системы, применяемые в интересах корпораций Safran и NASA (см. рис. 2), которые по сути представляют собой модернизированные портативные устройства, описанные выше [20, 21].



Роботизированный ТК углепластикового изделия сложной формы в фирме Safran (Франция)



Роботизированный ТК фюзеляжа самолета в NASA (США)

Рис. 2. Зарубежные роботизированные комплексы ТК

Принцип действия таких дефектоскопов основан на реализации ТК в односторонней процедуре: устройство устанавливают на контролируемое изделие, дефектоскоп может быть зафиксирован, например, с помощью вакуумных присосок, после чего происходит импульсный или термоволновой нагрев оптическим источником при одновременной регистрации распределения температуры с помощью тепловизора. Как правило, управление такими устройствами осуществляет оператор с помощью интегрированного пульта управления, а сбор и обработка результатов контроля производят на удаленном сервере.

2 Портативные, самодвижущиеся и роботизированные установки теплового неразрушающего контроля авиационных композитов: опыт ТПУ

В России активный ТК недостаточно распространен, в отличие от западных стран, и не является обязательным для контроля качества композиционных материалов авиационной и ракетно-космической техники. Тем не менее, организации, занимающиеся производством изделий из полимерных композиционных материалов, в самостоятельном порядке оснащают своих лабораторий неразрушающего контроля системами активного ТК, что сопровождается разработкой и внедрением соответствующих методик. Поскольку в России не организовано производство серийных тепловых дефектоскопов, оснащение предприятий осуществлялось зарубежными системами, в частности, Orgal, которые до введения санкций были доступны на российском рынке.

Научная группа ТПУ выполняет работы в области активного ТК многослойных полимерных структур в течение последних 40 лет. Тем не менее, лишь в последнюю декаду, в связи с ростом интереса отечественной промышленности к активному ТК, в ТПУ начали разрабатывать отечественные устройства активного ТК. Справедливости ради, стоит

отметить, что научная группа ТПУ имела необходимый для этого опыт, как в теоретических аспектах, так и в разработке специализированного программного обеспечения, которое признано на мировом уровне. Это подтверждается разработкой в ТПУ специализированного программного обеспечения для приборов C-CheckIR (Германия), используемых корпорацией Airbus.

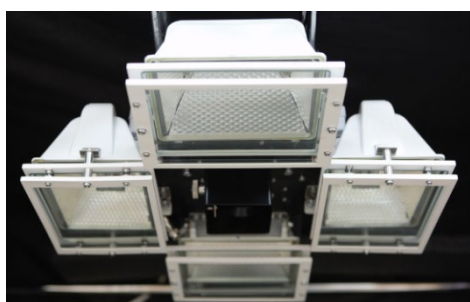
В ТПУ разработано несколько модификаций тепловых дефектоскопов различных типов, защищенных патентами, а именно, портативных тепловых дефектоскопов, аналогичных описанным выше зарубежным устройствам [23]. Этот ряд дефектоскопов включает: уникальную самодвижущуюся установку для контроля крупногабаритных композитных изделий [24], реализующий метод тепловизионного сканирования с производительностью до 25 м²/час, а также роботизированную установку для контроля цилиндрических объектов и изделий сложной геометрической формы [25]. Внешний вид тепловых дефектоскопов, разработанных в ТПУ, приведен на рис. 3.



Портативный тепловой дефектоскоп.
Модификация № 1



Портативный тепловой дефектоскоп.
Модификация № 2



Портативный тепловой дефектоскоп.
Модификация № 3



Самодвижущийся тепловой дефектоскоп



Портативный тепловой дефектоскоп.
Модификация № 4



Портативный тепловой дефектоскоп.
Модификация № 5

Рис. 3. Устройства для активного ТК полимерных композиционных материалов авиационной и ракетно-космической техники, разработанные в ТПУ

В определенной степени задержка в появлении отечественных серийных тепловых дефектоскопов связана с запросом предприятий на разработку и поставку устройств ТК узкой специализации, а именно, направленных на неразрушающий контроль отдельных типов компонентов.

Обобщенные технические характеристики тепловых дефектоскопов ТПУ приведены в таблице 1.

Таблица 1

**Краткие обобщенные технические характеристики дефектоскопов,
разработанных в ТПУ**

Параметр	Значение
Контролируемая толщина композитов	до 16 мм;
Минимальный поперечный размер выявляемого дефекта	1×1 мм
Площадь зоны однократного контроля	до 0,08 м ²
Производительность сплошного контроля	до 25 м ² /ч
Максимальная избыточная температура нагрева контролируемого объекта	до 70 °С
Потребляемая мощность портативной системы	до 2 кВт

3 Активный ТК полимерных композиционных материалов и сотовых структур

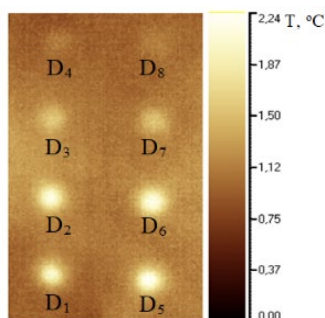
Основными преимуществами ТК перед ультразвуковым или рентгеновским видами неразрушающего контроля является его безопасность для персонала, высокая производительность и бесконтактный характер испытаний, а также возможность проведения дефектоскопии и дефектометрии при одностороннем доступе к объекту исследований. Кроме

того, ТК позволяет выявить приповерхностные дефекты производственного (расслоения, непрочности, инородные включения, неравномерность толщины) и эксплуатационного (ударные повреждения, трещины, расслоения и отслоения) происхождения в многослойных структурах, которые затруднительно выявить другими видами испытаний. Речь идет об обнаружении приповерхностных дефектов в угле- и стеклопластиках с глубиной залегания от 0 до 6 мм, дефектов в виде отслоений и расслоений теплозащитных, жаропрочных и гидроизоляционных покрытий толщиной от 0,01 до 8 мм, дефектов сотовых панелей с толщиной обшивки от 0,01 до 4 мм с целью обнаружения отслоений обшивки от сотового наполнителя и смятия сотового наполнителя, а также диагностики наличия воды в ячейках сот [26].

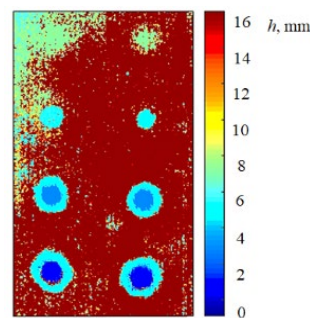
Недостатком ТК является низкая эффективность контроля дефектов с глубиной залегания более 8 мм при односторонней процедуре контроля, дефектов типа одинарных пор диаметром менее 3 мм и расслоений с поперечными размерами менее $3 \times 3 \times 0,01$ (при глубине залегания 3 мм и глубже). Кроме того, можно отметить более низкую эффективность ТК окрашенных в светлые тона изделий из полимерных композиционных материалов, а также полимерных композитов с частичной оптической прозрачностью.

В связи с этим, ТК следует рассматривать как высокопроизводительный вид неразрушающего контроля, эффективный для обнаружения приповерхностных дефектов производственного и эксплуатационного происхождения в многослойных структурах. Тепловой контроль целесообразно проводить в комбинации с ультразвуковым и рентгеновскими видами контроля, что обеспечивает повышение эффективности неразрушающего контроля в целом.

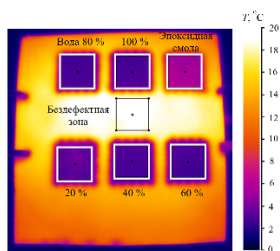
Следует отдельно отметить актуальность применения ТК при оценке состояния беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), многие компоненты которых изготавливают из полимерных композиционных материалов относительно небольшой толщины. Таким образом, при интенсивном многократном использовании БПЛА, высокопроизводительный и безопасный для персонала ТК может стать важным инструментом экспрессной диагностики ответственных элементов. Результаты ТК – тепловые изображения (термограммы) – достаточно легко интерпретируются обученными операторами. Ниже приведены термограммы так называемых, монолитных панелей из углепластика, а также сотовых структур, полученные с помощью ТК.



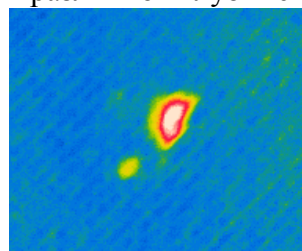
Термограмма расслоений в стеклопластике, расположенных на различной глубине



Карта глубин дефектов в стеклопластике, расположенных на различной глубине



Результат количественной оценки содержания воды в ячейках сотовой панели

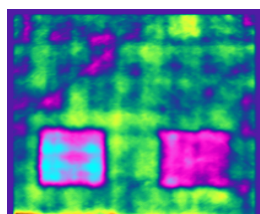


Термограмма ударного повреждения в углепластике

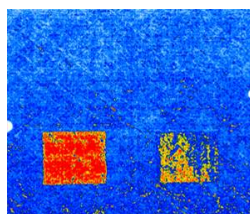
Рис. 4. Примеры результатов ТК изделий из полимерных композиционных материалов и сотовых панелей

Сравнение результатов ТК пластины из углепластика размерами 300×300 мм и толщиной 2,3 мм, между слоями которой были размещены вставки из полиэтилена размерами 100×100 мм, с результатами ультразвукового и рентгеновского контроля приведено на рис. 4.

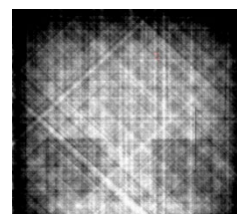
Все три использованных метода позволили обнаружить инородные включения в композитной панели, однако трудозатраты при использовании каждого из методов существенно отличаются: время проведения ТК 40 секунд (односторонний доступ), время проведения ультразвукового контроля 20 минут (требуется полное погружение объекта в иммерсионную среду), время проведения рентгеновского контроля 1 минута (требуется двухсторонний доступ и специальные условия безопасности).



Результат теплового контроля



Результат ультразвукового контроля (С-срез на глубине 0,4-0,62 мм)



Рентгенограмма при энергии 100 кЭв

Рис. 5. Сравнительные результаты контроля изделия из углепластика со вставками

из полиэтилена тепловым, ультразвуковым и радиационным видами контроля

Заключение

Активный тепловой неразрушающий контроль является интенсивно развивающимся видом неразрушающих испытаний полимерных композиционных материалов и многослойных теплозащитных и гидроизоляционных структур. Высокая производительность, достоверность, наглядность результатов контроля, безопасный и бесконтактный характер испытаний делают ТК пригодным для экспрессного обнаружения производственных и эксплуатационных дефектов в материалах и изделиях авиационной и ракетно-космической отраслей промышленности. Разработка тепловых дефектоскопов портативного, самодвижущегося и роботизированного типов в Томском политехническом университете закладывает фундамент для практического применения активного ТК в высокотехнологических отраслях промышленности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания «Наука», проект № FSWW-2023-0004.

Список используемых источников

- 1 Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. Москва, ИД «Спектр». 2015. 545 с.
- 2 Будадин О.Н., Вавилов В.П., Абрамова Е.В. Тепловой контроль. Диагностика безопасности. 2011. 176 с. ISBN 978-5-904270-61-2
- 3 AIRBUS A318/A319/A320/A321. Nondestructive Testing Manual. — 2009. № 55-20-07- 290-801-A-01. p. 20
- 4 <https://www.thermalwave.com/>
- 5 https://www.inores.com/yuklemeler/urunler/c-checkir_web2.pdf
- 6 http://activetest.ru/active_thermography_manual/
- 7 <https://www.ndt.net/search/docs.php3?id=27354>
- 8 Вавилов В.П., Ширяев В.В., Танасейчук С.Ю. Комплексный подход к проектированию системы теплового контроля паяных соединений // Дефектоскопия, 1978. № 10. С. 63–67.
- 9 Стороженко В.А., Вавилов В.П., Волчек А.Д. Неразрушающий контроль качества промышленной продукции активным тепловым методом // Киев, Техника, 1988. 128 С.
- 10 Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2013612064 "ThermoCalc-3D" Суханов М.С., Ширяев В.В., Вавилов В.П. Опубликовано 20.03.2013.
- 11 Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2018664832 "Тепловая томография" Ширяев В.В., Московченко А.И., Вавилов В.П. Опубликовано 22.11.2018.

12 Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2019662050 "THERMOFIT PRO" Ширяев В.В., Вавилов В.П. Опубликовано 16.09.2019.

13 Патент на изобретение № 2580411 С1 «Тепловизионный дефектоскоп». В.П. Вавилов, В.В. Ширяев, А.О. Чулков, Д.А. Нестерук. Заявлено 12.01.2015 г.; Опубликовано 10.04.2016 г. Бюл. № 10.

14. Патент на изобретение № 2599919 С1 «Тепловизионная дефектоскопическая система». В.П. Вавилов, В.В. Ширяев, А.О. Чулков. Заявлено 02.07.2015 г.; Опубликовано 20.10.2016 г. Бюл. № 29.

15 Патент на изобретение № 2 697437 С1 «Устройство для теплового неразрушающего контроля крупногабаритных цилиндрических изделий». Вавилов В.П., Ширяев В.В., Нестерук Д.А., Чулков А.О., Шильников Г.В., Щепелин В.Я., Перепелица А.А. Заявлено 04.06.2018. Опубликовано: 14.08.2019 Бюл. № 23.

16 Vavilov V.P. Thermal NDT research at Tomsk Polytechnic University / V.P. Vavilov, A.O. Chulkov, D.A. Derusova, Y. Pan // Quantitative InfraRed Thermography Journal. 2016. № 13. p.128–143.

17 Chulkov A.O., Nesteruk D.A., Vavilov V.P., Shagdirov B., Omar M., Siddiqui A.O., Prasad Y.L.V.D. Automated procedure for detecting and characterizing defects in GFRP composite by using thermal nondestructive testing // Infrared Physics & Technology - 2021.

18 Чулков А.О., Вавилов В.П., Нестерук Д.А. Автоматизированный алгоритм построения карт дефектов в активном тепловом контроле // Дефектоскопия № 8. 2019. DOI: 10.1134/S0130308219080074.

19 Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2020619186 "THERMO_NN" А.О. Чулков, Д.А. Нестерук, В.П. Вавилов. Опубликовано 13.08.2020.

20 <https://www.safran-nacelles.com/media/safran-nacelles-launches-new-automated-non-destructive-testing-solution-using-infrared-thermography-and-augmented-reality-world-first-20170404>

21 <https://metrology.news/robotic-inspection-to-allow-safer-more-cost-effective-aircraft-manufacturing-processes/>

22 <https://www.riatomsk.ru/article/20230711/defektoskop-avia-tpu/>

23 Патент на изобретение № 2 696 933 С1 «Тепловой дефектоскоп». В.П. Вавилов, В.В. Ширяев, А.О. Чулков Заявлено 03.05.2018 Опубликовано: 07.08.2019 Бюл. № 22.

24 Чулков А.О., Вавилов В.П., Нестерук Д.А., Шагдыров Б.И. Тепловой сканер-дефектоскоп для контроля крупногабаритных плоских изделий из композиционных материалов // Дефектоскопия №4. 2022. DOI: 10.31857/S0130308222040066.

25 Чулков А.О., Вавилов В.П., Нестерук Д.А., Бедарев А.М., Яркимбаев Ш., Шагдыров Б.И. Синтез данных активной инфракрасной термографии при оптической и ультразвуковой стимуляции изделий из

углепластика сложной формы // Дефектоскопия № 7. 2020. DOI: 10.31857/S0130308220070064.

26 Чулков А.О., Вавилов В.П., Шагдыров Б.И., Кладов Д., Стасевский В.И. Обнаружение и оценка количества воды в горизонтально ориентированных авиационных сотовых панелях с помощью автоматизированного теплового контроля // Дефектоскопия. 2023. №12. С 26-33. DOI: 10.31857/S0130308223120035.

УДК 620.179.11

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ПОЛЫХ ЯЧЕИСТЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Р.В. Сафиуллин, к.т.н.; А.Р. Сафиуллин; Р.Р. Мулюков, д.ф-м.н.

NON-DESTRUCTIVE TESTING HOLLOW CELLULAR STRUCTURES

R.V. Safiullin¹, Ph.D.; A.R. Safiullin¹; R.R. Mulyukov¹, Ph.D.
dr_rvs@mail.ru, d12art@mail.ru, radik@imsp.ru

¹*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН*

¹*Institute for Metals Superplasticity Problems RAS*

Аннотация

Разработана методика неразрушающего контроля полых ячеистых конструкций с помощью цифрового голографического интерферометра. Приведены результаты оценки качества изготовления плоских образцов полых лопатки и лопаток имитаторов. Установлено, что разработанная методика позволяет выявлять как наружные, так и внутренние дефекты ячеистых конструкций.

Ключевые слова:

сверхпластическая формовка, диффузионная сварка, ячеистые конструкции, неразрушающий контроль

Annotation

A technique for non-destructive testing of hollow cellular structures using a digital holographic interferometer has been developed. The results of the evaluation of the manufacturing quality of flat samples of hollow blades and blades of simulators are presented. It is established that the developed technique makes it possible to identify both external and internal defects of cellular structures.

Keywords:

superplastic forming, diffusion bonding, cellular structures, non-destructive testing

Введение

Проведенные в последние десятилетия в России и за рубежом исследования показывают, что высокую эффективность при изготовлении многослойных конструкций обеспечивает технологический процесс, основанный на сочетании сверхпластической формовки с диффузионной

сваркой (СПФ/ДС) [1–3]. Многослойные конструкции, получаемые методом СПФ/ДС, называют ячеистыми, т. к. они представляют собой тонкостенные оболочки, поделенные изготовленными заодно с ними перегородками на множество полых ячеек. Качество изготовления полых изделий методом СПФ/ДС определяется качеством выполнения технологических операций. Большинство ведущих мировых компаний, производящих авиакосмическую технику, успешно применяют и развивают данную технологию для получения ответственных конструкций летательных аппаратов. Разработка надежной промышленной технологии СПФ/ДС, позволяющей получать качественные узлы и детали современных летательных аппаратов невозможна без использования современных методов неразрушающего контроля. Целью работы является разработка методики и установки для неразрушающего контроля полых ячеистых конструкций с помощью цифрового голографического интерферометра (ЦГИ). По данному методу с помощью лазерного излучения на цифровую видеокамеру регистрируются два (или более) голографических изображения исследуемого объекта, соответствующих различным фазам процесса деформирования поверхности под действием внешней нагрузки. Путем цифровой обработки поле разности фаз может быть преобразовано в поле перемещений поверхности объекта, которые произошли в промежутке между первой и второй экспозициями. Основными преимуществами метода является бесконтактность, высокая чувствительность к перемещениям (доли микрона), возможность проведения измерений одновременно по всей поверхности изделия, возможность проведения измерений независимо от формы и материала изделия [4]. Методом конечных элементов рассчитаны поля перемещений поверхности конструкций при различных способах закрепления и нагружения в упругой области. Показано, что нагружение закрепленной по контуру конструкции внутренним давлением позволяет выявлять ряд типичных дефектов, таких как непровар или разрыв ребра жесткости. В работе приведено описание методики и установки для неразрушающего контроля, а также результаты контроля [5].

Методика эксперимента

Неразрушающий контроль лопаток проводили с помощью цифрового голографического интерферометра (ЦГИ-2М). Прибор предназначен для бесконтактной визуализации и измерения полей перемещений поверхности диффузно отражающих объектов под воздействием различных статических нагрузок. Действие прибора основано на использовании метода цифровой голографической интерферометрии, состоящего в записи и интерферометрическом сравнении двух цифровых голограмм, зарегистрированных для двух различных деформированных состояний объекта. ЦГИ обеспечивает:

регистрацию голограмм в цифровом виде без промежуточного носителя; автоматизированный расчет интерферограмм и обработку результатов измерений; проведение измерений (контроля) как одновременно по всей поверхности контролируемого изделия, так и по заданному участку (фрагменту) поверхности; возможность проведения измерений в незатемненном помещении в лабораторных условиях.

Связь разности фаз $\Delta\phi$ с перемещениями поверхности объекта d выражается формулой: $\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} d k$, где: $k = k_i - k_v$, вектор чувствительности интерферометра; k_i и k_v – единичные векторы освещения и наблюдения.

Путем цифровой обработки с помощью специализированного программного обеспечения (ПО) поле разности фаз преобразуется в поле перемещений поверхности объекта, которые произошли в промежутке между первой и второй экспозициями.

На рис. 1 представлен общий вид измерительного стенда, на котором проводилась отработка методики неразрушающего контроля.

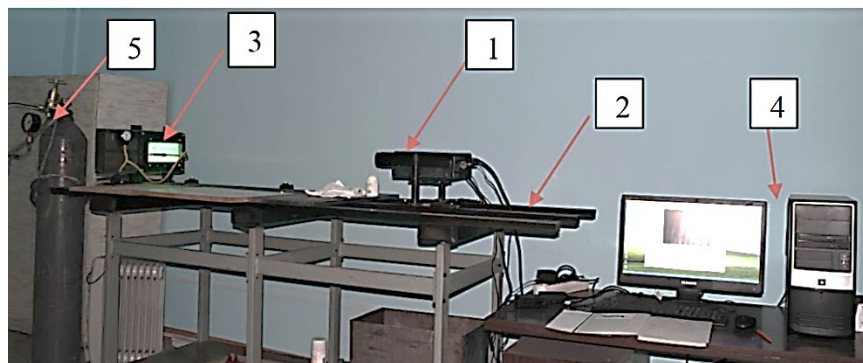


Рис. 1. Общий вид измерительного стенда: 1 – ЦГИ; 2 – лабораторный стол; 3 – исследуемый объект; 4 – управляющий компьютер; 5 – источник внешнего воздействия

Отработка методики неразрушающего контроля проводилась на плоских образцах полый лопатки и лопатках имитаторах, полученных по технологии СПФ/ДС (рис. 2). Такие ячеистые конструкции состоят из обшивок и образующего ребра жесткости гофрированного заполнителя, изготавливаемые из листовых двухфазных титановых сплавов с использованием сверхпластической формовки (СПФ) [6-8] и диффузионной сварки (ДС) [9, 10]. При изготовлении конструкций необходимо обеспечивать оптимальные температурно-скоростные условия сверхпластичности, так как в противном случае возможно возникновение дефектов, таких как непровары при диффузионной сварке обшивок и

заполнителя или разрывы заполнителя при формовке конструкции. Данные конструкции представляют особый интерес для авиакосмической отрасли так как позволяют значительно снизить вес и стоимость летательных аппаратов [1–3].

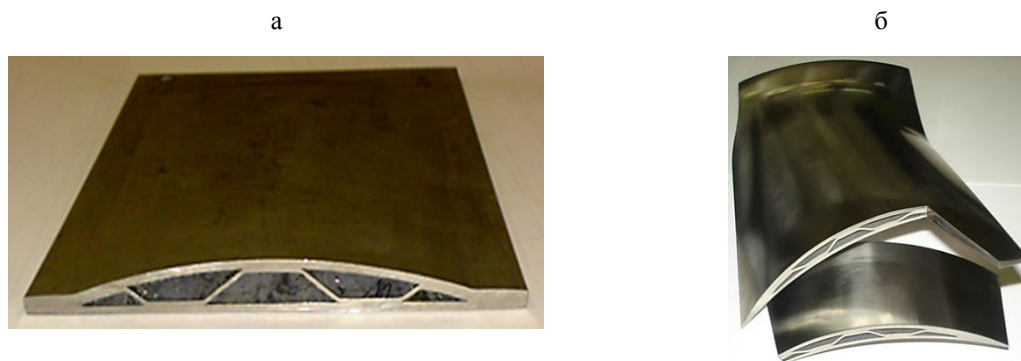


Рис. 2. Образцы для исследований: а – плоский образец лопатки, б – лопатка имитатор

Компьютерное моделирование

С целью определения наиболее эффективного вида нагружения при проведении неразрушающего контроля и для дальнейшего анализа полученных результатов проводили компьютерное моделирование [11–14]. В качестве объекта исследования рассматривалась трехслойная полая конструкция – плоский образец с 8-ю ребрами жесткости (рис. 3). При моделировании использовали как идеальную конструкцию, так и с внесенным дефектом - непроваром между листами заготовок (рис. 4).



Рис. 3. Трехслойная полая эталонная конструкция: а – общий вид, б – сечение

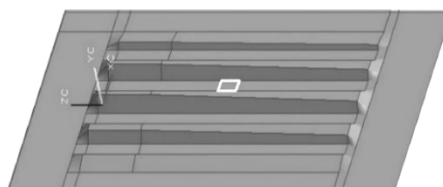


Рис. 4. Лист наполнителя трехслойной конструкции со стороны нижней плоской обшивки с отмеченной областью дефекта «непровар»

Данный дефект является трудно выявляемым. Для его выявления трехслойную конструкцию подвергали различным видам нагружения. Компьютерное моделирование проводили в трехмерной постановке с помощью пакета прикладных программ DEFORM-3D. Деформируемое тело разбивали на двадцатиузловые изопараметрические конечные элементы с квадратичной аппроксимацией поля перемещений. Общее количество элементов модели – 560000. Механическое поведение деформируемого тела описывалось законом Гука с константами упругости титанового сплава ВТ6.

Для изучения влияния вида нагружения/закрепления конструкции на выявляемость дефекта типа непровар методом ЦГИ сравнивались расчеты нормальной компоненты вектора перемещений поверхности конструкции, проведенные в упругой области для следующих условий: подача газа давлением 1 МПа во внутреннюю полость конструкции с закреплением одного торца; подача газа давлением 1 МПа во внутреннюю полость конструкции с закреплением конструкции по всему контуру; закрепление одного торца конструкции с приложением двух изгибающих сил; закрепление одного торца конструкции с приложением двух закручивающих разнонаправленных сил. Таким циклам нагружения/закрепления подвергались эталонная конструкция и конструкция с дефектом в виде непровара размером 10x10 мм в зоне сварки нижней плоской обшивки и заполнителя. Проведенное моделирование показало, что из рассмотренных четырех видов нагружения/закрепления наиболее информативным является нагружение внутренним давлением, причем закрепление должно проводиться по всему контуру конструкции. При таком виде нагружения/закрепления выявлено, что дефект вносит заметную асимметрию в поле перемещений поверхности конструкции по сравнению с эталонной конструкцией. На рис. 5, а и 5, б изолиниями представлены поля перемещений нижней обшивки для эталонной и дефектной конструкций, полученные с помощью математического моделирования, соответственно. На обоих рисунках хорошо видны пять вертикальных полос с максимумами нормальных перемещений, которые соответствуют областям между ребрами жесткости конструкции. С появлением дефекта (рис. 5, б) видны искажения в полях перемещений, а именно, образуются петли в изолиниях полей перемещений, огибающие область дефекта. Отметим, что асимметрия в полях перемещений, возникшая за счет внесения дефекта, привела к изменению картины прогиба в верхнем левом углу конструкции на рис. 5, б.

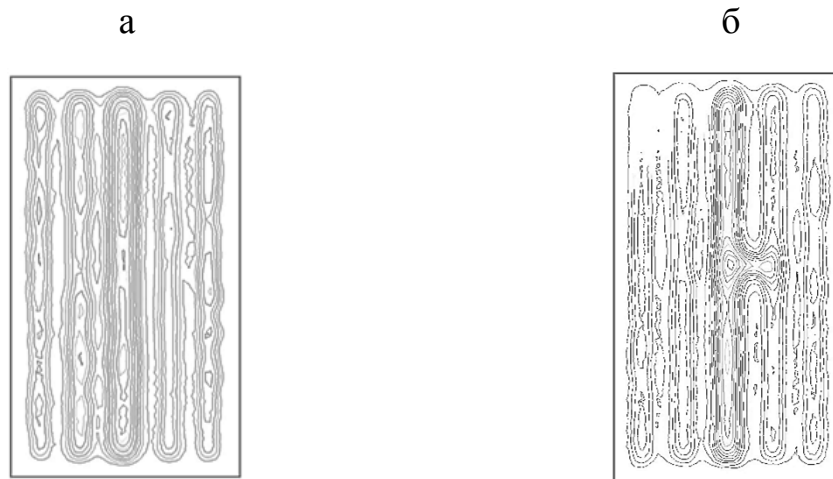


Рис. 5. Нормальная компонента вектора перемещений поверхности нижней плоской обшивки конструкции, полученные по результатам моделирования эталонной конструкции (а) и (б) – конструкция с дефектом (мкм). Диапазон перемещений от 0 до 0.06 мкм представлен линиями уровня с шагом 0.005 мкм

Таким образом, результаты исследований показали, что нагружение трехслойной конструкции внутренним давлением позволяет определять такие трудновыявляемые дефекты, как непровары, что является основным преимуществом по сравнению с другими методами неразрушающего контроля. Результаты моделирования позволили с минимальными трудозатратами подобрать наиболее оптимальный способ нагружения/закрепления, обеспечивающий высокую выявляемость дефекта. Кроме того, из анализа напряженного состояния была установлена величина внутреннего давления, не выводящая конструкцию за пределы упругой области.

Результаты неразрушающего контроля трехслойных ячеистых конструкций

Отработка методики неразрушающего контроля и контроль модельных образцов трехслойных ячеистых конструкций с помощью ЦГИ проводился на плоских образцах полый лопатки и на лопатках имитаторах. Трехслойные конструкции из титанового сплава ВТ6 были получены совмещением процесса диффузионной сварки и сверхпластической формовки. Практически все изготовленные образцы модельных полых лопаток изготовлены по оптимальным режимам технологии СПФ/ДС. Проведенные исследования микроструктуры и механических свойств полученных образцов позволили установить высокое качество их изготовления [1, 3, 15, 16]. При изготовлении лопаток имитаторов дополнительно использовалась операция гибки-крутки, необходимая для получения заданной геометрии. На рис. 6 приведены конструктивные особенности исследованных образцов полый лопатки.

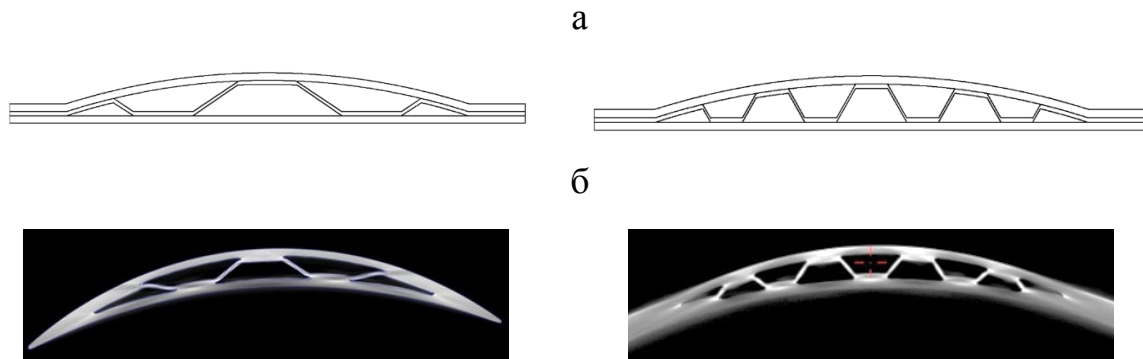


Рис. 6 Поперечные сечения исследованных модельных образцов полых лопатки (а – плоские образцы, б – лопатки имитаторы)

На первых этапах исследовались плоские образцы с четырьмя и восьмью ребрами жесткости. В дальнейшем исследования проводились лопатках имитаторах. Размеры плоских образцов составляли 220х110мм, размеры лопаток имитаторов – 300х150 мм. Для исследования плоских образцов полых лопаток на цифровом голографическом интерферометре было спроектировано и изготовлено специальное крепление, обеспечивающее жесткую фиксацию образца по контуру. Первоначально с помощью ЦГИ исследовалось 4 плоских образцов (№ 37, 38, 39, 43), имеющие четыре ребра жесткости. Цель контроля – оценка качества формирования внутренних ребер. Условия голографирования: крепление объекта вертикальное, нагружение – внутренним давлением. Последовательность контроля: а) получение исходных интерферограмм, б) обработка интерферограмм, в) получение полей перемещений. Проведенные исследования позволили установить, что все исследованные образцы имеют близкие, похожие поля перемещений, что свидетельствует о примерно одинаковом качестве изготовления. Последующие исследования микроструктуры и механических свойств этих образцов подтвердили результаты неразрушающего контроля. На рис. 7. приведена типичная топограмма поверхности перемещений характерная для плоских образцов, имеющих 4 ребра жесткости с плоской стороны.

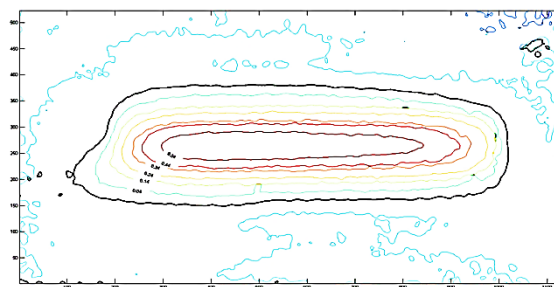


Рис. 7. Топограмма полей перемещений для плоского образца № 43

Плоские образцы с 8-мью ребрами жесткости (образцы № 44, 45 и 46) исследовались с двух сторон (рис. 12), со стороны спинки – выпуклая

часть образца и корыта – плоская часть образца). Образец № 45 был изготовлен с внутренними и внешними дефектами. Внутренними дефектами являлись многочисленные непровары, а наружные – имеющиеся на поверхности заготовки утяжины. Также был специально изготовлен образец (№ 46) со специально внесенным дефектом – непроваром на нижней обшивке. На рис. 8 и 9 приведены результаты исследования образца № 44, съемка со стороны корыта, давление в образце при съемке 255 кПа – 225 кПа.

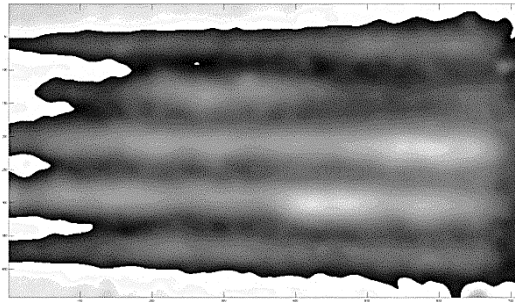


Рис.8. Интерферограмма после фильтрации и вырезания изображения.

После компьютерной обработки были получены результаты, представленные в виде полей перемещений деформированной поверхности образца.

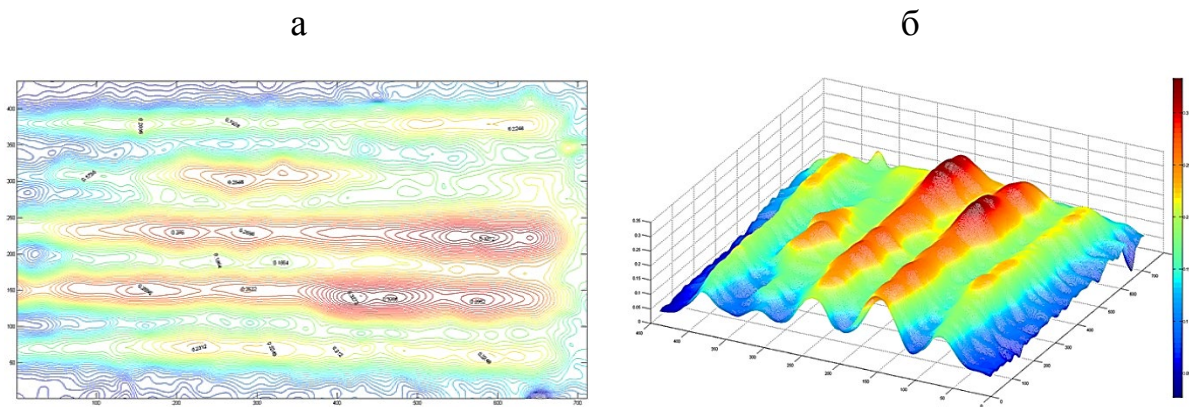


Рис. 9. а – топограмма поля перемещений (линии равных перемещений) б – трехмерное представление поля нормальных перемещений точек поверхности (в мкм)

После проведения неразрушающего контроля образец был разрезан и визуальным осмотром было установлено, что после СПФ сформировались нормальные ребра жесткости.

Проведенные исследования плоских образцов с дефектами № 45 и 46 позволили увидеть искажения полей перемещений образцов в местах нахождения дефектов. Для визуальной проверки полученных данных исследуемые образцы № 45 и 46 были разрезаны по сечениям, в которых обнаружены дефекты. На рис.10. приведены полученные результаты.

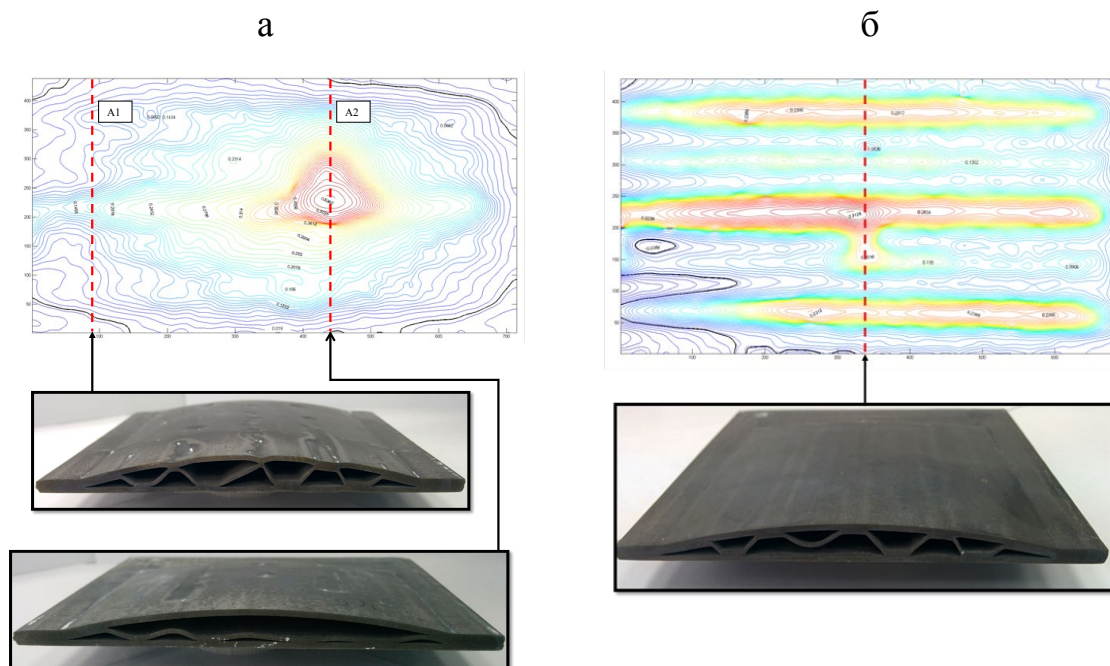


Рис. 10. Сечения плоского образца № 45 и 46 в местах с предполагаемыми дефектами

Было установлено, что в местах разрезки наблюдаются дефекты. В сечении A1 (рис. 10, а) наблюдается частичный непровар ребер жесткости, а в сечении A2 наблюдается полный непровар, т.е. между заполнителем и обшивками не произошло диффузионное соединение по заданному рисунку. Это связано с нарушением технологии нанесения противосварочного покрытия в процессе изготовления образцов. Данный дефект полностью нарушил картину перемещений поверхности, по сравнению с бездефектной конструкцией, и привел к тому, что образовался пик максимальных перемещений. Разрезка плоского образца № 46 также подтверждает наличие непровара в данном месте. На следующем этапе были проведены исследования лопаток имитаторов.

Лопатки имитаторы имеют сложный профиль, поэтому для их закрепления необходима специальная оснастка, которая была спроектирована и изготовлена с учетом опыта, накопленного при исследовании плоских образцов (рис. 11, а). На рис. 11, б представлен внешний вид имитатора, жестко закрепленного на столе с помощью оснастки, струбцин, и балок, закрепленных вертикально.

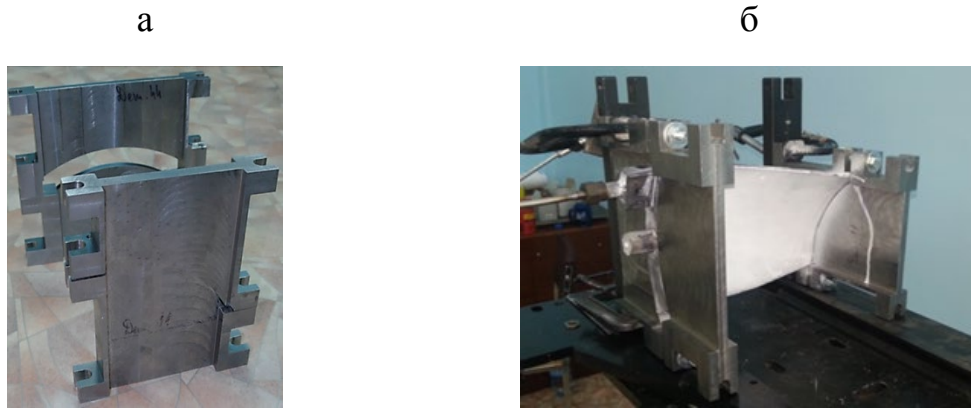


Рис. 11. а – оснастка для крепления лопатки имитатора, б – закрепленная в оснастке лопатка имитатор

При контроле лопаток имитаторов использовалось два варианта их закрепления на лабораторном столе. Первое крепление осуществлялось с двух сторон, за замок и верхнюю часть лопатки, второе с одной стороны – за замковую часть лопатки. В процессе построения голограмм, было выявлено, что интерферограмма лопатки имитатора с качественными контурами получалась при большей разности давлений, чем при съемке плоских образцов, для которых разница давлений между замерами составляла 2 кПа. С помощью ЦГИ было проведено исследование 10 лопаток имитаторов, изготовленных по одинаковой технологии с использованием одинаковых режимов диффузионной сварки, гибки, крутки и СПФ. Было установлено, что трехмерные поля перемещений лопаток имитаторов качественно повторяют друг. Полученные экспериментальные результаты (параметры поля перемещений поверхности лопаток) позволяют характеризовать внутреннюю геометрию изделия. Дефектов типа непровар, в рассмотренных лопатках имитаторах не обнаружено. На рис. 12 и 13 представлены результаты контроля лопатки имитатора № 3.

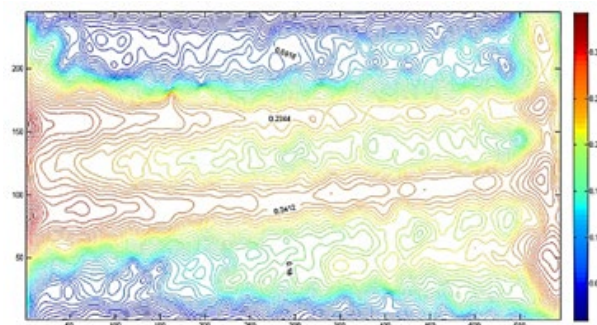


Рис. 12. Контурная карта деформированной поверхности лопатки имитатора № 3, полость с ребрами жесткости, съемка со стороны корыта

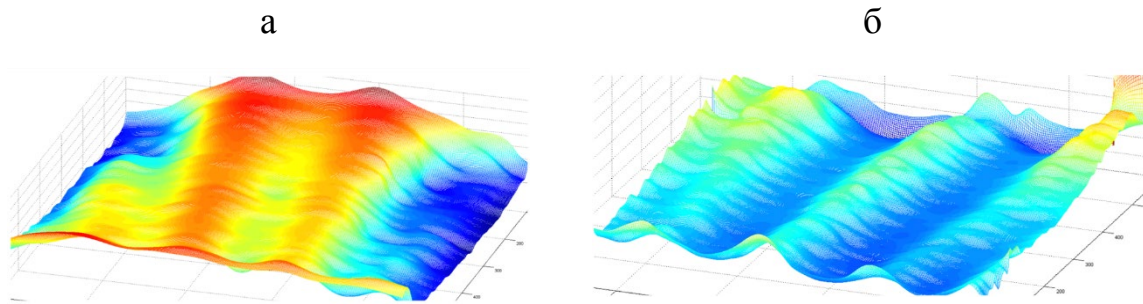


Рис. 13 Трехмерное представление поля нормальных перемещений точек поверхности (в мкм): а – съемка со стороны корыта, б – съемка со стороны спинки

Проведенные последующие исследования внутренней и наружной геометрии, а также микроструктуры и механических свойств выявили высокое качество изготовленных лопаток имитаторов.

Выводы:

1. Разработана методика неразрушающего контроля полых ячеистых конструкций с помощью ЦГИ.
2. Выполнена отработка новой методики неразрушающего контроля на плоских образцах полой лопатки и лопатках имитаторов.
3. По результатам моделирования установлено, что для получения информации о наличии дефектов типа непровар в трехслойных полых конструкциях методом ЦГИ целесообразно использовать нагружение внутренним давлением с закреплением конструкции по всему контуру.
4. Моделирование методом конечных элементов позволяет установить предельное значение внутреннего давления газа, позволяющее достичь максимальных полей перемещений в пределах упругой области работы конструкции.
5. Сравнение полей перемещений поверхностей плоских образцов, полученных методом ЦГИ и с помощью математического моделирования для эталонной и конструкции с дефектом, выявили хорошую сходимость результатов контроля и моделирования.
6. Проведенные результаты контроля лопаток имитаторов свидетельствуют о хорошем качестве их изготовления, т.к. дефектов конструкции типа непровар, в рассмотренных лопатках имитаторах не обнаружено

Работа выполнена при поддержке государственного задания ИПСМ РАН Регистрационный номер № НИОКТР 124022900007-9. Микроструктурные исследования и механические испытания на растяжение проводились на оборудовании центра коллективного пользования ИПСМ РАН «Структурные и физико-механические исследования материалов».

Литература

1. Петров Е.Н., Родионов В.В., Кузьмин Э.Н., Лутфуллин Р.Я., Сафиуллин Р.В. Ячеистые конструкции (ISBN 978-5-902278-26-9). Снежинск: Издательство РФЯЦ-ВНИИТФ, 2008. 176 с.
2. Сафиуллин Р.В. Сверхпластическая формовка и сварка давлением многослойных полых конструкций. Часть 1. Международный опыт // Письма о материалах. Т. 2(1). 2012. С. 32–35.
3. Сафиуллин Р.В. Сверхпластическая формовка и сварка давлением многослойных полых конструкций. Часть 2. Опыт ИМПС РАН // Письма о материалах. Т.2(1). 2012. С. 36–39.
4. Островский Ю.И., Бутусов М.М., Островская Г.В. Голографическая интерферометрия, М., Наука, 1977.
5. Патент № 108596 МПК G 01B 9/00 Оpub. 20.09.2011, Бюл. 26. Установка для голографического контроля.
6. Ахунова А.Х., Дмитриев С.В., Круглов А.А., Сафиуллин Р.В. Сверхпластическая формовка листовых заготовок в протяженную клиновую матрицу // Деформация и разрушение материалов. 2010. № 9. С. 38–41.
7. Ахунова А.Х., Дмитриев С.В. Оптимизация формы матриц для тестовых сверхпластических формовок листовых заготовок // Деформация и разрушение материалов. 2009. № 11. С. 40–44.
8. Akhunova A.Kh., Dmitriev S.V., Kruglov A.A., Safiullin R.V. Constitutive relations for super-plastic flow modeling from two-axial loading experiments // Key Engineering Materials. 2010. V. 433. P. 319–323.
9. Лутфуллин Р.Я. Сверхпластичность и твердофазное соединение наноструктурированных материалов. Часть 1. Влияние размера зерна на твердофазную свариваемость сверхпластичных сплавов // Письма о материалах. 2011. Т. I. № 1. С. 59–64.
10. Лутфуллин Р.Я. Сверхпластичность и твердофазное соединение наноструктурированных материалов (Обзор). Часть II. Физическая модель формирования твердофазного соединения в титановом сплаве в условиях низкотемпературной сверхпластичности // Письма о материалах. 2011. Т. 1. № 2. С. 88–91.
11. Safiullin R.V., Kruglov A.A., Akhunova A.Kh., Safiullin A.R., Dmitriev S.V. Modeling of superplastic forming of hollow structures with goffered filler made of VT6 titanium alloy // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. 2012. Vol. 43. №9. P. 786–788.
12. Ахунова А.Х., Дмитриев С.В., Сафиуллин Р.В., Сафиуллин А.Р., Сафин Ф.Ф. Расчет полей перемещений трехслойных полых конструкций для неразрушающего контроля качества методом цифровой голографической интерферометрии // Письма о материалах. 2012. Т. 2. № 2. С. 90–94.

13. Ахунова А.Х., Дмитриев С.В., Сафиуллин А.Р., Сафиуллин Р.В., Сафин Ф.Ф. Измерение и расчет полей перемещений трехслойной полый конструкции для целей неразрушающего контроля ее качества методом цифровой голографической интерферометрии // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2014. Т. 11. №2. С. 196–200.

14. Safiullin R.V., Dmitriev S.V., Akhunova A.K., Safiullin A.R. Finite element modeling of superplastic forming of ideal and intentionally defected titanium alloy products for the purpose of non-destructive control. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. 2014. Т. 45. № 9. С. 835–840.

15. Safiullin R., Malysheva S., Galeev R., Mukhametrakhimov M., Safiullin A., Khazhaliev R., Berestov A. Comparison of technological properties of sheet titanium alloys VT6 and VST2K. Solid State Phenomena. 2020. Т. 306. С. 33–41.

16. Safiullin R.V., Malyshev S.P., Khazhaliev R.G., Safiullin A.R., Berestov A.V., Plaksina E.A. Technological properties of sheet titanium alloys VT6. Letters on Materials. 13 (2). 2023. P. 98–103

УДК: 620.179.16

**АДАПТАЦИЯ К УСЛОВИЯМ УХОДА ЗАПАДНЫХ
ПОСТАВЩИКОВ ИММЕРСИОННЫХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ
АВТОМАТИЗИРОВАННОМ УЛЬТРАЗВУКОВОМ КОНТРОЛЕ**

З.Е. Некалин¹, к.т.н.

**ADAPTATION TO THE CURRENT CONDITIONS WITHOUT
WESTERN SUPPLIERS OF IMMERSION PIEZOELECTRIC
PROBE IN AUTOMATED ULTRASONIC INSPECTION**

Z. Nekalin¹, Candidate of Technical Sciences.

e-mail: z.nekalin@uecrus.com

¹*Производственный комплекс «Салют» АО «ОДК», Москва, Россия*

¹*Production Complex «Salyut» of JSC «UEC», Moscow, Russia*

Аннотация

Текущая геополитическая ситуация ставит отечественные машиностроительные предприятия перед серьезными вызовами, связанными с замещением комплектующих и оборудования западных компаний, прекративших своё сотрудничество и поставки продукции на территорию РФ. В данной работе приведен анализ и дана оценка альтернативных поставщиков иммерсионных пьезоэлектрических преобразователей, которые по своим техническим характеристикам позволят удовлетворить возрастающие потребности отечественных машиностроительных предприятий по обеспечению выпуска газотурбинных двигателей (ГТД) для авиационной и наземной техники.

Предлагаемая статья подробно рассматривает технические решения по замещению импортных компонентов на примере иммерсионных преобразователей систем неразрушающего контроля, задействованных в процессе контроля заготовок, относящихся к особо ответственным деталям ГТД (диски, лабиринты, валы, рабочие лопатки и т. п.).

Полученный при проведении работы положительный опыт позволит помочь другим специалистам неразрушающего контроля в решении схожих задач по поддержанию работоспособности автоматизированных систем ультразвукового контроля.

Ключевые слова:

автоматизированный ультразвуковой контроль, иммерсионный пьезоэлектрический преобразователь, автоматическое сканирование, иммерсионный метод

Announcement

The current geopolitical situation has posed serious challenges to domestic machine-building enterprises related to the replacement and selection of equipment and components from Western companies that have ceased their cooperation and supply of products to the territory of the Russian Federation. The paper presents the study and evaluation of alternative suppliers of immersion piezoelectric converters, which, according to their technical characteristics, allow meeting the increasing needs of machine-building enterprises to ensure the production of gas turbine engines (GTE) of aviation equipment. This material examines in detail technical solutions for the replacement of imported components using the example of immersion converters of non-destructive testing systems involved in the control of workpieces related to particularly critical parts of the gas turbine engine (discs, labyrinths, shafts, working blades, etc.).

The positive experience gained during the work will help other nondestructive testing specialists in solving similar tasks to maintain the operability of automated ultrasound control systems.

Keywords:

automated ultrasonic inspection, immersion piezoelectric probe, automatic scanning, immersion testing

Введение

За последние годы практически все машиностроительные предприятия, специализирующиеся на производстве ГТД, внедрили в свои технологические процессы системы автоматизированной ультразвуковой (УЗ) дефектоскопии. Данное оборудование необходимо для осуществления

входного контроля заготовок и полуфабрикатов на наличие внутренних дефектов [1].

Внедрению современных автоматизированных систем способствовали объективные факторы, связанные с использованием ручного контроля и устаревающих технологий, а также введение новых отраслевых стандартов и правил, ужесточающих требования к контролю качества выпускаемой продукции, с целью повышения ресурса изделий.

Ключевыми предпосылками к внедрению данного метода контроля в серийное производство продукции послужили следующие факторы:

- 1) автоматизация трудоемкого ручного УЗ контроля и минимизация влияния человеческого фактора на выявление дефектов;
- 2) увеличение скорости сканирования контроля заготовок более чем в 20 раз (с 1 м/мин [2] до 21,6 м/мин и более);
- 3) снижение уровня воздействия вредных факторов производства на человека и окружающую среду, т. к. вместо машинного масла в качестве контактной среды используется очищенная водопроводная вода;
- 4) повышение достоверности выявления дефектов при высокой скорости контроля, которое происходит за счет уменьшения шага спирального сканирования (увеличение разрешения контроля) и точного программирования траектории перемещения манипулятора с датчиком (см. рис.1, а и рис.1, б), повторяющего геометрию объекта контроля;
- 5) цифровизация процесса, обеспечивающая визуализацию, запись и хранение протоколов сканирования на электронных носителях, а также оперативную передачу и обмен данных с результатами УЗ контроля между поставщиками заготовок (металлургическими предприятиями АО «СМК», АО «Электросталь», ПАО «ВСМПО-АВИСМА» и т. д.) и двигателестроительными предприятиями (ПК «Салют» АО «ОДК» и др.).

К нормативным документам, устанавливающим приоритет автоматизированного иммерсионного УЗ контроля перед ручным, относятся ОСТ1 90197 [3], ПИ 1.2.032 [2] МР45/86Д [4] и ОСТ 1 01207 [5]. Следует отметить, что согласно современным методикам расчета ресурса и надежности ГТД, значительное влияние на результат оказывает вероятность выявления минимального дефекта при ультразвуковом контроле особо ответственных деталей (дисков, фланцев, валов, цапф, лопаток и т. п.).

Основным элементом систем автоматизированного УЗ контроля является иммерсионный ультразвуковой пьезоэлектрический преобразователь (ПЭП), см. рис.1.

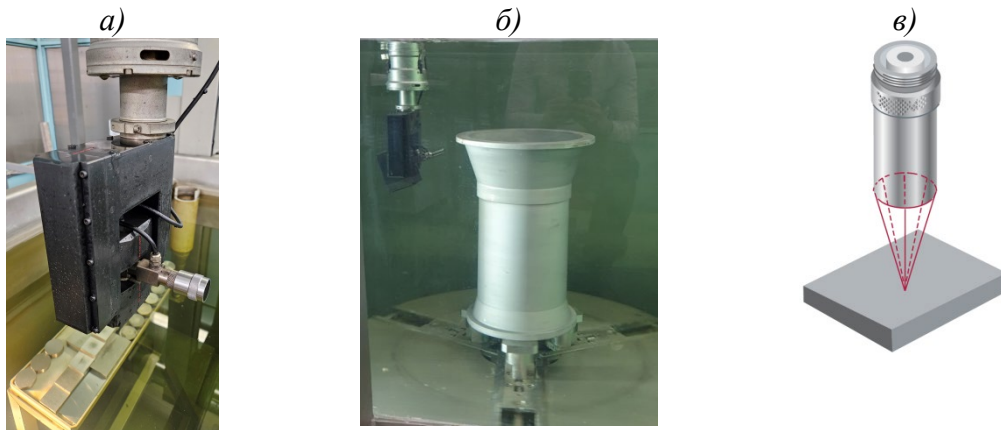


Рис.1. Иммерсионный ультразвуковой преобразователь

Без данного компонента вся автоматизированная система превращается в обычный манипулятор с иммерсионной ванной, который не способен проводить контроль. Сложившиеся в настоящее время ситуация такова, что практически все системы работают с использованием иностранных иммерсионных преобразователей, преимущественно произведенных западными компаниями. На текущий день в авиационной отрасли используется продукция следующих иностранных компаний: Olympus IMS (США), Panametrics NDT (США, входит в состав Olympus), Harisonic (США, входит в состав Olympus), Krautkramer (Германия, входит в состав корпорации General Electric Sensing & Inspection Technologies), ScanMaster (Израиль), TLC Ultrasound (США), Doppler (Китай).

Специалисты ПК «Салют» АО «ОДК» при автоматизированном ультразвуком контроле дисков, валов ГТД и т.п. используют преобразователи «Olympus IMS» и «TLC Ultrasound». Эти датчики ранее были поставлены совместно с системой УЗ контроля.

Продукция «Olympus» является наиболее распространенной и широко применяемой в отрасли. Данная компания является лидером рынка и выпускает разнообразную линейку датчиков (без фокусировки, со сферической «в точку» и цилиндрической «в линию» фокусировкой), а также специализированные технические решения (отражающие зеркала, малогабаритные и крупногабаритные ПЭП, особые ПЭП малого диаметра, высокочастотные ПЭП от 20 МГц до 100 МГц и т.д.). Благодаря ассортименту данной компании была возможность выбора средств контроля для решения практически всех задач по автоматизированному УЗ контролю, а также сформировалось рыночное предложение иммерсионных датчиков. Каталог продукции Olympus (Panametrics) находился в публичном доступе и служил для технологов неразрушающего контроля

вспомогательным пособием, так как помимо самой продукции, содержал обширный теоретический раздел, позволяющий рассчитать и выбрать необходимые преобразователи. Находящееся ранее в России представительство по запросу могло предоставить рекомендации по выбору средств контроля, которые уже применяются западными компаниями при решении схожих задач.

За последнее десятилетие на российский рынок начала поступать продукция TLC Ultrasound. TLC – небольшая компания, продукция которой имеет высочайшее качество и занимает нишу датчиков, обеспечивающих необходимую чувствительность контроля при наибольшем соотношении полезного сигнала и структурного «шума». Данный производитель выпускает специализированные линейки ПЭП для нужд газотурбинных гигантов «General Electric» и «Pratt & Whitney». Приобретение данной продукции гарантировало выявление дефектов минимального размера (эквивалентных плоскодонному отверстию диаметром от 0,4 мм и более).

Сегодня вышеперечисленные западные компании перестали осуществлять поставки иммерсионных УЗ датчиков на территорию РФ. Отсутствие возможности прямого приобретения преобразователей, как следствие этого, их завышенная стоимость при реэкспорте, а также существенно увеличившиеся сроки поставки, вынудили предприятия и специалистов адаптироваться к текущим реалиям и искать альтернативные решения.

Данные о методике исследования

Методика исследования заключалась в сопоставлении иммерсионных УЗ преобразователей различных компаний, представленных на российском рынке неразрушающего контроля, чью продукцию можно приобрести или получить для испытаний и апробации. Для проведения работ удалось получить различные ПЭП от таких организаций как: ООО «ТиВиЭн Технолоджи» (г. Москва), ООО «НПЦ «КРОПУС» (г. Ногинск) и ООО «НЕРКОН» (г. Санкт-Петербург).

В ходе подробного анализа рассмотрены основные параметры преобразователей: чувствительность; величина «мертвой» зоны; уровень структурных шумов; отношение полезный сигнал/шум; длительность фронта эхосигнала, отраженного от поверхности ввода УЗ волны; рабочее расстояние по воде; геометрические параметры датчиков и т.д.

Испытательная работа осуществлялась на системе УЗ контроля (см. рис. 2). Помимо ПК «Салют» подобные системы контроля или их модификации применяется на других двигателестроительных предприятиях и в исследовательских институтах (АО «ОДК – Пермские моторы», АО «ОДК-Климов, ПАО «ОДК-Сатурн», НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ [6, 7]).



Рис. 2. Система автоматизированного контроля

Тестирование ПЭП проводились на настроечных образцах из жаропрочного сплава ЭП741-НП с искусственным дефектом в виде плоскодонного отверстия $\varnothing 0,8$ мм. Данный размер (эквивалентная площадь дефекта) является обязательным контрольным отражателем для титановых сплавов поставляемых в соответствии с ОСТ1 90197[1], а также обладает наиболее распространенной чувствительностью контроля для жаропрочных сплавов на никелевой основе (включая порошковые материалы). Глубина залегания плоскодонного отражателя в комплекте образцов, мм: 2,0; 5,0; 15,0; 25,0; 35,0; 45,0; 55,0; 65,0; 75,0 85,0 и 110,0.

Сравнения проходили с двумя различными прямыми, совмещенными, иммерсионными преобразователями со сферической фокусировкой (см. рис. 1, в) частотой 5 МГц (OLYMPUS V308) и 10 МГц (TLC IS1010GA). Датчики сфокусированы в точку. Преобразователь частотой 5,0 МГц имеет паспортное фокусное расстояние 6" (152 мм), диаметр пьезоэлемента 0,75" (19 мм). Преобразователь частотой 10 МГц имеет паспортное фокусное расстояние 3" (76,2 мм), диаметр пьезоэлемента 0,375" (10 мм). Маркировка иностранных пьезоэлектрических преобразователей и их аналоги, которые применяются другими металлургическими и машиностроительными предприятиями, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Иммерсионные УЗ преобразователи западных компаний, обеспечивающие выявление плоскодонного отражателя Ø0,8мм

	5 МГц, фокус 150 мм, пьезоэлемент Ø19 мм	10 МГц, фокус 76 мм, пьезоэлемент Ø9,5...10 мм
Используемые ПК «Салют»	OLYMPUS V308 5MHz/ 0.75'' F=6.0'' PTF	TLC IS1010GA
Используемые другими предприятиями	TLC IX0519GB;	OLYMPUS V327-SU 10MHz/ 0.375'' F=3.0'' PTF
	TLC IX0519PC Harisonic I7-0512-R	Harisonic I3-1006-R

Критерием работоспособности преобразователей определена возможность выявления контрольного отражателя (КО) Ø0,8 мм на глубине от 2,0 мм до 65,0 мм для датчика с рабочей частотой 10МГц, а для датчика с рабочей частотой 5МГц на глубине от 5,0 мм до 110,0 мм. При этом для преобразователя частотой 10МГц рабочее расстояние по воде должно составлять 60 ± 1 мм, а для датчика 5МГц данный параметр должен равняться 130 ± 1 мм. Выбранные в работе рабочие расстояния по воде позволяют заглубить фокусировку ПЭП в подповерхностный слой материала, при этом обеспечивается увеличение рабочего диапазона контроля. Амплитуда эхо-сигнала от контрольных отражателей должна составлять не менее 80 % от высоты экрана дефектоскопа (окна программы с А-сканом), при этом уровень эхо-сигналов от структуры контролируемого материала не должен превышать заданный уровень в (20...25)%.

По результатам испытаний должны быть определены иммерсионные преобразователи (альтернативные «западным»), способные при установленной чувствительности, рабочем расстоянии по воде и шаге сканирования обеспечить УЗ контроль заготовок особо ответственных деталей ГТД. При подключении апробированных датчиков к автоматизированным системам (типа LS-200, LS-500 и др.) должна отсутствовать необходимость изменения программ сканирования и существенная перенастройка действующих акустических параметров дефектоскопа.

Экспериментальная часть

Первые испытания проводились для подбора аналога преобразователя TLC IS1010GA (10МГц), который обладает высокой рыночной стоимостью и является дефицитной позицией на предприятиях отрасли. ПЭП частотой 10МГц обеспечивает контроль заготовок на

глубине от 2,0 мм (так называемой ближней зоны) и поэтому является обязательно используемым средством контроля.

Сравнительные испытания были проведены с использованием преобразователей TWN-IM-F10D10-FS76-H (ТиВиЭн Технолоджи) и П211-10.0-10-Ф3 (НЕРКОН). Внешний вид преобразователей представлен на рис.2. На фотографии видно различие всех преобразователей по высоте, что неизбежно приводит к необходимости коррекции этого параметра в программах контроля (компенсации положения ПЭП по оси Z).



Рис. 2 – Преобразователи частотой 10 МГц: а) НЕРКОН; б) ТиВиЭн; в) TLC

Все испытуемые иммерсионные ПЭП выявили плоскодонное отверстие Ø0,8 мм на глубине от 2,0 мм до 65,0 мм с рабочим расстоянием по воде 60 мм. Наилучшую разрешающую способность выявления дефектов на глубине 2,0 мм показал П211-10.0-10-Ф3, при этом на глубинах 55,0 мм и более выявлены структурные шумы порядка (20..24)% высоты экрана. TWN-IM-F10D10-FS76-H продемонстрировал более протяженный по фронту поверхностный эхо-сигнал и исказил глубину залегания КО на глубине 2,0 мм (показания составили 4,69 мм), однако на других глубинах залегания при корректной калибровке глубиномер показывает реальные значения.

Результаты испытаний (А-сканы) ПЭП и их сопоставление с западным аналогом (TLC) приведены в таблице 2. Ввиду ограничения объема страниц публикации, в таблице представлены результаты только для плоскодонных отверстий Ø0,8 мм, расположенных на глубине 2,0 мм и 65,0 мм.

Второй этап испытаний проводился для подбора аналога преобразователя OLYMPUS V308 5MHz/ 0.75'' F=6.0'' PTF (5МГц).

Данный преобразователь является серийно выпускаемым и широко применяемым ПЭП, который уже более 15 лет эксплуатируется различными предприятиями. Датчики частотой 5МГц обеспечивает контроль заготовок на больших глубинах продольными волнами, а также для контроля заготовок поперечными УЗ-волнами в тангенциальных и радиальных направлениях.

Сравнительные испытания были проведены с использованием преобразователей IPX5019 (КРОПУС) и П211-5.0-19-Ф6 (НЕРКОН). Внешний вид преобразователей представлен на Рис.3. Габаритные размеры преобразователей «КРОПУС» и «Olympus» по диаметру и высоте идентичны, корпус датчика НЕРКОН на 2...3 мм выше, что не существенно.

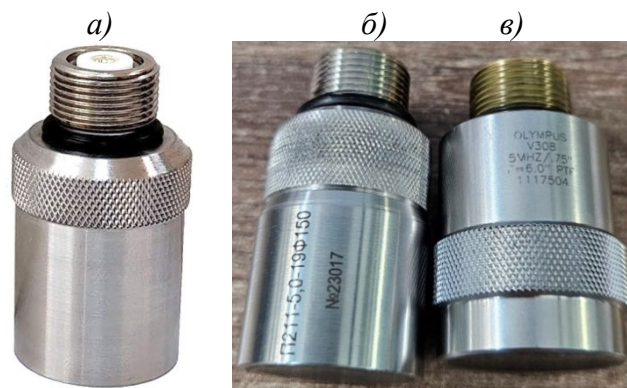


Рис. 3 – ПЭП частотой 5 МГц: а) КРОПУС; б) НЕРКОН; в) Olympus

Рассмотренные иммерсионные ПЭП выявили плоскодонные отражатели Ø0,8 мм на глубинах от 5,0 мм до 110,0 мм с рабочим расстоянием по воде 130 мм. Структурные «шумы» датчиков не превысили допустимый уровень (датчик «КРОПУС» показал общий уровень немного выше чем у других (до 22 %)).

Датчики IPX5019 и П211-5.0-19-Ф6 показали большую длительность фронта эхосигнала от поверхности ввода УЗ-волны по сравнению с иностранным образцом V308 5MHz/ 0.75'' F=6.0'' PTF.

Результаты испытаний (А-сканы) и их сопоставление с западным аналогом (OLYMPUS) приведены в таблице 3. Ввиду ограничения объема страниц публикации, в таблице представлены результаты только для плоскодонных отверстий Ø0,8 мм расположенных на глубине 5,0 мм и 110,0 мм.

Таблица 2

Результаты (А-сканы) сопоставления ПЭП частотой 10 МГц

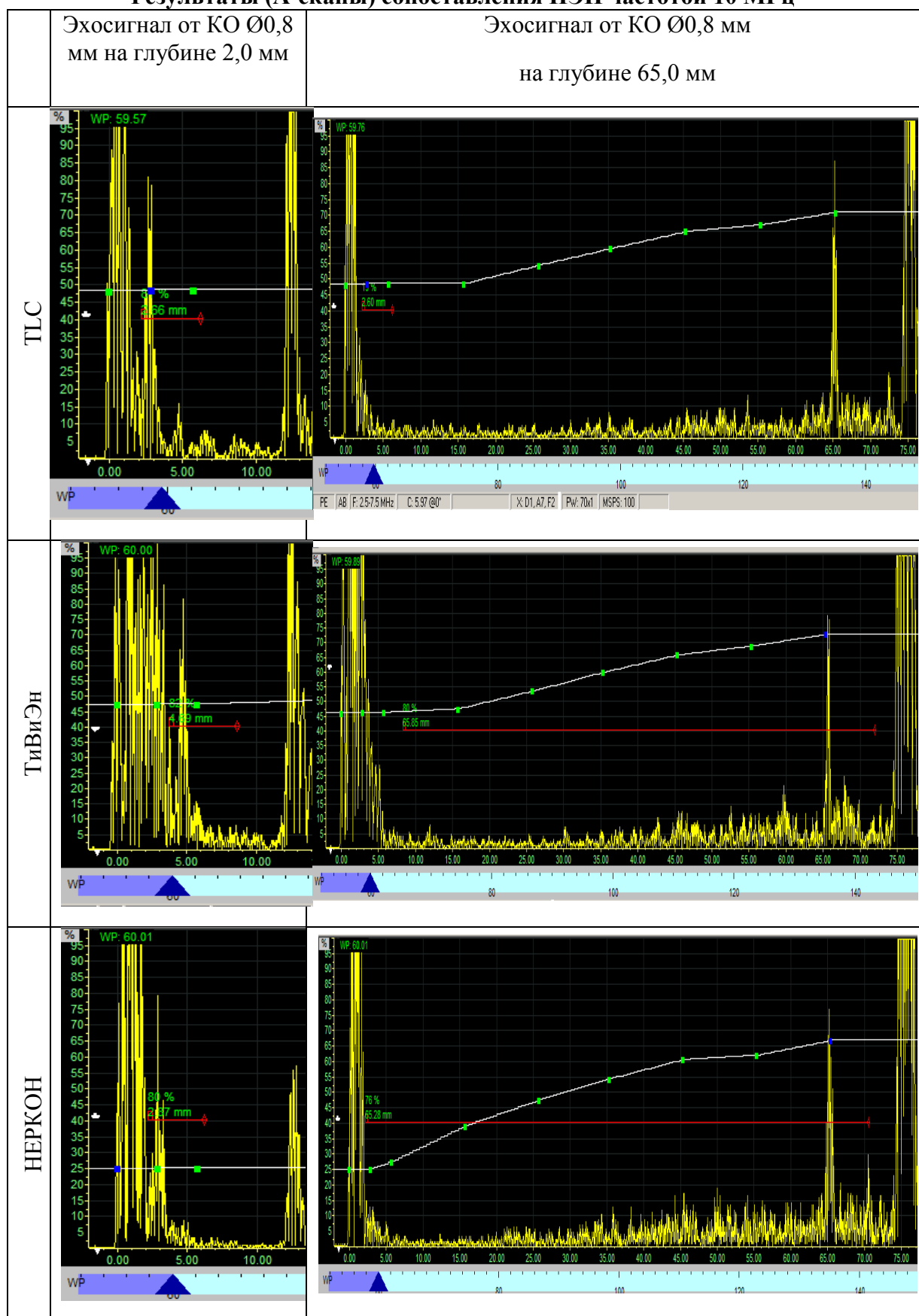
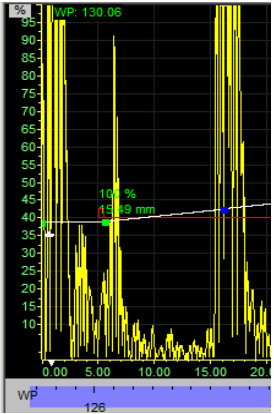
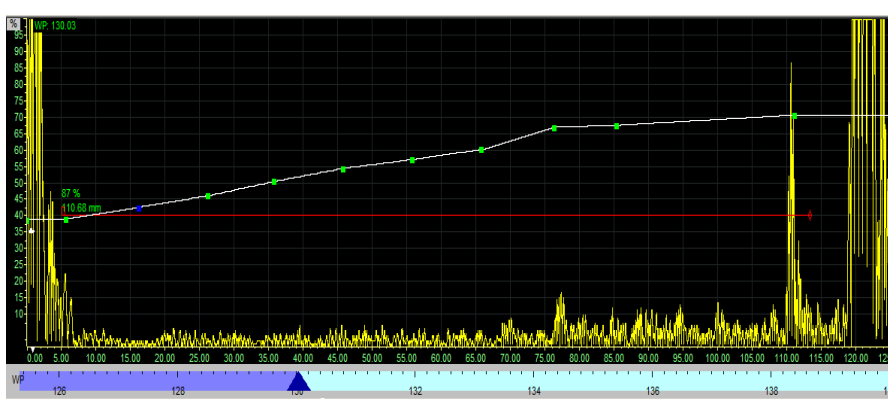
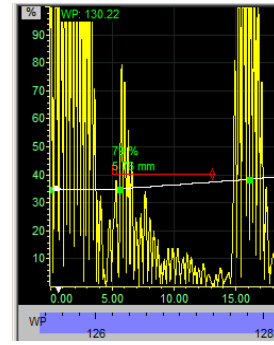
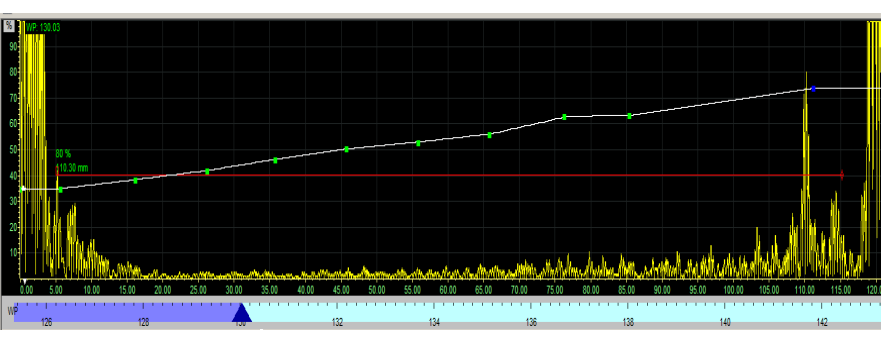
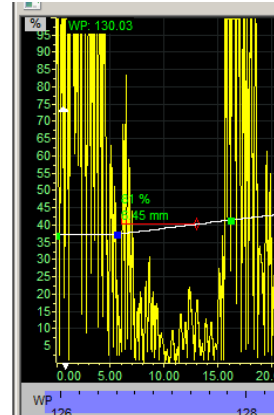
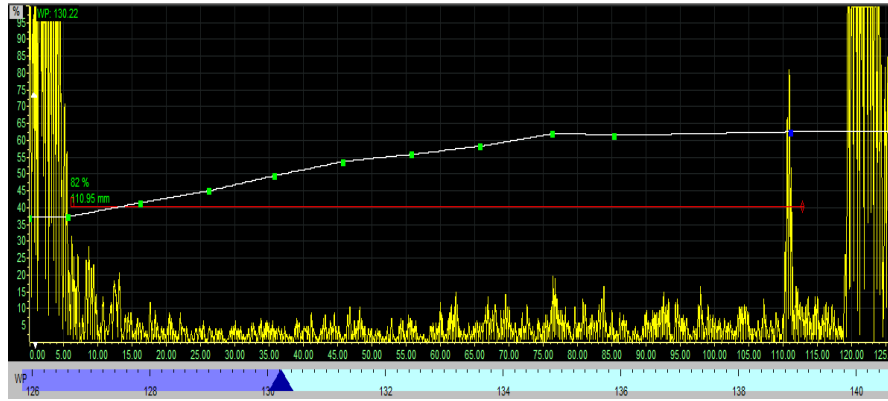


Таблица 3

Результаты (А-сканы) сопоставления ПЭП частотой 5 МГц

	Эхосигнал от КО Ø0,8 мм на глубине 5,0 мм	Эхосигнал от КО Ø0,8 мм на глубине 110,0 мм
OLYMPUS		
КРОКУС		
НЕРКОН		

Выводы и рекомендации

1. В России существуют производители и компании (ООО «НПЦ «КРОПУС», ООО «НЕРКОН», ООО «ТиВиЭн Технолоджи»), которые способны изготавливать и поставлять иммерсионные ультразвуковые пьезоэлектрические преобразователи для обеспечения потребностей отечественных двигателестроительных предприятий.

2. Представленные в работе преобразователи могут выявлять дефекты, эквивалентная площадь которых больше или равна эквивалентной площади плоскодонного отверстия Ø0,8 мм. Для оценки возможности выявления с большей чувствительностью (плоскодонное отверстие Ø0,4 мм и Ø 0,6 мм) необходимо проводить дополнительные испытания ПЭП с соответствующим комплектом настроечных образцов, рабочим расстоянием по воде, акустическими параметрами и шагом сканирования.

3. В работе не проводились длительные испытания, поэтому срок эксплуатации ПЭП при ежедневной эксплуатации в воде не установлен. Следует отметить, что при заказе отечественных иммерсионных ПЭП необходимо в техническом задании на поставку оговаривать чувствительность ПЭП (Ø КО) и предварительную приёмку датчиков на настроечных образцах предприятия. Это обусловлено тем, что производство преобразователей в России носит единичный характер и возможны отклонения при их изготовлении, поэтому возврат и последующая доработка должны быть заранее оговорены с поставщиком.

4. К сожалению, из общего количества отечественных компаний, только «КРОПУС» располагает каталожной информацией о выпускаемых УЗ иммерсионных ПЭП (маркировка, шифр) и их кратким описанием, которая размещена в открытых источниках (интернет сайт). Остальные компании предоставляют информацию о своих продуктах только по дополнительному запросу, поэтому у заказчиков отсутствует понимание об изготовителях данных технических решений.

5. По результатам проведенной работы и изучения отечественного рынка поставщиков иммерсионных УЗ преобразователей для автоматизированных систем контроля составлена таблица 4, которой могут воспользоваться другие предприятия авиационной отрасли.

6.

Таблица 4

Иммерсионные УЗ преобразователи отечественных компаний, обеспечивающие выявление плоскодонного отражателя Ø0,8мм

Компания	5 МГц, фокус 150 мм, пьезоэлемент Ø19 мм	10 МГц, фокус 76 мм, пьезоэлемент Ø10мм
НПЦ «КРОПУС»	IPX5019; IPX6019	IPV1010
«ТиВиЭн» Технолоджи»	TWN-IM-F10D10-FS76-H	Выпускают аналог V308 по запросу
«НЕРКОН»	П211-5.0-19-Ф6	П211-10.0-10-Ф3

Используемая литература

1. Неразрушающий контроль: В 7 т. Под общ. Ред. В.В. Клюева.
Т.3:Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. - М.: Машиностроение, 2004. С. 393–402.
2. Производственная инструкция ПИ 1.2.032-77 Ультразвуковой контроль дисков турбин и компрессоров авиадвигателей / Типография МАП. Подп. в печать 27/III-78 г.
3. ОСТ1 90197-89 Поковки дисков и валов кованные и штампованные из титановых сплавов. Общие технические условия. ОКП 18 2583 / НПО «ВИАМ» Зак.1878-89г.
4. МР №40-5/86Д Методические рекомендации. Ультразвуковой контроль наличия обогащённых азотом включений (нитридов) и несплошностей в титановых дисках и заготовках. / ВИАМ Зак.109-88г.
5. ОСТ 1 01207-2012 Двигатели газотурбинные авиационные. Неразрушающий контроль основных деталей. Общие требования, 2013. 7 с.
6. Пьянков В.А., Хузин Е.И., Вахов В.В. Автоматизированная система ультразвукового контроля дисков / Дефектоскопия. 2008. № 9. С. 46–53.

7. Славин А.В., Косарина Е.И., Генералов А.С., Диков И.А. Перспективы развития современных методов неразрушающего контроля и технической диагностики во ФГУП «ВИАМ» / ТестМат. Основные тенденции, направления и перспективы развития методов неразрушающего контроля в аэрокосмической отрасли: материалы X всероссийской конференции (г. Москва, 09 фев. 2018 г.), [Электронный ресурс] / ФГУП «ВИАМ». – М. : ВИАМ, 2018. С. 268.

УДК 620.179.162

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ РАДИУСНЫХ ЗОН МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА ФАЗИРОВАННЫМИ РЕШЕТКАМИ

А.С. Бойчук¹, к.т.н.; И.А. Диков¹; А.С. Генералов¹, к.т.н.

ULTRASONIC TESTING OF CFRP MONOLITH STRUCTURES RADIUS ZONES BY PHASED ARRAY

A.S. Boychuk¹, Candidate of technical Sciences; I.A. Dikov¹;
A.S. Generalov¹, Candidate of technical Sciences.

uzk@viam.ru

¹*Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИИ «Курчатовский институт» - ВИАМ)*

¹*Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute» (NRC «Kurchatov institute» - VIAM)*

Аннотация

Доклад посвящен работам по проведению ультразвукового контроля радиусных зон монолитных конструкций из углепластика радиусными фазированными решетками. Представлены результаты исследований образца изогнутой балки с помощью радиусных фазированных решеток и различных способов создания акустического контакта.

Реферат

При проведении неразрушающего контроля различных деталей и элементов конструкций из ПКМ наибольшую сложность представляет контроль монолитных зон с малым радиусом кривизны поверхности (радиусных зон). Для решения этой задачи были проведены ультразвуковые исследования радиусных зон с использованием радиусных фазированных решеток. Были опробованы различные способы создания акустического контакта. Полученные результаты с помощью данной технологии показали эффективность выявления дефектов в виде включений из фрагментов фторопластовой пленки диаметром 5 мм. По результатам исследований были также определены достоинства и недостатки использования радиусных фазированных решеток с различными способами создания акустического контакта.

Ключевые слова:

углепластик, монолитные конструкции, радиусные зоны, неразрушающий контроль, ультразвуковые методы, фазированные решетки

Abstract

The report is devoted to works on carrying out ultrasonic testing of carbon fiber-reinforced plastics (CFRP) monolith structures radius zones by radius phased array. The results of studies of curved beam samples using radius phased arrays and various methods of creating acoustic contact are presented.

Essay

When conduction non-destructive testing of various parts and structural elements made of polymer composite materials, the greatest difficulty is the testing of monolithic zones with a small radius of curvature of the surface (radius zones). To solve this problem, ultrasound studies of radius zones using radius phased arrays were carried out. Various ways of creating acoustic contact have been tried. The results obtained using this technology showed the efficiency of defects detection in the form of inclusions from fragments of PTFE film with a diameter of 5 mm. Based on the research results, the advantages and disadvantages of using radius phased arrays with various methods of creating acoustic contact were also defined.

Keywords:

carbon fiber-reinforced plastics (CFRP), monolith structures, radius zone, non-destructive testing, ultrasonic method, phased array

Введение

Увеличение объема применения полимерных композиционных материалов (ПКМ), в особенности углепластиков и стеклопластиков, в деталях и элементах конструкций летательных аппаратов (ЛА), таких как самолетах, вертолетах, беспилотниках, космической технике и др. требует особое внимание к проведению их неразрушающего контроля. В настоящее время изготавливается довольно широкий ассортимент монолитных деталей и конструкций из ПКМ, применяемых в ЛА, от плоских панелей, до конструкций с двойной кривизной поверхности. Если контроль сравнительно плоских или с небольшой кривизной поверхности панелей уже довольно хорошо отработан, то контроль конструкций с радиусными переходами малого радиуса затруднен. Речь идет о радиусных переходах (зонах) в таких деталях и элементах конструкций, как лонжероны, стрингерные панели (как с Т-, так и с Ω -образными стрингерами), и др. (рис. 1).

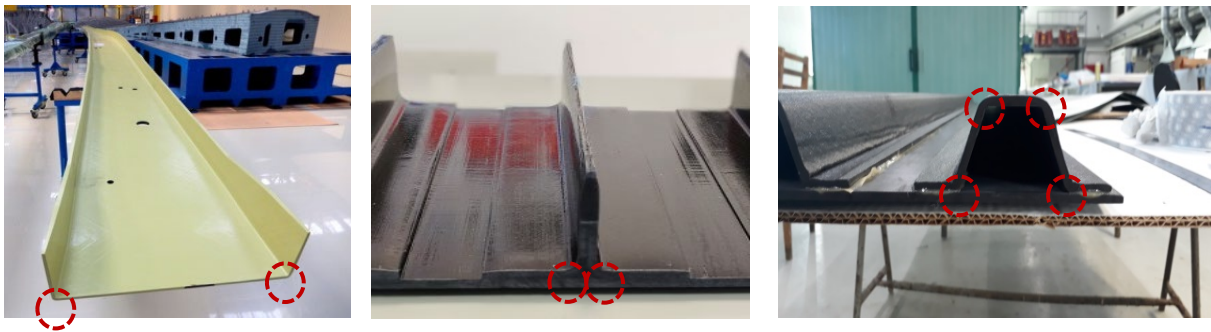


Рис. 1. Виды конструкций из ПКМ с радиусными зонами

Изготовление таких конструкций имеет определенные сложности, связанные с технологическими процессами, что может приводить к образованию дефектов в радиусных зонах. Также радиусные зоны, как правило, являются концентраторами напряжений, и в процессе эксплуатации в этих зонах часто могут появляться дефекты. К основным типам дефектов в радиусных зонах относятся расслоения, поры, включения и др., причем ориентация дефектов преимущественно по межслоевым разделениям.

Как известно, для контроля композитов широко используются ультразвуковые (акустические), радиационные и тепловые методы неразрушающего контроля, а также шерография. Каждый из методов имеет как свои преимущества, так и недостатки. Наибольшее же применение при контроле ПКМ получили ультразвуковые методы, такие как эхо-импульсный, теневой, импедансный, локальный метод свободных колебаний [1–5]. Что касается монолитных деталей и конструкций, то здесь контроль проводится преимущественно ультразвуковым эхо-импульсным методом. Данный метод позволяет проводить контроль с односторонним доступом к объекту контроля, обнаруживать внутренние неслошности с высокой чувствительностью (от 2 мм) и оценивать их размер и глубину залегания с достаточно хорошей точностью.

Долгое время при использовании ультразвукового эхо-импульсного метода контроля, в том числе и при контроле ПКМ, для излучения и приема ультразвуковых импульсов использовались традиционные одноэлементные пьезоэлектрические преобразователи и дефектоскопы с представлением результатов контроля в виде А-сканов. При создании акустического контакта, как правило, вместе с одноэлементным преобразователем используется специальная призма из полистирола или иммерсионный контакт.

Одной из передовых технологий контроля монолитных композитных изделий в последнее время стало применение эхо-импульсного метода с использованием ультразвуковых фазированных решеток. Применение

фазированных решеток по сравнению с традиционным ультразвуковым эхо-импульсным методом позволяет быстрее и наглядней проводить контроль, повысить выявляемость дефектов, а также достоверность их выявления (повысить вероятность выявления дефектов). Принцип работы фазированных решеток довольно подробно описан в [6].

На сегодняшний день наибольшее распространение получили линейные фазированные решетки, которые применяют при контроле плоских панелей и панелей с небольшой кривизной поверхности [2, 7–9, 13]. Для контроля радиусных зон применение данного вида фазированных решеток затруднено, хотя и имеются научные работы по их применению [10]. Поэтому радиусные зоны если и контролируются, то преимущественно с использованием традиционных одноэлементных преобразователей [11, 12]. Однако одноэлементные преобразователи не позволяют за один проход вдоль радиусной зоны охватывать всю область контроля, а также имеются и другие сложности для решения данной задачи. Поэтому для контроля радиусных зон стали выпускаться специальные радиусные фазированные решетки, формирующие фронт волны по определенному радиусу в зависимости от конструктива решетки, что позволяет при подборе необходимого расстояния от фазированной решетки до поверхности радиусной зоны объекта контроля вводить ультразвуковые сигналы перпендикулярно в каждой точке поверхности. Еще одним преимуществом радиусных фазированных решеток при определенных конструктивных особенностях может быть полный охват всей контролируемой поверхности объекта контроля за один проход вдоль радиусной зоны.

Особенности радиусных фазированных решеток

Специальные радиусные фазированные решетки представляют собой многоэлементные пьезоэлектрические преобразователи, элементы которых расположены на дуге окружности определенного радиуса, как правило, секторе круга 90 градусов. Излучение волнового фронта такой фазированной решеткой осуществляется таким образом, что ультразвуковой фронт волны фазированной решетки при излучении сначала сходится в точке, соответствующей центру дуги окружности, на которой располагаются элементы решетки, а затем начинает расходиться в виде дуги окружности. Это позволяет при определенных условиях вводить волновой фронт ультразвуковых сигналов перпендикулярно к каждой точке радиусной поверхности объекта контроля. На рис. 2 представлены радиусные фазированные решетки некоторых фирм производителей оборудования для неразрушающего контроля.

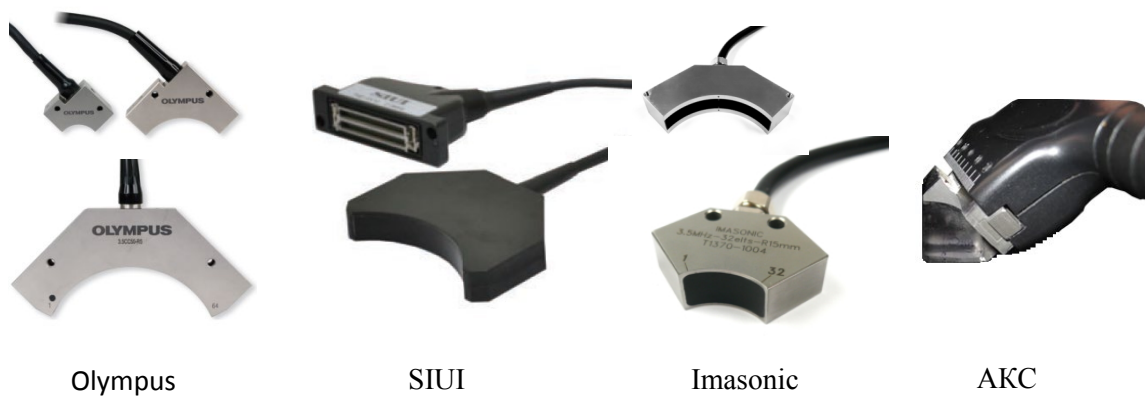


Рис. 2. Радиусные фазированные решетки

Требования к расположению радиусной ФР относительно ОК и геометрические преобразования обнаруживаемых несплошностей.

Основное требование к применению радиусных ФР при контроле радиусных зон монолитных конструкций из ПКМ – это правильное расположение ФР относительно поверхности ввода ультразвуковой волны в объект контроля. При контроле с вогнутой стороны центр окружности радиусом $R_{фр}$, на которой расположены элементы радиусной фазированной решетки, должен совпадать с центром окружности вписанной на вогнутой поверхности радиусной зоны с радиусом $R_{ок}$, а средний элемент радиусной ФР находиться на биссектрисе угла сгиба радиусной зоны. На рис. 3 представлен частный случай контроля радиусной зоны с углом сгиба 90° .

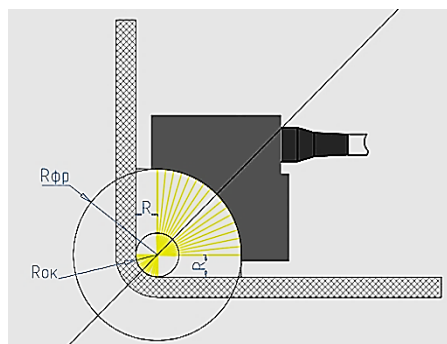


Рис. 3. Расположение радиусной фазированной решетки при контроле радиусных зон

На экране дефектоскопа развертке типа В (В-скане) при контроле радиусными фазированными решетками мы будем наблюдать изображение аналогичное как при контроле линейными ФР, т. е. образ от поверхности ввода ультразвуковых колебаний в объект контроля будет в виде прямой линии. При наличии донной поверхности или расслоений они также будут отображаться аналогично как при контроле плоских монолитных панелей. Основное отличие будет в том, что из-за геометрических преобразований

обнаруживаемый дефект на кране В-скана в зависимости от радиуса кривизны поверхности ввода и глубины залегания будет отображаться либо меньшего, либо большего размера, чем он есть на самом деле. На Рисунке 4 наглядно показано, из-за чего это происходит.

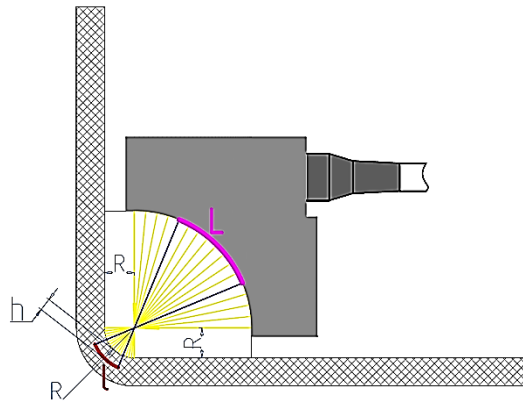


Рис. 4. Геометрические преобразования размера обнаруживаемого дефекта на кране В-скана

Поэтому при обнаружении дефектов в радиусных зонах при использовании радиусных ФР истинные их размеры по оси индекса фазированной решетки нужно пересчитывать по следующей формуле:

$$l = \frac{L \cdot (R + h)}{r},$$

где l – размер дефекта в радиусной зоне; L – размер дефекта на экране В-скана дефектоскопа; R – радиус поверхности ввода ультразвуковых сигналов в объект контроля; h – глубина залегания дефекта в радиусной зоне; r – радиус фазированной решетки.

Способы создания акустического контакта.

Одним из важных моментов при использовании радиусных фазированных решеток при контроле радиусных зон является создание акустического контакта между поверхностями преобразователя и объекта контроля.

Самый простым и надежным способом создания акустического контакта между радиусной ФР и объектом контроля является полное погружение объекта контроля в ванну с водой (иммерсионный контроль). Частным случаем иммерсионного контроля является использование локальной иммерсионной ванны. Как в одном так в другом случае при ручном контроле необходимо использовать специальные оправки, которые обеспечивали бы правильное позиционирование фазированной решетки относительно поверхности радиусной зоны объекта контроля и образовывали бы локальную ванну с водой (для случая локальной

иммерсионной ванны). При использовании автоматизированного контроля необходимо использовать робот-манипулятор, который перемещал бы радиусную фазированную решетку вдоль радиусной зоны на необходимом расстоянии от поверхности ввода ультразвуковых сигналов в объект контроля. На рисунке 5 показано расположение локальной иммерсионной ванны с радиусной фазированной решеткой при контроле радиусной зоны с углом сгиба 90° .



Рис. 5. Радиусная фазированная решетка с локальной иммерсионной ванной

Другим, более традиционным способом создания акустического контакта, является использование призм из полистирола, которые с одной стороны через слой контактной жидкости соединяются с поверхностью радиусной фазированной решетки или приклеиваются, с другой - контактируют с радиусной поверхностью объекта контроля. Призма при этом должна удовлетворять требованиям по расположению радиусной фазированной решетки относительно объекта контроля, как показано на рисунке 6.

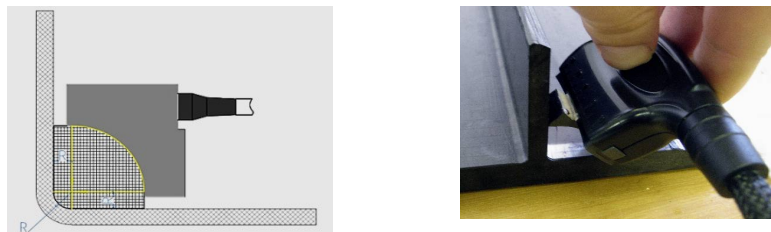


Рис. 6. Радиусная фазированная решетка с призмой из полистирола

При использовании линейных фазированных решеток вместо жесткой призмы из полистирола иногда используют призмы из эластомерного материала, например из аквалена. Это позволяет сохранить хороший акустический контакт при небольших неровностях и криволинейностях поверхности, при которых применение призм из полистирола уже не обеспечивает надежного акустического контакта или требует большого количества контактной жидкости, что в свою очередь приводит к появлению приповерхностных мешающих сигналов и тем самым увеличивает приповерхностную мертвую зону. Данный материал можно использовать и при изготовлении призм для радиусной фазированной решетки (рис. 7).

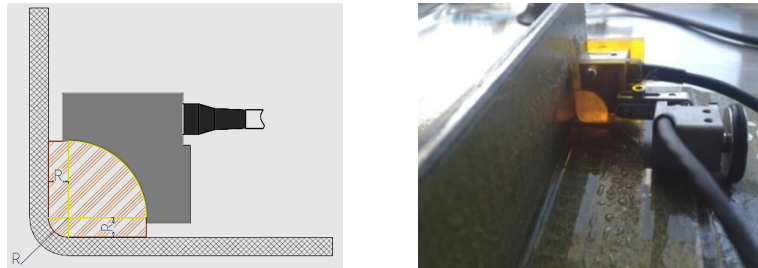


Рис. 7. Радиусная фазированная решетка с призмой из эластомера

Помимо использования локальных иммерсионных ванн и призм из полистирола или эластомерного материала, есть еще одно довольно эффективное решение для создания акустического контакта между радиусной фазированной решеткой и поверхностью радиусной зоны объекта контроля. Здесь также идея была позаимствована из способа создания акустического контакта для линейной фазированной решетки. Речь идет о таком приспособлении, которое за рубежом называют *waterbox* [7, 13]. В основу приспособления легла водная акустическая линия задержки, которая образуется в небольшом корпусе с водой, с одной стороны которого прикреплена радиусная фазированная решетка, с другой – эластичный материал (рис. 8).

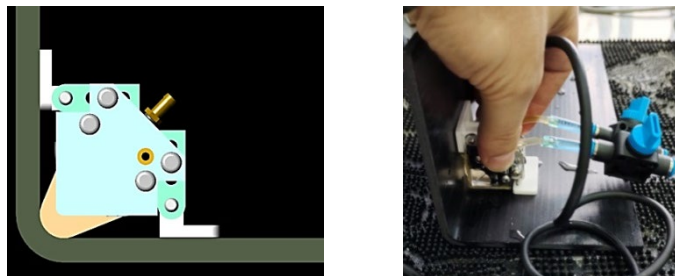


Рис. 8. Радиусная фазированная решетка с приспособлением вида *waterbox*

Результаты контроля радиусной зоны образца изогнутой балки из углепластика.

Для оценки возможности проведения контроля радиусных зон конструкций из ПКМ с использованием радиусных фазированных решеток были проведены ультразвуковые исследования образца изогнутой балки из углепластика толщиной 6,7 мм с углом сгиба 90° с закладными искусственными дефектами диаметром 5 мм в виде технологических пленок из фторопласта толщиной 40 мкм и пакетов из полиимида. Искусственные дефекты были заложены в радиусный переход образца в приповерхностных зонах и в середину толщины.

Исследования с локальной иммерсионной ванной, призмой из аквалена и приспособления вида *waterbox* проводились с использованием дефектоскопа, работающего с фазированными решетками по классической схеме, и 16-элементной фазированной решетки с радиусом 10 мм и

центральной частотой 5 МГц. Для контроля с призмой из полистирола использовался дефектоскоп, работающий с фазированными решетками в режиме синтезированной апертуры, и 16-элементная радиусная антенная решетка с радиус 10 мм и центральной частотой 4 МГц. При проведении исследований использовалась настройка временной регулировки чувствительности (ВРЧ) по заложенным искусственным дефектам в виде фрагментов фторопластовой пленки.

На рисунках 9 и 10 представлены А- В- и С-сканы радиусной зоны образца изогнутой балки, полученные при использовании радиусной фазированной решетки и различных способов создания акустического контакта при сканировании вдоль радиусной зоны за один проход.

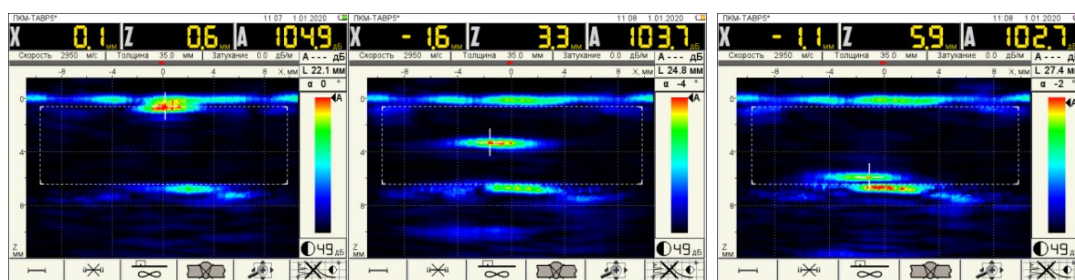


Рис. 9. Результаты контроля радиусной зоны образца изогнутой балки радиусной фазированной решеткой и призмы из полистирола

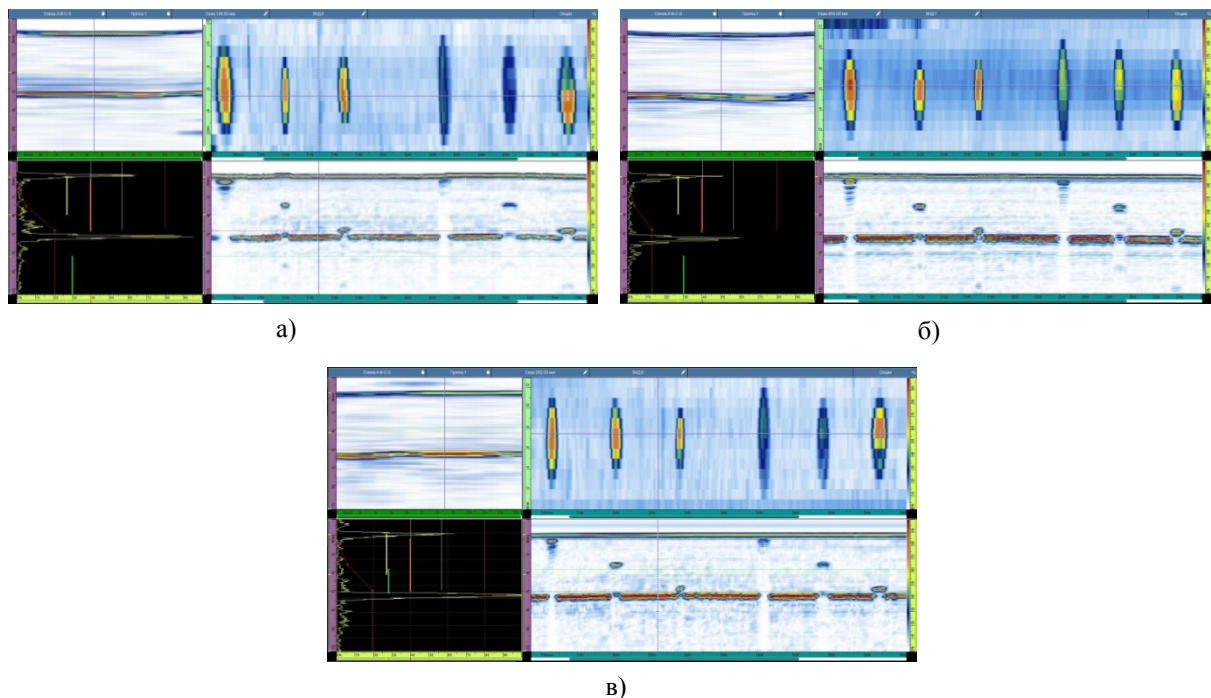


Рис. 10. Результаты контроля радиусной зоны образца изогнутой балки радиусной фазированной решеткой и: а) локальной иммерсионной ванны; б) призмы из аквалена; в) приспособления вила waterbox

В таблице 1 представлены результаты измерения амплитудных характеристик выявления искусственных дефектов в исследуемом образце.

Таблица 1

Результаты измерения амплитудных характеристик выявления искусственных дефектов в образце изогнутой балки

		Способ создания акустического контакта			
	Глубина залегания, мм	Призма из полистирола	Призма из эластомера аквален	Локальная иммерсионная ванна	Приспособление Waterbox
Амплитуда эхо-сигналов от фрагментов фторопластовых пленок диаметром 5 мм, $A_{отр}$	0,6	104,7 дБ	94 %	83 %	88 %
	3,4	103,7 дБ	81 %	75 %	81 %
	5,8	103,4 дБ	89 %	88 %	82 %
Амплитуда структурных шумов, $A_{ш}$		94 дБ	13 %	8,4 %	8,8 %
$A_{отр}/A_{ш}$, дБ		9,9	16,6	19,6	20,4

Как мы видим из полученных результатов, представленных на рис. 9 и 10 и в таблице 1, контроль радиусных зон образца изогнутой балки с применением радиусной фазированной решетки и всеми четырьмя способами создания акустического контакта позволяет хорошо выявлять дефекты в радиусной зоне (отношение «сигнал от дефекта/ шум» более 8 дБ), и при этом проводить контроль радиусной зоны за один проход. Наглядность отображения результатов контроля на экране дефектоскопа в виде цветных изображений позволяют нам легче интерпретировать результаты контроля, а также проводить измерения размеров обнаруживаемых дефектов прямо на экране дефектоскопа.

Обсуждение и заключение

Приведенные результаты исследований показывают, что применение радиусных фазированных решеток для контроля радиусных зон конструкций из ПКМ с радиусными переходами малого радиуса являются очень эффективным решением. Для создания акустического контакта между радиусной фазированной решеткой и поверхностью объекта контроля можно применять разные способы и приспособления, которые имеют как свои преимущества, так и недостатки.

Иммерсионная ванна

Достоинства: стабильный акустический контакт, отсутствие необходимости применения дополнительных приспособлений (при автоматизированном контроле).

Недостатки: необходимость полного погружения контролируемой детали в ванну с водой (что иногда недопустимо), при контроле достаточно габаритных изделий необходимы огромные емкости с водой, невозможность применения в процессе эксплуатации.

Локальная иммерсионная ванна

Достоинства: простота конструкции, хороший акустический контакт, нет необходимости полного погружения объекта контроля в ванну с водой.

Недостатки: необходимость постоянной подачи воды, нет гибкости к небольшим геометрическим изменениям зоны контроля (радиус, угол сгиба), т.е. под каждый радиус и угол сгиба нужна новая оправка.

Призма из полистирола или оргстекла

Достоинства: простота изготовления, использование небольшого количества контактной жидкости.

Недостатки: нет гибкости к небольшим геометрическим изменениям зоны контроля (радиус, угол сгиба), качество контакта сильно чувствительно к неровностям поверхности контроля.

Призма из эластомерного материала

Достоинства: хороший акустический контакт, гибкость к небольшим неровностям поверхности, использование небольшого количества контактной жидкости.

Недостатки: сложность изготовления призмы, нет гибкости при больших изменениях геометрических размеров радиусной зоны.

Приспособление вида Waterbox

Достоинства: хорошая гибкость к геометрическим изменениям зоны контроля (радиус, угол сгиба), использование небольшого количества контактной жидкости, хороший акустический контакт.

Недостатки: сложность изготовления.

Литература

1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т./ Под общей редакцией В.В. Клюева. Т. 3. И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. Ультразвуковой контроль. – 2-е изд., испр. М.: Машиностроение, 2006. 864 с.

2. Бойчук А.С., Генералов А.С., Далин М.А., Диков И.А. Контроль монолитных деталей и конструкций авиационной техники, изготавливаемых из ПКМ, ультразвуковым методом неразрушающего контроля с использованием фазированных решеток // Сб. тр. X Всеросс. Конф. ТестМат «Основные тенденции, направления и перспективы развития методов неразрушающего контроля в аэрокосмической отрасли». М.: ВИАМ, 2018. С. 18–31. URL:

<https://conf.viam.ru/sites/default/files/uploads/proceedings/1063.pdf> (дата обращения 23.01.2024).

3. Иванов В.Г. и др. Автоматизированный ультразвуковой контроль клеевых соединений и трёхслойных конструкций из полимерных композиционных материалов // В мире НК. 2021. Т. 24. № 1. С. 34–38.

4. Трифонова С.И., Генералов А.С., Далин М.А. Современные технологии и средства теневого ультразвукового контроля полимерных композиционных материалов // В мире НК. 2016. Т. 19. № 1. С. 31–35.

5. Чертищев В.Ю. Бойчук А.С., Диков И.А., Генералов А.С. Неразрушающий контроль акустическими методами многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов мотогондолы авиационного двигателя // Сб. тр. X всеросс. Конф. ТестМат «Основные тенденции, направления и перспективы развития методов неразрушающего контроля в аэрокосмической отрасли». М.: ВИАМ, 2018. С. 329–349. URL: <https://conf.viam.ru/sites/default/files/uploads/proceedings/1063.pdf> (дата обращения 23.01.2024).

6. Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications: R/D Tech Guideline // Quebec: R/D Tech inc., 2004. 368 p.

7. Бойчук А.С., Диков И.А., Генералов А.С. Особенности УЗК конструкций из углепластика с выпуклой поверхностью с использованием фазированных решеток и оправок типа «Waterbox» // Контроль. Диагностика. 2019. № 3. С. 14–21

8. Бойчук А.С., Диков И.А., Генералов А.С. Повышение чувствительности и разрешающей способности ультразвукового неразрушающего контроля монолитных образцов из ПКМ с использованием фазированных решеток // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3. С. 83–88. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-83-88.

9. Бойчук А.С., Генералов А.С., Степанов А.В. Вероятностная оценка достоверности результатов ультразвукового неразрушающего контроля монолитных конструкций из углепластика при использовании фазированных решеток // Труды ВИАМ. 2016. № 11. С. 86–94. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-11-11-11.

10. Luo Z., Kang J., Cao H., Lin L. Enhanced ultrasonic total focusing imaging of CFRP corner with ray theory-based homogenization technique // Chinese Journal of Aeronautics, 2022. No. 2432. Pages 10. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1000936122002187> (дата обращения 23.01.2024).

11. Sergio González, Álvaro Herrera, Rosario Fernández, etc. Ad-hoc solutions for ultrasonic inspection of radii in closed composite Structures // 11th International Symposium «NDT in Aerospace». 2019, Paris, France. URL: https://www.ndt.net/article/aero2019/papers/fp_fri2b3_s_gonzalez.pdf (дата обращения 23.01.2024).

12. F.-C. He, Z. Wang, L.-J. Shi. Ultrasonic Testing Technique for the Inspection of Defects in the Corner of Composites // Journal of Materials Engineering 1.7 (2011): 80-84. URL: <https://www.ingentaconnect.com/content/jme/jme/2011/00000001/00000007/art00017?crawler=true> (дата обращения 23.01.2024).

13. Rau E., Grauvogl E., Manzke H., Cyr P. Ultrasonic Phased Array Testing of Complex Aircraft Structures// ECNDT 2006 - Tu.1.1.2 pp. 1-17. URL: <https://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/Tu.1.1.2.pdf> (дата обращения 23.01.2024).

УДК: 681.7.063

**ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ
ДАТЧИКОВ В КРИОГЕННОМ МЕТАЛЛОКОМПОЗИТНОМ
ТОПЛИВНОМ БАКЕ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЦЕЛОСТНОСТИ
КОНСТРУКЦИИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ И ИСПЫТАНИЯХ**

А.А. Склезнев¹, д.т.н.; А.Н. Рыков², к.т.н.;

**USING OF THE FIBER OPTICAL SENSORS EXPERIENCE IN A
CRYOGENIC METAL COMPOSITE FUEL TANK TO MONITOR
STRUCTURE INTEGRITY DURING MANUFACTURING AND
TESTING**

А.А. Skleznev¹, DSc; А.Н. Rykov², PhD;

skleznev@crism-cat.ru; mail@crism-cat.ru;

¹АО «Центр перспективных разработок», г. Хотьково

¹ JSC «Center of perspective developments», Khotkovo

²АО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения», г. Хотьково

² JSC «Central research institute for special machinery», Khotkovo

Аннотация

Рассмотрен опыт применения измерительных систем непрерывного мониторинга на основе волоконнооптических датчиков в конструкции и материале металлокомпозитного криогенного топливного бака. Рассмотрены технологические вопросы и вопросы обеспечения достоверности измерений.

Ключевые слова:

КМ, криогенный топливный бак, волоконно-оптические датчики

Annotation

The experience of using continuous monitoring measuring systems based on fiber-optic sensors in the design and material of a metal-composite cryogenic

fuel tank is considered. Technological issues and issues of ensuring the reliability of measurements are considered.

Keywords:

CM, cryogenic fuel tank, fiber-optic sensors

Реферат

В докладе представлен опыт применения измерительных систем непрерывного мониторинга на основе волоконнооптических датчиков в конструкции и материале металлокомпозитного криогенного топливного бака. Рассмотрены вопросы обеспечения неповреждаемости измерительных систем при изготовлении: намотке, термообработке, механической обработке. Предложены приёмы для обеспечения защиты выводов, приводятся результатами экспериментального исследования модельной конструкции бака с внедрённой измерительной системой. Рассмотрены вопросы температурной компенсации измерительной системы.

Введение

Существующие в настоящий момент основные конструктивные решения для топливных баков космических носителей на жидком топливе представляют собой вафельные оболочки из металлических сплавов, изготовленные методом фрезерования. Такая технология требует уникального технологического оборудования, особенно для изготовления баков больших длины и диаметра. Следует также отметить крайне низкий коэффициент использования материала (КИМ) в топливных баках вафельной конструкции, составляющий 7–8 %.

С целью повышения массового совершенства топливных криогенных баков предложено применить в конструкции несущих топливных баков космических носителей армированные полимерные композитные материалы (ПКМ) [1–3]. Имеются следующие предпосылки для такого решения: в ракетах на твёрдом топливе доля применения силовых конструкций, выполненных из полимерных композиционных материалов с непрерывным армированием (включая такие элементы, как корпуса транспортно-пусковых контейнеров, соединительные отсеки, головные обтекатели, сопловые блоки и ракетные двигатели твёрдого топлива) составляет около 80 %, а экономия веса по сравнению с аналогичными изделиями из металлических сплавов составляет 25–30 %. В то же время в

ракетах-носителях (РН) среднего и тяжёлого класса характерными особенностями являются сравнительно большие габариты (диаметр РН Протон-М, а также других перспективных РН составляет 4.1 м), высокий уровень действующих нагрузок (I ступень проектируется на расчётную осевую эквивалентную сжимающую силу порядка 15 МН), что может привести к ещё большей экономии веса в случае применения композитов.

Альтернативой вафельным конструктивным схемам, в части восприятия силовых нагрузок на отсек, являются сетчатые конструкции, представляющие собой интегральную систему взаимопересекающихся однонаправленных рёбер [4]. Композитный материал в такой конструкции работает вдоль волокон, что позволяет наиболее полно реализовать его характеристики. Конструкция же металлокомпозитного топливного бака для криогенного топлива представляет собой симбиоз двух конструктивно-силовых схем: металлокомпозитных ёмкостей и силовых сетчатых структур, объединяющихся в единую интегральную силовую конструкцию. Очевидно, что конструкция металлокомпозитного криогенного топливного бака является сложной интегрально изготовленной системой, содержащей в себе значительное количество разнотипных конструктивных элементов и разнородные материалы. В корпусе бака имеются: тонкостенный металлический лайнер в виде бака, силовая углепластиковая оболочка, сетчатая цилиндрическая оболочка, тонкостенная обшивка, лёгкий наполнитель, металлические закладные элементы. Напряжённо-деформированное состояние стенки бака является достаточно сложным, что подтверждается результатами прочностных расчётов.

Традиционные методы тензометрии не могут в полной мере обеспечить точное исследование объекта измерения, так как многопозиционная система измерения с применением тензометров при сложной конфигурации испытуемой конструкции или при неясном распределении напряжений позволяет только приближённо определить топографию распределения деформаций и температурного поля по наружной обшивке конструкции. Это связано с тем, что тензометрические датчики имеют конкретные размеры, и не могут быть размещены в любой точке поверхности. Кроме этого толщина стенки бака составляет более 20 мм, что затрудняет оценку напряжённо-деформированного состояния только всей стенки только по её наружной поверхности. Однако самой существенной проблемой, которую не может обеспечить измерение при помощи традиционной тензометрии, является измерение уровня деформаций в тонкостенном металлическом лайнере, которые могут привести к его потере устойчивости [5-8], разрушению и потере герметичности бака в целом.

Основная часть

Одним из наиболее перспективных путей перехода на качественно новый уровень надёжности и безопасности авиационной и ракетно-космической техники является разработка и применение инкорпорированных в ПКМ систем контроля за его деформированным и тепловым состояниями. Большой интерес в этом направлении представляют информационные системы с датчиками на основе оптических волокон (волоконно-оптические датчики, ВОД, optical fiber sensors), обладающие высокими метрологическими характеристиками, надёжностью, стабильностью, малыми габаритами и оптимальной совместимостью с электронными системами обработки информации [2]. Одним из типов ВОД, наиболее часто используемых при мониторинге напряжённо-деформированного состояния (НДС) композиционных материалов, является сенсорная система на основе внутриволоконных брэгговских решёток (ВБР). В работе приводится опыт применения волоконно-оптических датчиков в криогенном металлокомпозитном топливном баке для контроля целостности конструкции при изготовлении и испытаниях.

ВБР могут использоваться как непосредственно для измерений температуры в процессе технологической переработки композитных материалов (КМ) [2], так и в качестве датчиков температурной компенсации при измерении деформаций в процессе испытаний различных конструкций из КМ, например гибких систем подвеса баков [9], представляющих собой тонкие ленты полимеризованного материала, сечением не более 1×10 мм.

Одной из проблем, возникающих при закладке волоконнооптических датчиков в композиционный материал, является формирование выводов оптического волокна. В работе [2, 10] предложено устройство выхода ВОД с использованием гибкого кембрика, который защищает внешнюю часть световода и не интегрируется в основную массу изделия. Как показала технологическая отработка, метод использования гибкого кембрика не пригоден для рассматриваемой конструкции, так как в процессе термообработки на границе раздела, отделяющей кембрик от изделия, происходит обрыв световода. Для сохранения его целостности следует применять либо дорогостоящий прочный световод либо, при использовании рядового световода, кембрик частично следует вводить в материал. Для сетчатой конструкции глубина интегрирования кембрика может составлять несколько процентов от конструкционной толщины сетки без заметного влияния на прочностные характеристики конструкции

в целом. На Рисунке 1 показан пример размещения световода с последующим его закреплением вне рабочей зоны изделия.

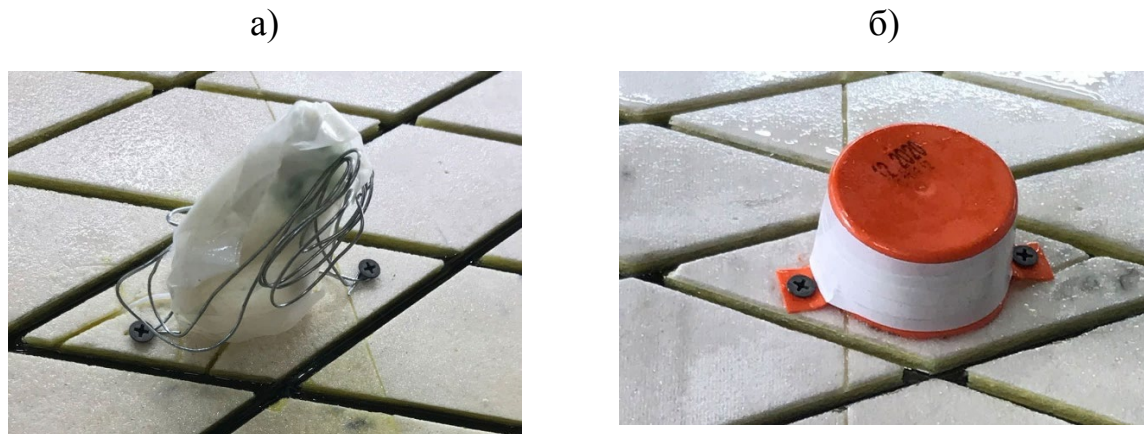


Рис. 1. Размещение вывода ВОД вне рабочей зоны изделия: а) на проволочном каркасе во фторопластовом пакете; б) под защитным кожухом

В сетчатой конструкции без наружной оболочки возможно расположение выводов ВОД с привязкой к закладным элементам или конструктивным элементам, свободным от воздействия элементов намотки (фланец, шпангоут) как показано на рис. 2. В последующий момент осуществляется защита мест выводов ВОД салфеткой (рис. 3). По окончании намотки сложнопрофильного элемента (например – днища кокона) выводы ВОД, упакованные в пакет из фторопласта при необходимости могут быть перенесены в пассивную зону изделия (рис. 4).

Кроме ВБР могут использоваться распределённые датчики на основе регистрации Рэлеевского рассеяния. Эти датчики позволяют регистрировать одновременное воздействие температуры и деформации с пространственным разрешением от 0,4 мм на всей длине датчика. Датчики могут охватывать всю длину окружности, располагаться вдоль любого ребра сетчатой структуры, быть расположенными на лейнере или между слоями силовой оболочки по любым траекториям, допускающим размещение таких датчиков без повреждения.



Рис. 2. Расположение выводов ВОД на фланце изделия



Рис. 3. Защита выводов ВОД салфетками в процессе намотки



Рис. 4. Перенос выводов ВОД в пассивную зону

В процессе изготовления, как уже отмечалось выше, в различных зонах модельного бака были установлены датчики деформации и температуры на основе Брэгговских решёток. В общей сложности установлено 6 датчиков деформации и два датчика температуры. Датчики на основе Рэлеевского рассеяния охватывали всю длину окружности цилиндрической части бака, при этом один датчик был расположен на лейнере, второй – под первым слоем наружной оболочки.

Для решения задачи температурной компенсации влияния окружающего датчика материала [11] на наружной поверхности бака термокомпенсирующая ВБР была приклеена в непосредственной близости (3...5 мм) от ВБР, предназначенной для измерения собственно деформации. В процессе циклических испытаний проводилось измерение деформации наружной оболочки бака с использованием ВБР, распределённого датчика рэлеевского рассеяния с применением системы ODiSI 6104 и тензодатчиков. Датчики деформации и температурной компенсации располагались на расстоянии 430 ± 15 мм от нижнего торца шпангоута.

На рис. 5 показан общий вид металлокомпозитного криогенного топливного бака на испытательном стенде для проведения термоциклических испытаний. Измерения проводились в течение цикла от начала заполнения бака жидким азотом до его высыхания после слива азота.

При проведении испытаний бака установлено, что показания датчиков на основе ВБР и на основе обратного рэлеевского рассеяния, установленных на наружную поверхность бака, практически совпадают до того момента времени, пока наружная оболочка бака не начинает охлаждаться и не требуется температурная компенсация показаний датчиков, которая затруднена для датчика на основе рэлеевского рассеяния вследствие неоднородности теплового поля на наружной поверхности.

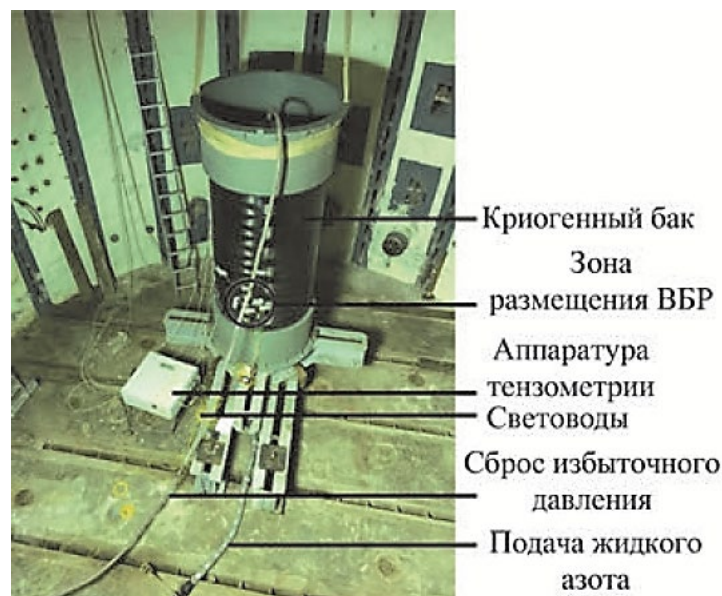


Рис. 5. Модельный криогенный металлокомпозитный топливный бак в испытательном комплексе в процессе криостатических испытаний

Таким образом, установлено, что существенной проблемой при использовании оптоволоконных датчиков в процессе эксплуатации металлокомпозитного криогенного топливного бака является широкий диапазон рабочих температур, вопросы компенсации погрешности от которого рассмотрены в работе [11]. Так как в процессе использования температура внутренней поверхности бака – лейнера – может меняться на величину более 200 К, а наружной поверхности до 60–80 К. В этом случае необходима корректировка информации с ВОД с учётом температуры. Корректировка с учётом температуры (термокомпенсация) осуществляется посредством ВБР, рабочая часть которой была вклеена в металлическую оболочку наружным диаметром 0,2 мм и длиной 12 мм, что позволяет изолировать ВБР от действия деформации.

На рис. 6 приведён график изменений деформации, зарегистрированных ВБР в окружном направлении (D2-T) и по образующей (D4-T) бака с учётом температурной компенсации. Измерения проводились в течение цикла от начала заполнения бака жидким азотом до его высыхания после слива азота. На Рисунке 7 представлен график изменения деформации за то же время, полученный распределённым датчиком (без температурной компенсации). График приведён для участка, относительно свободного от других типов навесного оборудования, используемого при испытаниях. Анализ рис. 6 и 7 показывает их качественное совпадение в процессе проведения испытаний за исключением начального участка испытаний. Кроме того, в начальный момент времени (до 9 мин с момента начала испытаний) показания датчиков ВБР и распределённой линии практически совпадают по абсолютному значению деформации ($0,028\%$ для ВБР и $300\text{ мкм/м} = 0,03\%$ – для распределённой линии измерения). Это объясняется тем, что первые 9 мин на наружной оболочке бака проявляются деформации, вызванные расширением бака за счёт небольшого избыточного давления испаряющегося азота. Далее превалирующее значение на деформацию поверхности и соответственно датчиков оказывает температура, компенсация которой была проведена для датчиков ВБР, а распределённый датчик регистрировал деформацию без температурной компенсации. Незначительное расхождение в результатах измерений может быть объяснено не совсем точной компенсацией температуры для датчиков ВБР из-за существенного разброса температуры даже в рядом лежащих точках, что принципиально при снятии показаний с ВБР.

Кроме этого, существенные проблемы вызвал процесс технологической механической обработки металлокомпозитного криогенного топливного бака в процессе его изготовления и обработки. Среди вопросов, поставленных в настоящем момент в ходе

технологической отработки процесса изготовления металлокомпозитного криогенного топливного бака, наиболее сложным является вопрос сохранения целостности выводов оптоволоконных датчиков в процессе различных технологических переходов.

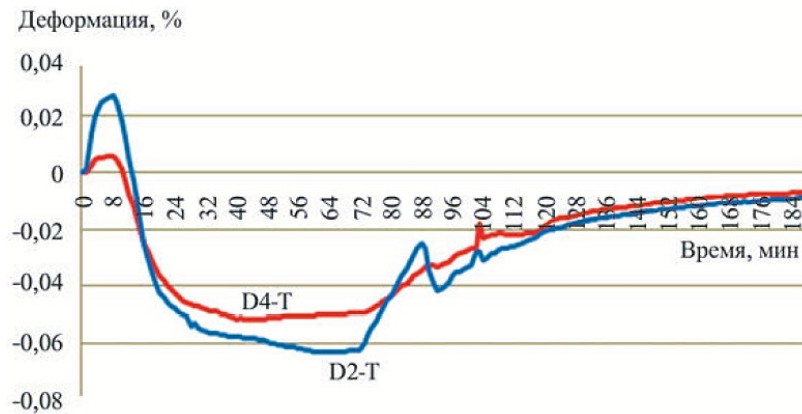


Рис. 6. Относительная деформация с учётом температурной компенсации, полученная посредством ВБР

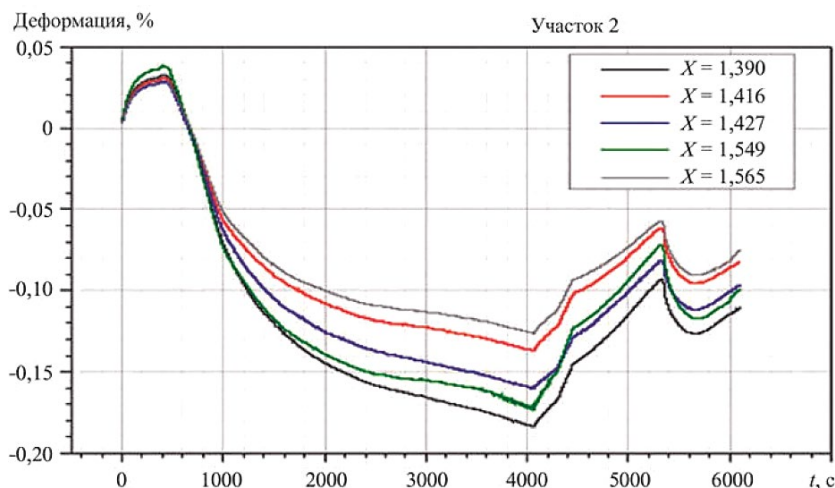


Рис. 7. Относительная деформация в различных точках наружной поверхности бака, полученная распределённым датчиком без учёта температурной компенсации: X – расстояние в миллиметрах от начала измерительной линии рэлеевского рассеяния до точки, в которой непосредственно снимались значения относительной деформации

Наиболее опасными с этой стороны являются операции механической обработки и снятия технологической рубашки с ложными днищами. Так, после снятия технологического ложного днища бака было установлено, что часть волоконной оптики повреждена, что показано на

рис. 8. В работе [2] предложены и проверены на модельных изделиях способы сохранения выводов датчиков неповреждёнными в процессе изготовления, температурной и механической обработки металлокомпозитных баков.



Рис. 8. Обрыв оптоволоконной линии при снятии технологической рубашки в зоне днища

Заключение

Таким образом, в настоящий момент отработана технология выводов ВОД на поверхности и внутри материала металлокомпозитного криогенного топливного бака, силовая оболочка которого выполнена методом непрерывной мокрой намотки. Отработан процесс температурной компенсации показаний ВОД в широких диапазонах эксплуатационных температур. Подтверждена работоспособность волоконно-оптических датчиков после всех технологических циклов изготовления бака как при размещении выводов ВОД через зону фланца, так и при размещении через цилиндрическую оболочку. Работоспособность волоконных датчиков сохраняется после нескольких операций термообработки, снятия ложных днищ и технологической «рубашки», механической обработки торцевых шпангоутов, а также после десяти трёхчасовых циклов температурных испытаний. Использование датчиков на лейнере и на наружной оболочке позволяет регистрировать динамику изменения деформаций на внутренней и наружной поверхностях силовой оболочки из углепластика, а также оценивать работоспособность отдельных элементов конструкции бака в режиме реального времени.

Литература

1. Склезнев А.А. Проектирование композитного криогенного топливного бака с несущей сетчатой обечайкой // Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред. Сборник трудов 10-й Всероссийской научной конференции с международным участием им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского, посвящённой 100-летию со дня рождения академика И.Ф. Образцова. - Москва, 17–19 ноября 2020 г. – М.: ООО «Сам Полиграфист». 2020. С. 205–208.
2. Склезнев А.А. Проектирование, конструкция и изготовление металлокомпозитных криогенных топливных баков для ракетно-космической техники // дис. на соиск. ст. докт. техн. наук: 2.5.13: защищена 19.10.2023: утв. 13.02.2024 приказом Минобрнауки России №100/нк/ Хотьково: ЦНИИСМ. 2023. 322 С.
3. Титов В.А., Юранев О.А., Склезнев А.А., Разин А.Ф., Бабичев А.А., Пшеничников И.В., Бородулин Д.А. Проектирование и изготовление криогенных металлокомпозитных топливных баков // Конструкции из композиционных материалов. 2023. № 2 (170). С. 12–20.
4. Склезнев А.А., Разин А.Ф. Бетонные конструкции с сетчатой композитной арматурой // Композиты и наноструктуры. – 2015. Т. 7. № 3 (27). С. 145–150.
5. Васильев В.В., Салов В.А., Склезнев А.А. Устойчивость бесконечно длинной цилиндрической оболочки под действием наружного давления, создаваемого намоткой гибких нитей // Известия Российской академии наук. Механика твёрдого тела. 2022. № 6. С. 63–71.
6. Васильев В.В., Склезнев А.А. Устойчивость лайнера цилиндрического композитного баллона давления // Механика композиционных материалов и конструкций. 2022. Т. 28. № 2. С. 235–246.
7. Vasiliev V.V., Salov V.A., Skleznev A.A. Stability of an Infinitely Long Cylindrical Shell Under the Action of External Pressure Created by Winding Flexible Filaments // Mechanics of Solids. 2022. V. 57. № 6. P. 1330–1337.
8. Склезнев А.А. Устойчивость лайнера цилиндрического металлокомпозитного бака при осевом сжатии // Конструкции из композиционных материалов. 2023. № 2 (170). С. 3–7.
9. Мироненко Е.Д., Бабичев А.А., Склезнев А.А. К вопросу обеспечения натяжения вант композитного бака высокого давления

космического аппарата // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2019. № 1 (43). С. 66–70.

10. Анискович В.А., Будадин О.Н., Козельская С.О., Кутюрин Ю.Г., Рыков А.Н., Склезнев А.А., Гнусин П.И., Юранев О.А. Интегрирование волоконно-оптических датчиков в композитный цилиндрический корпус из углепластика, изготовленный способом непрерывной намотки // Контроль. Диагностика. 2022. Т. 25. № 2 (284). С. 16–23.

11. Анискович В.А., Рыков А.Н., Склезнев А.А. Температурная компенсация при измерениях деформаций с использованием волоконных брэгговских решёток // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2023. № 3 (128). С. 114–119.

УДК 519.248

**К ВОПРОСУ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ
ДЕФЕКТОВ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ПЕРСПЕКТИВНЫХ АВИАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ**

В.В. Яковлева¹; А.П. Мишачев¹; С.А. Хижняк¹

**ANALYSIS OF DYNAMICS OF DEFECTS
IN THE STRUCTURE OF COMPOSITE COMPONENTS
OF THE PERSPECTIVE AVIACOMPLEX**

V. Yakovleva¹; A. Mishachyov¹; S. Khizhnyak¹

valya.yakovleva2001@mail.ru

¹ПАО «ОАК» ОКБ Сухого; г. Москва

¹JSC “UAC” Sukhoi Design Bureau; Moscow

The objective of this research is to analyze the dynamics of defects in structure of composite components of the perspective fighter and to improve regularity of non-destructive testing.

Целью данной работы является проведение анализа динамики развития дефектов конструкций из ПКМ перспективных авиационных комплексов, а также оценка результатов для совершенствования системы проведения неразрушающего контроля (НК).

Научная новизна настоящей работы заключается в применении математических методов анализа результатов контроля для получения закономерностей развития дефектов и выводов по корректировке периодичности проведения НК.

Актуальность работы обусловлена необходимостью своевременного проведения контроля конструкций из ПКМ для повышения надёжности и качества эксплуатации опытных и серийных ЛА.

В соответствии с руководством по эксплуатации перспективного истребителя осуществляется периодический неразрушающий контроль качества конструкций из ПКМ на изделиях. В рамках работы проведен анализ данных по дефектам на проверяемых опытных и серийных изделиях, условно обозначаемых как: О-1, О-2, О-3; С-1, С-2, С-3.

Анализ данных по дефектам проводился на основании статистических закономерностей и законов теории надёжности самолёта, которая позволяет:

- оценивать фактический уровень надёжности самолёта данного типа и динамику его изменения по годам эксплуатации;
- выявлять наименее надёжные агрегаты самолёта;

- уточнять действующую эксплуатационную документацию;
- получать исходную информацию для расчёта и анализа уровня надёжности разрабатываемых самолётов.

В целом теория надёжности решает следующие задачи:

- ✓ определение закономерностей возникновения отказов и неисправностей и восстановления работоспособности систем;
- ✓ изучение влияния внешних и внутренних воздействий на процессы в системах;
- ✓ разработка методов расчёта надёжности систем на различных этапах проектирования;
- ✓ изыскание способов повышения надёжности при конструировании и изготовлении, а также способов сохранения надёжности при длительной эксплуатации;
- ✓ разработка методики сбора, учёта и анализа статистических сведений, характеризующих эксплуатационную надёжность;
- ✓ разработка методик испытаний на надёжность [1].

Таким образом, можно перейти к обработке и анализу статистических данных по дефектам с помощью законов, принципов и коэффициентов теории надёжности самолёта.

Показатели и зависимости, применяемые для анализа данных

Примем, что элементарный дефект – это дефект площадью 5 см^2 .

1) Суммарная площадь дефектов изделия:

по налёту: $\sum S(t_n)$

по календарным датам (с учетом процесса производства): $\sum S(t_{к.д.})$.

Данный показатель имеет фундаментальное значение для количественной оценки бездефектности планера и анализа причин возникновения дефектов по налёту.

2) Коэффициент дефектов (показывает уровень дефектности каждой детали):

$$K_d = \frac{S_i}{\sum S}, \text{ где}$$

S_i – площадь дефектов на данной детали,

$\sum S$ – суммарная площадь дефектов на изделии.

3) Частота появления элементарного дефекта для интервалов налёта

Δt_n :

$$\hat{q}_k = \frac{S_k}{\sum N}, \text{ где}$$

S_k – площадь выявленных в интервале налёта дефектов на детали,

$\sum N$ – суммарное количество контролируемых деталей.

4) Мода площади выявляемого дефекта: площадь дефекта, выявляемая чаще всего - S_m .

5) Мода глубины залегания дефекта (глубина выражена в % от толщины контролируемой детали): глубина, на которой чаще всего выявляются дефекты при дефектоскопическом контроле – L_m .

6) Площадь дефектов на 1 час налёта:

$$\omega_d = \frac{\sum S_{di}}{t_{\Sigma}}, \text{ где}$$

t_{Σ} – суммарный налёт парка самолётов за календарный период эксплуатации Δt_3 ;

$\sum S_{di}$ – суммарная площадь дефектов, выявленных за календарный период эксплуатации Δt_3 .

В ходе работы автором был решен ряд задач.

1) Создана база статистических данных по выявленным дефектам конструкций из ПКМ в опытных и серийных изделиях. *Результат*: оптимизирована информация по каждому изделию, подготовлен шаблон для дальнейшей обработки данных по серийным самолётам.

2) Проведён анализ динамики развития дефектов. *Результат*: построены графики динамики развития дефектов, выявлены тенденции - основная фаза роста площади дефектов наблюдается на первой сотне часов налёта. Отражена возможность появления дефекта 5 см^2 в каждом 50 ч интервале налёта: наибольшие значения получены в интервалах налёта 0-50 часов и 50–100 часов.

Определён размер дефекта, выявляемого чаще всего - 6 см^2 . При этом в ряду данных преобладает относительная глубина возникновения дефектов, равная 50 % толщины ПКМ-детали.

Среди 2 типов выявляемых дефектов преобладающим в конструкциях из ПКМ определен тип расслоение (составляет 98–100 % всей площади дефектов обоих типов) [2].

3) Осуществлена оценка и первичное прогнозирование возможного дальнейшего развития дефектов.

В первую очередь, по итогам анализа данных, наиболее уязвимыми определены ПКМ-панели верхние. На них выявлены дефекты наибольшей площади, причём основное количество этих дефектов появилось на уровне до 100-200 часов налёта. Это отражено на дополнительно составленных сводных графиках динамики развития дефектов панелей ОЧК по налёту. Пример: рис.1 «Развитие дефектов ПКМ-панелей» - для О-3.

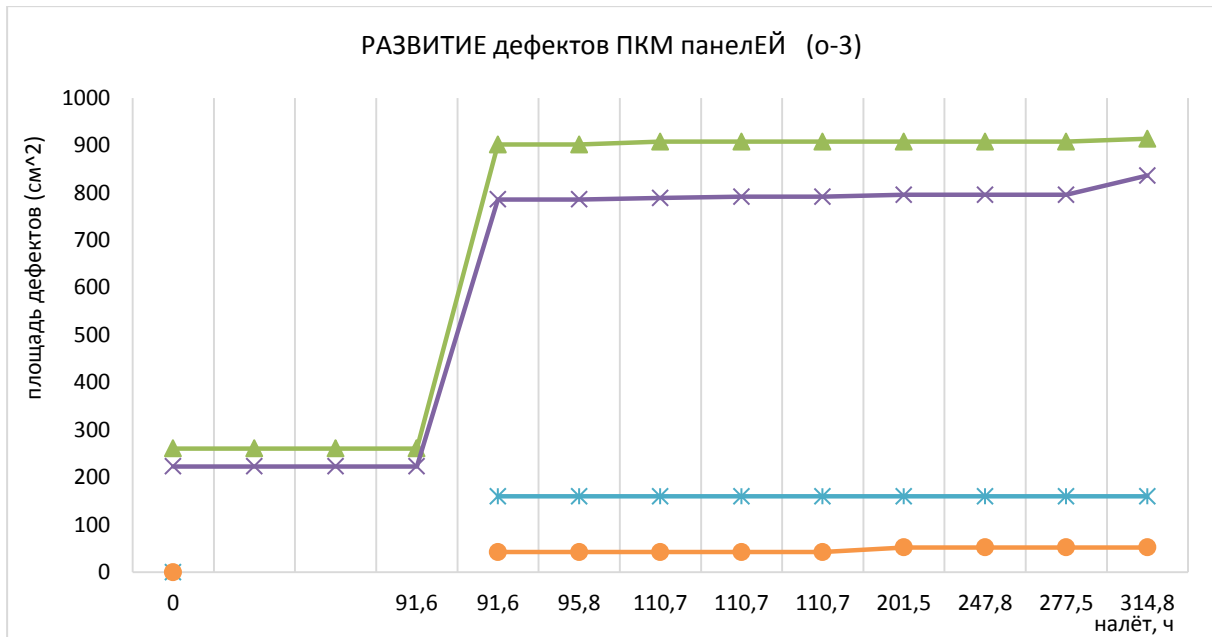


Рис. 1. Развитие дефектов ПКМ-панелей

В части прогнозирования, учитывая динамику по О-1 и О-2 до 504 и 506 часов налёта соответственно, экстраполированы значения для О-3 для налёта от 315 часов (с известным значением площади дефектов) до 500 часов по интервалам налёта $\Delta t_n = 50$ часов (рис. 2).

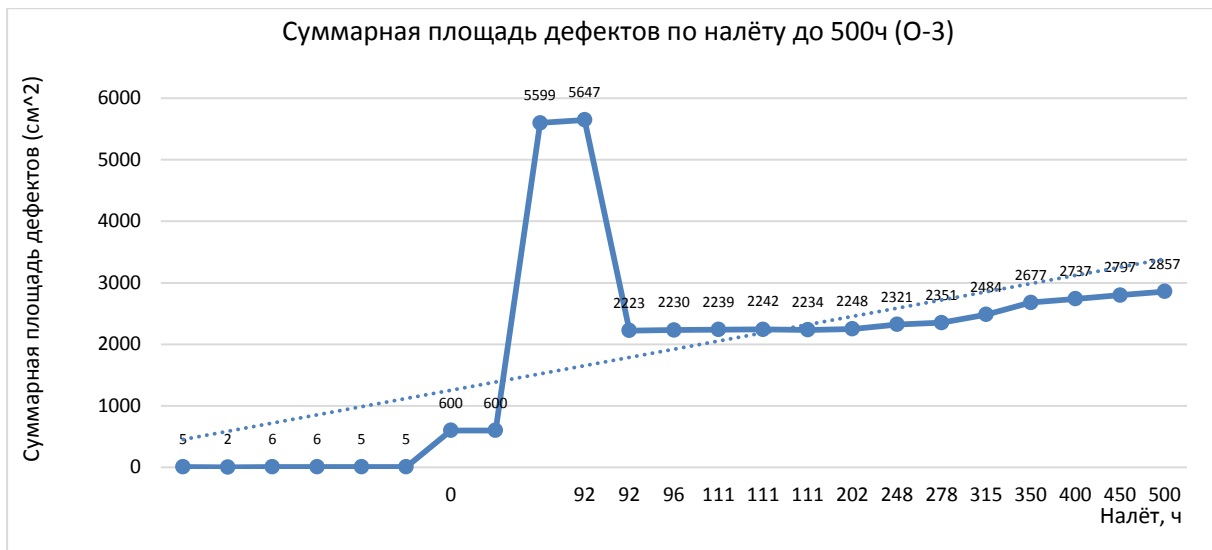


Рис. 2. Площадь дефектов по налёту

4) Для опытных изделий вынесены предложения по совершенствованию системы проведения неразрушающего контроля, в частности изменение его периодичности. *Результат:* на основании полученных данных по доле дефектности каждой детали из ПКМ на перспективном истребителе, предлагается внести корректировки периодичности проведения планового НК (таблица 1 «Предложенная периодичность планового НК»).

Таблица 1

Предложенная периодичность планового НК

№ п/п	Наименование детали	Интервалы налёта					
		25 ч	50 ч	75 ч	100 ч	150 ч	200 ч
1	ПКМ-панели верхние	+	+	+	+	+	+
2	ПКМ-панели боковые	+	+	+	+	+	+
3	Композиционный блок стабилизатора	+	+	+	+	+	+
4	ПКМ-панели створок	+	+	+	+		+
5	ПКМ-панели воздухозаборников	+	+	+	+		+
6	ПКМ-панель хвостовой части	+	+	+	+		+
7	ПКМ-панели створок опор шасси	+	+	+	+		+

Это позволит своевременно выявлять новые дефекты особо ответственных деталей в целях поддержания надёжности ЛА и безопасности полёта. После 200 часов налёта предлагаются проверки с интервалом налёта $\Delta t_n = 50$ часов.

В перспективе возможно применение и развитие данной научно-технической работы для изучения и описания механики разрушения композиционных материалов, что существенно поспособствует более эффективному применению ПКМ в ответственных и сложных конструкциях авиационной техники [3].

Личный вклад автора состоит в создании базы статистических данных, в проведении анализа динамики развития дефектов и в оценке результатов, в том числе и в составлении предложений по совершенствованию периодичности проведения НК.

Список литературы

1. Надёжность, безопасность и живучесть самолёта: учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Самолётостроение» / Л.Л. Анцелиович - М.: Машиностроение, 1985.
2. Композиционные материалы. Справочник/ коллектив авторов; под общей ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского - М.: Машиностроение, 1990.
3. Экспериментальная механика композитов: учебное пособие/ А.Н. Полилов - 2-е изд. - М.: Издательство МГТУ им Н.Э. Баумана, 2016.

УДК 678.8:620.179

**КОНТРОЛЬ ВЫСОТЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТРЕЩИН В
КЕРАМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИЙ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ПОМОЩЬЮ
УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН**

А.А. Филатов¹, А.В. Терехин¹, к.т.н.; С.И. Минин¹, д.т.н.; Д.И. Чулков¹

**CONTROL OF HEIGHT OF SUPERFICIAL CRACKS IN CERAMIC
ELEMENTS OF DESIGNS OF AIRCRAFT BY MEANS OF
ULTRASONIC WAVES**

A.A. Filatov¹; A.V. Terehin¹, Ph.D. of Engineering Sciences; S.I. Minin¹, D.Sc.
of Engineering Sciences; D.I. Chulkov¹

info@technologiya.ru

¹АО «ОИПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» Государственный научный
центр Российской Федерации

¹JSC ORPE Technologiya named after A.G. Romashin State Research Center of
the Russian Federation

Аннотация

В данной работе представлены результаты разработки способа определения высоты выходящих на поверхность вертикально ориентированных трещин в керамических элементах конструкции летательных аппаратов, основанного на явлении дифракционного ослабления ультразвуковых волн, распространяющихся вдоль трещины.

Ключевые слова:

высота трещин, дифракция ультразвуковых волн, рентгеновская компьютерная томография

Summary

In this work results of development of a nondestructive way of the determination of depth of vertically focused plane defects in pottery based on diffraction of ultrasonic waves are presented.

Keywords:

depth of cracks, diffraction of ultrasonic waves, x-ray computer tomography

Введение

Конструкционные керамические материалы находят все более широкое применение во многих отраслях современной промышленности, в том числе при производстве ответственных элементов конструкции высокоскоростных летательных аппаратов (ЛА) [1–3]. Вследствие роста требований к уровню безотказности современных и перспективных ЛА, актуальной задачей при изготовлении керамических элементов конструкции ЛА является обеспечение надежности.

В процессе производства керамических элементов конструкции ЛА, связи с особенностями технологического процесса (ТП), на поверхности заготовок элементов конструкции ЛА возможно образование трещин, которые при нагрузках существенно ниже предельных для керамического материала могут привести к разрушению ЛА в процессе эксплуатации. В общем виде, ТП производства керамических элементов конструкции ЛА включает в себя следующие последовательные стадии: помол исходного стекла, приготовление водного шликера, формование заготовок шликерным литьем в пористых формах, сушку и термообработку заготовок, механическую обработку до требуемого уровня технических характеристик, влагозащиту и сборку с переходным отсеком ЛА. При обнаружении трещин в керамических заготовках до стадии их механической обработки некоторые поверхностные трещины, высота которых меньше глубины обработки, могут быть удалены вместе с удаляемым слоем материала. Кроме этого, своевременное обнаружение не устраняемых (с высотой больше высоты механической обработки) трещин позволяет снизить технологические потери и амортизацию оборудования за счет исключения таких заготовок из ТП на ранних этапах производства [4–5]. Таким образом, оперативное определение высоты поверхностных трещин в керамических заготовках элементов конструкции ЛА с помощью методов неразрушающего контроля (НК) является актуальной научно-технической задачей.

Известные способы НК определения высоты трещин, применительно к керамическим материалам, имеют ряд ограничений. Так электропотенциальный и вихретоковый способ НК, являющиеся традиционными при контроле высоты поверхностных трещин в металлических конструкциях, не могут быть применены для определения высоты трещин в конструкциях, выполненных из поликристаллических анизотропных диэлектрических керамических материалов, а ультразвуковой способ определения высоты трещин, основанный на

измерении перемещения ультразвукового преобразователя поперек расположения трещины, обладает высокой погрешностью вследствие разброса акустических характеристик керамики а также неточностью измерения перемещения пьезоэлектрического преобразователя по поверхности контролируемой заготовки. Возможно проводить контроль высоты трещин в таких материалах методом рентгеновской компьютерной томографии (РКТ), однако его применение ограничено максимально возможным размером контролируемой заготовки (высокое пространственное разрешение томографа достигается на заготовках небольшого размера). Кроме этого, применение метода РКТ для определения высоты трещин в заготовках крупногабаритных элементах конструкции ЛА в условиях серийного производства ограничивает существенная продолжительность контроля (около 3 часов), высокая стоимостью оборудования, по сравнению с ультразвуковыми методами, а также требует организацию радиационного контроля персонала и наличие специального защитного помещения. В связи с этим, наиболее перспективно для определения высоты вертикально ориентированных трещин в керамических заготовках элементов конструкции ЛА применять метод, основанный на дифракции ультразвуковых волн (УЗВ) [6].

Целью данной работы является разработка оперативного способа определения высоты вертикально ориентированных трещин в керамических заготовках элементов конструкции ЛА, основанного на явлении дифракционного ослабления УЗВ при их распространении вдоль трещин.

Теоретическая часть

При распространении УЗВ в твёрдых упругих материалах (в том числе керамических) вследствие дифракционного ослабления и затухания, происходит уменьшение их амплитуды. В общем виде зависимость амплитуда УЗВ от пройденного расстояния и акустических свойств среды может быть описана выражением [7]:

$$A(r) = \frac{A_0}{r^b} e^{j(\omega t - kr)} e^{-r(\delta)},$$

где A и A_0 – амплитуда волны в произвольной точке среды и в начальный момент времени; r – расстояние, пройденной волной; b – показатель, зависящий от формы фронта волны и дифракционного ослабления; δ – коэффициент затухания волны; $j = \sqrt{-1}$; $\omega t - kr$ – фаза колебаний.

Коэффициент затухания δ характеризует ослабление продольной ультразвуковой волны в следствии необратимых потерь при ее распространении в твёрдой упругой среде и состоит из коэффициента поглощения δ_n и коэффициента рассеяния δ_r . Коэффициент поглощения

учитывает переход акустической энергии ультразвуковой волны в тепловую в результате теплопроводности. Коэффициент рассеяния учитывает потери акустической энергии из направленно-распространяющейся ультразвуковой волны вследствие переотражения в материале.

Для продольной ультразвуковой волны, излучаемой прямым пьезоэлектрическим преобразователем (ПЭП), и распространяющейся в бездефектной области, дифракционное ослабление практически отсутствует и показатель b может быть принят равным 0. В случае распространения продольной ультразвуковой волны вдоль трещины на ее границах образуются поперечные волны, что приводит к уменьшению амплитуды отражённой от донной поверхности ультразвуковой волны вследствие дифракционного ослабления [8–9], при этом снижение амплитуды донного сигнала пропорционально высоте трещины ($\Delta A_{\text{дон}} \approx h_{\text{т}}$).

Для учёта потерь акустической энергии УЗВ, связанных с изменением коэффициента затухания в керамических заготовках вследствие неоднородности структурных характеристик материала, определять глубину поверхностных трещин целесообразно по отношению амплитуды ультразвуковой волны, прошедшей по трещине, затем отраженной от противоположной поверхности контролируемой заготовки и вернувшейся назад на ультразвуковой преобразователь ($A_{\text{тр}}$), к амплитуде ультразвуковой волны ($A_{\text{дон}}$), прошедшей по бездефектной области материала заготовки, отраженной от донной поверхности заготовки и вернувшейся назад на ультразвуковой преобразователь (рис. 1) [10–12].

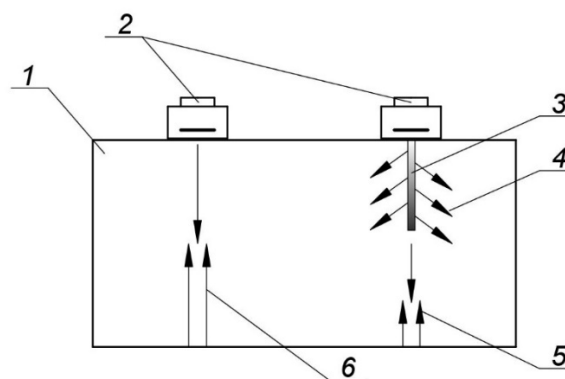


Рис. 1. Схематическая иллюстрация дифракционного ослабления УЗВ: 1 – заготовка; 2 – прямой высокочастотный совмещенный пьезоэлектрический преобразователь; 3 – вертикально-ориентированная трещина высотой $h_{\text{т}}$; 4 – поперечные боковые волны; 5 – отраженная от донной поверхности заготовки УЗВ, прошедшая вдоль трещины; 6 – отраженная от донной поверхности заготовки УЗВ, прошедшая по бездефектной области

Экспериментальная часть

Для проведения экспериментальных работ по установлению зависимости между отношением амплитуд $A_{тр}/A_{дон}$ и высотой трещины h_T использовались образцы с трещинами, изготовленные из забракованных заготовок элементов конструкции ЛА из кварцевой керамики. Размер образцов составлял не более $100 \times 100 \times h$ мм, где h – толщина стенки заготовки.

С помощью рентгеновского компьютерного томографа была выполнена томография исследуемых образцов и определена высота трещин h_T , принятая за фактическую. Величина ускоряющего напряжения рентгеновской трубки составляла 220 kV, при токе накала на трубке 252 μ A. Для фильтрации спектра рентгеновского излучения использовался медный фильтр толщиной 0,5 мм. Разрядность томографического изображения 16 бит (градация от 0 до 65535 оттенков серого). Фрагменты томографических снимков образцов с трещинами представлены на рис. 2.

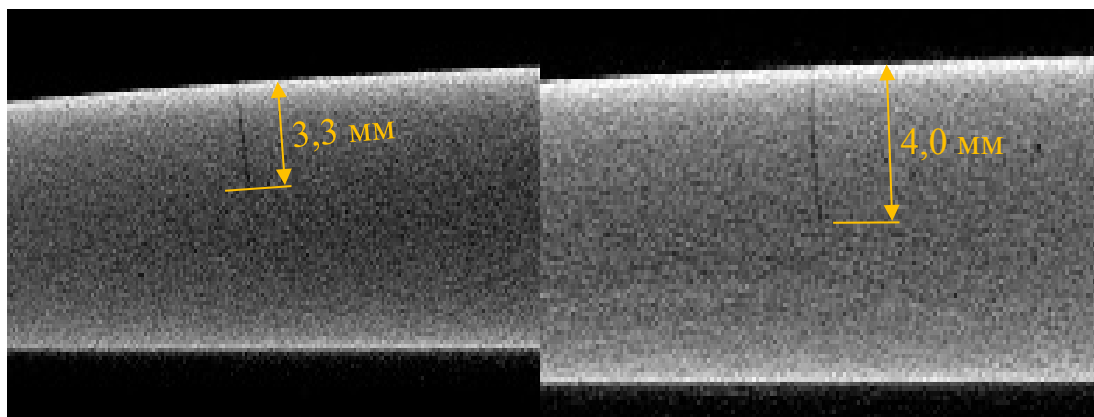


Рис. 2. Фрагменты томографических снимков исследуемых образцов с указанием высоты поверхностных трещин

Малый размер образцов (не более $100 \times 100 \times h$ мм) при проведении РКТ позволил воспользоваться принципом геометрического увеличения для достижения максимального пространственного разрешения применяемого томографа, определяемого минимальным размером пикселя на изображении равного 18 мкм.

После проведения РКТ, с помощью ультразвукового дефектоскопа УСД-60 и ПЭП V544 резонансной частотой 10 МГц в исследуемых образцах по эхо-импульсной схеме контроля были измерены амплитуды донного сигнала при установке ПЭП на трещине $A_{тр}$ и на бездефектном участке $A_{дон}$ в непосредственной близости от трещины. Примеры осциллограмм с экрана ультразвукового дефектоскопа представлены на

рис. 3. Для уменьшения влияния пористости кварцевой керамики на точность измерения амплитуд УЗВ, исследуемые образцы предварительно были пропитаны контактной жидкостью (водой), используемой для создания акустического контакта [9].

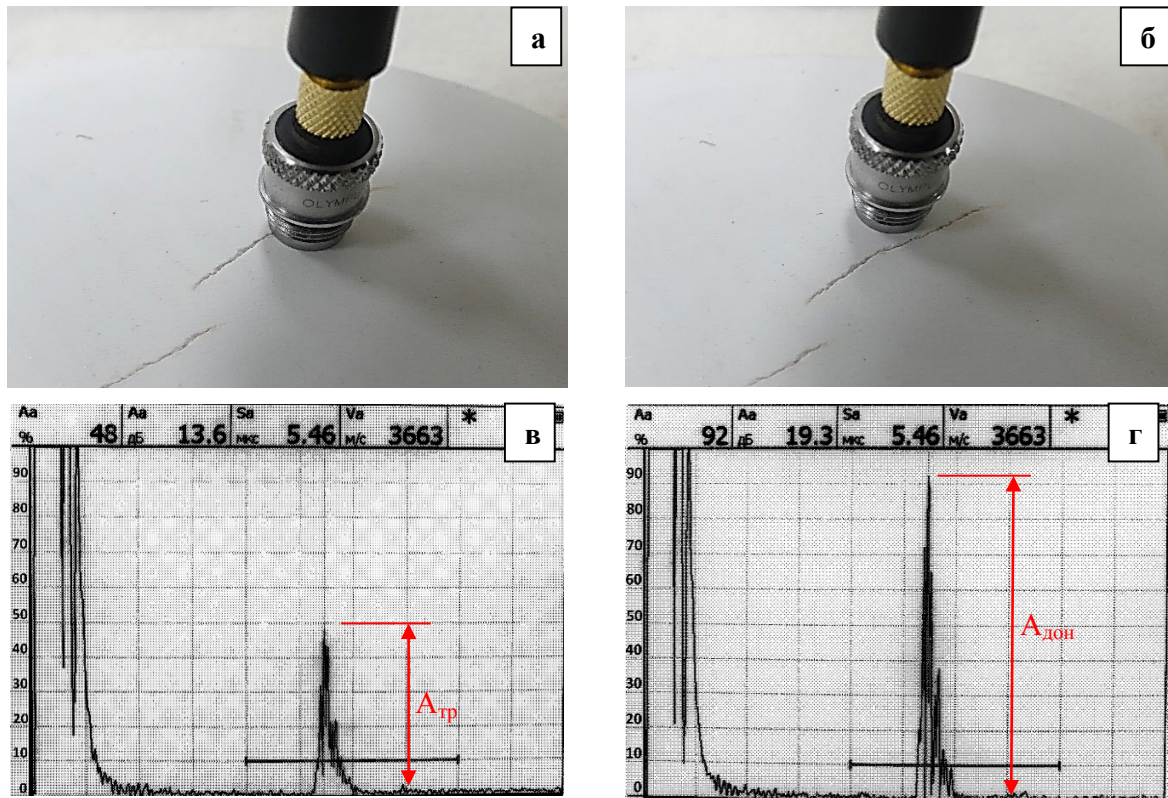
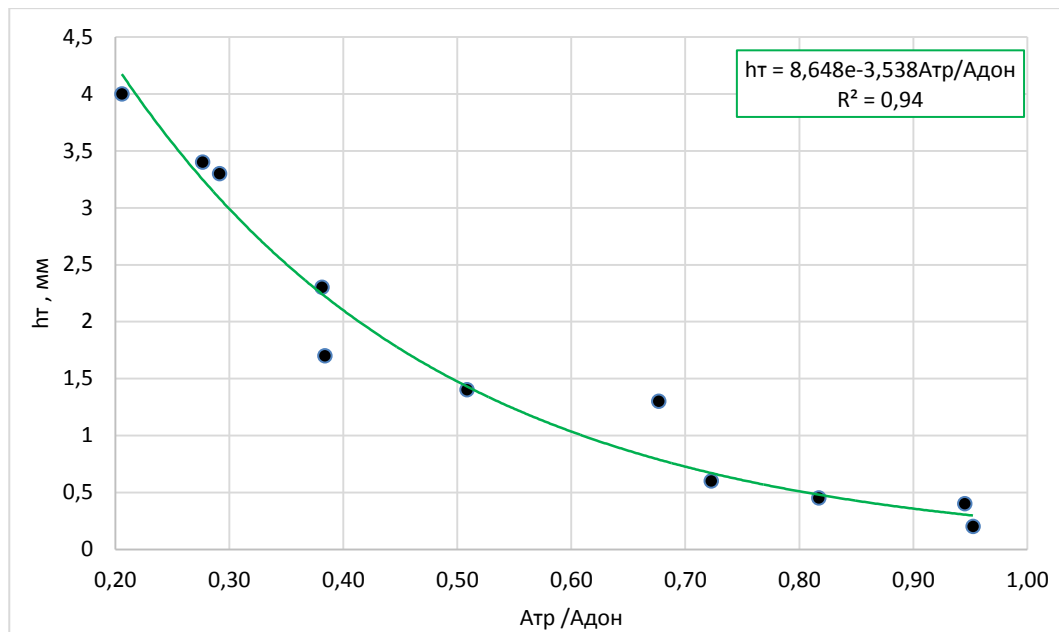


Рис. 3. Осциллограммы с экрана ультразвукового дефектоскопа (в,г) при установке ПЭП на выходящую на поверхность трещину (а) и бездефектный участок в непосредственной близости от трещины (б)

По полученным данным была построена графическая зависимость между отношением $A_{тр}/A_{дон}$ и высотой трещин в образцах h_t (рис. 4). На график наложена экспоненциальная линия регрессии, её уравнение, полученное методом наименьших квадратов, а также представлен рассчитанный коэффициент детерминации для оценки полученной зависимости.

Рис. 4. Зависимость между $A_{тр}/A_{дон}$ и высотой трещин h_T

Из графика на рис. 4 видно, что между отношением амплитуд УЗВ $A_{тр}/A_{дон}$ на трещине и в бездефектной области и их фактической высотой h_T , определенной методом РКТ, наблюдается зависимость с коэффициентом корреляции $-0,93$, что говорит о наличии высокой взаимосвязи между исследуемыми параметрами. Полученные экспериментальные данные достаточно качественно аппроксимируются экспоненциальной зависимостью, при этом общая доля дисперсии зависимой переменной (h_T), объяснённая регрессионной моделью, близка к 100% (коэффициент детерминации $0,94$). Погрешность измерения высоты трещин может быть связана с неточностью позиционирования сечений в которых проводилось определение высоты трещин методом РКТ и определялась амплитуда УЗВ.

Заключение

На основании регрессионной зависимости между высотой выходящих на поверхность трещин (h_T) и отношением амплитуд ($A_{тр}/A_{дон}$) продольных ультразвуковых волн, прошедших через бездефектный и дефектный (с трещинами) участки керамических образцов, разработан способ определения высоты вертикально ориентированных трещин в керамических заготовках элементов конструкции ЛА.

Данный способ может быть применён для контроля высоты выходящих на поверхность трещин в керамических заготовках элементов конструкции ЛА и принятия решения о возможности и целесообразности

устранения обнаруженной трещины путем механической обработки заготовки.

Преимуществами предлагаемого способа определения высоты трещины при помощи УЗВ (по сравнению с РКТ) являются высокая оперативность (для настройки оборудования и проведении измерений требуется не более 10 минут), приемлемая точность (погрешность не превышает 20 %), а также низкая стоимость и доступность оборудования (ультразвуковой дефектоскоп с ПЭП).

Список литературы

1. Русин М.Ю. Проектирование головных обтекателей ракет из керамических и композиционных материалов: учебное пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 64 с.
2. Харитонов Д.В., Тычинская М.С., Анашкина А.А., Макаров Н.А., Лемешев Д.О. Керамические материалы для авиации и космоса: учеб. пособие / М: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2022. 120 с.
3. Суздальцев Е.И., Харитонов Д.В., Анашкина А.А. Анализ существующих радиопрозрачных материалов, композиций и технологий для создания обтекателей скоростных ракет. Часть 3. Технология изготовления кварцевых и стеклокристаллических обтекателей, проблемы и перспективы улучшения. // Новые огнеупоры. 2010. № 8. С. 43–49.
4. Харитонов Д.В., Амосов А.И., Терехин А.В., Анашкина А.А., Маслова Е.В. Керамические изделия. Инновационные операции неразрушающего контроля. // Компетентность, 2022, №7. С. 21–24.
5. Харитонов Д.В., Терехин А.В., Русин М.Ю., Анашкина А.А., Тычинская М.С., Амосов А.И., Маслова Е.В., Типикин М.Е. Разработка методики визуально-оптического контроля изделий из кварцевой керамики. // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России, 2021. №4.
6. Алешин Н.П., Белый В.Е., Вopilкин А.Х. и др. Методы акустического контроля металлов. М.: Машиностроение, 1989. 456 с.
7. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Неразрушающий контроль. Т. 3. Ультразвуковой контроль. Москва, Машиностроение, 2004. 864 с.
8. Вopilкин А.Х. Волны дифракции и их применение в ультразвуковом неразрушающем контроле // Дефектоскопия, 1985, №1. С. 20–34; № 2, С. 72–85.
9. Боровиков В.А., Кинбер Б.Е. Геометрическая теория дифракции. М.: Связь, 1978. 248 с.
10. Пат. 2760487 С1 РФ, МПК G01N 29/04. Ультразвуковой способ измерения высоты вертикально ориентированных плоскостных дефектов в стеклокерамических материалах элементов конструкций летательных аппаратов / Минин С.И., Русин М.Ю., Терехин А.В., Хамицаев А.С., Харитонов Д.В. опубл. 25.11.2021. Бюл. № 33.

11. Пат. 2814130 С1 РФ, МПК G01N 29/04. Ультразвуковой способ измерения высоты вертикально ориентированных плоскостных дефектов в кварцевой керамике / Минин С.И., Терехин А.В., Русин М.Ю., Чулков Д.И.; опубл. 22.02.2024, Бюл. № 6.

12. Минин С.И., Русин М.Ю., Терехин А.В., Чулков Д.И., Филатов А.А. Способ контроля высоты поверхностных трещин в изделиях из конструкционной керамики. // Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2024, № 2, С. 52–58.

УДК 620.179

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ТОМОГРАФИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ КОЭФФИЦИЕНТНОЙ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ

В.Ю. Чертищев¹

ULTRASOUND TOMOGRAPHY OF METAL AND POLYMER COMPOSITE STRUCTURES BASED ON THE COEFFICIENT INVERSE PROBLEM

V.Yu. Chertishchev¹

chertishchevv@mail.ru

¹ООО «НПЦ «ЭХО+», 123458, г. Москва, ул. Твардовского, д.8

¹ECHO+ Ltd. ul., Tvardovskogo 8, Technopark Strogino, Moscow

Аннотация

В работе освещены результаты разработки ультразвуковых томографических методов, основанных на решении обратной коэффициентной задачи, в неразрушающем контроле. Приведены результаты исследований для композитных сварных соединений металлов и для полимерных композиционных материалов в виде слоистых пластиков с искусственными дефектами с применением различных схем начальных условий для расчета поля скоростей.

Реферат

Обратная задача реконструкции скоростного разреза рассматривается как нелинейная коэффициентная обратная задача для скалярного волнового уравнения. Приведено краткое описание основного математического аппарата. Разработаны эффективные итерационные методы ее решения на суперкомпьютере, использующие прямые формулы для вычисления градиента функционала невязки между рассчитанным и экспериментально измеренным волновым полем на детекторах. Эффективность алгоритмов апробирована на экспериментальных данных. Приведены результаты численных и натурных экспериментов по восстановлению поля скоростей при всестороннем доступе на специально изготовленных твердотельных образцах с простейшим расположением включения при регистрации сигналов стандартными ультразвуковыми антенными решетками на частоте 5 МГц. Показано, что с помощью разработанных томографических методов в схеме на отражение и прохождение в реальном эксперименте можно не только обнаружить границы отражателей, но и определить скоростной разрез внутри

отражателей. Приведен адаптированный математический аппарат для расчета томографической картины при одностороннем доступе для плоских объектов контроля для схемы регистрации эхосигналов в зеркально-теневом режиме. Показано, что с помощью разработанных томографических схем можно не только обнаружить границы сварного соединения, но и определить поле скоростей внутри объекта контроля. Приведены результаты исследований для композитных сварных соединений металлов с различными скоростями звука и для полимерных композиционных материалов в виде слоистых пластиков с искусственными дефектами с применением различных схем начальных условий для расчета поля скоростей.

Ключевые слова:

обратные задачи, ультразвуковая томография, ультразвуковой неразрушающий контроль, антенная решетка, скорость звука, ПКМ.

The paper highlights the results of the development of ultrasonic tomographic methods based on the solution of the inverse coefficient problem in nondestructive testing. The results of studies for composite welded metal joints and for polymer composite materials in the form of laminates with artificial defects using different schemes of initial conditions for calculating the velocity field are presented.

Keywords:

inverse problems, ultrasonic tomography, ultrasonic nondestructive testing, antenna array, speed of sound, polymer composite materials.

Введение

В настоящее время томографические методы широко используются как в медицине, так и в промышленности. Наиболее распространены рентгеновские томографы. Если в томографе использовать ультразвуковые источники, то для интерпретации томографических данных необходимо применять волновые модели. Математические методы решения обратных задач волновой томографии намного сложнее, чем в рентгеновской томографии. В последние годы появилось большое количество публикаций в области разработки методов решения обратных задач томографии в волновых моделях.

Прорывные результаты в области решения задач волновой томографии как коэффициентных обратных задач связаны с возможностью на математическом уровне строгости вычисления градиента функционала невязки между расчетным волновым полем и измеренным в эксперименте [1–4]. В этой постановке модель учитывает волновые эффекты, а

искомыми коэффициентами являются как скорость распространения волны, так и коэффициент поглощения как функции координат.

В настоящее время методы волновой томографии уже используют в медицине и сейсмике. В сейсмике существует направление «full waveform inversion», в котором обратная задача рассматривается как нелинейная задача в волновой модели, для решения которой применяют итерационные методы [5]. Специфика задач в сейсмике такова, что используются в основном только отраженные волны. В такой постановке можно реконструировать только границы слоев. В отличие от этих работ в настоящей работе освещается использование томографического подхода, в котором регистрируются как отраженные, так и прошедшие волны. Именно прошедшие через неоднородность волны позволяют восстанавливать скоростной разрез неоднородности.

В ультразвуковом неразрушающем контроле (УЗК) количество публикаций в области реконструкции скоростного разреза томографическими методами в волновых моделях с применением проходящих волн невелико, в отличие от сейсмоакустики и медицины. Считается, что в задачах УЗК можно использовать методы решения обратных задач, разработанные для сейсмоакустики. Как и в сейсмоакустике, эти попытки в УЗК также связаны только с использованием отраженного излучения [6]. Примером могут служить методы синтезированной апертуры (Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT)) [7–9], которые ориентированы на определение границ дефектов в твердом теле. Продвинутые варианты получили название «topological imaging», «time reverse» [10].

На уровне модельных задач сделаны попытки применить методы «full waveform inversion» в задачах УЗК [11]. В модельных расчетах используется очень маленькое количество источников и приемников и грубые сетки, что существенно ограничивает возможности томографических методов. Как показано в настоящей работе высокое разрешение в обратных задачах можно получить при существенном увеличении количества узлов сетки, количества источников и количества приемников. К сожалению, зависимость количества операций от числа узлов сетки имеет вид n^3 . Приведенный томографический подход в задачах УЗК вполне реализуем на высокопроизводительных вычислительных системах. Например, специалисты из МГУ для реализации разработанных ими аналогичных численных алгоритмов применительно к медицинским задачам (ультразвуковая томография молочной железы) использовали графический кластер суперкомпьютера «Ломоносов-2» [12].

Обратная задача ультразвуковой томографии в 2d-дефектоскопии и методы ее решения

В данной работе приводится лишь краткое описание сути алгоритма. Подробный математический аппарат приводится в соответствующих публикациях [12–14].

В задачах УЗК в силу своей простоты широко распространена скалярная волновая модель, которая достаточно точно описывает распространение отдельно продольных или поперечных волн. Можно ограничиться рассмотрением продольных волн, которые при проведении измерений в эксперименте можно отделить от поперечных волн по времени прихода на детекторы. Распространение продольной волны описывается скалярным волновым уравнением с нулевыми начальными условиями.

Для случая всестороннего доступа рассматривается простейшая двумерная задача, в которой исследуемое тело представляет собой область Q , на границе которой расположены ультразвуковые антенные решетки (рис. 1, а). Внутри области Q расположена область G . Скорость волны $v(r)$ в области G , форма области G и ее расположение внутри области Q – неизвестны. Скорость волны $v(r)$ в области $Q \setminus G$ постоянна и известна $v(r) = \text{const} = v_0$. В исследуемом теле Q различными элементами АР последовательно возбуждаются ультразвуковые импульсы. Обратная задача заключается в восстановлении неизвестной функции скорости $v(r)$ в области Q по данным измерения АР волны на границе ∂Q . Возможны различные схемы эксперимента. Наиболее перспективной является схема, в которой используются данные как на отражение, так и на прохождение.

Для решения задачи вводится функционал невязки $\Phi(c)$ от аргумента $c(r)$ между экспериментальными данными и рассчитанным полем при заданном $c(r)$ на границе S . Обратная задача ставится как задача поиска функции, минимизирующей функционал невязки. Эффективными методами минимизации функционала невязки $\Phi(c)$ являются градиентные методы, например, метод наискорейшего спуска.

Для численного решения обратной задачи в прямоугольной области объекта Q использован конечно-разностный метод во временной области в двумерном случае. Использование около 15 точек на длину волны центральной частоты для схемы 4-го порядка аппроксимации вдоль пространственных координат обеспечивает достаточную точность расчетов прямой задачи при характерных параметрах задачи. В экспериментах не использовались элементы АР, расположенные близко к боковым границам, в результате чего волны, отраженные от границ объекта Q , приходили на детекторы с большой задержкой по времени по сравнению с прямой волной от источника. Это позволило выбирать время так, чтобы отсекал по времени волны, отраженные от границ.

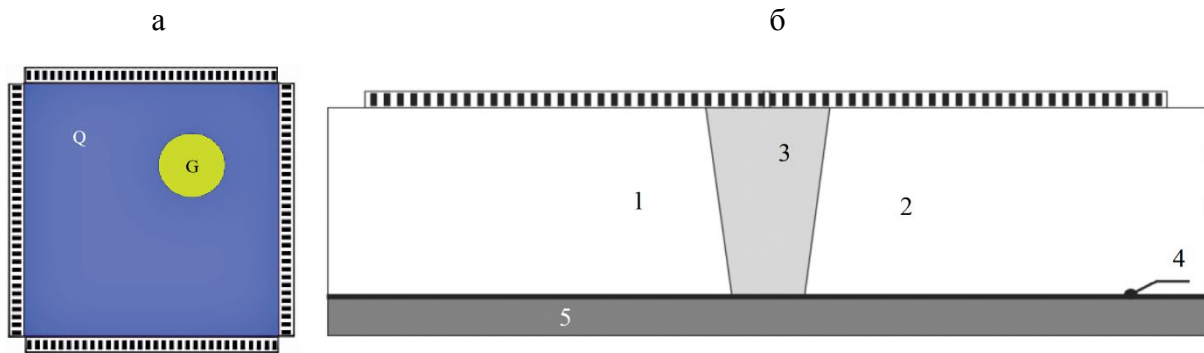


Рис. 1. Схемы экспериментов: а) при всестороннем доступе, б) при одностороннем доступе

При одностороннем доступе для решения обратной задачи томографической ультразвуковой диагностики плоских объектов рассмотрим простейшую двумерную задачу (рис. 1, б), в которой области 1 и 2 (основной металл) изготовлены из одного и того же или разных материалов и разделены областью из другого материала 3 (сварное соединение). Скорость распространения продольной волны $v(r)$ в областях 1 и 2 постоянна и равна $v(r) = \text{const} = v_0$. Скорость волны $v(r)$ в области 3 может быть неоднородна и ее форма точно неизвестна. На верхней границе пластин располагается линейная антенная решетка или две решетки на наклонных призмах. Цифрой 4 на рис. 1, б обозначена нижняя граница областей 1, 2 и 3. Ниже границы 4 располагается однородная среда 5 (например, воздух или вода). Скорость продольной волны $v(r)$ в области 5 постоянна и известна, эта скорость сильно отличается от скоростей в областях 1, 2, 3. Из-за большого изменения импеданса на границе 4 ультразвуковые волны, излучаемые антенной решеткой, отражаются от границы 4 и регистрируются ею.

Для решения рассматриваемой нелинейной обратной задачи необходимо провести огромный объем вычислений. Это невозможно без использования высокопроизводительных вычислительных кластеров. Используемая явная разностная схема, позволяет провести высокоэффективное распараллеливание расчетов на вычислительных узлах кластера. Особенность рассматриваемой задачи ультразвуковой томографии в УЗК в том, что используется большое число (несколько десятков) источников. Вычисления распространения волн в «основной» и «сопряженной» задачах для каждого источника выполняются практически независимо. Простейшая схема распараллеливания расчетов состоит в использовании ~ 100 вычислительных ядер, каждое из которых проводит расчеты только для своего источника. Такая схема позволяет ускорить вычисления почти в 100 раз по сравнению с однопроцессорным компьютером. Для решения рассматриваемых обратных задач можно

использовать любые высокопроизводительные вычислительные системы. Наиболее эффективно использование кластеров на графических картах.

Модельный эксперимент при всестороннем доступе

В эксперименте использовались две линейные эквидистантные АР, содержащие по 32 одинаковых приемно-излучающих пьезоэлемента. Центральная частота излучаемого импульса решеток 5 МГц, размер активного пьезоэлемента 0,5 мм и зазор между элементами 0,1 мм. Ширина лепестка диаграммы направленности каждого элемента в эксперименте составила 50–60 град. Малый размер пьезоэлемента обеспечивает регистрацию сигнала с шагом, сравнимым с длиной волны в эксперименте.

Для проведения измерений был собран стенд (рис. 2) для фиксации АР с двух сторон от неподвижного рексолитового бруска «статора» внутри которого вращается цилиндр «ротор» в два сменных палочками диаметром 4 мм из различных материалов. В ротор вставлялись палочки из эбонита, полиацетата и капролона имеющие различные скорости звука и создающие различный контраст относительно рексолита корпуса. Ротор имеет 16 положений по кругу через 22,5° соответственно. Для получения первичных данных применялись антенные решетки и дефектоскопическое оборудование ООО «НПЦ «ЭХО+».

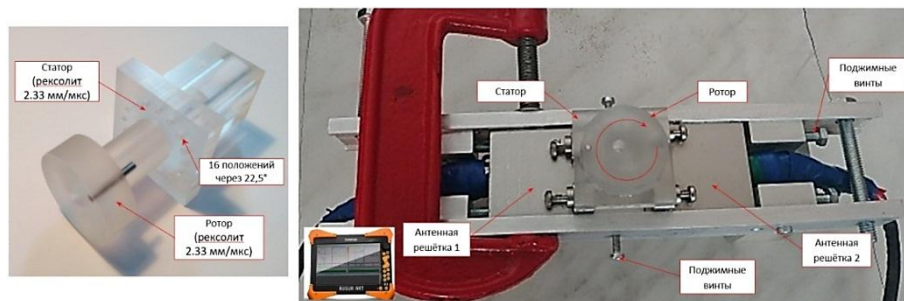


Рис. 2. Стенд для эксперимента при всестороннем доступе

Восстановление томографических изображений производилось специалистами МГУ. Результаты восстановления поля скоростей приведены на рисунке 3 сверху. Хорошо видны как срезы, так и границы вставленных палочек. Хорошо видно различие скоростей как при низком контрасте для полиацетата и эбонита (отличие скоростей от рексолита на 2 % и 5 % соответственно), так и при среднем контрасте для капролона (13,7 %).

Для сравнения на рис. 3 снизу приведены результаты синтеза внутренней структуры тех же образцов цифровой фокусировкой апертуры. Границы различаются с трудом. Имеется множество артефактов, затрудняющих анализ формы включений. Невозможно понять тип материала включений.

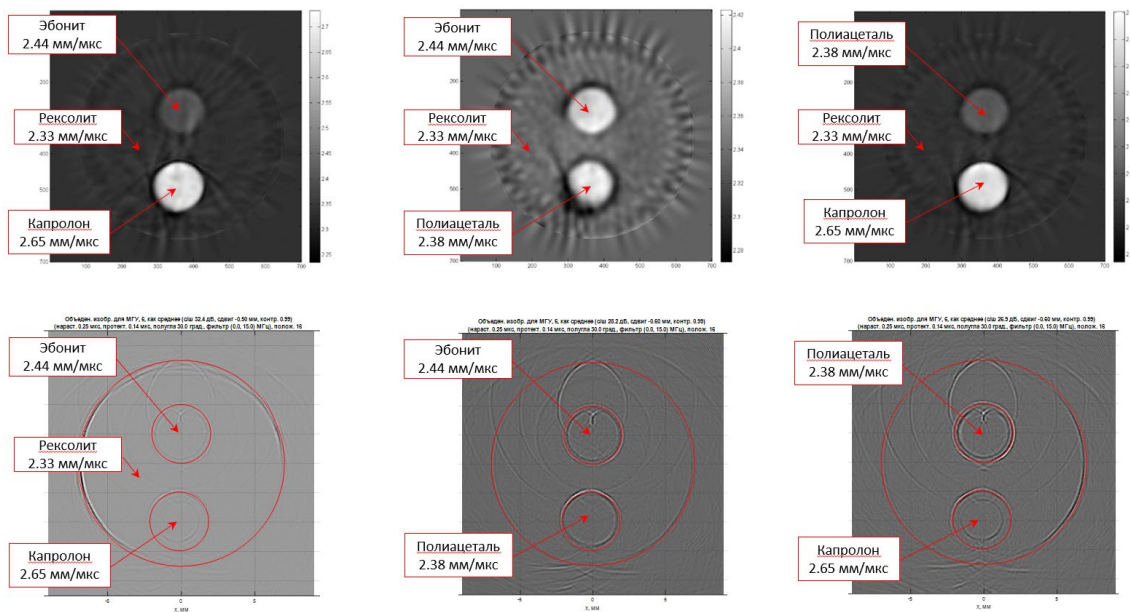


Рис. 3. Результаты сравнения результатов томографического восстановления скоростей в срезе рексолитового корпуса со вставками из эбонита, капролона и полиацетала (сверху) и результатов ЦФА (снизу)

Предложенный метод решения обратных задач волновой томографии и предложенная схема проведения томографического эксперимента, в отличие от традиционных методов УЗК, позволяют по данным на прохождение и отражение не только локализовать неоднородность, найти ее границу, но и определить скорость в ней с точностью около 1 % в центральной части неоднородности. Знание скорости внутри неоднородности чрезвычайно важно в задачах УЗК. К таким задачам можно отнести задачу контроля сварных швов, задачу контроля смесового соотношения компонентов в цилиндрических объектах при разработке изделий из полимерных материалов, когда разные компоненты имеют разные скорости.

Модельный эксперимент при одностороннем доступе к сварному шву

Определение формы нижней границы и скорости звука сварного соединения

Одной из проблем в задаче контроля сварных соединений плоских объектов, когда доступ к объекту возможен только на верхней границе, является отсутствие точной информации о расположении нижней границы, в том числе нижней границы сварного соединения. Эта информация важна как с точки зрения диагностики качества сварки, так и для корректного решения обратной задачи методом ЦФА, учитывающим неоднородность акустических свойств объекта контроля.

Относительно положения нижней границы 4 (см. рис. 1, б) будут рассмотрены три варианта. В первой постановке будем считать, что положение границы 4 известно, то есть известен вертикальный размер областей 1, 2 и 3. Во второй постановке положение границы 4 неизвестно, а в третьем варианте положение границы 4 известно только частично в области основного металла (области 1 и 2). В численных расчетах скорость распространения звука в областях 1 и 2 принималась равной 5,9 мм/мкс (сталь), скорость распространения звука в области 3 (сварное соединение) – 5,7 мм/мкс (аустенитная сталь; отличается примерно на 3,4 %). Скорость звука в области 5–1,5 мм/мкс (отличается почти в 4 раза). Эти же скорости выбирались в качестве начального приближения при расчетах.

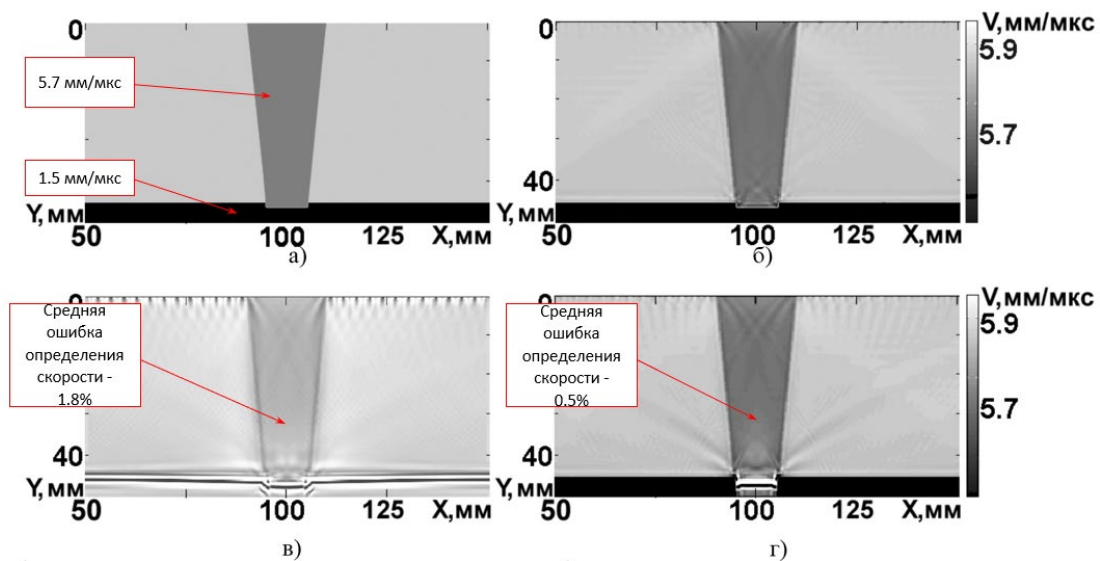


Рис. 4. Численное моделирование провисания корня сварного соединения: а) исходное распределение скорости звука, б) изображение, реконструированное в случае известной нижней границы, в) изображение, реконструированное в случае неизвестного положения нижней границы 4, г) изображение, восстановленное в случае частично известной границы.

Результаты численного моделирования провисания сварного шва приведены на рисунке 4. На рис. 4, б приведены результаты реконструкции в случае, когда положение нижней границы 4 известно полностью, то есть, например, известен вертикальный размер областей 1, 2 и 3. Значения скорости продольной волны в сварном соединении (область 3) в среднем восстановлено правильно и составило около 5,7 мм/мкс, небольшие (около 2 %) по размеру флуктуации скорости заметны в нижней части. На рис. 4в приведены результаты решения обратной задачи в постановке, когда положение отражающей границы 4 неизвестно. Узкая осциллирующая полоса в нижней части рисунка соответствует восстановленной границе 4. Видно, что качество реконструкции поля скоростей области 3 стало хуже. Хотя очертания области 3 восстановились, однако значение скорости в области 3 составило в среднем около 5,8 мм/мкс, что сильно отличается от

модельного значения 5,7 мм/мкс. Это связано с тем, что восстановленная граница 4 в центральной части в целом смещена вниз на 0,6 мм от своего реального положения в образце. На рис. 4, г приведены результаты решения обратной задачи в постановке, когда положение нижней границы области 3 неизвестно. Видно, что качество реконструкции скоростного разреза области 3 стало заметно лучше. Остались артефакты вблизи участка с неизвестным положением границы 4. Однако отчетливо видно, что под областью 3 реконструированная граница имеет выступ вниз по вертикали. Максимум осциллирующей полосы в области границы 4 совпадает с реальным положением границы с точностью размера 1 пикселя около 0,2 мм.

Обнаружение круглых дефектов в композитном сварном соединении

Выполнено численное моделирование томографии композитного сварного соединения двух металлов со скоростями звука 5,7 и 5,9 мм/мкс (конструкционная и аустенитная стали) со сварным соединением с рандомизированной картиной скоростей по диаграмме Вороного со средним размером 0,5 мм и разбросом скорости $5,7 \pm 4\%$ мм/мкс (рис. 5, а). Имеется три искусственных дефекта в виде боковых цилиндрических отверстий (БЦО) диаметром 2,0 мм. Скорость звука материала БЦО 3,6 мм/мкс.

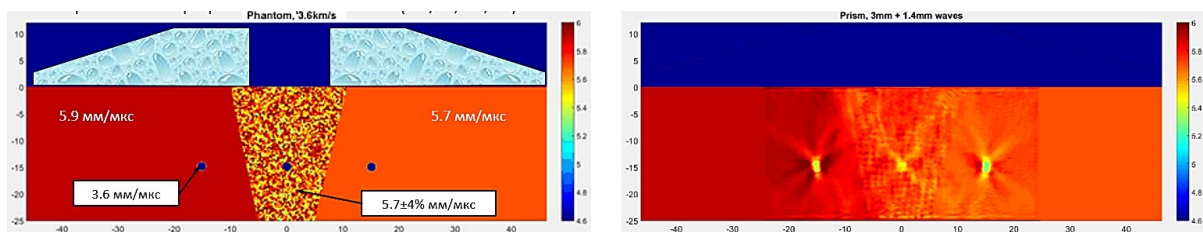


Рис. 5. Численное моделирование трех круглых дефектов в композитном сварном соединении: а) исходная модель, б) результаты томографии

Контроль производится двумя антенными решетками на призмах с углом наклона 15 градусов (скорость 2.33 мм/мкс). Антенные решетки ($64 \times (0,25 + 0,35)$ мм) симметричны. Регистрации по четырём каналам (NN, PP, PN, PP).

Результаты рассчитанного томографического изображения с учетом двукратного отражения от границ образца приведены на рис. 5, б. Можно надежно выделить все три объёмных отражателя размерами около 2 мм. Скорость звука внутри трещин определяется примерно равной 4,1 мм/мкс (с ошибкой около 1,5 мм/мкс). Контуры области наплавленного металла слабо угадываются. Шаг сетки для всех расчётов 0.04 мм.

Обнаружение плоскостных дефектов в композитном сварном соединении

Выполнено численное моделирование томографии аналогичного композитного сварного соединения с четырьмя искусственными плоскостными дефектами в виде трещин длиной 4 мм. Скорость звука материала трещин 3,6 мм/мкс (рис. 6, а).

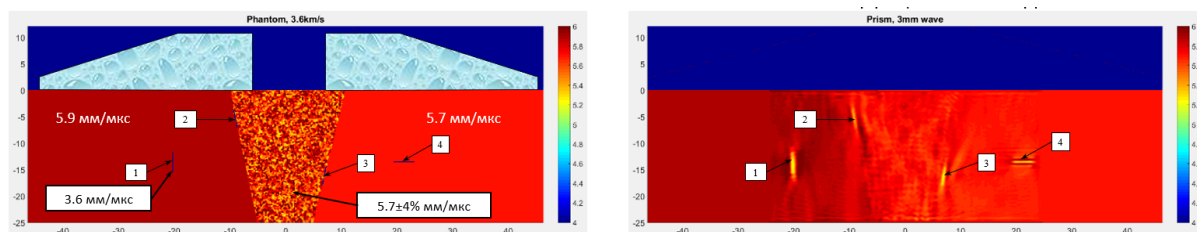


Рис. 6. Численное моделирование четырех плоскостных дефектов в композитном сварном соединении: а) исходная модель, б) результаты томографии.

Результаты рассчитанного томографического изображения с учетом двукратного отражения от границ образца приведены на рис. 6, б. Можно надежно выделить все четыре трещины, однако наблюдается существенное влияние ориентации и расположения трещин на результат. Положение трещин и их размеры определяются с точностью до четверти длины волны равной 3 мм. Скорость звука внутри трещин так же определяется с ошибкой около 1,5 мм/мкс. Контуры области наплавленного металла слабо угадываются.

Обнаружение дефектов в ПКМ в виде слоистых пластиков с доступом с одной стороны

Выполнено численное моделирование восстановления поля скоростей в слоистых полимерных композиционных материалах. Схема эксперимента с односторонним расположением антенной решетки приведена на рис. 7, а. Варианты модельных дефектов приведены на рис. 7, б. В качестве начального приближения для расчета может применяться несколько вариантов (рис. 7, в): средняя скорость по всему объему, средний контраст по слоям и эталонная структура скоростей звука по слоям.

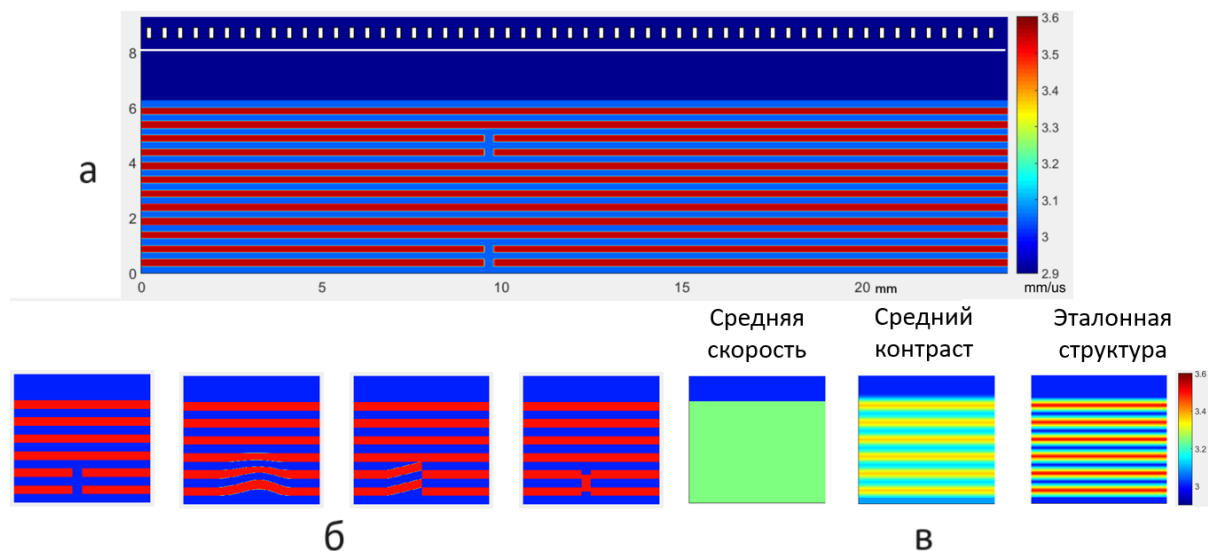


Рис. 7. Моделирование поля скоростей в слоистом ПКМ: а) общая схема с односторонним расположением антенной решетки, б) варианты искусственных дефектов, в) варианты начальных приближений

Результаты томографии путем решения обратной коэффициентной задачи приведены на рис. 8. Моделирование производилось одноэтапно для двух частот 3 и 5 МГц, а так же многоэтапно (Multi-stage) сначала для более низкой частоты 3 МГц, а затем для более высокой частоты 5 МГц с начальным приближением в виде результатов расчета на 3 МГц (возможно большее число итераций от меньших частот к большим). Приведены результаты томографии для начальных приближений в виде средней скорости по всему объему (рис. 8, а) и для эталонного поля скоростей по слоям (рис. 8, б).

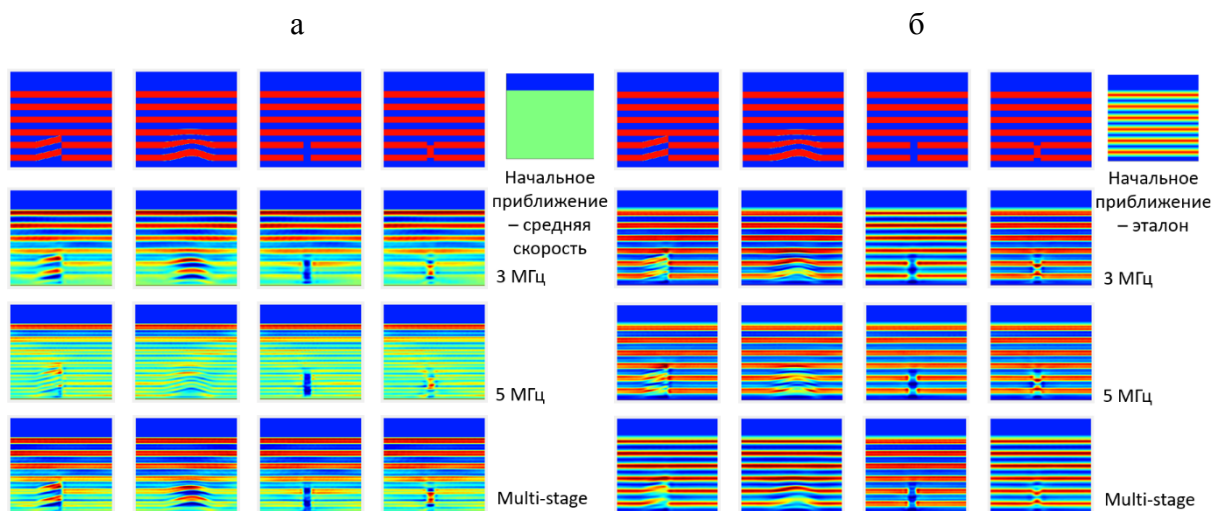


Рис. 8. Результаты томографии различных типов искусственных дефектов на двух частотах 3 и 5 МГц и с поэтапным расчетом Multi-stage: а) при начальном приближении в виде средней скорости по всему объему, б) при начальном приближении в виде эталонного поля скоростей по слоям

Все типы дефектов удовлетворительно различаются почти во всех режимах. Можно сделать вывод о существенном улучшении качества при использовании многоэтапного режима восстановления Multi-stage по сравнению с моночастотными расчетами, и при использовании в качестве начального приближения эталонного поля скоростей.

Определение формы нижней границы и скорости звука в ПКМ в виде слоистых пластиков с доступом с одной стороны

При контроле ПКМ в виде слоистых пластиков с односторонним доступом одной из проблем так же является отсутствие точной информации о расположении нижней границы.

Выполнено численное моделирование томографии слоистого пластика с 10 модельными дефектами в виде разрывов армирующего волокна и дном сложной формы. На рис. 9, а приведена исходная задача. На рис. 9, б и 9, в – результаты томографии с неизвестным дном (дефекты у дна выявляются неубедительно) и точность восстановления формы дна в сравнении с реальной (сходимость на прямых участках – высокая, на перегибах имеются ошибки).

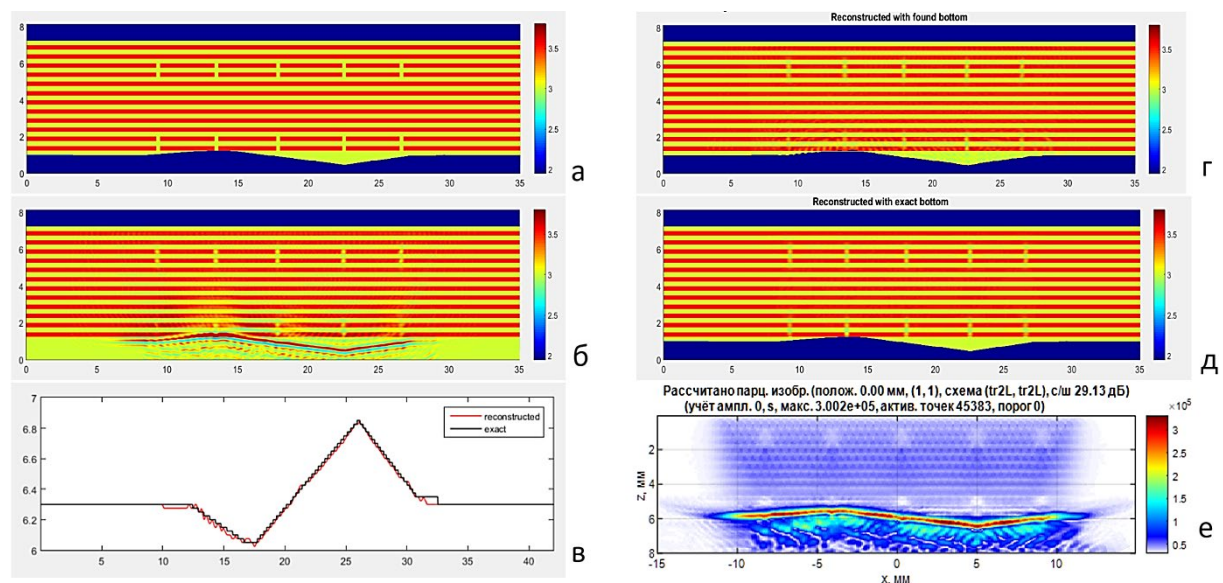


Рис. 9. Восстановление поля скоростей при неровном дне: а) исходная задача, б) томография с неизвестным дном, в) сравнение восстановленной формы дна с реальной, г) томография с дном восстановленной формы, д) томография с достоверным дном, е) SAFT аналогичного объекта с неизвестной формой дна

На рис. 9, г приведены результаты томографии при наличии дна форма которого восстановлена предыдущей томографией. На рис. 9, д для сравнения томографии при наличии дна с реальной формой. После учёта формы дна, разрывы нитей у дна восстанавливаются лучше. На рис. 9, е приведены результаты контроля аналогичного объекта методом SAFT: форма дна восстанавливается достаточно достоверно, но амплитуда

донного сигнала многократно превосходит отражения от искусственных дефектов, нижний ряд дефектов у дна выявляется неубедительно, один из дефектов можно считать пропущенным.

Выводы

Обратная коэффициентная задача позволила уменьшить уровень структурного шума для скалярного варианта волнового уравнения за счёт учёта перерасеивания и восстановления изображения в виде распределения скоростей.

Хорошие изображения удалось получить для объёмных и плоскостных отражателей с контрастностью более 40 % (скорость в неоднородностях более 3,6 мм/мкс) при выполнении двух или трёх итераций.

Для проведения экспериментов предпочтительно использование ультразвуковых антенных решёток с числом элементов 64 и более.

Обратная коэффициентная задача позволяет одновременно решать две задачи:

1. определение неизвестных геометро-акустических свойств образца (границы образца, геометрию и свойства сварного соединения) и, как следствие, эффективный учёт эхосигналов, отражённых от границ образца;
2. учёт произвольной формы отражателя и перерасеивания между ними, так как на каждой итерации прямая задача решается, как численное решение волнового уравнения. Ложных бликов как при ЦФА при этом не будет. Ни один импульс обегания или перерасеяния не оказывается лишним – все они вносят свою лепту в точное восстановление распределения скорости звука и коэффициента поглощения.

Обратная коэффициентная задача имеет ряд ограничений:

1. Она хорошо работает для слабоконтрастных отражателей при облучении со всех сторон. С количественной точки зрения фаза импульса прошедшего через неоднородность не должна измениться более чем на 360 градусов. Поэтому её применение для решения задач дефектоскопии, в которой приходится работать с высококонтрастными объектами, требует дополнительного изучения и адаптации.

2. Для плоских объектов контроля с доступом только с одной стороны (сверху) важно:

- а) чем точнее известно отражающее дно, тем лучше результаты;
- б) чем больше диапазон углов зондирования (лучи ближе к горизонтали и вертикали в месте сварки), тем лучше результаты. Сильно мешает валик усиления в месте сварки, т.к. он не позволяет разместить источники-приёмники сверху.

Для перехода к корректному решению обратной коэффициентной задачи для твёрдого тела:

1. Необходимо вывести формулы расчёта градиента для итерационного определения как минимум двух коэффициентов Ламэ (изотропное тело), плотности и коэффициента затухания.

2. Для анизотропных тел нужно определять, как минимум, три коэффициента упругости для кубической симметрии, а лучше пять для случая трансверсально-изотропной симметрии.

Список литературы

1. Natterer F. Possibilities and limitations of time domain wave equation imaging / Contemporary Mathematics. V. 559. Providence. AMS, 2011. P. 151–162.

2. Бейлина Л., Клибанов М.В., Кокурин М.Ю. Адаптивность и релаксация для некорректных задач и глобальная сходимость для коэффициентной обратной задачи // Проблемы математического анализа. 2010. № 46. С. 3–44.

3. Goncharsky A.V., Romanov S.Y. Supercomputer technologies in inverse problems of ultrasound tomography // Inverse Probl. 2013. V. 29. № 7. P. 075004.

4. Goncharsky A.V., Romanov S.Y. Iterative methods for solving coefficient inverse problems of wave tomography in models with attenuation // Inverse Problems. 2017. V. 33. № 2. P. 025003.

5. Virieux J., Operto S. An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics // Geophysics. 2009. V. 74. № 6. P. WCC1–WCC26.

6. Langenberg K.-J., Marklein R., Mayer K. Ultrasonic Nondestructive Testing. CRC Press, 2012.

7. Базулин Е.Г., Садыков М.С., Коновалов Д.А. Метод конечных разностей во временной области. Ч. 2. Расчет эхосигналов в анизотропных неоднородных материалах, структурный шум // Дефектоскопия. 2018. № 8. С. 3–10.

8. Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. Ультразвуковая томография металлоконструкций методом цифровой фокусировки антенной решетки // Дефектоскопия. 2011. № 1. С. 21–38.

9. Чертищев В.Ю., Генералов А.С. Повышение производительности ультразвукового контроля изделий с плоскопараллельными границами цифровой фокусировкой антенных решеток методом C-SAFT // Труды ВИАМ. 2016. № 10 (46). Ст. 10. DOI 10.18577/2307-6046-2016-0-10-10-10.

10. Metwally K., Lubeigt E., Rakotonarivo S., Chaix JF., Baqué F., Gobillot G., Mensah S. Weld inspection by focused adjoint method // Ultrasonics. 2018. February. V. 83. P. 80–87.

11. Seidl R., Rank E. Iterative time reversal based flaw identification // Computers & Mathematic with Applications. 2016. August. V. 72. № 4. P. 879–892.

12. Гончарский А.В., Кубышкин В.А., Романов С.Ю., Серёжников С.Ю. Обратные задачи интерпретации экспериментальных данных 3D ультразвуковых томографических исследований // Вычислительные методы и программирование. 2019. Т. 20. С. 254–269. DOI 10.26089/NumMet.v20r323.

13. Базулин Е.Г., Гончарский А.В., Романов С.Ю., Серёжников С.Ю. Ультразвуковая томография на основе коэффициентной обратной задачи как способ борьбы со структурным шумом // Дефектоскопия. 2023. № 10. С. 3–17. DOI 10.31857/S0130308223100019.

14. Базулин Е.Г., Гончарский А.В., Романов С.Ю., Серёжников С.Ю. Определение геометро-акустических свойств сварного соединения как решение обратной коэффициентной задачи для скалярного волнового уравнения // Дефектоскопия. 2021. № 11. С. 3–14. DOI 10.31857/S0130308221110014.

УДК 620.179.16

АКУСТОУПРУГИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИН ПРИ ОДНООСНОМ НАГРУЖЕНИИ

Ю.В. Гладышева¹; М.В. Малых¹; Р.Р. Исхужин¹, к.т.н.; А.А. Узких¹

ACOUSTOELASTIC CHARACTERISTICS OF THIN METAL PLATES UNDER UNIAXIAL LOAD

Y.V. Gladysheva¹, M.V. Malykh¹, R.R. Iskhuzhin¹ (Candidate of Engineering Science), A.A. Uzikh¹

¹ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», г. Снежинск, Челябинская обл.

¹FSUE «RFNC-VNIITF named after Academ. E.I. Zababakhin», Snezhinsk Chelyabinsk region

Аннотация

В работе приведены математическая модель и результат ее программной реализации, описывающие особенности распространения ультразвуковых нормальных волн в тонких напряженных пластинах. Описан способ экспериментального определения зависимости относительного изменения времени пробега нормальных SV-волн от величины и направления приложенного одноосного напряжения.

Ключевые слова:

акустоупругость, нормальные волны, волны Лэмба, групповая скорость, дисперсия скорости

Abstract

The paper presents a math model and its software implementation, which demonstrate the features of ultrasonic guided waves propagation in thin strained plates. A method is described to experimentally determine the relative change in time-of-flight of SV-guided waves as a function of the value and direction of the uniaxial load applied.

Keywords:

acoustoelasticity, guided waves, Lamb waves, group velocity, velocity dispersion

Введение

Разработка методических принципов неразрушающего контроля механических напряжений (напряженно-деформированного состояния) конструкционных материалов в составе ответственных узлов изделий имеет огромную практическую значимость для атомной техники и других отраслей промышленности. Напряженно-деформированное состояние (НДС) материала может сопровождаться необратимыми изменениями его структуры и физико-механических характеристик под влиянием высоких температур, процессов пластического течения, релаксации и т. д. Такое состояние может привести к непредсказуемому поведению материала в составе изделий при эксплуатации.

Помимо выявления несплошностей акустические методы неразрушающего контроля используют для определения физико-механических свойств материалов, таких как: модули упругости второго и третьего порядков, прочность, структурная анизотропия и т. д., а также для оценки НДС упругих материалов.

Акустическая тензометрия является относительно новым и прогрессивным направлением, рассматривающим проблемы контроля НДС в материалах различных узлов и конструкций неразрушающим способом. Из всех методов акустической тензометрии можно выделить наиболее перспективный, основанный на явлении акустоупругости. Суть акустоупругого эффекта - наличие зависимости скорости распространения, или времени пробега, упругих волн в объекте от:

- величины приложенного к объекту напряжения;
- взаимной ориентации направления приложенного напряжения и волнового вектора;
- типа поляризации волны [1].

На основании положений акустоупругости описаны методические основы прецизионного исследования напряженного состояния конструкционных материалов с помощью объемных и поверхностных волн [2, 3].

Нормальные волны в пластинах

Распространение волн в ограниченных средах, поперечные размеры которых сопоставимы с длиной волны (пластины, стержни и др.), сопровождается различными волноводными эффектами (интерференцией, искажением формы импульса и т. д.), в результате чего возникают так называемые нормальные волны. В пластинах существуют два типа нормальных волн:

- волны горизонтальной поляризации (SH), или волны Лява;
- волны вертикальной поляризации (SV), или волны Лэмба.

Характерной особенностью нормальных волн является дисперсия скорости, то есть зависимость фазовых и групповых скоростей различных

мод от частоты зондирующего импульса. Дисперсия SH-волн, симметричных (s) и антисимметричных (a) мод SV-волн в пластине описывается дисперсионными кривыми, получаемыми в результате численного решения характеристических уравнений [4, 5].

Одним из способов возбуждения нормальных волн SV-поляризации в пластинах является «метод клина», при котором продольная волна, излученная пьезоэлектрическим преобразователем (ПЭП), падает на границу раздела сред (призма ПЭП-пластина, или иммерсионная жидкость-пластина) под углом к нормали. Данным методом, варьируя угол падения β можно селективно возбудить необходимую моду в материале пластины.

Для возбуждения волн SH-поляризации используют электромагнитно-акустический метод и метод сухого точечного контакта.

К преимуществам использования нормальных волн в акустодиагностике относится возможность оценки состояния тонкостенных изделий (листов, труб, оболочечных конструкций и т.д.), возможность вариации базы прозвучивания и возможность оценки напряжений, локализованных не только на поверхности, но и в толще изделия.

Модель распространения нормальных волн в напряженной среде

Пусть имеется изначально изотропная, гиперупругая пластина, подвергнутая двусосному напряжению в плоскости Ox_1x_2 (рис. 1, а). Модель распространения упругих волн в напряженной пластине рассматривают как движение материальной точки, вызванное волновым смещением $\vec{u}^{II-III}$, «наложенным» на смещение, вызванное приложенным напряжением $\vec{u}^{I-II}$ (рис. 3, б).

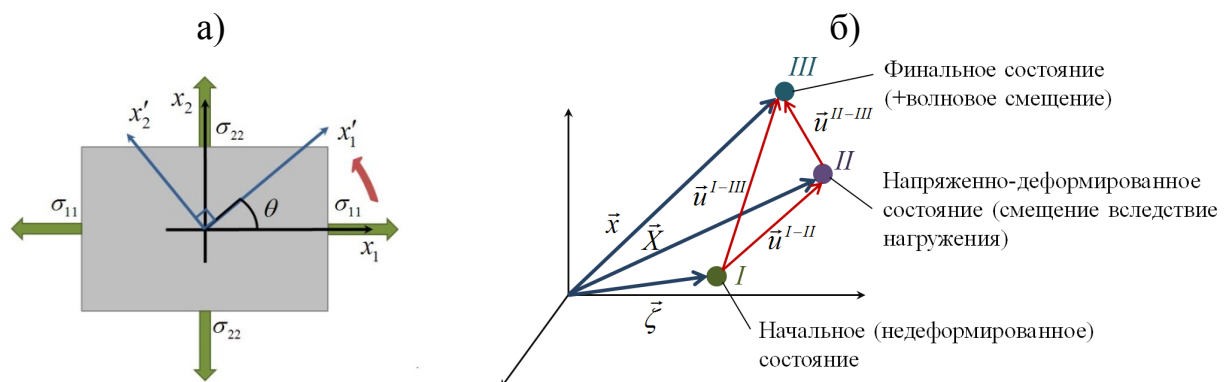


Рис. 1. Пластина, подвергнутая плоскому напряжению (а), модель движения материальной точки, вызванного деформацией и волновым смещением (б)

Второй тензор напряжения Пиолы-Кирхгофа для данного случая равен

$$T_{ij}^{I-II} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Исходя из условия изначальной изотропности пластины и допущения, что вследствие плоского нагружения пластина приобретает наведенную ортотропную анизотропию, запишем закон Гука для состояния II в виде

$$T_i^{I-II} = C_{ij} u_j^{I-II}, \quad (2)$$

где C_{ij} – тензор упругости материала с ортотропной симметрией (нотация Фойгта) со свернутыми индексами.

Уравнение движения для состояния III получено по аналогии со случаем распространения волны в анизотропной среде в координатах $\vec{\zeta}$, относящихся к состоянию I [6]

$$A_{ijkl} \frac{d^2 u_k^{II-III}}{d\zeta_j d\zeta_l} = \rho \frac{d^2 u_i^{II-III}}{dt^2}, \quad (3)$$

здесь ρ – изначальная плотность среды, A_{ijkl} – тензор коэффициентов, который при условии малых деформаций и с учетом типа приложенного напряжения (1) имеет вид

$$A_{ijkl} = C_{ijkl} u_{kl}^{I-II} \delta_{ik} + C_{ijkl} + C_{ijpl} u_{kp}^{I-II} + C_{pjkl} u_{ip}^{I-II} + C_{ijklmn} u_{mn}^{I-II}. \quad (4)$$

Связь тензоров напряжения и деформации для состояния III выражается как

$$T_{ij}^{II-III} = (C_{ijkl} + C_{ijpl} u_{kp}^{I-II} + C_{ijklmn} u_{kl}^{I-II}) \frac{du_k^{II-III}}{d\zeta_l} = B_{ijkl} \frac{du_k^{II-III}}{d\zeta_l}. \quad (5)$$

В выражениях (4) и (5) используются тензоры упругости второго C_{ijkl} и третьего C_{ijklmn} порядков для изотропного материала. Тензор C_{ijkl} выражается через упругие постоянные Ламе, а тензор C_{ijklmn} через упругие постоянные третьего порядка – константы Мурнагана (l , m и n).

Для вывода характеристических уравнений для нормальных волн в нагруженной пластине используется метод «парциальных волн» [7]. Метод построен на рассуждении, что нормальные волны – это некая совокупность объемных волн, постоянно отражающихся от свободных границ пластины и взаимодействующих между собой. Поэтому все возможные гармонические колебания должны иметь одинаковые проекции векторов

волнового числа на ось Ox_1 и распространяться с одинаковой скоростью вдоль оси Ox_1 . Таким образом, решение для гармонических волн представим в виде

$$u_i = U_i e^{i(\xi_1 x_1 + \xi_3 x_3 - \omega t)} = U_i e^{i\xi_1(x_1 + \alpha x_3 - ct)}, \quad \alpha = \frac{\xi_3}{\xi_1}, \quad (6)$$

ξ_1 и ξ_3 – проекции волнового числа на оси Ox_1 и Ox_3 соответственно.

Подставляя данное решение (6) в уравнение движения (3) получим уравнение Кристоффеля

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} = 0 \quad (7)$$

Условием существования нетривиальных решений системы (7) является равенство нулю определителя, таким образом, получим уравнение шестого порядка относительно α

$$P_6 \alpha^6 + P_4 \alpha^4 + P_2 \alpha^2 + P_0 = 0, \quad (8)$$

Уравнение (8) имеет шесть независимых решений α_p , $p=1, 2, \dots, 6$, что говорит о том, что с заданной фазовой скоростью v_{ph} в пластине распространяются шесть монохроматических волн. Дальнейшее совместное решение (7) и (5), с учетом граничных условий, при которых компоненты тензора напряжения T_{33} , T_{13} , T_{23} равны нулю при x_3 , равном координатам верхней и нижней границ пластины, приводит к выводу характеристических уравнений. Данные уравнения выражают зависимость фазовых скоростей нормальных волн от частоты волны (дисперсию) и от величины приложенного напряжения для симметричных мод и

$$D_{11}G_1 \operatorname{ctg}(\gamma\alpha_1) + D_{13}G_3 \operatorname{ctg}(\gamma\alpha_3) + D_{15}G_5 \operatorname{ctg}(\gamma\alpha_5) = 0 \text{ и} \quad (9)$$

$$D_{11}G_1 \operatorname{tg}(\gamma\alpha_1) + D_{13}G_3 \operatorname{tg}(\gamma\alpha_3) + D_{15}G_5 \operatorname{tg}(\gamma\alpha_5) = 0 \quad (10)$$

для антисимметричных мод, где $\gamma = \frac{\omega d}{2v_{ph}} = \pi \frac{fd}{v_{ph}}$ и

$$\begin{aligned} G_1 &= D_{23}D_{35} - D_{33}D_{25}, \\ G_3 &= D_{31}D_{25} - D_{21}D_{35}, \\ G_5 &= D_{21}D_{33} - D_{31}D_{25}. \end{aligned} \quad (11)$$

Коэффициенты D_{ip}

$$\begin{aligned} D_{1p} &= B_{3311} + B_{3312} \frac{U_{2(p)}}{U_{1(p)}} + B_{3333} \frac{U_{3(p)}}{U_{1(p)}} \alpha_p, \\ D_{2p} &= \alpha_p (B_{1313} + B_{1323} \frac{U_{2(p)}}{U_{1(p)}}) + B_{1331} \frac{U_{3(p)}}{U_{1(p)}}, \\ D_{3p} &= \alpha_p (B_{1323} + B_{2323} \frac{U_{2(p)}}{U_{1(p)}}) + B_{1332} \frac{U_{3(p)}}{U_{1(p)}}. \end{aligned} \quad (12)$$

Отношения амплитуд находят путем некоторых перестановок в системе (7)

$$\frac{U_{2(p)}}{U_{1(p)}} = \frac{K_{11}(\alpha_p)K_{23}(\alpha_p) - K_{13}(\alpha_p)K_{12}(\alpha_p)}{K_{13}(\alpha_p)K_{22}(\alpha_p) - K_{12}(\alpha_p)K_{23}(\alpha_p)}, \quad (13)$$

$$\frac{U_{3(p)}}{U_{1(p)}} = \frac{K_{11}(\alpha_p)K_{23}(\alpha_p) - K_{13}(\alpha_p)K_{12}(\alpha_p)}{K_{12}(\alpha_p)K_{33}(\alpha_p) - K_{23}(\alpha_p)K_{13}(\alpha_p)}. \quad (14)$$

Выражения (9) и (10) полностью описывают поведение любой волны, распространяющейся в нагруженной пластине, в том числе и волн горизонтальной поляризации [7].

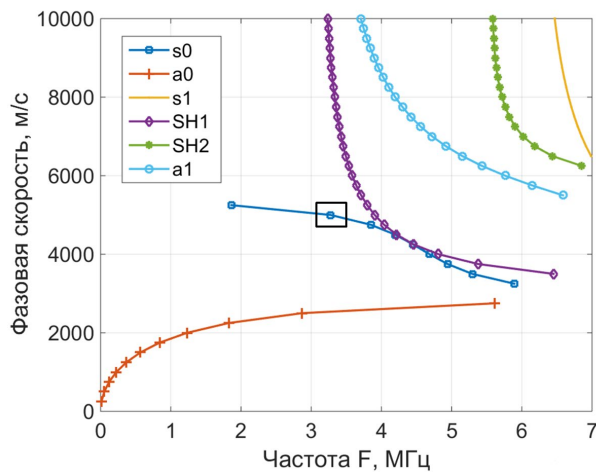
Для изучения распространения плоских волн вдоль направления, составляющего некий угол θ с осью x_1 в плоскости пластины Ox_1x_2 , вводят систему координат, связанную с направлением распространения волны. Новая система координат образуется вращением исходной системы на угол θ . Каждый тензор, использующийся в расчетах, должен быть преобразован с применением поворотной матрицы по правилам преобразования тензоров.

Полученные характеристические уравнения решаются численно путем нахождения таких пар значений частоты f и фазовой скорости v_{ph} , при которых выполняются равенства (9) и (10). Одноосный вид напряжения рассматривают в рамках данной модели с учетом допущения, что $\sigma_{22} = 0$.

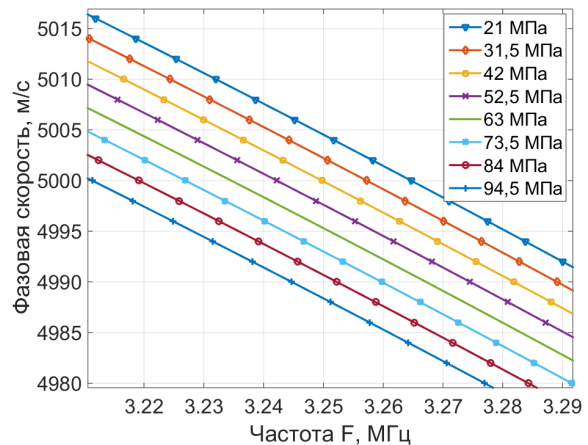
Расчеты проведены для пластины толщиной 0,5 мм со следующими параметрами: первый параметр Ламе $\lambda = 49,6$ ГПа, второй параметр Ламе $\mu = 25$ ГПа, модули Мурнагана $l = 264$ ГПа, $m = -191$ ГПа, $n = -290$ ГПа, плотность материала $\rho = 2640$ кг/м³. Данные параметры соответствуют материалу сплава АМг6 [3]. Напряжение σ_{11} менялось от 21 МПа до 94,5 МПа с шагом 10,5 МПа.

Результатом численного решения характеристических уравнений является набор дисперсионных кривых для фазовой скорости v_{ph} , соответствующих величинам напряжений σ_{II} (рис. 2). Дисперсионные кривые для групповых скоростей находят путем решения уравнения

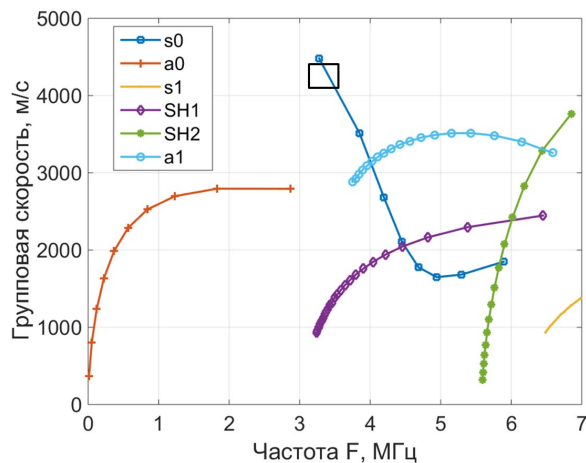
$$v_{gr} = v_{ph} \left(1 - \frac{f}{v_{ph}} \frac{dv_{ph}}{df} \right)^{-1}. \quad (15)$$



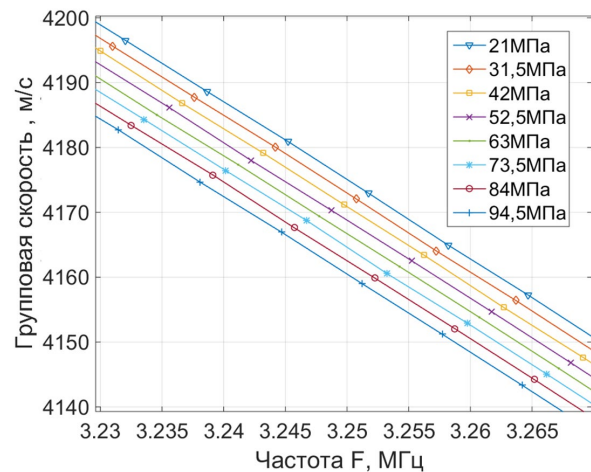
а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Дисперсионные кривые фазовых (а, б) и групповых (в, г) скоростей

В результате анализа теоретических расчетов получены графики (рис. 3), описывающие характер зависимости относительного изменения фазовой

скорости δv_{ph} мод при изменении σ_{II} (от начального значения до 94,5 МПа) от частоты.

Из графиков видно, что δv_{ph} мод имеют различную чувствительность к приложенному напряжению, а также δv_{ph} одной моды меняется при изменении частоты. На примере моды $s0$ показан тот факт, что при частоте $\approx 4,33$ МГц мода не показывает чувствительности к приложенному напряжению. Также диапазоны частот, при которых фазовая скорость мод SH1 и $a1$ имеет максимальную чувствительность к напряжению, близки к критическим частотам для данных мод.

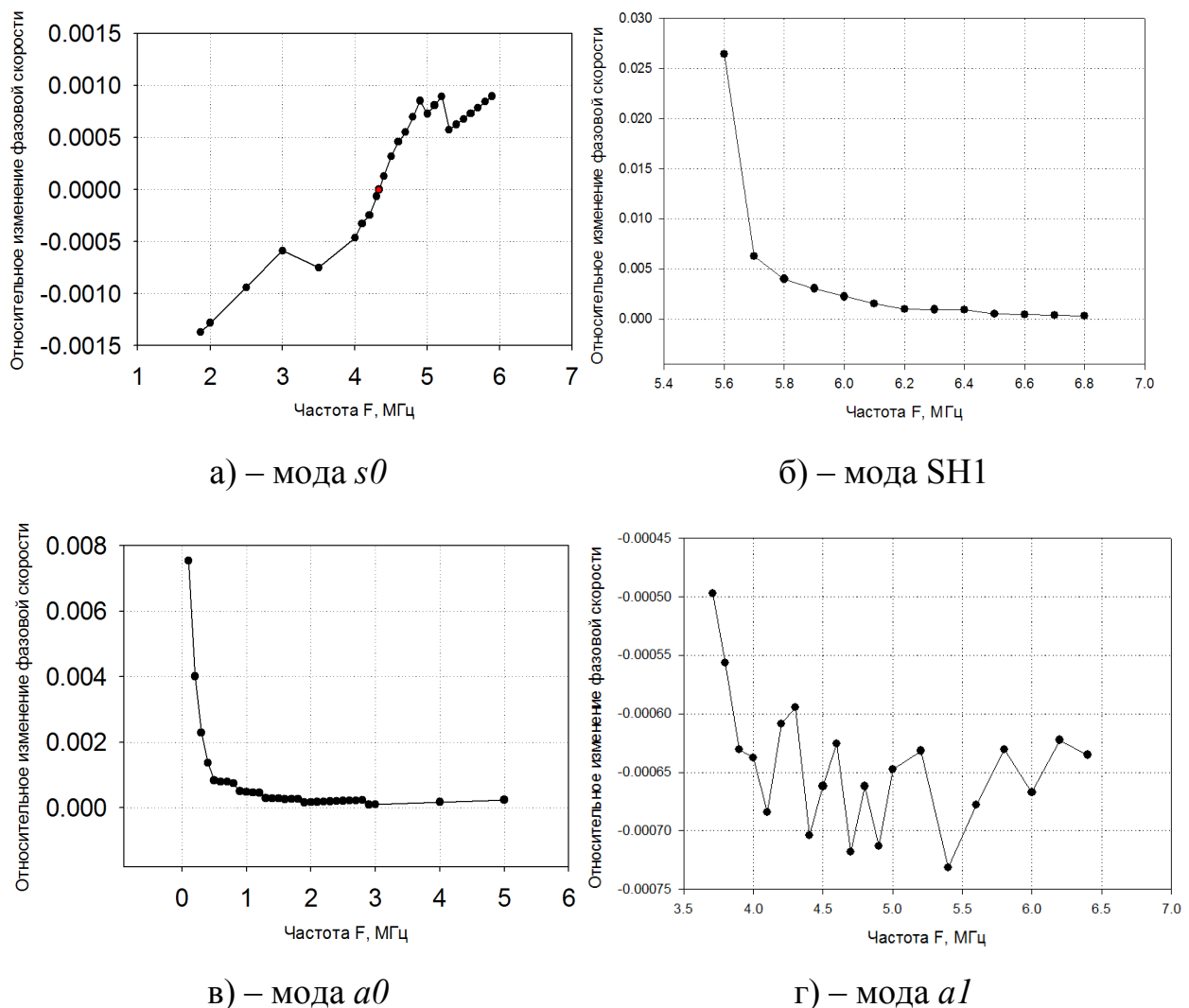


Рис. 3. Чувствительность фазовой скорости к напряжению на различных частотах

Экспериментальные исследования

Задача экспериментальных исследований заключалась в сопоставлении получаемых данных с теоретическими результатами в рамках имеющихся технических возможностей.

Определение акустоупругих характеристик проводили для пластины из сплава АМг6 шириной ≈ 95 мм, длиной ≈ 210 мм и толщиной $\approx 0,5$ мм ($0,477 \pm 0,002$ мм).

Возбуждение и прием нормальных УЗ волн в пластине проводили импульсным контактным методом прохождения (теневым) с помощью двух пьезоэлектрических преобразователей (далее по тексту - ПЭП) с переменным углом ввода. ПЭП подключали к ультразвуковому дефектоскопу Р163-Л8 разработки РФЯЦ-ВНИИТФ (Свидетельство об утверждении типа СИ № 72228), имеющего расширенные возможности работы с нормальными волнами. Программное обеспечение дефектоскопа позволяет проводить анализ спектра сигналов для определения центральной частоты волны $f_{ц}$. Исходя из значений $f_{ц}$, проводили цифровую фильтрацию по частоте с целью получения наиболее “чистого” сигнала.

Пластину устанавливали в захваты универсальной испытательной машины. Схема исследования приведена на рисунке 4. Пластину подвергали одноосному растяжению σ_i от 21 МПа до 94,5 МПа с шагом 10,5 МПа. Максимальное значение напряжения не превышало 70% от условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ для сплава АМг6 [8]. Сообщаемая пластине предварительная нагрузка, принятая за нулевое значение σ_0 , составляла не более 10,5 МПа. На каждом шаге растяжения фиксировали значение времени пробега волны при неизменной базе прозвучивания.

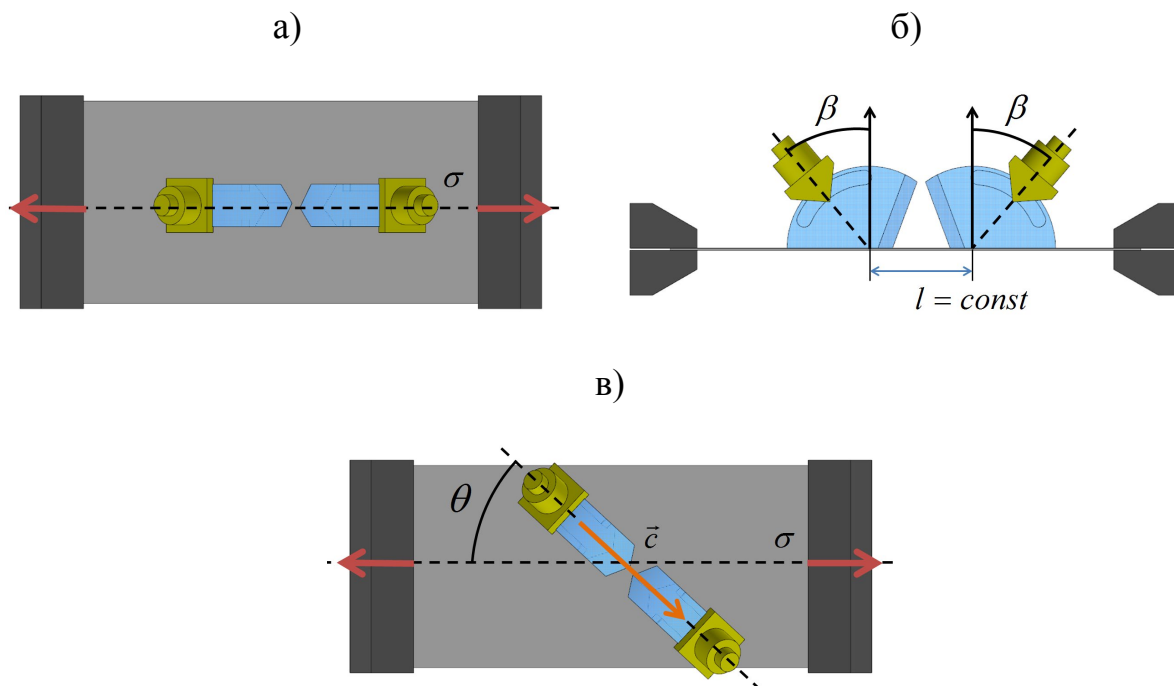


Рис. 4.Схема исследования

Угол наклона ПЭП β варьировали с целью селективного возбуждения мод $a0$, $s0$ и $a1$, на рис. 5, а приведена частотно-угловая диаграмма, рассчитанная для исследуемой пластины [9, 10]. Сигнал, фиксируемый дефектоскопом, представляет собой волновой пакет (рис. 5, б). За время пробега волны принимали значение времени t_i , соответствующее максимуму огибающей сигнала, индекс i соответствует номеру шага нагружения. Относительное изменение времени пробега волны определяли по формуле $\delta t_i = \frac{t_i - t_0}{t_0}$.

Исследования зависимости относительного времени пробега от взаимной ориентации вектора распространения волны и направления действия напряжения (угла θ) приводили путем поворота ПЭП согласно схеме на рис. 4, в. Угол θ варьировали от 0° до 90° с шагом 15° .

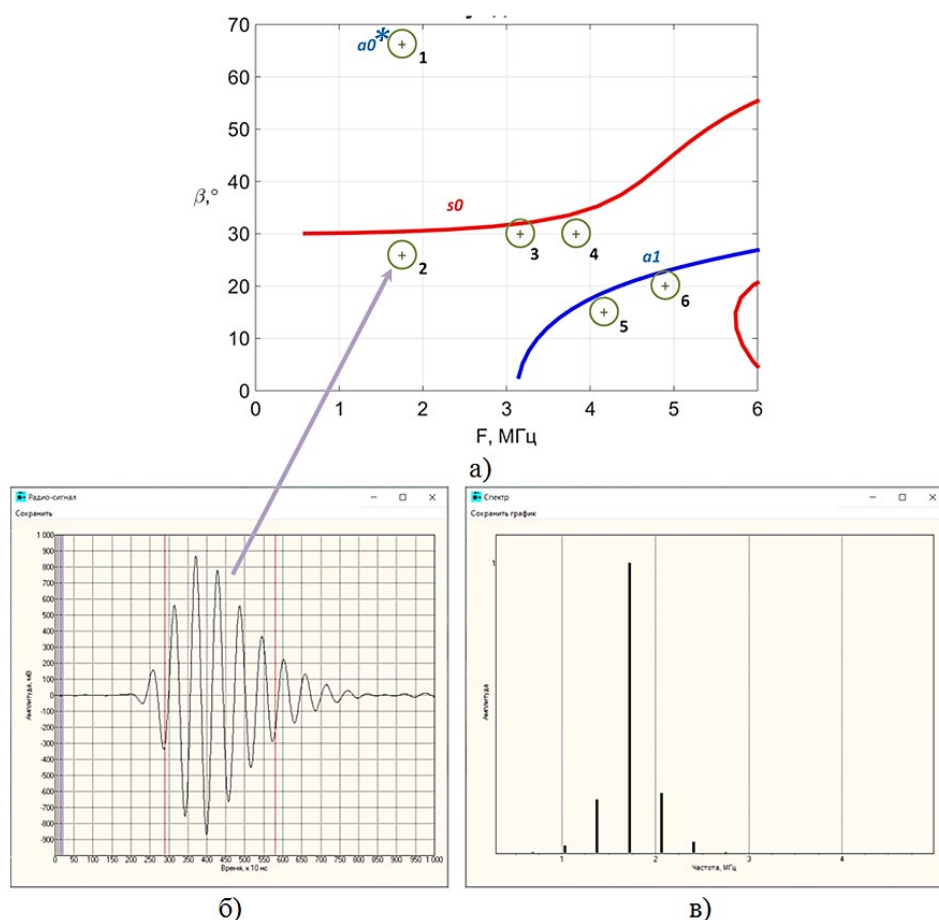


Рис. 5. Частотно-угловая диаграмма (а), форма (б) и спектр (в) принимаемого сигнала волны моды $s0$

На рис. 5, а кругами обозначены зоны исследования, в которых удалось наблюдать сигнал. В табл. 1 приведены параметры исследуемых волн.

Таблица 1

Параметры исследуемых волн в пластине

Номер волны	Рабочая частота ПЭП, МГц	Угол падения β , °	Центральная частота f_u , МГц	Приблизительное время пробега волны, мкс	Идентификатор моды волны
1	1,8	65	1,72	45,52	$a0^*$
2	1,8	25	1,72	38,70	$s0$
3	5,0	30	3,23	44,50	$s0$
4	5,0	30	3,85	42,30	$s0$
5	5,0	15	4,27	39,00	$a1$
6	5,0	20	4,91	41,50	$a1$
* Или поверхностная волна					

В результате увеличения напряжения наблюдали смещение сигнала во временной области (рис. 6).

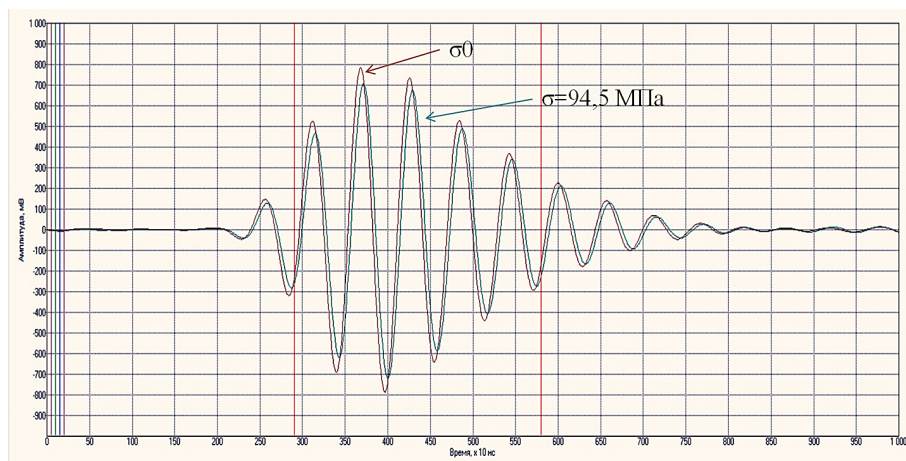


Рис. 6. Смещение сигнала при увеличении напряжения

По результатам проведенных исследований получили зависимости относительного изменения времени пробега волны от величины приложенного напряжения σ_i . На рис. 7, а приведены линейные графики зависимости $\delta t(\sigma)$, полученные путем аппроксимации данных методом наименьших квадратов. На рис. 7, б приведены теоретические графики зависимости $\delta t_T(\sigma)$, полученные в ходе анализа приведенной ранее математической модели. При этом вектор распространения волны

ориентирован вдоль направления действия напряжения ($\theta=0^\circ$). Графики на рис. 7, в демонстрируют, как меняется коэффициент связи между δt и σ (коэффициент акустоупругой связи) в зависимости от величины угла θ . Характерная зависимость коэффициента связи от величины угла θ , полученная в результате расчетов на примере волны s_0 , приведена на рис. 7, г.

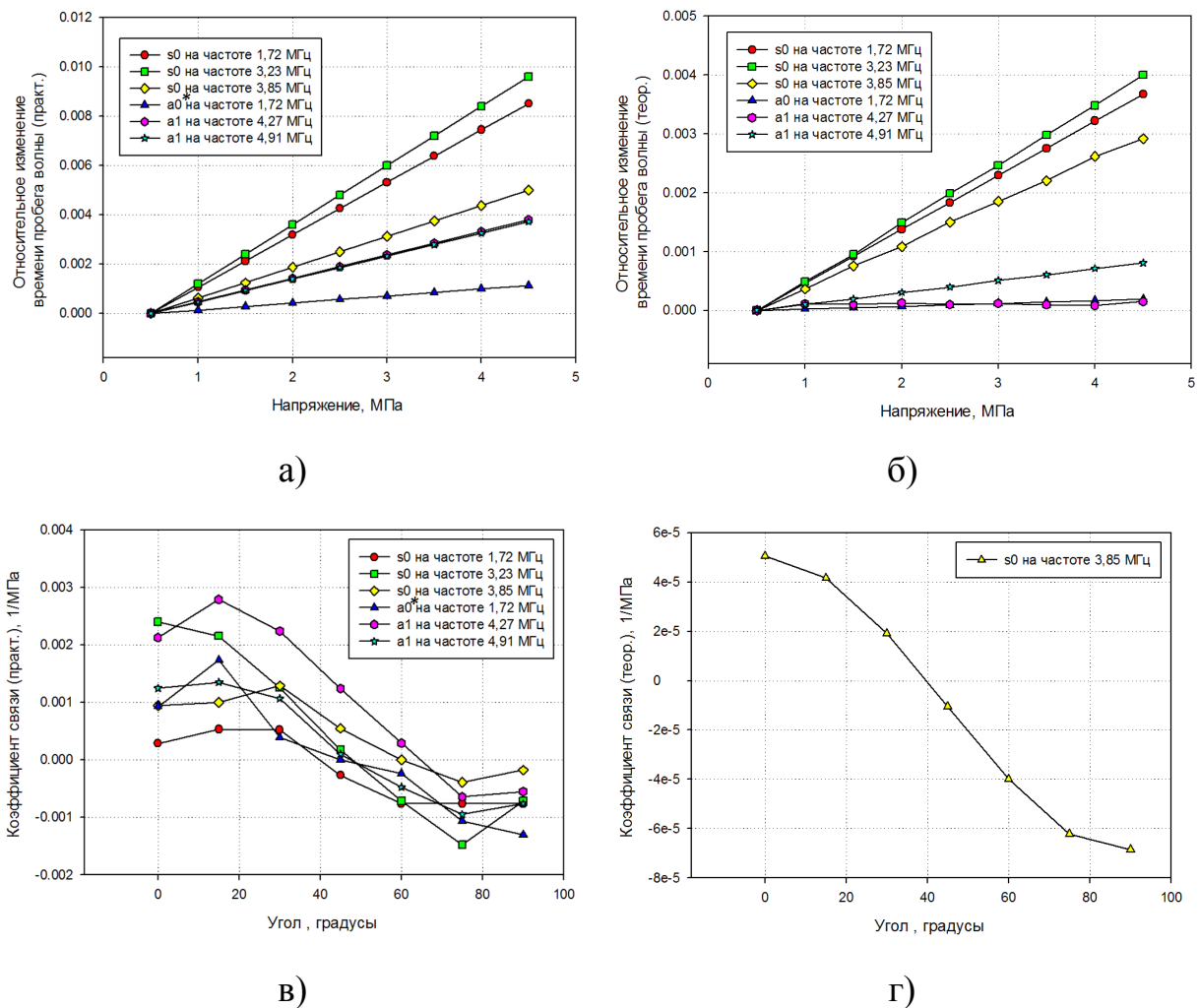


Рис. 7. Результаты акустомеханических исследований (а, в) и теоретических расчетов (б, г)

Заключение

В работе приведена математическая модель распространения нормальных волн в пластине толщиной 0,5 мм, из сплава АМгб, подвергнутой одноосному растяжению. Анализ результатов программной реализации модели показал, что:

- зависимости относительных изменений фазовой и групповой скоростей имеют линейный характер;
- моды демонстрируют различную чувствительность к напряжению;
- существует частота, при которой мода s_0 не чувствительна к изменению напряжения.

Приведен способ экспериментального определения зависимостей относительного изменения групповых скоростей от величины приложенного напряжения. Установлено, что данная зависимость имеет характер близкий к линейному. Экспериментальные результаты для моды s_0 в части градации чувствительности к напряжению на различных частотах совпадают с теоретическими.

Характер экспериментальной зависимости коэффициента акустоупругой связи от величины угла между вектором распространения волны и направлением напряжения совпадает с теоретической. Из графиков также видно, что при одноосном растяжении, при угле θ больше 45° коэффициент связи меняет свой знак (до 45° групповая скорость увеличивалась, после 45° - уменьшалась).

Значения относительных изменений групповых скоростей и коэффициентов акустоупругой связи, полученных экспериментально, отличаются от теоретических значений. Различия могут быть связаны с несовпадением расчетных параметров пластины с фактическими, наличием ошибок численного решения, наличием погрешностей средств измерений.

Литература

- 1 Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Неразрушающий контроль: Справочник: в 8 т. под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3. Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение. 2008. С. 864.
- 2 Никитина Н.Е. Акустоупругость. Опыт практического применения. Н. Новгород: ТАЛАМ. 2005. С. 208.
- 3 Анисимов В.А., Каторгин Б.И., Куценко А.Н. и др. Неразрушающий контроль: Справочник: в 8 т. под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 4: В 3 кн. Кн.1. Акустическая тензометрия. М.: Машиностроение. 2006. С. 736.
- 4 Муравьева О.В., Муравьев В.В. Методические особенности использования SH-волн и волн Лэмба при оценке анизотропии свойств листового проката // Дефектоскопия. 2016. №7. С. 3–11.
- 5 Викторov И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея-Лэмба в технике. М.: Наука, 1966. С. 169.
- 6 Pao Y.-H., Gamer U. Acoustoelastic waves in orthotropic media // J. Acoust. Soc. Amer. 1985. Vol. 77, P. 806-812.

7 Gandhi N. Determination of Dispersion Curves for Acoustoelastic Lamb Wave Propagation, Master's Thesis, Georgia Tech, 2010.

8 Драгунов Ю.Г. Марочник сталей и сплавов. 5-е изд., стереотипное. / Ю.Г. Драгунов, А.С. Зубченко, Ю.В. Каширский и др.; М.: Инновационное машиностроение. 2016. С. 1216.

9 Исхужин Р.Р., Атавин В.Г. Определение оптимального угла возбуждения волн Лэмба с применением фазированной антенной решетки // XXI Всероссийская конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике: сборник трудов. М.: издательский дом «Спектр». 2017. С. 95–98.

10 Исхужин Р.Р., Борисов В.Н., Атавин В.Г. и др. Ультразвуковой контроль сварного шва тонкостенной титановой оболочки с индикатором непровара // Дефектоскопия. 2021. №2. С. 24–32.

УДК 621.791.052.539.4.014

ИНФОРМАЦИОННАЯ ЭНТРОПИЯ В ЗАДАЧЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЯ МАТЕРИАЛА С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Г.А. Бигус¹, д.т.н.; А.Б. Счастливцев¹;

Г.М. Кононов²

INFORMATION ENTROPY IN THE PROBLEM OF MATERIAL DAMAGE RESEARCH USING THE ACOUSTIC EMISSION METHOD

G.A. Bigus¹, Doctor of Technical Sciences; A.B. Schastlivtcev¹;

G.M. Kononov²

schastlivtcev@bmstu.ru

¹*МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва*

¹*Bauman Moscow State Technical University, Moscow*

²*ООО «Диаформ», г. Москва*

²*ООО "Diaform", Moscow*

Аннотация

В работе рассматривается задача идентификации степени поврежденности материала стального образца с помощью информационной энтропии акустической эмиссии (АЭ). Акустическая эмиссия, используемая для изучения развития повреждения, получена при испытании образцов на одноосное растяжение. Приведены результаты исследования изменения информационной энтропии потока акустической эмиссии в ходе нагружения стального образца. Эволюция энтропии акустической эмиссии демонстрирует устойчивую тенденцию роста в течение всего эксперимента. В данном исследовании для оценки степени поврежденности материала объекта контроля предлагается новый качественный параметр, основанный на информационной энтропии распределения амплитуды сигналов и активности акустической эмиссии.

Ключевые слова:

акустическая эмиссия, информационная энтропия, статические испытания, повреждение.

Abstract

The paper considers the problem of identifying the degree of damage to the steel sample material using the information entropy of acoustic emission (AE). The acoustic emission used to study the development of damage was obtained by testing samples for uniaxial tension. The results of the study of changes in the information entropy of the acoustic emission flux during loading of a steel sample are presented. The evolution of the entropy of acoustic emission demonstrates a steady growth trend throughout the experiment. In this study, to assess the degree of damage to the material of the object of control, a new qualitative parameter is proposed based on the information entropy of the distribution of the amplitude of the signals and the activity of acoustic emission.

Keywords:

acoustic emission, information entropy, static tests, damage

Введение

Метод акустической эмиссии (АЭ) в настоящее время является одним из самых перспективных методов неразрушающего контроля и технической диагностики, поскольку непосредственно объединяет модели механики разрушения и методики неразрушающего контроля [1]. Однако несмотря на свою перспективность, практическое применение метода АЭ тормозится сложностью и неоднозначностью интерпретации результатов АЭ измерений. В настоящее время в большинстве методических документов на выполнение АЭ контроля отсутствуют количественные критерии оценки состояния объекта. Примерами могут служить стандарт ASTM E569/E569M-13, где в течение более 20 лет источники АЭ делятся на три класса: неактивный, активный и критически активный. При этом, активный источник – тот, активность которого непрерывно увеличивается при увеличении параметра нагружения. Аналогичные критерии применяются в других стандартах ASTM и отечественных документах. Многосвязность и многомерность процесса АЭ-контроля существенно усложняет поиск и формализацию оценки выявляемых сигналов, поэтому на настоящий момент процесс проведения АЭ контроля и главное интерпретация результатов испытаний производится оператором в соответствии со своими навыками, опытом и интуицией. Эта отличительная способность оператора подводит к идее создания нового направления в области автоматизированного АЭ-контроля, которое позволило бы перенести выполнение функции анализа полученных данных АЭ на машинную часть системы. Явление акустической эмиссии сопровождает процесс изменения состояния материала и описывается

поток значений параметров акустической эмиссии (рис. 1). Формализация процесса интерпретации потока значений параметров акустической представляется возможной путем параметризации данного процесса.

Исходя из порогового принципа, регистрируемые АЭ данные представляют собой не непрерывный сигнал, а последовательность значений параметров акустико-эмиссионного импульса, получаемую непосредственно в ходе эксперимента или испытаний - временной ряд значений информативных параметров АЭ (рис. 1). То есть последовательность пар измеренных величин, одна из которых является временем, вторая величина имеет значение соответствующей величины параметра акустической эмиссии.

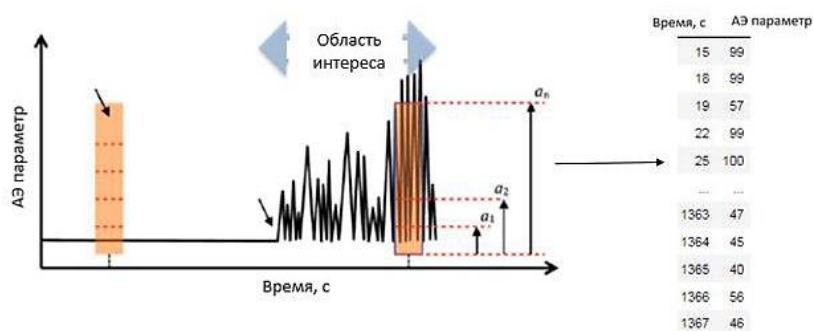


Рис.1. Временной ряд значений параметров акустической эмиссии

Эти соображения позволяют предложить критерий выявления перехода от одной стадии деформирования к другой – это относительное изменение статистических характеристик распределения параметров потока АЭ импульсов. Другими словами, момент перехода от одной стадии развития поврежденности зоны контроля к другой может быть определен моментом нарушения характера потока АЭ данных [2].

При этом наиболее важным представляется выбор идентификационного параметра, который должен быть как высокочувствителен к изменению АЭ процессов. В работе [2] в качестве такого параметра предлагается использование распределения амплитуд сигналов. В тоже время данный параметр не позволяет оценить степень роста темпа нарушения целостности конструкции, в качестве дополнительного информационного параметра было предложено рассмотреть показатель активности АЭ.

В тоже время явление акустической эмиссии представляет собой стохастический процесс и следовательно временной ряд значений параметров акустической эмиссии так же имеет стохастическую природу. Это обстоятельство накладывает серьезные ограничения на использование традиционных методов обработки акустико-эмиссионной информации. Опираясь на результаты работы [1] в качестве параметра,

позволяющего количественно охарактеризовать последовательность данных АЭ является информационная энтропия H .

$$H = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i \quad (1)$$

где H – информационная энтропия; $p(x)$ – функция вероятности; где $p(x_i)$ – вероятность определенного значения x_i , присутствующего в сообщении с n возможными состояниями.

В рамках данной работы была проведена энтропийная обработка значений информативных параметров потока сигналов акустической эмиссии, сопровождающего процесс повреждения стального образца при одноосном растяжении.

Предпосылка данного исследования заключается в том, что развитие поврежденности материала стального образца (пластическая деформация, микротрещинообразование и др.) является одной из форм структурного беспорядка, которая проявляется в изменении характеристик сигналов акустической эмиссии и может быть количественно оценена с использованием информационной энтропии. Соответственно, в рамках данного исследования мы используем информационную энтропию в качестве функции распределения, которая зависит от распределения вероятностей измерений, а не от каждого конкретного значения.

Методика эксперимента

В эксперименте были поставлены следующие задачи:

1. Исследовать параметры акустической эмиссии, сопровождающей процессы деформирования и микротрещинообразования на стальных образцах.
2. Построить сопряженные графики зависимостей параметров АЭ от этапов нагружения, упругопластического перехода, момента достижения предела текучести в материале образцов (распределение амплитуд сигналов, активность).
3. Провести энтропийную обработку потока значений параметров акустической эмиссии за время испытаний образца.

Методы выполнения поставленных задач:

Исследования были проведены на образцах типа «лопатка» размерами $330 \times 50 \times 10$. Количество образцов – 5 шт.

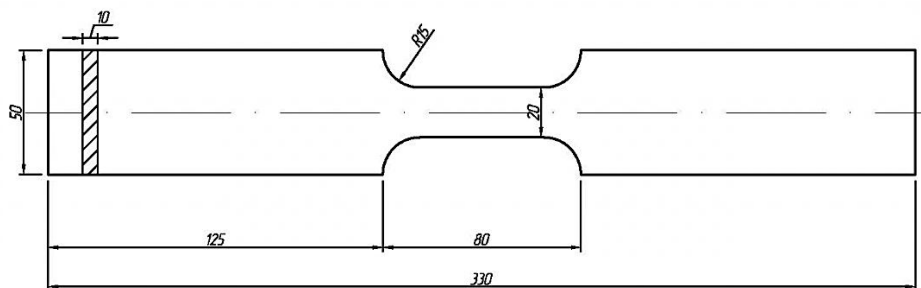


Рис. 2. Эскизы образцов для испытаний: образец из основного металла

Предварительно были проведены испытания на определение реальных механических характеристик материала подготовленных образцов. Результаты измеренных значений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Механические свойства образцов из стенки трубы

Условный предел текучности, (σ_T , МПа)	Временное сопротивление, (σ_B , МПа)	Относительное удлинение, δ , %
289–305	434–439	25–27

Методически для определения акустико-эмиссионных характеристик металла образца на расстоянии 25 мм с каждой стороны от срединной плоскости устанавливались преобразователи акустической эмиссии (ПАЭ). Установка ПАЭ на образец выполнялась через слой контактной смазки «Литол-24» и с помощью клейкой ленты (рис. 3). В качестве ПАЭ применялись полосовые датчики GT-200 (ООО «ГлобалТест») с линейной полосой пропускания 50–550 кГц.

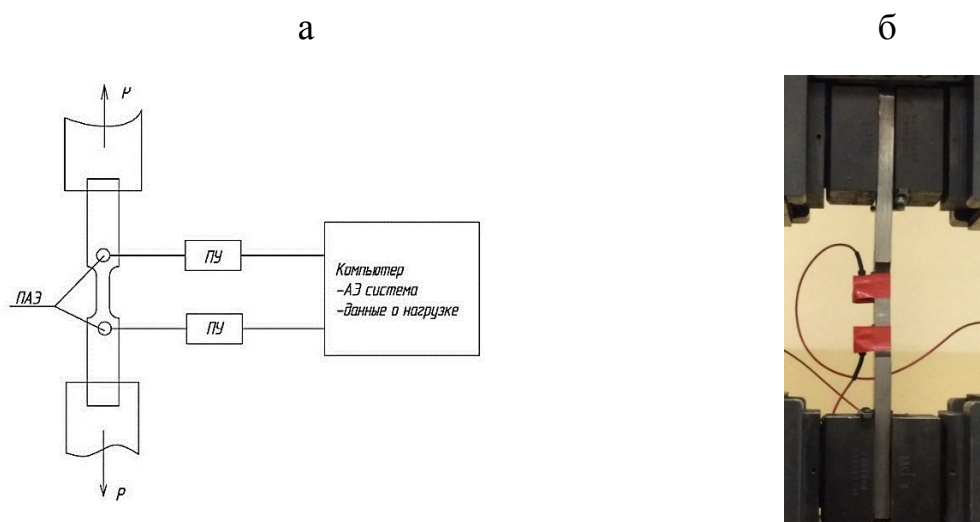


Рис. 3. а – схема проведения эксперимента;
б – образец с установленными ПАЭ в испытательной машине

Для приема и обработки данных использовалась АЭ-система A-Line 32D (ООО «ИНТЕРЮНИС»). Основные технические характеристики системы A-Line 32D приведены в табл. 2.

Таблица 2

Основные технические характеристики АЭ-системы A-Line 32 D

Наименование параметра	Данные
Рабочий частотный диапазон, кГц	20–500
Амплитудный диапазон, дБ	120
Входной импеданс АЭ канала, Ом	50
Максимальная скорость регистрации в канале, событий/с	8000–10000

Образец в испытательной машине подвергался одноосному растяжению и доводился до полного разрушения с непрерывной записью параметров акустической эмиссии.

Параметры нагружения испытываемого образца:

Применяемая скорость нагружения при одноосном растяжении – 0,5 кН/с.

Шаг нагружения – 5кН, выдержка на площадках нагружения – 50 с.

По результатам проведенных испытаний для партии образцов были получены графические результаты изменения выбранных информативных параметров АЭ, сопровождающие процесс накопления поврежденности в образце – распределение амплитуд сигналов и активности АЭ (рис. 4).

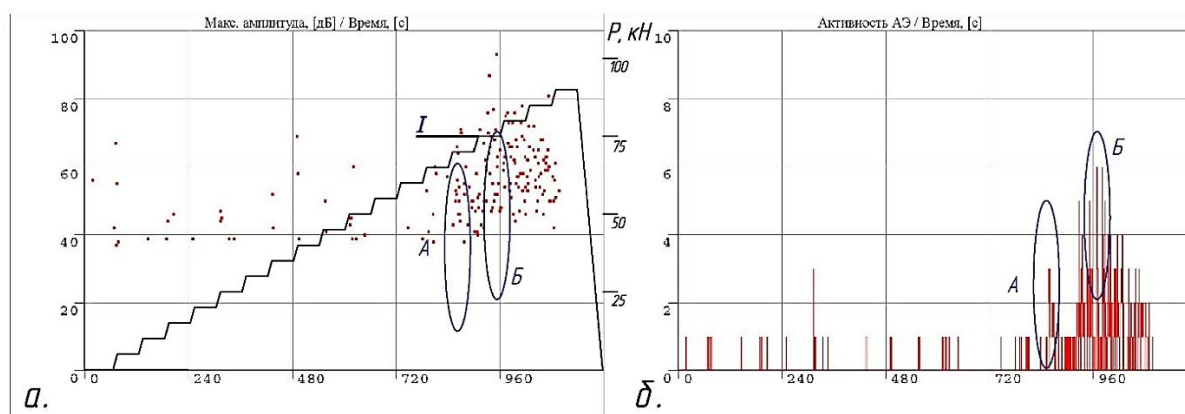


Рис. 4. а – зависимость амплитуд сигналов АЭ от времени, $A \propto t$; б – зависимость активности АЭ от времени

На диаграмму изменения амплитуды сигналов АЭ (рис. 4, а) наложен ступенчатый график изменения испытательной нагрузки. На графике нагрузки нанесена опорная линия I , которая соответствует уровню нагрузки, при котором в данном образце достигается расчетное значение условного предела текучести материала $\sigma_{0,2} \approx 290 \text{ МПа}$.

Анализ сопряженных графиков зависимостей АЭ параметров показал, что момент упругопластического перехода материала хорошо фиксируется на всех временных зависимостях. Данный переход на графике мы обозначим областью A , который соответствует 842 с проведения испытаний. При переходе через границу области A фиксируется начало отчетливого накопления сигналов АЭ.

Стоит отметить, что момент, когда все сечение образца подвергается пластической деформации, уровень нагрузки I , соответствует области B , 945 с испытаний. Очевидно, что поток сигналов, который фиксируется от 842 до 945 с испытаний связан с локальными источниками пластической деформации, возникающих на участках концентрации напряжений по сечению образца. В области B наблюдается максимум амплитуды сигналов АЭ, который достигает значения 87 дБ. Максимальный уровень амплитуды устойчиво фиксируемого потока сигналов АЭ (более 3-х сигналов заданного уровня) при пластической деформации соответствует значению 77 дБ. Момент перехода в область B наблюдается максимум активности АЭ (рис. 4, б), что говорит нам о высокой скорости развития разрушения. На всей площадке текучести наблюдаются всплески активности АЭ.

Все испытываемые образцы при разрушении давали косой слом, ориентированный под углом около 45° по отношению к растягивающей силе (рис. 5), что говорит о развитии разрушения по вязкому механизму, сопровождающийся интенсивной пластическим течением в сечении образца.



Рис. 5. Характерный вид разрушения образца

Это явление хорошо фиксируется на графиках изменения амплитуды, во всей временной области испытания от зоны А происходит лавинообразное накопление сигналов акустической эмиссии с амплитудой, превышающей 54 дБ даже на площадках выдержки.

Методика проведения энтропийной обработки:

Обработка записанных параметров акустической эмиссии (рис. 4) производилась по выделенным фреймам, соответствующим площадкам нагружения – 60 с (10 с – подъем нагрузки, 50 с – выдержка). Алгоритм обработки акустического потока приведен на рис. 6.

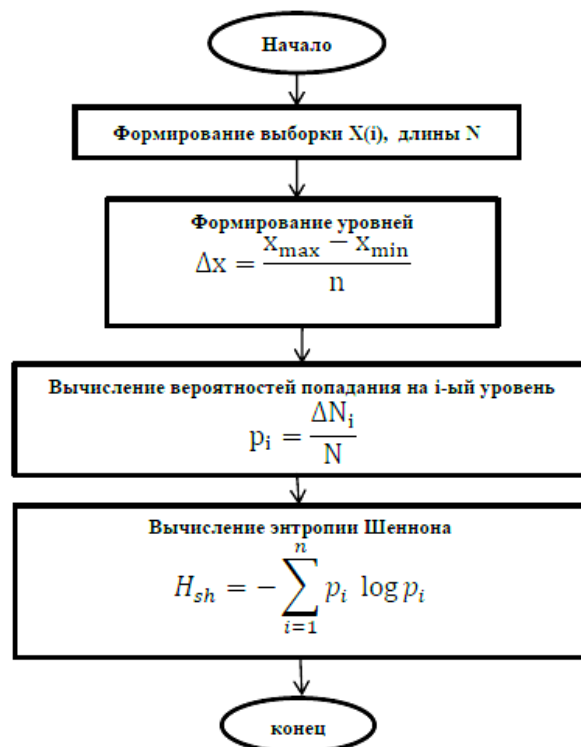


Рис. 6. Алгоритм расчета энтропии потока сигналов АЭ

Расчет информационной энтропии для каждого испытанного образца проводился в специально подготовленной расчетной программе в Python:

Шаг 1. Сигналы, записанные системой в виде временного ряда – содержащего значения параметров акустической эмиссии, были скопированы в электронную таблицу – временной ряд;

Шаг 2. Электронная таблица, содержащая значение распределение амплитуд была импортирована в Scientific Python Development Environment (Spyder 4.0.1). По предварительно написанному программному коду было получено дискретное распределение вероятностей последовательности параметров акустической эмиссии.

Шаг 3. Из дискретного распределения вероятностей амплитуд был проведен расчет энтропии АЭ по формуле (1).

К недостаткам расчета информационной энтропии, проведенного согласно рассмотренного алгоритма (рис. 6), является ее нечувствительность к импульсным значениям временного ряда, поэтому для учета подобных форм изменения в данной работе предложено выполнить расчет второй выборочной информационной энтропии. Для расчета второй выборочной энтропии также используется формула (1), в которой вероятностная мера p_i рассчитывается по частоте встречаемости значений временного ряда:

$$p_i = \frac{n_i \cdot x_j}{\sum_{j=1}^N x_j} \quad (2)$$

В результате мы получаем численный индекс, характеризующий наличие в сигнале импульсов. Повышенное значение второй выборочной энтропии, близкое к максимальному, указывает на спокойное течение процесса. Малые же значения, указывают на беспокойное, взрывоопасное течение. Расчет второй выборочной энтропии проводим для активности акустической эмиссии.

Результаты исследования и обсуждение

Анализируемое распределение амплитуд сигналов и значение активности сигналов были обработаны по предложенному алгоритму энтропийной параметризации.

Результаты параметризации для распределения амплитуд сигналов приведены на рис. 7. Был рассчитан общий индекс для стадии упругого поведения материала, который рассчитывался для временной выборки, соответствующей упругому поведению материала образца, индекс для упругопластического перехода и индекс для стадии вязкого разрушения.

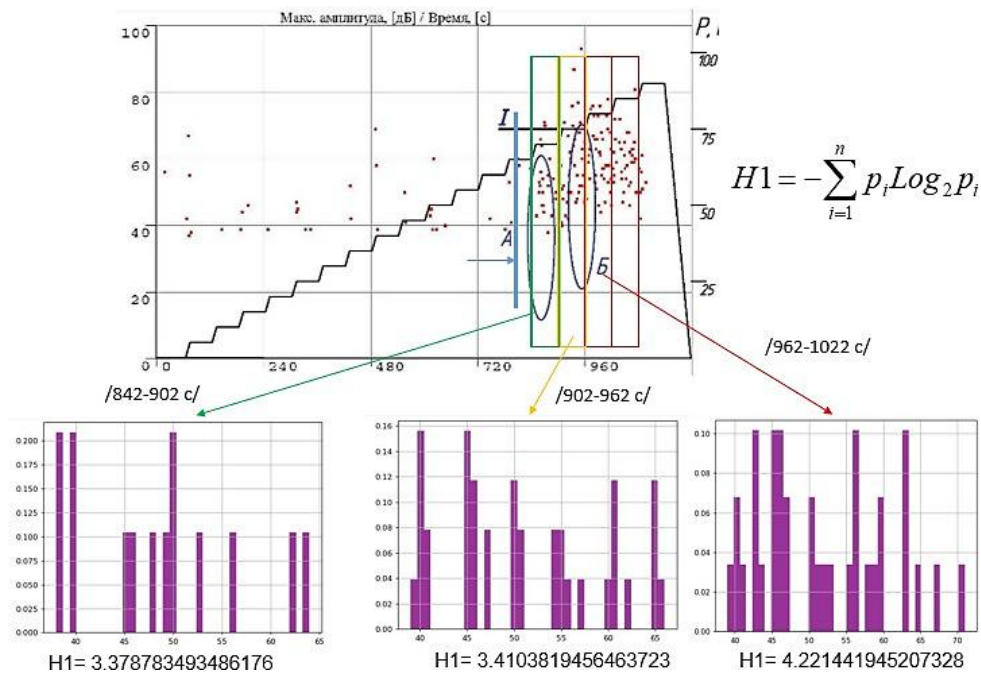


Рис. 7. Расчет индексов состояния для распределения амплитуд

Упругая область работы материала образца характеризует собой поведение бездефектного участка испытываемой конструкции под нагрузкой. Пластическая деформация всего сечения, характеризует процесс разрыва стенки объекта по всему сечению. Упругая область работы материала образца демонстрирует нам участок нагружения объекта при испытательном нагружении, т. е. до предела текучести. Участки пластической деформации – это развитие повреждений в стенке объекта.

Оценка стабильности процесса проводилась по расчету информационной энтропии для активности акустической эмиссии (рис. 8).

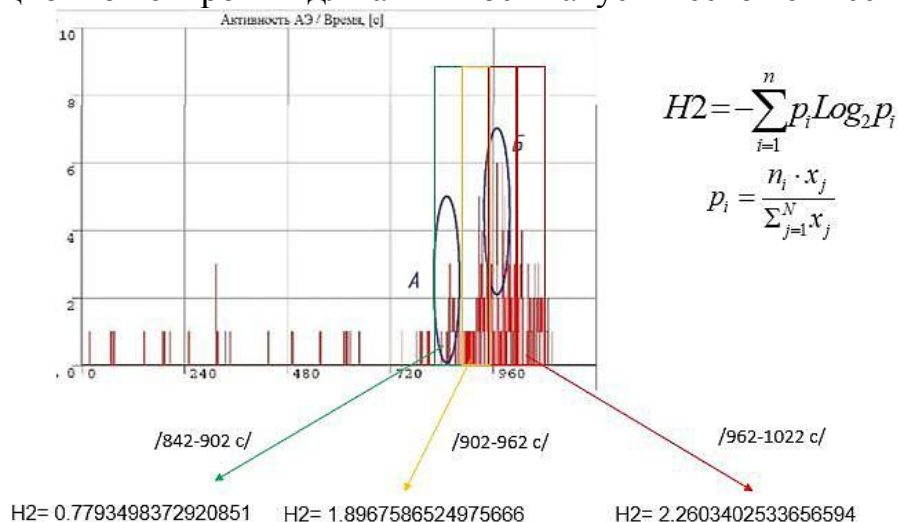


Рис. 8. Расчет индексов состояния для активности АЭ

По результатам проведенных расчетов параметров АЭ было предложено ввести новый информационный параметр акустической эмиссии – индекс повреждения конструкции – D . Графическое изображение индекса приведено на рис. 9. Индекс повреждения позволяет поставить в соответствие каждой степени поврежденности исследуемого материала числовое значение. Составляющими индекса повреждения являются средняя амплитуда сигналов, информационная энтропия распределения амплитуд, информационная энтропия активности сигналов акустической эмиссии, сопровождающих соответствующую стадию повреждения материала исследуемой конструкции.

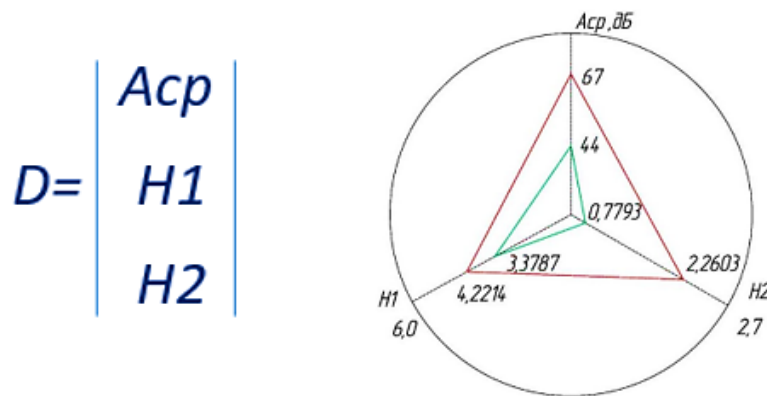


Рис. 9. Индекс повреждения металла образца

Выводы:

Введен новый информативный параметр состояния поврежденного материала диагностируемой конструкции – индекс повреждения, основанный на информационной энтропии параметров сигналов акустической эмиссии.

Для целей практического применения необходимо провести дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования, направленные на обеспечение полного понимания информационной энтропии акустической эмиссии, включая различные факторы, влияющие на ее характеристики.

Литература

1. Счастливцев А.Б., Бигус Г.А. Оценка повреждений конструкций с использованием информационной энтропии акустической эмиссии // Материалы и доклады VII Всероссийской конференции «Безопасность и мониторинг природных и техногенных систем» - Кемерово, 2020. С. 120–124.

2. Дорохова Е.Г., Ростовцев М.Ю. Применение информационного статистического АЭ-критерия // В мире неразрушающего контроля. 2007. № 2.
3. Shiotani, Nakanishi, Luo, Haya, Noda. Damage assessment in railway sub-structures deteriorated using AE technique. Research Institute of Technology, Railway Technical Research Institute (Japan).
4. Чумак О.В. Энтропии и фракталы в анализе данных. М. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2011. 164 с.

УДК 620.179.1

**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В КОНСТРУКЦИЯХ С
ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ:
ТЕОРИЯ, МЕТОДИКА И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ**

К.Д. Илларионов¹, Е.А. Прилипко¹; Н.В. Турбин¹

**INVESTIGATION OF INHOMOGENEITIES IN STRUCTURES
USING THE SPECKLE INTERFEROMETRY METHOD:
THEORY, METHODOLOGY AND PRACTICAL APPLICATION**

K.D. Illarionov¹; E.A. Prilipko¹; N.V. Turbin¹

illarionovkd@mai.ru, prilipkoea@mai.ru, turbinnv@mai.ru

¹*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва*

¹*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Moscow Aviation Institute (National Research University)", Moscow*

Аннотация

В данной работе рассматривается возможность применения шерографии в качестве перспективного метода неразрушающего контроля для оценки состояния агрегатов, конструктивно подобных и элементарных образцов из композиционных материалов. Проведена экспериментальная работа по опробованию метода шерографии на образцах из композиционных материалов. Показано, что метод позволяет эффективно выявлять структуру конструкции агрегатов, конструктивно-подобных и элементарных образцов, типовые внутренние неоднородности. Сделаны выводы о возможностях и ограничениях данного метода.

Ключевые слова:

композиционные материалы, неразрушающий контроль, шерография, дефект, образец

Annotation

This paper considers the possibility of using sherography as a promising method of non-destructive testing to assess the condition of aggregates, structurally similar samples and coupons made of composite materials.

Experimental work has been carried out to test the sherography method on samples made of composite materials. It is shown that the method makes it possible to effectively identify the structure and typical internal heterogeneities of aggregates, structurally similar samples coupons. Conclusions are drawn about the possibilities and limitations of this method.

Keywords:

composite materials, non-destructive testing, sherography, defect, sample

Введение

Композиционные материалы (КМ) имеют сложную структуру, большое количество несплошностей как в процессе производства, так и во время и после эксплуатации [1]. Технологические дефекты, такие как трещины, расслоения, инородные включения в элементах конструкции играют главную роль для оценки безопасности, при этом их детектирование оказывается проблематичным [2]. Каждый из известных методов неразрушающего контроля (НК), таких как ультразвуковой, радиографический, тепловой, имеет свои недостатки, преимущества, область применения, но ни один из них не является универсальным [3].

Одним из перспективных в настоящее время является метод шерографии, который позволяет проводить НК качества формования, сборки конструкций из КМ и их диагностики в процессе эксплуатации.

В существующих источниках литературы описывается принцип метода шерографии и подход к изучению различных типов образцов [4–7]. Недостатком является отсутствие базы данных с классификацией дефектов для определения поврежденности конструкции, конструктивно-подобных и элементарных образцов (КПО и ЭО). Необходимость в квалификации дефектов на критические и допустимые, сравнение шерографических изображений с результатами других методов НК, дающих более подробную информацию о типе и структуре неоднородности, позволит систематизировать и оперативно определять дефекты на элементах конструкции.

Данное исследование позволит создать базу дефектов для конструкций и дать оценку технологическому и эксплуатационному состоянию изделий.

Основная часть

Целью работы является получение экспериментальных данных о процессах деформирования и разрушения агрегатов, КПО и ЭО из материалов аэрокосмического назначения, с перспективой создания базы данных, классификации дефектов с различной степенью поврежденности изделия.

Методом шерографии возможно исследовать КМ, преимуществом которых является возможность уменьшения массы конструкции при сохранении прочностных характеристик.

Материалы, исследуемые методом шерографии: сотовые КМ, сэндвич-панели, ламинаты из армированного углеродным волокном пластика, металлические соты, резиновые компоненты, металлические конструкции, керамика, соединения металл-металл.

Шерография – оптический метод НК, с помощью которого дефекты материалов могут быть определены посредством измерения и анализа поверхностных деформаций [8]. Деформации образуются как ответная реакция внутренней структуры на внешнее воздействие. Совмещая изображение объекта в исходном состоянии с изображением, взятым в возбужденном состоянии, можно определить изменение любой заданной точки изображения.

В ходе проведения шерографии поверхность объекта испытания засвечивается лазерным излучением. Отраженное от поверхности объекта излучение принимается CCD-камерой, оснащённой «сдвигающей оптикой», которая проецирует изображение объекта на матрицу камеры дважды. Каждая точка объекта является дважды отображаемой на CCD-матрице [9].

Шерография является гибким методом с точки зрения применяемых способов воздействия для возбуждения реакции внутренней неоднородности (тепловое, вакуумное, вибрационное). Оптимальный тип воздействия применяется в зависимости от структуры и материала объекта контроля, а также от размера, положения (глубины залегания) и типа дефектов.

После воздействия на объект исследования, лазерное излучение, отражённое каждым участком поверхности, также изменяется. Эти изменения обнаруживаются системой. Это даёт представление о характере дефекта через его реакцию на поверхность.

Метод реализуется с помощью шерографа, состоящего из оптического блока, совмещенного с блоком термического нагрева, и электронного блока, работающего под управлением ПК [9]. Оптический блок располагается на штативе в непосредственной близости от поверхности объекта.

Площадь обзора варьируется от типа и глубины залегания дефекта (от 150x150 мм до 500x500 мм). Данный диапазон зависит от отражающей способности поверхности объекта и мощности лазерной системы для подсветки, а также диапазона фокусировки оптики.

Математическое уравнение интенсивности на шерограмме, обнаруженной на каждом пикселе CCD - матрицы, имеет вид:

$$I = I_0(1 + \mu \cos(\varphi)) \quad (1)$$

где I – распределение интенсивности спекл-картины на CCD-матрице, I_0 – интенсивность срезаемых изображений, μ – амплитуда модуляции спекл-картины и φ представляет собой случайную разность фаз между рассеянными из двух точек на поверхности объекта.

Когда объект слегка деформирован, распределение интенсивности спекл-рисунка изменяется на I' , а разность фаз Δ обозначает деформацию поверхности, которая показана следующем уравнении:

$$I' = I_0(1 + \mu \cos(\varphi + \Delta)) \quad (2)$$

Путем добавления интерференционных спекл-паттернов, уравнения (1) и (2), полученные до и после возникновения деформаций, и применяя алгоритмы методов формирования сигнала, можно визуализировать изображения подповерхностных дефектов, описанных как:

$$|I_d| = |I + I'| = 2I_0 \left(\mu \sin\left(\varphi + \frac{\Delta}{2}\right) \sin\left(\frac{\Delta}{2}\right) \right) \quad (3)$$

Фазовый сдвиг позволяет определять разность фаз Δ путем с использованием управляемого фазосдвигающего зеркала в интерферометре Майкельсона. Для каждого состояния нагрузки снимаются четыре изображения интенсивности, каждое с дополнительной фазой $\pi/2$.

$$I_1 = I_0(1 + \mu \cos(\varphi + 0)) \quad (4)$$

$$I_2 = I_0 \left(1 + \mu \cos\left(\frac{\varphi + \pi}{2}\right) \right) \quad (5)$$

$$I_3 = I_0(1 + \mu \cos(\varphi + \pi)) \quad (6)$$

$$I_4 = I_0 \left(1 + \mu \cos\left(\frac{\varphi + 3\pi}{2}\right) \right) \quad (7)$$

Тогда фаза φ для ненагруженного тестового объекта определяется выражением:

$$\varphi = \arctan \frac{(I_2 - I_4)}{(I_3 - I_1)} \quad (8)$$

а для деформированного тест-объекта с напряжённостями по формуле

$$\varphi + \Delta = \arctan \frac{(I'_2 - I'_4)}{(I'_3 - I'_1)} \quad (9)$$

Это позволяет определить разность фаз Δ . Деформации поверхности в направлении оси z (перпендикулярно поверхности детали) могут быть измерены с точностью от 2 до 20 нанометров в зависимости от окружающей среды или фонового шума. Аномалии на поверхности или подповерхностном уровне вызывают изменения теплового расширения, а в случае дефекта, встроенного в образец, возникают дополнительные эффекты изменения тепловых потоков из-за более высоких возникает теплопроводность в направлении волокон.

Объекты контроля

В виду отсутствия калибровочных образцов для опознания типа дефекта использованы типовые КПО, ЭО, агрегаты монолитной и сотовой структур. По полученным шерограммам создается база данных типовых дефектов с помощью которой определяются неоднородности на агрегатах механизации крыла. Основные дефекты, занесенные в базу данных представлены ниже.

Отслоение сот от обшивки в панели, скопление жидкости в трехслойной панели показано на рис. 1.

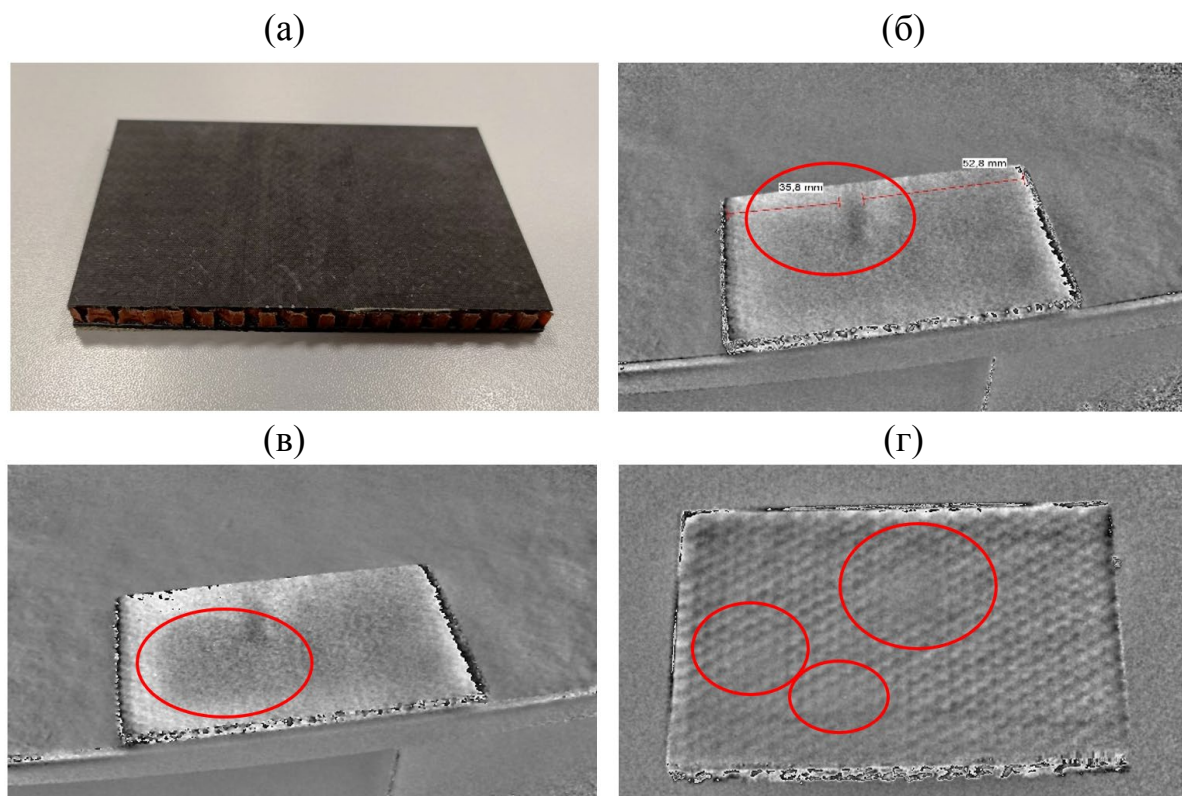


Рис. 7. Обнаружение жидкости методом шерографии: (а) – сотовый образец; (б) – место введения жидкости в образец; (в) – распределение жидкости; (г) – скопление жидкости

Эксплуатационные дефекты, в отличие от производственных, способны быстро прогрессировать, что может привести к деградации надежности конструкции. Например, влага, проникающая через трещину в матрице материала, вызывает его несплошность, сопровождаемое снижением модуля упругости (рис. 1). Расслоение материала ведёт к уменьшению прочности на сжатие, разрыву волокон и снижению предельной нагрузки на разрыв.

Отдельное внимание стоит уделить, слабозаметным ударным повреждениям (BVID – Barely visible impact damage). Причиной появления дефектов данного типа, является отсутствие у материалов пластических свойств.

Особенность заключается в том, что на поверхности после удара образуется слабозаметное повреждение, однако в объеме материала происходит процесс, показанный на рис. 2. Вследствие этого слабозаметные ударные повреждения опасны для конструкций, изготовленных из КМ. Обнаруженный дефект BVID методом шерографии на монолитном образце представлен на рис. 2.

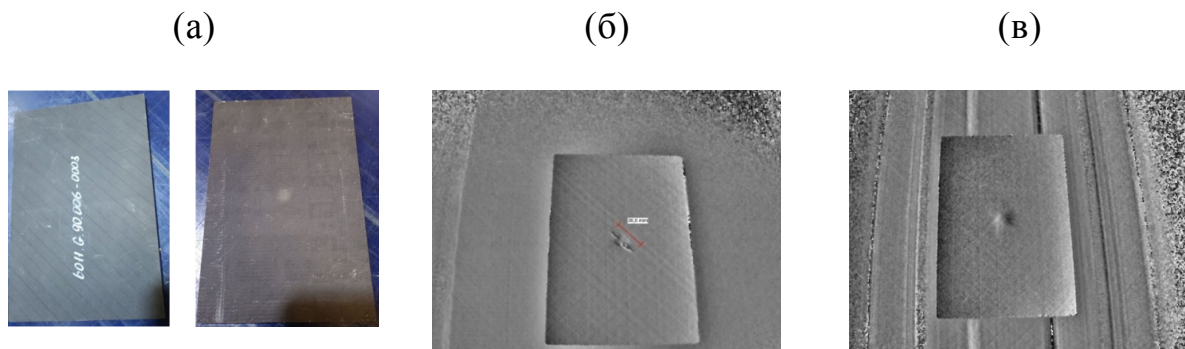


Рис. 8. Повреждение, обнаруженное методом шерографии:
(а) – монолитный образец; (б) – образец с повреждением типа BVID со стороны удара; (в) – монолитный образец с повреждением типа BVID с обратной стороны удара

Отремонтированные участки (заплаты) на нагруженных компонентах (рис. 3).

Исследование ремонтных заплат методом шерографии позволяет контролировать надежность соединения заплата с ремонтируемым участком, что в последствии дает возможность соотнести механические характеристики конструкции в этой зоне с механическими характеристиками неповрежденной части изделия (приводит к повышению качества ремонта).

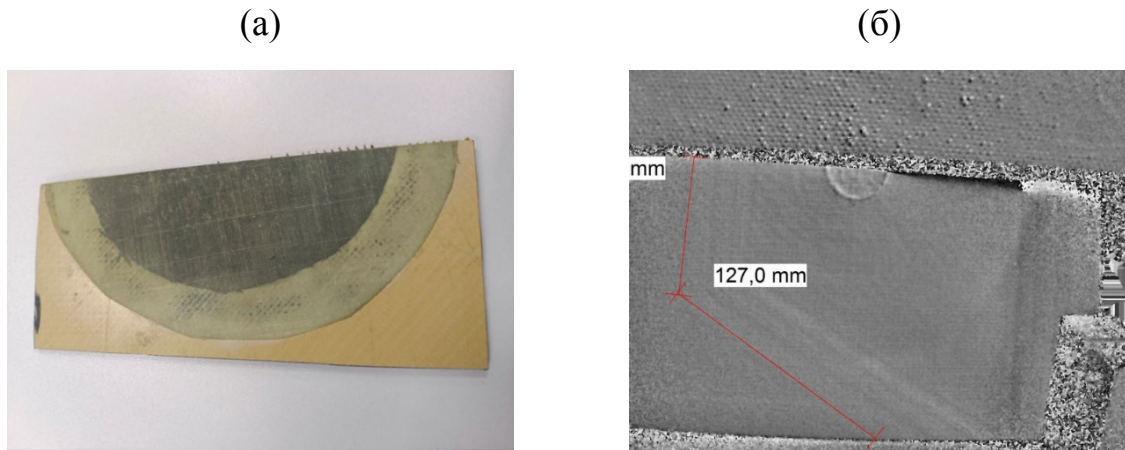
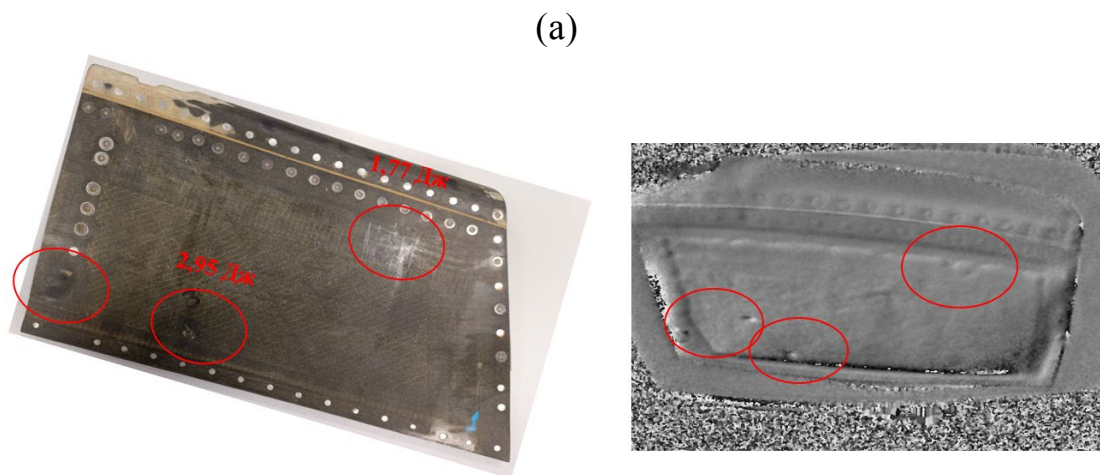


Рис. 9. Ремонтная заплат: (а) – сотовый образец с ремонтной заплатой; (б) – ударное повреждение в центре ремонтной заплаты и сбег слоев, вид спереди

Исследование методом шерографии позволяет оценить уровень элемента конструкции и выявить ударные повреждения, которые могут возникнуть в результате воздействия внешних сил.

Результаты исследования показали, что при сильных ударах элерон может быть поврежден, что приводит к нарушению его функциональности и, как следствие, к потенциальной опасности для безопасности полета. Такие повреждения могут быть обнаружены с помощью методов шерографии, что позволяет оперативно принять меры по ремонту или замене поврежденного элемента (рис. 4).



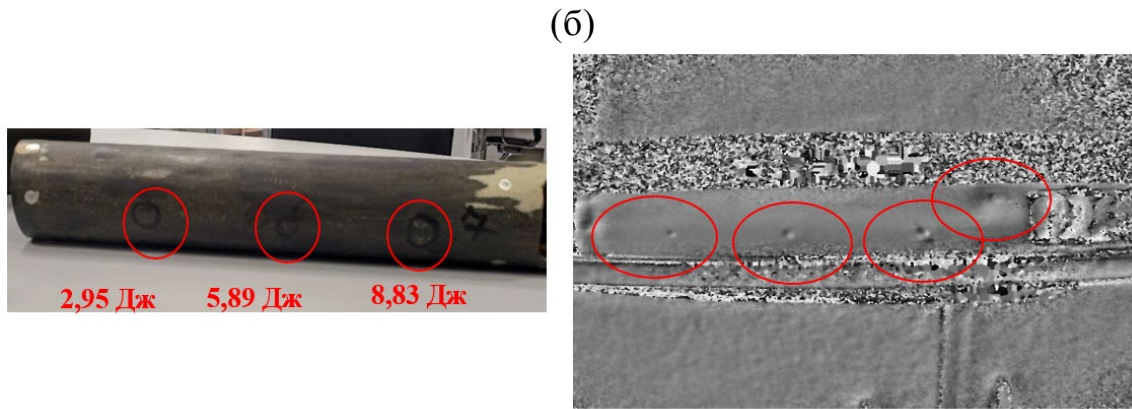


Рис. 10. Обнаруженные дефекты поврежденного элемента механизации: (а) – ударные повреждения – сверху, расслоение – снизу; (б) – ударное повреждение – слева, заклепка – справа

Использование метода шерографии для исследования кессона самолета после статических испытаний позволяет получить информацию о состоянии поверхности материала и выявить скрытые дефекты, которые могут привести к потенциальным проблемам в будущем. Результаты исследования позволяют оценить уровень повреждений, определить области наибольших напряжений и деформаций, а также выявить потенциальные проблемные зоны конструкции. Эти данные могут быть использованы для дальнейшей оптимизации конструкции, улучшения материалов и повышения безопасности эксплуатации самолета (рис. 5).

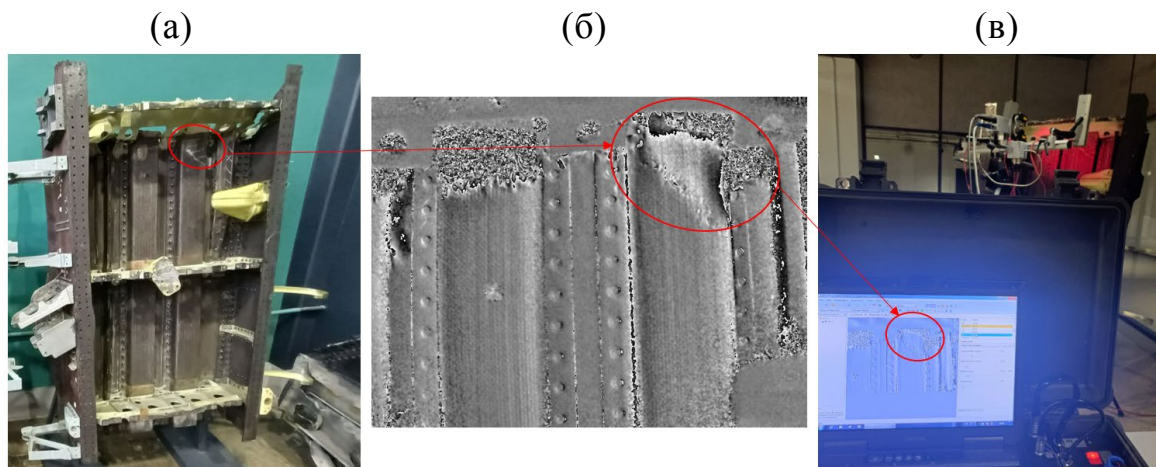


Рис. 11. Результаты исследования кессона методом шерографии: (а) – часть кессона крыла; (б) – отслоение, обнаруженное методом шерографии; (в) – проведение исследования методом шерографии

Заключение

Метод шерографии позволяет инспектировать криволинейные поверхности; измерять и анализировать данные большой области исследуемой поверхности ($\sim m^2$) в течение небольшого времени инспектирования; проводить измерения в режиме реального времени; применять измерительную систему, пригодную к использованию как на предприятии, так и в лабораторных условиях.

В существующих источниках в основном описывается сам метод шерографии и подход к изучению, но не существует базы данных для конструкций, КПО и ЭО из КМ, в том числе для тонкостенных конструкций после эксплуатации. Результаты данного исследования приводят к структуризации несплошностей и дефектов материалов для последующего создания базы данных дефектов в конструкции и дает оценку технологическому и эксплуатационному состоянию элементов конструкции.

По результатам работы по опробованию метода шерографии на образцах конструкции из КМ можно сделать вывод, что данный метод позволяет выявлять дефекты в виде расслоения, непрочности, трещины в сотовых конструкциях с обшивками из углепластика и в монолитных углепластиковых конструкциях. Для контроля деталей и узлов из КМ необходима дальнейшая отработка и накопление экспериментальных данных о характерных дефектах для каждого типа конструкции.

Список литературы

1. Onu A. D., Chibuzor I. R., Terwase A. S. Manufacturing advanced materials for aerospace application. An overview // Вестник науки и образования. 2018. № 18-1 (54). P. 41–55.
2. Mouritz A. P. Nondestructive inspection and structural health monitoring of aerospace materials // Introd. Aerosp. Mater. 2012. P. 534–557.
3. Dwivedi S. K., Vishwakarma M., Soni A. Advances and researches on non-destructive testing: A review // Materials Today: Proceedings. 2018. Vol. 5. № 2. P. 3690–3698.
4. Hung M. Y. Y., Shang H. M., Yang L. Unified approach for holography and shearography in surface deformation measurement and nondestructive testing // Optical engineering. 2003. Vol. 42. № 5. P. 1197–1207.
5. Бобко Ю. А., Синчугов И. С. Применение метода шерографии для дефектоскопии изделий из композиционных материалов // В мире неразрушающего контроля. 2016. Vol. 19. № 4. P. 4–7.
6. Vollen M. W. et al. Application of shearography techniques for vibration characterization and damage detection in sandwich structures. – Optonor as trondheim (Norway), 2005.

7. Waldner S., Goudemand N. Quantitative strain analysis with image shearing speckle pattern interferometry // Interferometry in speckle light: theory and applications. – Springer Berlin Heidelberg, 2000. P. 319–326.

8. Композиты полимерные. Шерография полимерных композитов, материалов внутреннего слоя «сэндвич»-конструкций и изготовленных намоткой сосудов, работающих под давлением: ГОСТ Р 56795-2015. введ. 01-01.2017. М.: Стандартиформ, 2016. 23 с.

9. Nevatecnology: официальный сайт. – Москва, 2022. URL: <https://nevatec.ru/> (дата обращения 06.03.2024).

УДК 620.179

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТОПОРОШКОВОГО
КОНТРОЛЯ НА ВЫЯВЛЕНИЕ ДЕФЕКТОВ В ДЕТАЛЯХ
ИЗДЕЛИЙ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ**

И.С. Леднев¹; Е.А. Ходакова¹

**THE INFLUENCE OF MAGNETIC PARTICLE INSPECTION
PARAMETERS ON THE DETECTION OF DEFECTS IN PARTS
OF THE PRODUCTS AEROSPACE INDUSTRY**

I.S. Lednev¹; E.A. Khodakova¹

mpndt@mail.ru

¹*Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ)*

¹*Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute» (NRC «Kurchatov institute» - VIAM)*

Аннотация

Доклад посвящен проблематике выявления дефектов при проведении магнитопорошкового контроля деталей в зависимости от изменчивости параметров и режимов контроля.

Реферат

Магнитопорошковый контроль позволяет обнаруживать дефекты шириной раскрытия порядка 1 мкм в различных ответственных деталях и изделиях, входящих в состав вертолетных рулевых и несущих винтов, самолетных шасси, а также ракетных и турбовентиляторных двигателей. В процессе проведения контроля могут произойти изменения, влияющие на выявление дефектов. Например, изменения режимов намагничивания или концентрации магнитного порошка в магнитных индикаторах. Также стоит обращать внимание на выбор магнитных индикаторов в зависимости от целей и объектов контроля. Перечисленные факторы могут снизить качество проводимого контроля.

Ключевые слова:

неразрушающий контроль, магнитный метод, магнитопорошковый контроль, параметры контроля, несплошности в деталях

Abstract

The report is devoted to the problem of detecting defects during magnetic particle inspection of parts, depending on the variability of parameters and control modes.

Essay

Magnetic particle inspection makes it possible to detect defects with an opening width of about 1 micron in various critical parts and products that make up helicopter steering and rotors, aircraft landing gear, as well as rocket and turbofan engines. During the control process, changes may occur that affect the detection of defects. For example, changes in magnetization modes or the concentration of magnetic powder in magnetic indicators. It is also worth paying attention to the choice of magnetic indicators depending on the goals and objects of control. These factors may reduce the quality of the control performed.

Keywords:

non-destructive testing, magnetic method, magnetic powder control, control parameters, discontinuities in details

Безопасная эксплуатация изделий аэрокосмической отрасли может быть обеспечена отсутствием дефектов в ее узлах, деталях и применяемых для их изготовления материалах. Различные методы неразрушающего контроля помогают увеличить безопасность на эксплуатируемых объектах.

Среди общего разнообразия используемых в авиа- и ракетостроении материалов доля магнитных сталей составляет около 8–15 %. Оценку качества поверхностного состояния данных материалов осуществляют магнитопорошковым методом неразрушающего контроля (МПК), основанным на анализе магнитных полей рассеяния с использованием в качестве индикатора ферромагнитного порошка или магнитной суспензии. Объектами МПК являются поверхностные дефекты и дефекты, расположенные на глубине до 2 мм [1].

Магнитопорошковому контролю подвергаются болты и корпуса, входящие в состав вертолетных рулевых и несущих винтов, основные детали самолетных шасси, обшивки ракетных двигателей, детали турбовентиляторных двигателей.

С помощью метода МПК можно выявлять трещины, волосовины и некоторые виды расслоений на поверхности объекта контроля (ОК). Параметром искомых несплошностей, принятым во всех отраслях и обозначающим степень чувствительности метода, является ширина раскрытия несплошности. В лабораторных условиях возможна индикация дефекта с шириной раскрытия менее 1 мкм и длиной от 0,5 мкм. На производстве метод МПК применяется для НК деталей или образцов на наличие несплошностей различной формы, в основном на поверхности ОК (рис. 1).

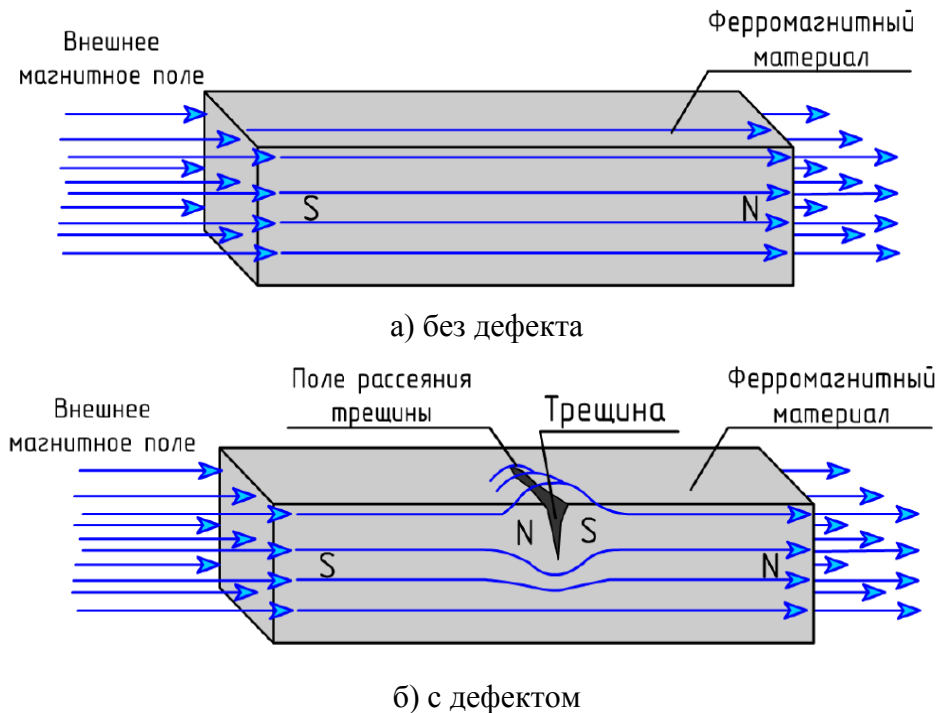


Рис. 1. Схема распределения магнитного поля по ОК

При проведении МПК контролер регистрирует неоднородность магнитного поля (поля рассеяния – рис. 2), появляющуюся в зоне дефекта во время намагничивания ОК, путем притяжения магнитных частиц индикатора, которым обрабатывают контролируемый объект, с последующим образованием индикаторного следа в виде валика. Визуально регистрируют выявление и геометрические параметры индикаторного следа, допускается применение оптических приборов или автоматических систем распознавания, фиксирования и анализа полученных дефектограмм.

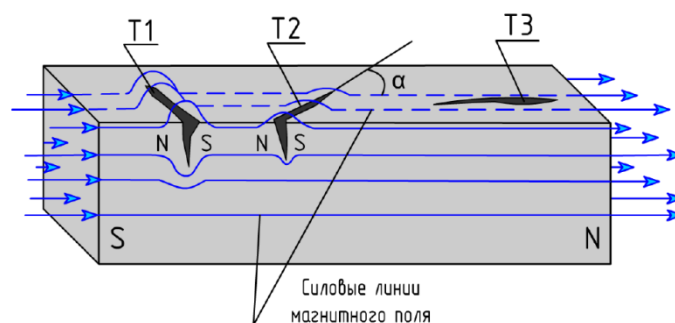


Рис. 2. Поля рассеяния над несплошностями.

Ферромагнитные материалы или ферромагнетики состоят из малых областей самопроизвольной намагниченности с линейными размерами порядка 0,001 мм, называемые доменами [2].

На частицу в поле рассеяния будут действовать (рис. 3):

F_z – затягивающая сила магнитного поля (пондеромоторная), направленная в область наибольшей плотности магнитных силовых линий, т.е. к месту расположения трещины;

$F_{тр}$ – сила трения;

F_T – сила тяжести;

F_A – сила выталкивающего действия жидкости (Архимедова сила);

$F_э$ и F_m силы электростатического и магнитного взаимодействия, возникающие между частицами;

F_p – результирующая сила, под действием которой частицы притягиваются к трещине и накапливаются над ней, образуя скопление порошка.

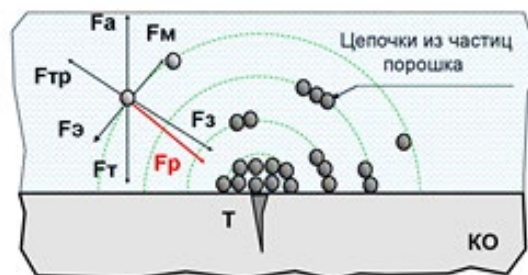


Рис. 3. Действующие силы на частицы магнитного индикатора

В ферромагнитных материалах из-за явления гистерезиса при уменьшении напряженности H магнитная индукция B убывает не по кривой первоначального намагничивания, а по кривой, лежащей несколько выше нее. Когда же внешнее магнитное поле исчезает совсем, то в ферромагнитном материале сохраняется некоторая остаточная индукция B_r , величина которой определяется магнитными свойствами материала и характером магнитных воздействий, предшествовавших рассматриваемому состоянию. Остаточная индукция B_r принимает максимальное значение в том случае, если ферромагнитный материал предварительно намагнитить до насыщения, а затем напряженность магнитного поля уменьшить до нуля.

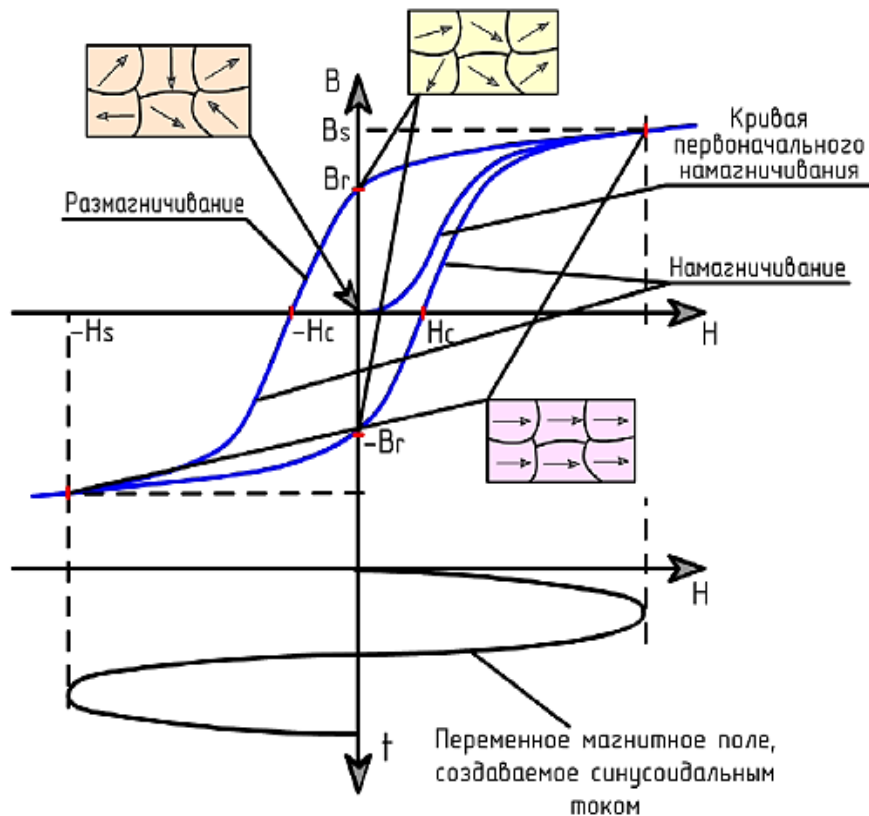


Рис. 4. Магнитный гистерезис

B_s – индукция технического насыщения.

H_s – напряженность магнитного поля, при которой достигается состояние технического магнитного насыщения материала образца.

B_r – остаточная индукция, т. е. оставшаяся в детали после снятия поля H_s (остаточная намагниченность).

Индукция B обращается в ноль лишь под действием поля H_c , имеющего направление, противоположное полю, вызвавшему намагничивание. Напряженность H_c называется коэрцитивной силой.

Величины H_s , B_r , H_c являются основными магнитными характеристиками ферромагнетика и приводятся в справочниках.

Петля гистерезиса, достигающая области насыщения называется предельной (максимальной) петлей гистерезиса.

Магнитные характеристики существенным образом зависят не только от марки стали (химического состава), но и от режима термообработки.

Индикации магнитного порошка непосредственно связаны с интенсивностью магнитной коагуляции. На интенсивность магнитной коагуляции оказывают влияние следующие факторы:

- концентрация магнитного порошка;
- магнитные характеристики порошка;
- вязкость дисперсионной среды;

- напряженность намагничивающего поля;
- длительность действия намагничивающего поля.

Картину из осевшего порошка называют индикацией, индикаторным рисунком или следом.

В авиационной отрасли для проведения магнитопорошкового контроля руководствуются ГОСТ Р ИСО 9934-1, ГОСТ Р ИСО 9934-2, ГОСТ Р ИСО 53700-2009 (ИСО 9934-3:2002), ГОСТ Р 56512-2015 и РТМ 1.2А.020-2011, который разработан специалистами ВИАМ.

Для оценки работоспособности магнитопорошковых дефектоскопов и магнитных индикаторов применяют контрольные образцы – детали или специальные изделия с искусственными или естественными дефектами типа несплошности материала в виде узких плоских пазов, цилиндрических отверстий или трещин различного происхождения.

В настоящий момент, для проверки качества магнитных индикаторов на территории РФ следует применять контрольные образцы, указанные в ГОСТ Р 56512 (приложение В) или в ГОСТ Р ИСО 9934-2. Работоспособность магнитных индикаторов и дефектоскопов оценивают путём выявления дефектов на образцах с применением режимов, указанных в сопроводительной документации или рассчитанных исходя из магнитных характеристик материала и размеров контрольных образцов. Магнитный индикатор и дефектоскоп считаются пригодными к использованию, если дефекты на образце выявлены, а индикаторный рисунок соответствует дефектограмме.

Эталонный образец типа 1 представляет собой постоянный магнит с двумя видами трещин: грубыми трещинами, полученными шлифовкой, и мелкими – коррозионным растрескиванием (рис. 5). Образец применяется для проверки работоспособности магнитных индикаторов.

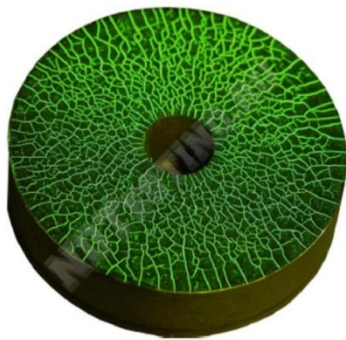


Рис. 5. Образец тип 1



Рис. 6. Образец тип 2

Сравнительный образец тип 2 состоит из двух притёртых стальных блоков, стянутых винтами, с искусственным дефектом между ними (рис. 6). С торцевых сторон расположены постоянные магниты, которые создают магнитные поля рассеяния, уменьшающиеся по мере увеличения расстояния от магнитов. Чувствительность магнитного индикатора определяется длиной индикаций над дефектом.

Для оценки работоспособности дефектоскопов, имеющих электроконтакты или электромагнит с ярмом, применяют образец МО-1 (рис. 7), изготовленный по ГОСТ Р 56512.



Рис. 7 – Образец МО-1

Образец выполнен в виде плоской стальной пластины с одним поверхностным дефектом и двумя подповерхностными дефектами в виде отверстий, которые находятся на различной глубине от рабочей поверхности. Поверхностный дефект представляет собой вставку с узким плоским пазом.

Для оценки работоспособности дефектоскопов полюсного намагничивания с применением соленоида или кабеля, намотанного в виде соленоида, применяют контрольные образцы МО-2 (рис. 8) и МО-3 (рис. 9), изготовленные по ГОСТ Р 56512-2015. Образец МО-3 также применяется для проверки дефектоскопов с магнитным ярмом (например, электромагнитом).

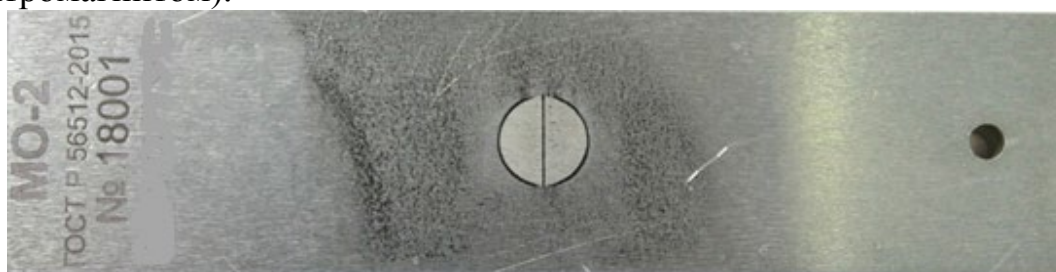


Рис. 8. Образец МО-2

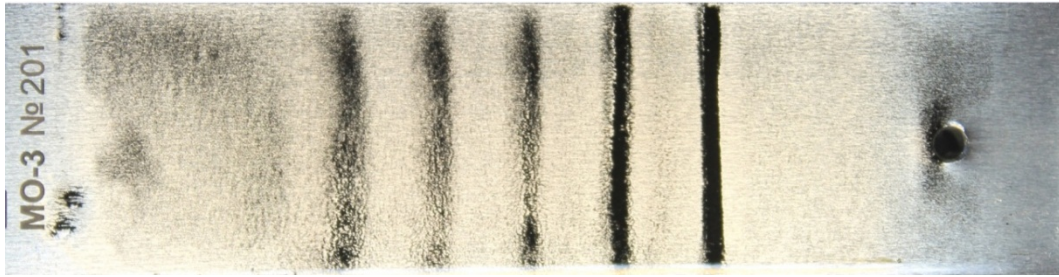


Рис. 9. Образец МО-3

Образец МО-2 выполнен в форме бруска и содержит вставку с дефектом в виде плоской несплошности материала. Образец МО-3 выполнен в виде стального бруска, содержащего пять подповерхностных дефектов в виде цилиндрических отверстий, расположенных на различной глубине, закрытых винтами. Глубина залегания дефекта влияет на яркость и четкость индикаторного следа. Наименее четкий индикаторный рисунок определяет наиболее глубоко расположенный дефект.

Образец МО-4 применяют для оценки работоспособности дефектоскопов циркулярного и индукционного намагничивания (рис. 10). Данный образец выполнен в виде стального диска с центральным отверстием. Для проверки работы дефектоскопов индукционного намагничивания на цилиндрической поверхности диска расположен поверхностный дефект в виде плоской несплошности материала, перпендикулярной образующей цилиндра. Для проверки дефектоскопов циркулярного намагничивания на образце расположен поверхностный дефект, плоскость которого параллельна образующей цилиндра, и три подповерхностных дефекта в виде отверстий.



Рис. 10. Образец МО-4

При проведении магнитопорошкового контроля требуется выполнить следующие операции:

- подготовка детали к контролю;
- подготовка средств контроля;
- намагничивание детали или деталей;
- нанесение магнитного индикатора на контролируемую поверхность;

- осмотр контролируемой поверхности и расшифровка магнитной индикации с последующим измерением размеров дефекта;
- при необходимости уточнения результатов контроля выполнение дополнительных операций по идентификации дефекта;
- размагничивание деталей (если требуется);
- оформление результатов контроля в журналы или в виде протоколов.

В зависимости от последовательности операций магнитопорошковый контроль разделяется на два способа контроля:

- способ приложенного поля (СПП);
- способ остаточной намагниченности (СОН).

Сущность способа приложенного поля (СПП) заключается в том, что операции намагничивания, нанесения магнитного порошка и основную часть осмотра выполняют одновременно, т. е. в приложенном поле.

Способ остаточной намагниченности (СОН) описывает способ намагничивания детали с последующим нанесением магнитных частиц после снятия намагничивающего поля. В этом случае для образования индикаций на поверхности изделия используется только остаточное магнитное поле намагниченной детали.

Преимущества СОН:

- возможность установки детали в любое положение для выбора лучшего освещения и удобного осмотра, так как деталь не надо удерживать в поле намагничивающего устройства, особенно ценно это преимущество при контроле деталей сложной формы, когда надо заглядывать в пазы, канавки и т. п.;

- нанесение суспензии как путем полива, так и окунанием в ванне с суспензией одновременно ряда деталей не только непосредственно за операцией намагничивания, но и спустя несколько часов;

- почти всегда способ СОН имеет большую производительность труда, так как выполнение однотипных операций, например, сначала намагничивание 100 деталей подряд, а затем полив сразу их всех, а потом последовательный осмотр, сокращает рабочее время по сравнению с работой, когда надо выполнять каждый раз другую операцию;

- меньшую вероятность появления ложных отложений порошка в местах грубой обработки поверхности, наклепа, по рискам и т. п.;

- улучшение безопасности труда; так как дефектоскопист даже случайно не может попасть в магнитное поле включенного намагничивающего устройства или коснуться открытых частей токопровода намагничивающего устройства (некоторые устройства имеют в силу технических особенностей открытые части, по которым протекает электрический ток).

СПП имеет только одно важное преимущество – этот способ имеет высокую чувствительность. При этом индикаторные рисунки дефектов

образуются в процессе намагничивания. При использовании СПП сначала прекращают нанесение индикатора на объект, затем – намагничивание. Осмотр контролируемой поверхности проводят при намагничивании и (или) после его прекращения. При контроле СПП достигаются высокие значения намагниченности деталей, вплоть до насыщения, и, следовательно, тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля рассеяния над дефектами. Это повышает выявляемость дефектов данным способом, но не всегда, так как даже при средней шероховатости поверхности и наличии эксплуатационных рисок, вмятин и т. п. могут появляться дополнительные ложные осаднения магнитного порошка в этих местах, осложняющие расшифровку результатов контроля.

Для правильного выбора способа намагничивания следует выполнить следующие действия:

- 1) определяют марку материала проверяемого объекта, используя техническую документацию на его изготовление;
- 2) по справочникам оценивать остаточную намагниченность и коэрцитивную силу;
- 3) исходя из положения точки с координатами H_c и B_r на рисунке делают заключение о возможности применения того или иного способа контроля, руководствуясь следующим: если на графике точка (H_c , B_r) расположена выше кривой, то возможен контроль объекта как СОН, так и СПП, если точка (H_c , B_r) расположена ниже кривой, то рекомендуется контроль СПП (рис. 11).

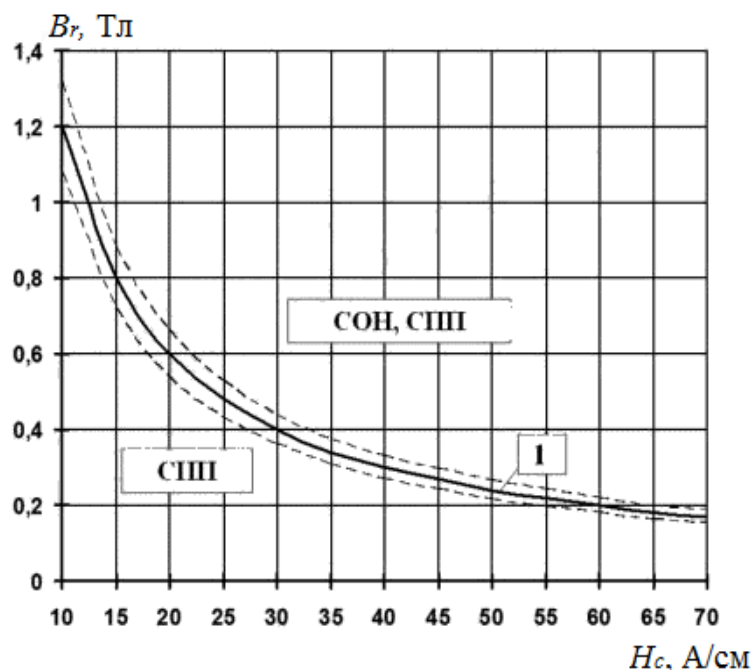


Рис. 11. Определение способа намагничивания

Проведен эксперимент, в результате которого установлено, что при увеличении или уменьшении расчетного тока циркулярного намагничивания длина индикации над дефектом изменяется: при уменьшении тока намагничивания длина дефекта снижается, а при увеличении остается практически неизменной, но увеличивается фон из порошка, что ухудшает расшифровку индикации (рис. 12).

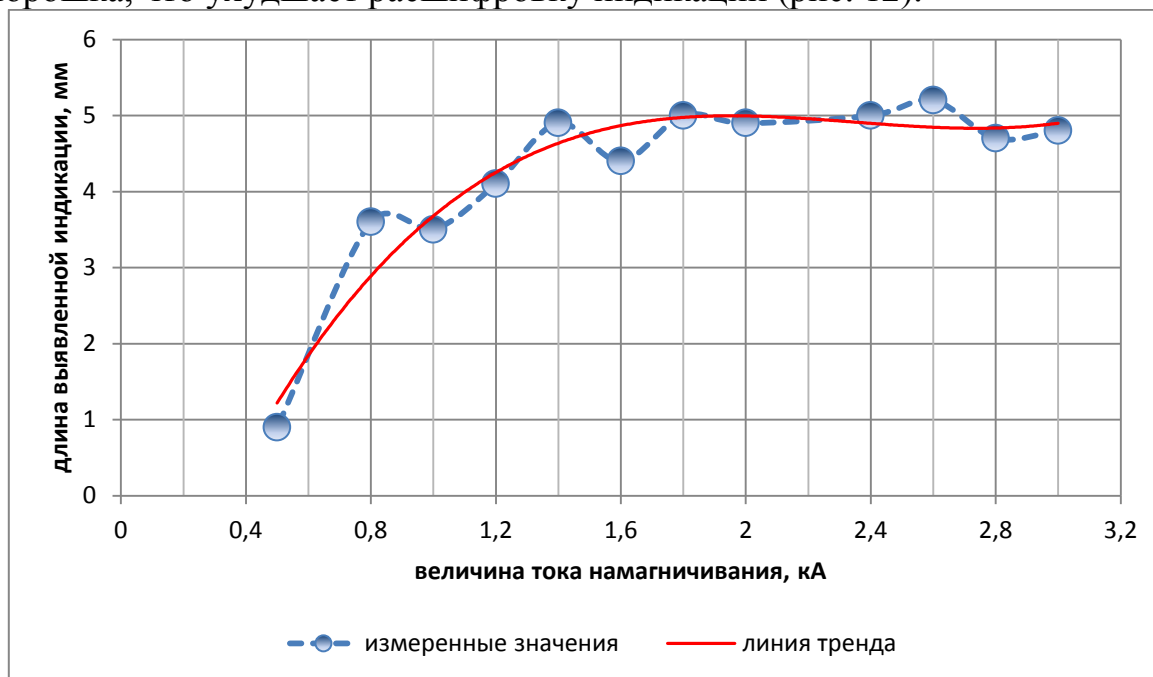


Рис. 12. Влияние величины тока намагничивания на длину выявленной индикации

Изменение концентрации порошка в магнитной суспензии влияет на визуальную оценку выявления дефекта. Проведен эксперимент, в результате которого проведена оценка выявляемости дефекта на стандартном образце в зависимости от рекомендуемой контракции, а также увеличенной и уменьшенной (рис. 13).

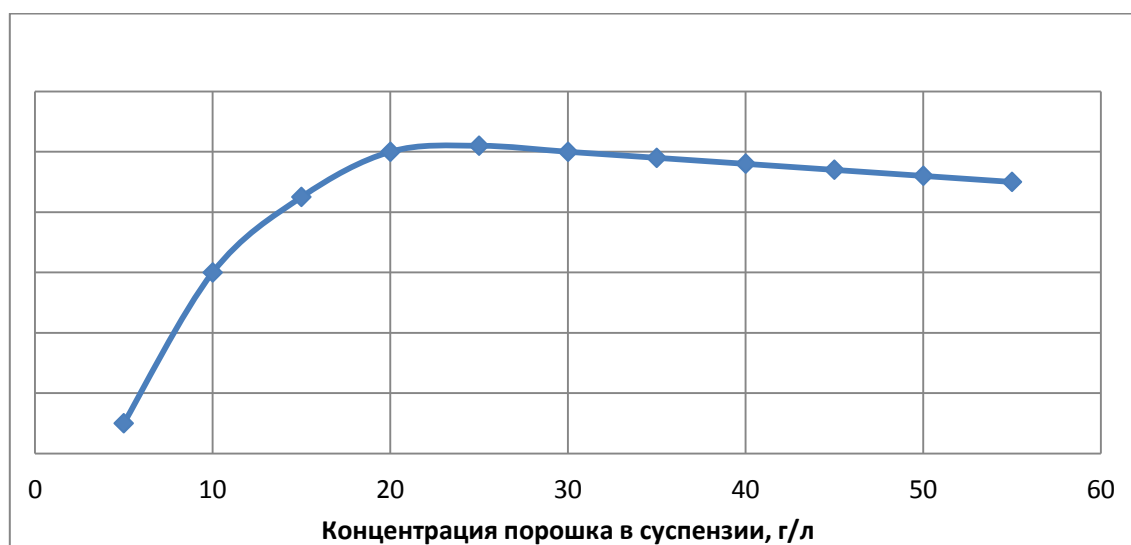


Рис. 13. Визуальная оценка выявляемости дефекта

Имеет значение выбор используемого магнитного индикатора для определенных задач контроля. Приведены примеры применения трех различных баллонов с флуоресцентной суспензией на одинаковых деталях с известными дефектами. Видна разница в качестве индикаций при одинаковых параметрах контроля (рис. 14).

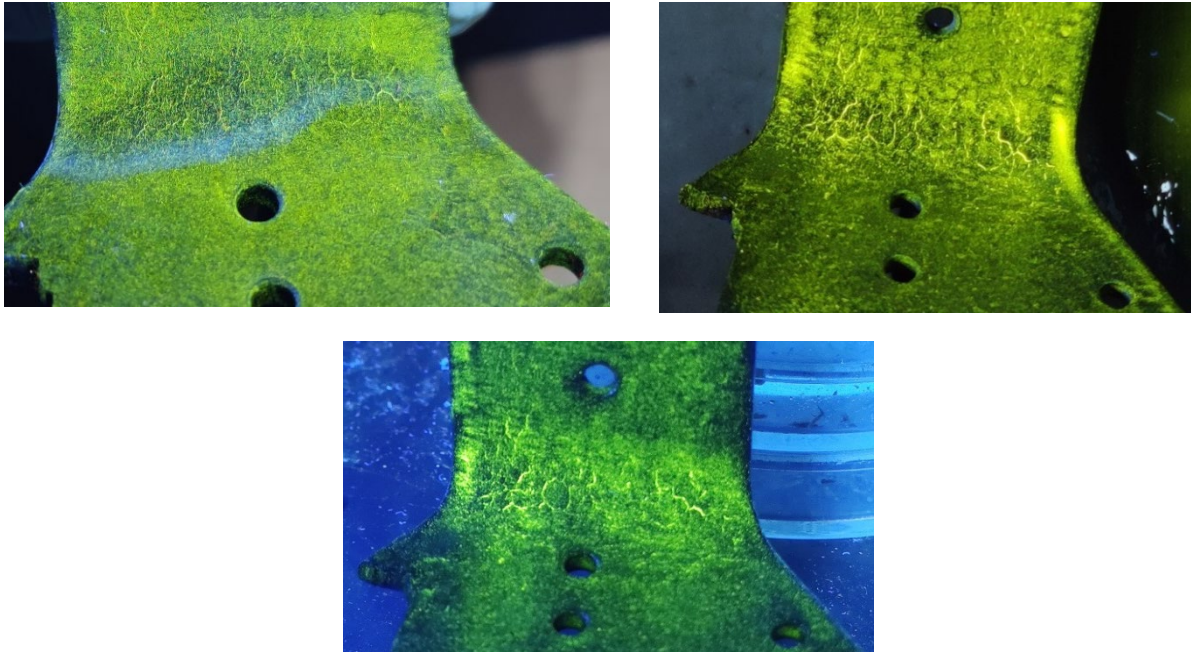


Рис. 14. Индикаторные рисунки трех разных баллонов

Литература

1. Шелихов Г.С. Магнитопорошковая дефектоскопия деталей и узлов. М.: Государственное предприятие НТЦ «Эксперт», 1995. 224 с.
2. Неразрушающий контроль: справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 4: В 3 кн. Кн. 1: В.А. Анисимов, Б.И. Каторгин, А.Н. Куценко и др. Акустическая тензометрия. Кн. 2: Г.С. Шелихов. Магнитопорошковый метод контроля. Кн. 3: М.В. Филинов. Капиллярный контроль. 2-е изд., испр. М.: Машиностроение, 2006. 736 с.

Системные требования: Intel Pentium; 1,3 ГГц и выше; Windows 7/10; Adobe Reader 6.0 и выше; дисковод CD-ROM.

Использованное программное обеспечение: Microsoft Office Word 2010

Статьи представлены в авторской редакции

За содержание статей, точность приведенных фактов и цитирование несут ответственность авторы публикаций

Объем издания: 16 Мб.

Тираж 100 экз.

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Государственный научный центр Российской Федерации (НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ)

Изд-во НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ

admin@viam.ru