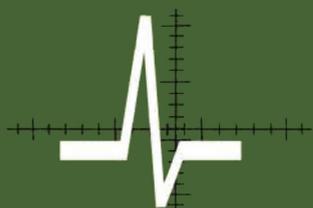




ISSN 0130-3082

Российская Академия наук

# Дефектоскопия



*Неразрушающий контроль*

*Техническая диагностика*

*Анализ материалов*

**№ 1**

**2024**



**ДЕФЕКТОСКОПИЯ**

Журнал ежемесячный  
 Основан в феврале 1965 года  
 Екатеринбург

№ 1  
 2024

**СОДЕРЖАНИЕ****Акустические методы**

- Е.Г. Базулин, А.А. Крылович.** Измерение времени прихода ультразвукового импульса методом построения модели сигнала для определения скорости его распространения ..... 3
- Р.В. Ромашко, О.В. Башков, Т.А. Ефимов, М.Н. Безрук, Д.А. Бобруйко, Н.В. Макарова.** Особенности применения адаптивных интерферометрических волоконно-оптических датчиков акустической эмиссии для контроля состояния полимерных композиционных материалов ..... 21

**Радиационные методы**

- М.М. Мурашев, В.Т. Эм, В.П. Глазков, И.В. Шишковский, К.И. Макаренко, Е.А. Сульянова.** Исследования металлических изделий аддитивных производств методами нейтронной визуализации .... 28

**Тепловые методы**

- А.Г. Дивин, С.В. Пономарев, С.В. Мищенко, Ю.А. Захаров, Н.А. Карпова, А.А. Самодуров, Д.Ю. Головин, А.И. Тюрин.** Применение лазерной сканирующей термографии и регрессионного анализа для определения характеристик дефектов полимерных композиционных материалов ..... 40
- С.А. Бехер, А.А. Попков, А.С. Выплавень, В.Н. Федоринин, В.И. Сидоров, С.П. Шляхтенков, И.Ю. Кинжагулов.** Контроль прессовых соединений на основе закономерностей их деформирования при локальном тепловом воздействии ..... 49

**Электромагнитные методы**

- А.А. Марков, В.В. Мосягин, А.Г. Антипов, Г.А. Иванов.** Исследование возможности выявления дефектов в перьях подошвы рельсов магнитным методом ..... 60

**Комплексное применение методов неразрушающего контроля**

- А.Е. Зорин, В.И. Красеньков.** Диагностический комплекс «MicroLab-Z2» для неразрушающей оценки структурно-деформационных параметров металла конструкций ..... 73

## ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ ПРИХОДА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИМПУЛЬСА МЕТОДОМ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ СИГНАЛА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ЕГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ

© 2024 г. Е.Г. Базулин<sup>1,\*</sup>, А.А. Крылович<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+»

Россия 123458 Москва, ул. Твардовского, 8, Технопарк «Строгино»

<sup>2</sup>Московский Энергетический Институт (Национальный исследовательский университет), Россия 111250

Москва, Красноказарменная ул., 14

E-mail: \*bazulin@echoplus.ru

Поступила в редакцию 13.10.2023; после доработки 12.11.2023

Принята к публикации 17.11.2023

Рассмотрено несколько методов измерения времени прихода ультразвуковых импульсов. Предложен метод определения времени прихода импульса на основе построения модели сигнала с адаптивным словарем и поиска минимума целевой функции методом квантового роевого интеллекта. Приведены результаты численных и модельных экспериментов по измерению скорости распространения ультразвуковых волн в различных образцах. Показано, что предложенный метод определения времени прихода импульса более устойчив к искажению формы эхосигналов, возникающей из-за частотно-зависимого затухания в материале объекта контроля.

*Ключевые слова:* измерение скорости звука, толщинометрия, измерение времени прихода импульса, алгоритм разреженной аппроксимации, matching pursuit (MP), quantum-behaved particle swarm optimization (QPSO).

## MEASUREMENT OF ULTRASONIC PULSE ARRIVAL TIME BY CONSTRUCTING A SIGNAL MODEL TO DETERMINE ITS PROPAGATION VELOCITY

E.G. Bazulin, A.A. Krylovich

ECHO+ Research and Production Center LLC

8, Tvardovskogo St., Technopark "Strogino", Moscow, 123458 Russia

Moscow Power Engineering Institute (National Research University)

14, Krasnokazarmennaya St., Moscow, 111250 Russia

The paper considers several methods of measuring the arrival time of ultrasonic pulses. A method for determining the pulse arrival time based on the construction of a signal model with an adaptive dictionary and the search for the minimum of the target function by the quantum swarm intelligence method is proposed. The results of numerical and modeling experiments on measuring the propagation velocity of ultrasonic waves in various samples are presented. It is shown that the proposed method of determining the time of pulse arrival is more resistant to distortion of the echo waveform arising due to frequency-dependent attenuation in the material of the control object.

*Keywords:* sound speed measurement, thickness measurement, pulse arrival time measurement, sparse approximation algorithm, matching pursuit (MP), quantum-behaved particle swarm optimization (QPSO).

DOI: 10.31857/S0130308224010013

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Задачу измерения времени прихода акустических импульсов приходится решать в ультразвуковой толщинометрии, дефектоскопии, медицинской диагностики, в ультразвуковых уровнемерах. Как правило, принцип работы этих приборов основан на определении времени прихода ультразвуковых импульсов. Точность его определения зачастую является ключевым элементом, задающим основные метрологические характеристики прибора.

Существуют разнообразны методы определения времени прихода импульса и измерения интервалов времени между ними. Наиболее простым является метод нахождения максимума огибающей импульса [1] или достижения заданного уровня его огибающей [2]. Реализация этих методов проста, однако их недостатком является сильная зависимость результатов измерений от шума, что приводит к высокой погрешности определения времени прихода импульса. В статье [3] описа-

на экспериментальная установка, позволяющая при малом уровне шума проводить измерения скорости продольной волны с абсолютной погрешностью 2 м/с. Нахождение среднего между интервалами переднего и заднего фронтов импульсов, разбитых на несколько уровней, является развитием этих двух методов [2]. Его недостатками являются довольно высокая относительная погрешность и неопределенность выбора уровня пороговых значений.

В толщинометрии часто используется метод измерения интервалов времени по переходу сигнала через ноль [4] с учетом его интерполяции (далее — по пересечению нуля). Достоинством этого метода является относительная простота его реализации и малая погрешность при наличии шума. Обобщением этого метода можно считать метод аппроксимации огибающей эхосигнала полиномом второго или третьего порядка [5].

В радиотехнике и ультразвуке существуют импульсно-фазовые методы, основанные на измерении фазового сдвига между импульсами [6], например, метод корреляции фазы [7].

Ранговые непараметрические методы [8] связаны с расчетами различных коэффициентов, позволяющих определить степень близость двух числовых выборок. Ранговые непараметрические методы не требуют никаких предположений о законе распределения исходных статистических данных, так как при их расчете оперируют не самими значениями, а их рангом, который представляет собой порядковую позицию или степень упорядоченности каждого наблюдения в выборке. Особенно эффективны непараметрические методы, когда необходимо измерить связь между качественными признаками нескольких выборок, например, двух скользящих смежных участков эхосигнала. Существует много вариаций ранговых непараметрических критериев: критерий Стьюдента [9], критерий Уилкоксона [10], U-критерий Манна—Уитни [11], критерий Пирсона [12], медианный критерий [13].

Применение информационного критерия Акаике [14] основано на предположении, что интервалы времени до и после начала эхоимпульса — это два разных стационарных временных ряда, где каждый интервал рассматривается как авторегрессивный процесс. Анализ параметров двух рядов позволяет определить начало импульса.

Вейвлет-преобразование [15] эхосигнала позволяет выделять вейвлет нужного масштаба и сдвига, что позволяет оценить время прихода импульса. Однако форма базисных функций вейвлет-преобразования не совпадает с формой реального ультразвукового эхосигнала, что будет приводить к ошибке определения времени прихода импульса. К достоинствам такого подхода можно отнести его устойчивую работу в присутствии шумов.

Алгоритм поиска совпадения (Matching Pursuit (MP)) [16] основан на идее разреженной аппроксимации, суть которой в том, чтобы находить «наиболее подходящие» проекции многомерных данных из диапазона избыточного словаря. Данный метод подобен вейвлет-преобразованию с той разницей, что элементам словаря не обязательно быть взаимортогональными, и поэтому они могут иметь форму предельно близкую к форме импульса. Недостатком алгоритма является его вычислительная сложность и неоднозначность выбора словаря, особенно в случае, когда форма сигнала может меняться на временной апертуре. В идеальном случае словарь должен содержать все возможные формы сигналов, но при этом он не должен быть слишком большим, чтобы избежать уменьшения производительности алгоритма.

Таким образом, проблема определения времени прихода импульсов неизвестной формы является актуальной задачей для повышения точности измерения скорости звука в объекте контроля, для решения которой предлагается метод построения адаптивной модели сигнала по заданному числу параметров, один из которых время задержки.

## 2. АЛГОРИТМ MATCHING PURSUIT «С АДАПТИВНЫМ СЛОВАРЕМ»

Алгоритм Matching Pursuit (MP) — это алгоритм разреженной аппроксимации, который представляет из себя итеративный процесс поиска элементов избыточного словаря, «жадно» минимизирующий ошибку аппроксимации на каждом шаге [17]. Алгоритм MP работает следующим образом:

1. На каждом итерационном шаге алгоритм выбирает элемент словаря, наиболее коррелирующий со сигналом.
2. Затем алгоритм добавляет выбранный элемент словаря со своим весом к приближению и вычитает его вклад из сигнала.
3. Алгоритм продолжает итерационно выбирать элементы словаря, пока не достигнет заданного числа итераций или пока не будет достигнута заданная точность аппроксимации сигнала.

На каждом шаге алгоритм выбирает элемент словаря, который максимально уменьшает ошибку приближения сигнала, независимо от того, какие элементы будут выбраны на последующих

шагах, в этом и заключается смысл термина «жадность». Этот подход не гарантирует глобального оптимального приближения, но позволяет получать достаточно хорошее приближение за короткое время.

Популярным расширением Matching Pursuit является алгоритм Orthogonal Matching Pursuit (OMP). Его отличие в том, что на каждой итерации находится ортогональная проекция приближения на текущий набор элементов словаря, что, несмотря на увеличивающееся время вычисления, уменьшает ошибку аппроксимации.

## 2.1. Модель сигнала

Для идентификации измеренного сигнала предлагается использовать модель сигнала  $s_m(t, \nu)$ , зависящую от вектора  $\nu$ , который определяется семью параметрами: время задержки  $t_{\text{start}}$ , центральная частота  $f_c$ , коэффициент линейно-частотной модуляции (ЛЧМ)  $b$ , времена нарастания  $t_{\text{rise}}$  и спада  $t_{\text{decline}}$ , фаза  $\varphi$  и амплитуда  $A_m$  сигнала. Существует много моделей сигналов [18], но в статье рассматривались только три, отличающиеся формой огибающей:

несимметричная гауссоподобная

$$y_G(t) = \begin{cases} \frac{t^2}{t_{\text{rise}}^2}, & t \leq t_{\text{rise}} \\ e^{-\frac{t-t_{\text{rise}}}{t_{\text{decline}}}}, & t > t_{\text{rise}} \end{cases}; \quad (1)$$

подобно нарастанию напряжения в RC-цепи (далее RC-модель)

$$y_{RC}(t) = \begin{cases} e^{-\frac{t_{\text{rise}}}{\tau}}, & t \leq t_{\text{rise}} \\ e^{-\frac{t-t_{\text{rise}}}{\tau}}, & t > t_{\text{rise}} \end{cases}; \quad (2)$$

согласно модели Берлаге

$$y_B(t) = t^n e^{-bt}. \quad (3)$$

Изменение мгновенной частоты  $f(t)$  внутри импульсов с ЛЧМ происходит по линейному закону [19]:

$$f(t) = f_{\min} + b \cdot t, \quad t_{\text{rise}} \leq t \leq t_{\text{decline}}, \quad (4)$$

где  $f_{\min}$  — начальная частота сигнала;  $b = (f_{\max} - f_{\min})/T$ ;  $f_{\max}$  — максимальное значение частоты радиосигнала;  $T = t_{\text{rise}} + t_{\text{decline}}$  — длительность сигнала. ЛЧМ-несущая у всех моделей одинакова, и форма сигнала рассчитывается по формуле:

$$s_m(t; \nu) = y(t) A_m \sin(2\pi f_c t + \varphi), \quad (5)$$

где  $\nu = (t_{\text{start}}, f_c, b, t_{\text{rise}}, t_{\text{decline}}, \varphi, A_m)$ . Каждая модель огибающей сигнала (1), (2) и (3) имеет свои недостатки:

1) модель по стандартной формуле с огибающей по Гауссу при наличии шума может выходить за реальное начало импульса на половину периода;

2) при примерно одинаковой скорости нарастания  $t_{\text{rise}}$  и спада импульса  $t_{\text{decline}}$  модель Берлаге имеет значительный интервал, когда импульс практически равен нулю, что сильно уменьшает значение начала эхоимпульса;

3) RC-модель сигнала недостаточно корректно учитывает значения фазы несущего сигнала отличные от 0 и 180 град. В случае, если фаза равна 90 град, в начале импульса появится «полупериод», равный не половине периода, а четверти периода.

## 2.2. Построение модели сигнала

Если через  $s(t)$  обозначить измеренный сигнал, в котором находится импульс, отраженный от дна, время прихода  $t_{\text{start}}$  которого нужно найти, то задача сводится к решению задачи поиска пара-

метров  $v$  модели сигнала  $s_m(t; v)$  предельно близкого к измеренному. Если в качестве целевой функции выбрать среднеквадратичное отклонение, то модель сигнала  $v$  можно определить следующим образом:

$$v = \min_{v \in R^T} \|s(t) - s_m(t, v)\|^2. \quad (6)$$

Целевая функция имеет овражистый вид, например, по паре переменных «время задержки  $t_{\text{start}}$  и фаза  $\varphi$ », что приводит к большому количеству локальных минимумов целевой функции. Существует множество методов решения задачи оптимизации (6). Выбор конкретного метода зависит от ее размерности (типа целевой функции), наличия ограничений, знания градиента и Гессеяна, т.е. второй производной, целевой функции. Часто применяемый симплексный алгоритм заключается в поиске минимума целевой функции за счет оценки градиента по значениям на вершинах выпуклого многогранника (симплекса) [20]. Однако симплексный метод имеет недостатки. Во-первых, он может быть вычислительно затратным при работе с задачами, число переменных и ограничений которых велико. Во-вторых, симплексный метод может столкнуться с проблемой остановки вычислений в локальном минимуме целевой функции. Поэтому для нахождения глобального минимума задачу (6) приходится решать для многих начальных точек, что увеличивает время расчета. Поэтому его использование для решения поставленной задачи (6) может оказаться неэффективным.

Существует класс методов поиска глобального минимума целевой функции, основанный на биоинспирированных принципах работы, например, метод роевого интеллекта (particle swarm optimization (PSO)) [21]. В алгоритме роевого интеллекта каждая особь роя выбирает траекторию движения в пространстве поиска, исходя из своего найденного лучшего решения и зная наилучшее решение, найденное роем. Для повышения эффективности метода PSO была предложена его модификация, называемая квантовоповеденческой (quantum-behaved particle swarm optimization (QPSO)) [22]. Алгоритм QPSO использует идею квантовой механики, когда каждая особь роя представляет собой «квантовую частицу» с координатами и квантовым состоянием, представленным вектором вероятностей, задающим вероятность нахождения частицы в определенных точках пространства поиска. QPSO имеет преимущества перед PSO в тех случаях, когда требуется алгоритм оптимизации с вектором  $v$  большой размерности и с меньшей вероятностью остановки вычислений в локальном минимуме целевой функции.

Предложенный алгоритм, согласно формуле (6), эффективно работает, когда строится модель сигнала при наличии одного импульса на заданной временной апертуре, что характерно для определения скорости звука. Однако в реальных измерениях после многократных отражений от границ объекта контроля из-за эффекта трансформации типа волны в объекте контроля и из-за перерасеивания импульса в призме импульсов может быть много, они могут замаскировать импульс, отраженный от дна. На рис. 1 графиком красного цвета показан эхосигнал на временной апертуре,

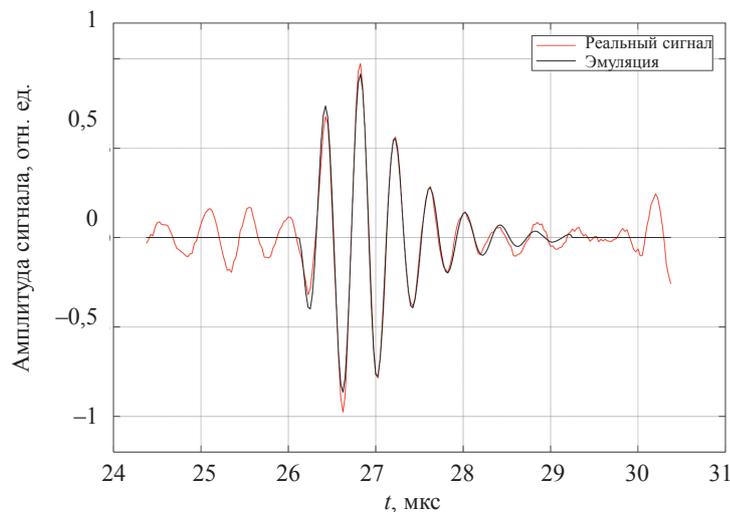


Рис. 1. Измеренный эхосигнал (график красного цвета) и определенная по формуле (6) модель импульса (график черного цвета).

соответствующей пяти отражениям от границ стального образца толщиной 12 мм. Импульс после пяти отражений хорошо виден на фоне множества перерассеянных импульсов амплитудой до 20 процентов, но определить его начало сложно. Графиком черного цвета показан импульс, определенный по формуле (6) методом QPSO, что позволяет оценить время прихода импульса  $t_{\text{start}}$  равное 26,117 мкс.

Решение задачи (6) можно рассматривать как частный случай алгоритма МР при выполнении одной итерации.

### 3. ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

В основном серийно выпускаемые приборы [23, 24] для определения толщины или групповой скорости распространения звука в объекте контроля работают по стандартному алгоритму: в объект контроля известной толщины излучается зондирующий импульс, который распространяется в объекте, отражается от его дна и регистрируется. Обработка измеренного эхосигнала позволяет оценить время прихода импульса, однократно отраженного от дна, и рассчитать скорость распространения звука в объекте контроля. Основная проблема — точность измерения времени задержки импульса, форма которого может меняться. Для повышения точности измерения скорости звука необходимо учитывать такие факторы, как временные задержки в электронике прибора и в преобразователе, влияние шумов, дисперсию сигнала и так далее.

#### 3.1. Причины возникновения ошибок измерений

Основные причины возникновения погрешности измерений скорости распространения ультразвуковых волн перечислены ниже.

1. Точность измерения толщины объекта контроля. Погрешность измерения толщины обычным электронным микрометром в диапазоне от 0 до 50 мм равна  $\Delta l = \pm 2$  мкм [25]. Наклон или форма поверхности объект контроля при измерениях обычно не учитывается, но они искажают форму отраженного от дна импульса.

2. Точность измерения временных интервалов определяется свойствами аппаратуры и, в первую очередь, стабильностью кварцевого генератора, синхронизирующего работу всех модулей прибора. Например, для задающего генератора модели ECX-53B-DU на 50 МГц стабильность частоты равна  $\pm 100$  ppm. Это приводит к нестабильности периода, равной  $\delta t = \pm 40$  фс [26], которой в силу ее малости можно пренебречь.

3. Частота дискретизации сигналов влияет на точность измерения временных интервалов. При частоте дискретизации в 50 МГц минимальная ошибка работы простых алгоритмов может быть очень большой величиной, равной 20 нс (график синего цвета на рис. 2).

4. Дисперсия и частотно-зависимое затухание приводят к изменению формы сигнала на разных частотах и толщинах объектов контроля. Это может привести к существенно разным измеренным значениям скорости звука в объекте контроля в зависимости от его толщины и частоты преобразователя. Поэтому необходимо разрабатывать алгоритмы определения временных интервалов для сигналов точно не известной формы.

5. При распространении ультразвукового импульса наблюдается его дифракционное расхождение, приводящее к изменению формы сигнала при его регистрации, что влияет на точность определения времени прихода импульса [27]. При проведении прецизионных измерений скорости звука этот эффект нужно учитывать. Строго говоря, и отражение от дна образца также приводит к изменению формы ультразвукового импульса.

#### 3.2. Повышение точности измерения скорости распространения ультразвуковых волн

У обычных толщиномеров относительная погрешность измерения находится в пределах от 0,1 до 0,5 %. Измерения считаются прецизионными при величине относительной погрешности менее 0,1 % [3, 28, 29]. Эти уровни отмечены на рис. 2 штриховыми линиями красного (7) и зеленого (8) цвета.

##### 3.2.1. Увеличение базы измерений

Простейший способ повысить точность измерения скорости распространения звука заключается в увеличении базы измерений, которую можно увеличить за счет измерения времени прихода многократно отраженных импульсов. На рис. 2 изображена зависимость относительной

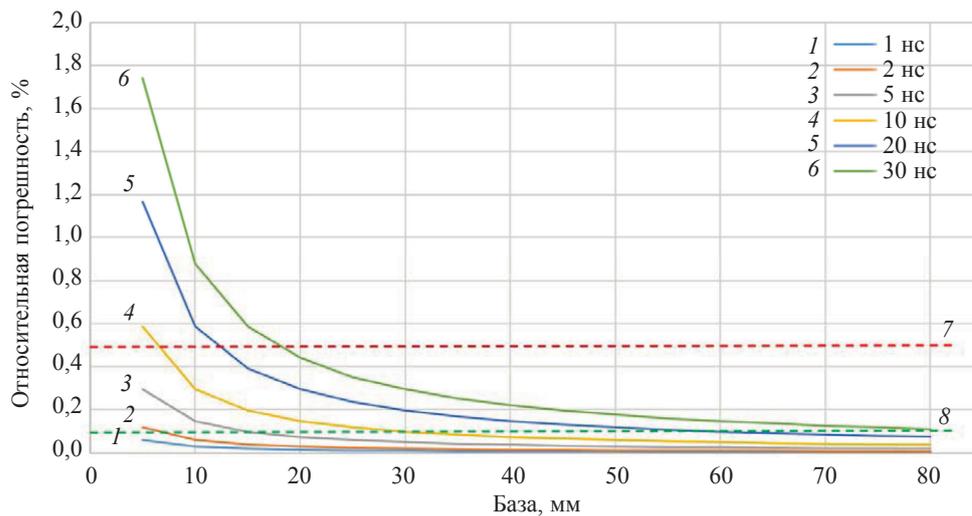


Рис. 2. Зависимость относительной погрешности от базы измерений.

погрешности от базы измерений. Видно, что ошибка определения времени прихода импульса в 20 нс на базе 10 мм приводит к большой величине относительной погрешности 0,5 %, но при увеличении базы до 80 мм она может стать равной 0,08 %, что позволяет считать точность измерений прецизионной.

Недостатком работы с большой базой является увеличение расстояния пробега эхоимпульса, что при наличии частотно-зависимого затухания может привести к искажению формы импульса и, следовательно, к снижению точности измерений. Достоинством подхода работы с многократно отраженными импульсами является возможность игнорировать неизвестное время распространения импульса в протекторе преобразователя и в электронных модулях системы. В некоторых толщинамерах [23] для коррекции времени распространения импульса в протекторе преобразователя существуют специальные процедуры калибровки на образце с известной толщиной и скоростью распространения звука.

### 3.2.2. Частотно-зависимое затухание

Для описания распространения звука в объектах с вязкоупругими свойствами существуют различные модели: модель Максвелла, модель Кельвина—Фойгта, стандартная линейная модель твердого тела [30, 31].

Модель Кельвина—Фойгта для описания вязкоупругих свойств среды предполагает, что элементарные массы среды соединены параллельно поршнем и пружиной. Свойства среды описываются тремя параметрами: коэффициентом упругости  $E$ , коэффициентом динамической вязкости  $\eta$  и плотностью  $\rho_0$ . На малых частотах поршень не влияет на динамику модели, но при увеличении частоты его жесткость будет возрастать, и поршень становится более сопротивляющимся деформации элементом, чем пружина. Это означает, что в материале будет присутствовать дисперсия скорости. На рис. 3а представлена частотная зависимость отклонения скорости в процентах к скорости на нулевой частоте для стального образца со свойствами:  $E = 2,74 \times 10^{11}$  Па,  $\eta = 10$  Па·с,  $\rho_0 = 7,8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Скорость продольной волны при стремлении частоты к 0 МГц стремится к 5,93 мм/мкс. Изменение скорости продольной волны на частотах 2 и 10 МГц будут отличаться друг от друга примерно на 0,0002 %, и этой разницей в силу ее малости можно пренебречь. На рис. 3б показана зависимость коэффициента затухания от частоты, которая близка к квадратичному закону. Это означает, что высокочастотные и низкочастотные составляющие спектра сигнала будут уменьшаться по-разному с увеличением расстояния пробега импульса в объекте. Поэтому форма импульса будет изменяться при увеличении толщины объекта контроля, и, следовательно, применение простых методов определения времени задержки приведет к ошибкам.

На рис. 4а показаны эхосигналы от одного до шестикратного отражения для плоскопараллельного образца толщиной 16 мм, рассчитанные с помощью модели Кельвина—Фойгта для модели

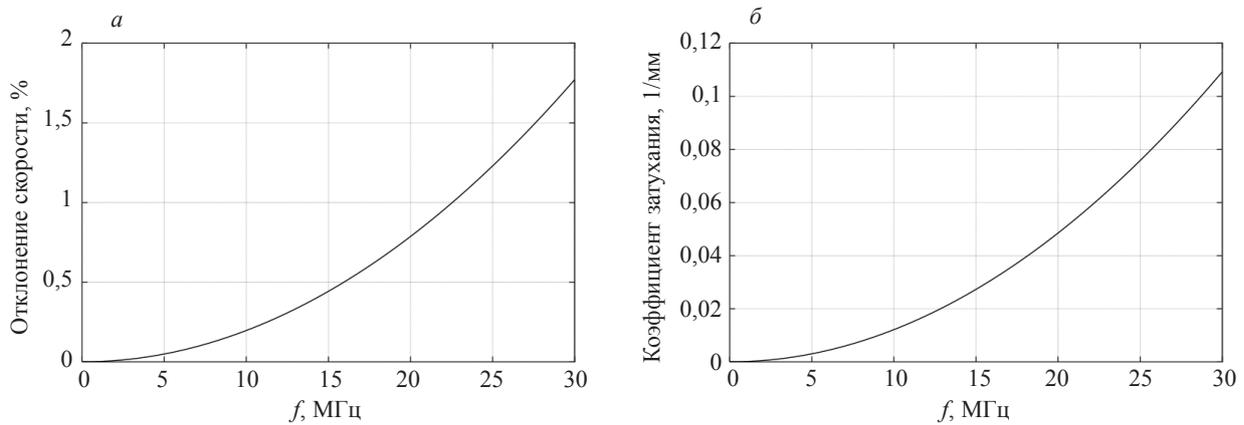


Рис. 3. Зависимость дисперсии скорости и коэффициента затухания от частоты для стального образца.

сигнала с гауссовой огибающей с параметрами:  $f_c = 5$  МГц;  $b = 0$ ;  $t_{\text{rise}} = 0,2$  мкс;  $t_{\text{decline}} = 0,3$  мкс;  $\varphi = 0$ . Причиной получения отрицательной развертки по времени является формирование окна, начало которого определяется скоростью распространения звука и количеством отражений. Особенности излучения и отражения от границ объекта контроля не учитывались. Все эхосигналы нормированы к единице. На рис. 4б показаны спектры эхосигналов, которые смещаются в сторону низких частот из-за частотно-зависимого затухания. В результате форма импульса зависит от числа отражений от дна: время нарастания увеличивается, что может привести к увеличению измеренного времени задержки. Между стрелками красного цвета показана «разбежка» эхоимпульсов для разного числа отражений, равная примерно 30 нс. Ошибка измерения времени прихода в 30 нс приводит к относительной погрешности измерения на базе 10 мм в 0,6 %, а на базе 80 мм — примерно в 0,1 % (см. рис. 2, линия зеленого цвета).

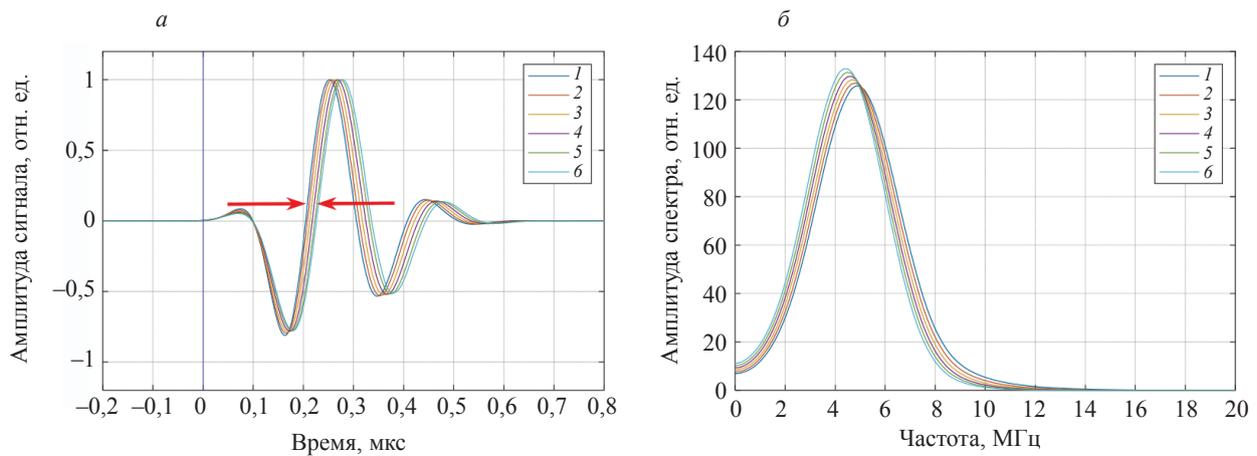


Рис. 4. Эхосигналы и их спектры на рабочей частоте преобразователя в 5 МГц для стали.

На рис. 5а представлена частотная зависимость отклонения скорости в процентах к скорости на нулевой частоте для образца из плексигласа со свойствами:  $E = 5,79 \cdot 10^9$  Па,  $\eta = 2,5$  Па·с,  $\rho_0 = 1,1 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Скорость продольной волны при стремлении частоты к 0 МГц стремится к 2,33 мм/мкс. На рис. 5а видно, что на частоте 5 МГц относительная погрешность измерения скорости звука составляет 0,0065 %, а на частоте 10 МГц — 0,022 %. В большинстве практических измерений этой погрешностью можно пренебречь. На рис. 5б показана зависимость коэффициента затухания от частоты, которая является более крутой, чем на рис. 3а.

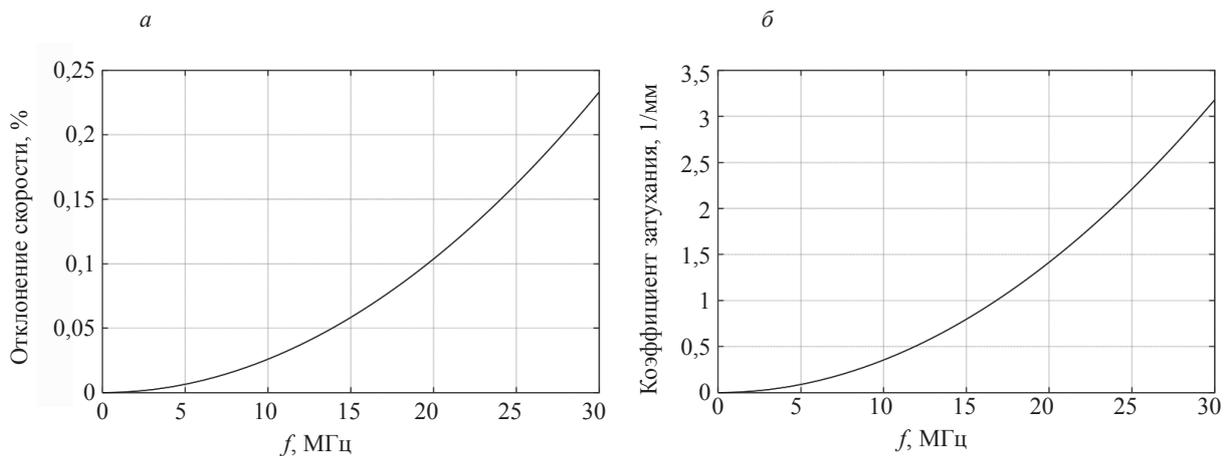


Рис. 5. Зависимость дисперсии скорости и коэффициента затухания от частоты для плексигласа.

На рис. 6а представлены эхосигналы, рассчитанные для плексигласового образца толщиной 16 мм при одном и двух отражениях. Форма эхосигналов меняется еще сильнее, чем в объекте из стали (см. рис. 4а). На рис. 6б видно, что спектр эхосигналов сильно смещается в сторону низких частот. Так как при расчетах частотные свойства преобразователя не учитывались, то в области нулевых частот спектр сигналов отличен от нуля.

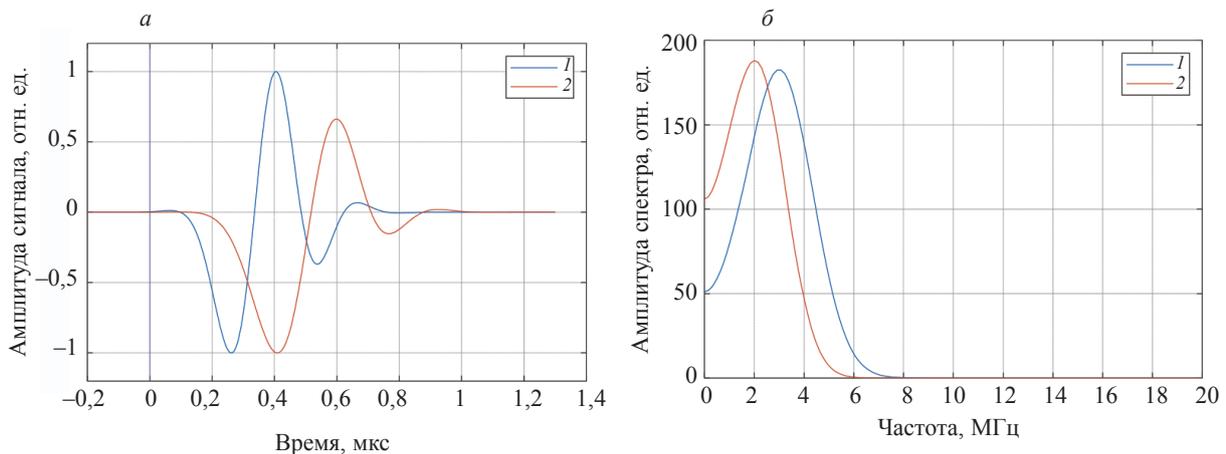


Рис. 6. Эхосигналы и их спектры на рабочей частоте преобразователя в 5 МГц для плексигласа.

#### 4. ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для проверки точности определения скорости звука по предложенному алгоритму (6) и по методу пересечения нуля [4] использовались эхосигналы с гауссовой огибающей, согласно формуле (1), с несущими частотами 5 и 10 МГц, рассчитанные по модели Кельвина—Фойгта для стальных образцов толщиной 16, 32, 48, 64 и 80 мм ( $E = 2,74 \cdot 10^{11}$  Па,  $\eta = 10$ ,  $\rho_0 = 7,8 \cdot 10^3$ ) (см. раздел 3.2.2). Скорость продольной волны при стремлении частоты к 0 МГц стремится к 5,93 мм/мкс. Скорость звука измерялась по разнице времен прихода второго и первого эхосигнала, третьего и второго и так далее. Итоговое значение скорости определялось как среднее по пяти измерениям. При проведении расчетов полагалось, что частотной модуляции импульса нет ( $b = 0$ ).

На рис. 7 показаны результаты определения скорости продольной волны в зависимости от толщины объекта контроля. Измерения, полученные с использованием метода по пересечению нуля, отображаются штриховыми линиями: красного цвета (4) для частоты 10 МГц, синего цвета (3) для

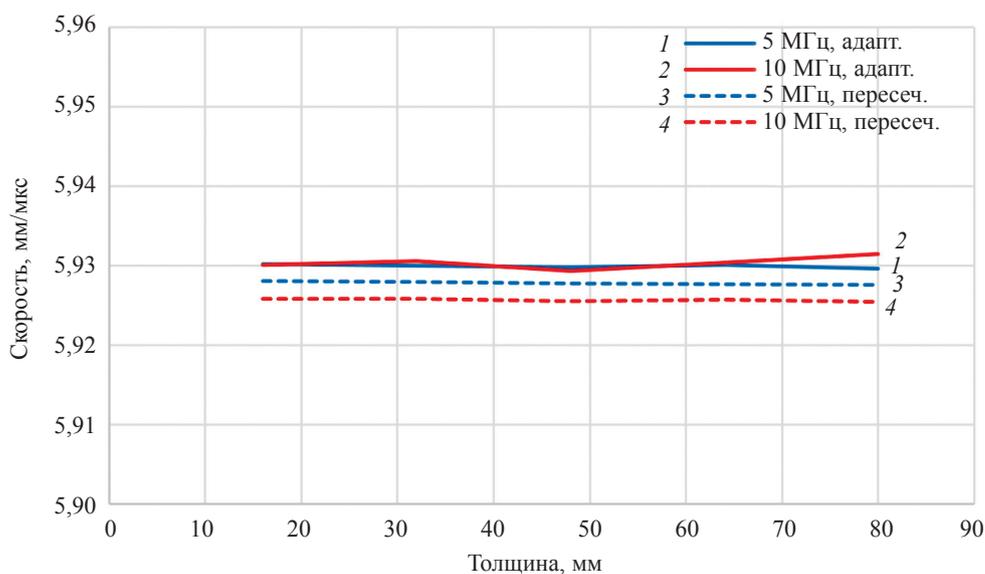


Рис. 7. Зависимость оценки скорости распространения звука от толщины образца на частотах 5 и 10 МГц.

частоты 5 МГц. Видно, что при увеличении толщины рассчитанная величина скорости распространения ультразвуковых волн уменьшается, что связано с эффектом затягивания переднего фронта импульса из-за частотно-зависимого затухания (см. раздел 3.2.2). Этот эффект становится особенно заметным на частоте 10 МГц, так как при прохождении большего расстояния спектр эхосигнала сильнее смещается в сторону нижних частот (см. рис. 5б). На частоте 5 МГц среднее значение скорости продольной волны равно 5,928 мм/мкс ( $\Delta = c_{\max} - c_{\min} = -0,002$  мм/мкс, относительная погрешность равна  $\delta = -0,03\%$ ), а на частоте 10 МГц среднее значение скорости составляет 5,926 мм/мкс ( $\Delta = -0,004$  мм/мкс,  $\delta = 0,07\%$ ). Результаты, полученные предлагаемым адаптивным алгоритмом, отображаются рис. 7 сплошными линиями: красного цвета (2) для частоты 10 МГц, синего цвета (1) для частоты 5 МГц. Расхождение в значениях скорости продольной волны для обеих частот в три раза меньше, чем для метода пересечения нуля: на частоте 5 МГц среднее значение скорости равно 5,9303 мм/мкс ( $\Delta = 0,0003$  мм/мкс,  $\delta = 0,005\%$ ) и на частоте 10 МГц среднее значение скорости составляет 5,9307 мм/мкс ( $\Delta = 0,0007$  мм/мкс,  $\delta = 0,01\%$ ). Результаты расчета сведены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты расчета абсолютной  $\Delta$  (относительной  $\delta$ ) погрешности измерений скорости продольной волны**

Частота несущей, МГц	По пересечению нуля	Адаптивный метод
5	-0,002 мм/мкс (-0,03 %)	-0,0006 мм/мкс (-0,008 %)
10	-0,004 мм/мкс (-0,07 %)	0,0014 мм/мкс (0,02 %)

Результаты численного эксперимента говорят о том, что предложенный алгоритм измерения параметров эхосигнала позволяет определять скорость распространения продольной волны в три раза точнее по сравнению с методом пересечения нуля для обеих частот. Отметим и то обстоятельство, что предлагаемый метод, в отличие от метода пересечения нуля, работает не с двумя отсчетами эхосигнала, а с множеством отсчетов (см. рис. 1), и поэтому он является более помехоустойчивым.

## 5. МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Модельные эксперименты проводились с использованием дефектоскопа АВГУР-АРТ, разработанного и изготавливаемого в «Научно-производственном центре «ЭХО+» [32], толщиномера Echotest 1076 Basic фирмы Karl Deutsch [33] и толщиномера А1210 фирмы «АКС» [34]. Все изме-

рения проводились при комнатной температуре 20—22 град по Цельсию. При проведении расчетов полагалось, что частотной модуляции импульса нет ( $b = 0$ ).

### 5.1. Разновысотный образец

Для проверки точности работы предлагаемого адаптивного алгоритма был выбран образец со ступеньками, изготовленный из стали Ст20 (рис. 8). Его малые размеры позволяют предположить высокую однородность его механических свойств. Поэтому при проведении измерений скорости звука на ступеньках разной толщины для разного числа переотражений должны быть получены максимально близкие значения скорости распространения продольной волны. С помощью электронного микрометра с точностью  $\pm 2$  мкм были измерены высоты ступенек образца, которые указаны на рис. 8. Подобный образец для оценки точности измерения скорости звука применялся в статье [3].

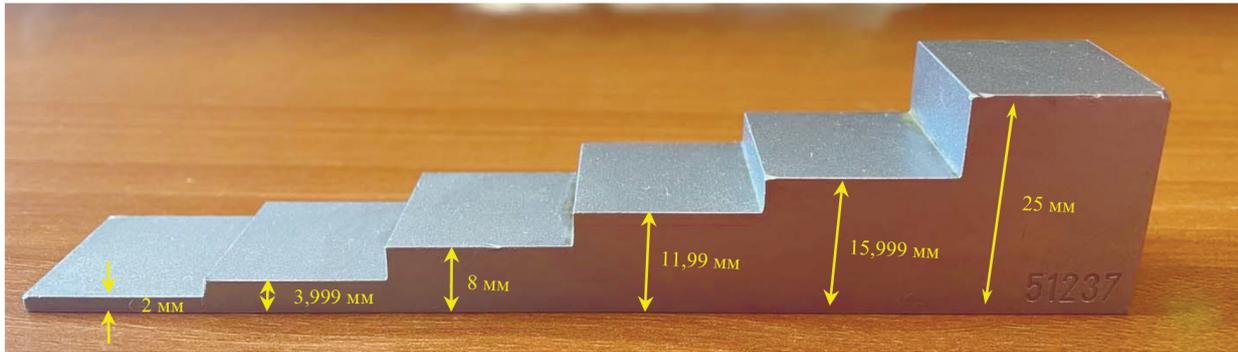


Рис. 8. Фотография разновысотного образца.

#### 5.1.1. Измерения серийно выпускаемыми толщиномерами

Измерения скорости продольной волны проводились для ступенек толщиной 3,999, 8, 11,99 и 15,999 мм с помощью толщиномера Echotest 1076 Basic с пьезоэлектрическими преобразователями (ПЭП) на частоты 4 и 8 МГц (параметр чувствительности был установлен в положение high) и толщиномера A1210 с ПЭП на частоты 2,5, 5 и 10 МГц. Значение скорости определялось как среднее по результатам нескольких измерений. В силу малого количества промежуточных результатов скорости для оценки рассеивания этих значений использовалось не среднеквадратическое отклонение, а величина  $\Delta = \pm(c_{\max} - c_{\min})/2$ .

На рис. 9 показаны результаты определения скорости в ступеньках разной толщины. Измерения, полученные с использованием толщиномера Echotest 1076 Basic, отображаются сплошными линиями: красного цвета (2) для частоты 8 МГц, синего цвета (1) для частоты 4 МГц. При измерениях на частоте 8 МГц значения скорости продольной волны с увеличением толщины ступенек имеют тенденцию к уменьшению, как и ожидается в силу частотно-зависимого затухания. Однако возник слишком большой разброс измерений скорости звука: для толщины 3,999 мм она равна 5,941 мм/мкс, а для толщины 16 мм — 5,922 мм/мкс. Среднее значение скорости продольной волны равно 5,931 мм/мкс ( $\Delta = \pm 0,0095$  мм/мкс,  $\delta = \pm 0,16$  %). При измерениях на частоте 4 МГц для толщины 3,999 мм скорость звука равна 5,922 мм/мкс, а для толщины 16 мм — 5,926 мм/мкс. Среднее значение скорости равно 5,924 мм/мкс ( $\Delta = \pm 0,002$  мм/мкс,  $\delta = \pm 0,03$  %).

Измерения, проведенные с использованием толщиномера A1210, отображаются на рис. 9 штриховыми линиями: красного цвета (5) для частоты 10 МГц, синего цвета (4) для частоты 5 МГц и зеленого цвета (3) для частоты 2,5 МГц. При измерениях на частоте 10 МГц скорость распространения продольной волны с увеличением толщины не имеет ярко выраженного тренда: для толщины 3,999 мм она равна 5,950 мм/мкс, а для толщины 16 мм — 5,945 мм/мкс. Среднее значение скорости равно 5,9475 мм/мкс ( $\Delta = \pm 0,0025$  мм/мкс,  $\delta = \pm 0,04$  %). При измерениях на частоте 5 МГц результаты получились высокостабильными: значение скорости на всех толщинах равно 5,923 мм/мкс. При измерениях на частоте 2,5 МГц результаты также слабо изменяются с увеличе-

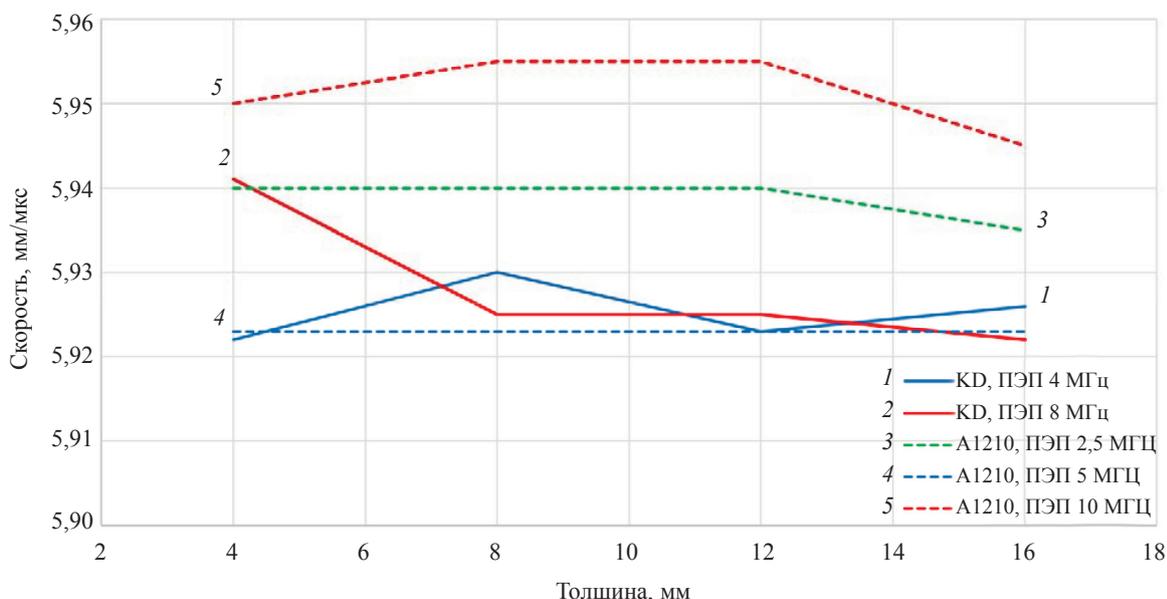


Рис. 9. Зависимость скорости распространения продольной волны от толщины при использовании двух толщиномеров и разных ПЭП.

нием толщины, скорость распространения продольной волны равна 5,940 мм/мкс, и только на толщине 16 мм она уменьшается до 5,935 мм/мкс. Среднее значение скорости продольной волны получается равным 5,9375 мм/мкс ( $\Delta = \pm 0,0025$  мм/мкс,  $\delta = \pm 0,04$  %).

Как видно из графиков на рис. 9, измерения, проведенные двумя толщиномерами с ПЭП на пять частот, дают заметно отличающиеся результаты. Оценить значение скорости продольной волны по всем измерениям можно как 5,933 мм/мкс ( $\Delta = \pm 0,016$  мм/мкс,  $\delta = \pm 0,27$  %).

### 5.1.2. Измерения системой АВГУР-АРТ

Для регистрации эхосигналов использовалась система АВГУР-АРТ и ПЭП на частоты 5 и 10 МГц, установленные на плексигласовую призму толщиной 10 мм. Для уменьшения влияния импульса, отраженного от поверхности образца (интерфейсного импульса), и импульса, однократно отраженного от дна призмы, на образце ISO 19675 PAUT BLOCK измерялся эхосигнал-шаблон в месте, где не было отражателей. Далее при обработке эхосигналов, измеренных в разновысотном образце, эхосигнал-шаблон вычитался.

На рис. 10 показан эхосигнал, измеренный ПЭП на 5 МГц для ступеньки толщиной 3,999 мм с вычтенным эхосигналом-шаблоном. Хорошо видны эхосигналы от одного до шестикратного

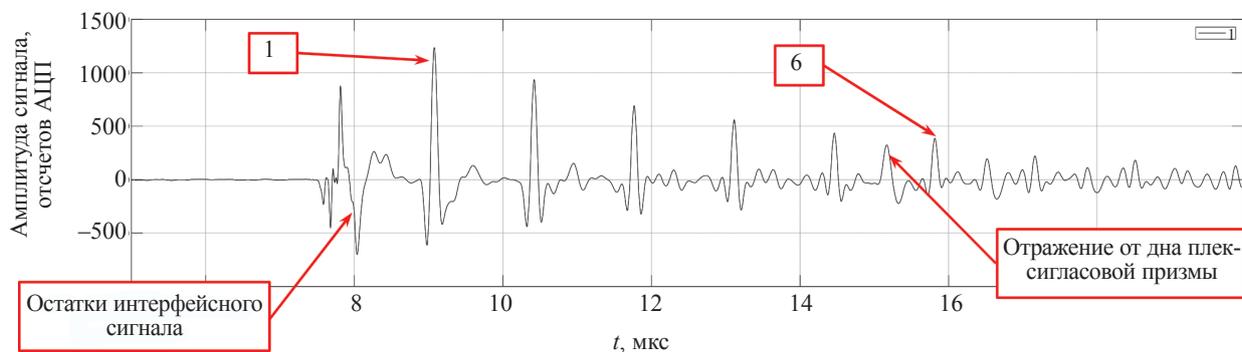


Рис. 10. Вид исходного сигнала с вычитанием шаблона.

отражения от верхней и нижней границ ступеньки (см. выноски 1 и 6). Интерфейсный импульс в области 8 мкс не удалось полностью устранить при вычитании эхосигнала-шаблона, как и импульс, отраженный от дна призмы (см. выноски с текстом). Отраженный от дна призмы импульс имеет более низкочастотный спектр, так как он распространяется в плексигласовой призме.

На рис. 11а показаны эхосигналы при отражении от дна от одного до шести раз для ступеньки толщиной 16 мм. Видно, что форма импульсов меняется при увеличении числа отражений, и это создает впечатление увеличивающегося времени прихода. Между красными стрелками показана «разбежка» эхоимпульсов, равная примерно 30 нс, что соизмеримо с результатами численного моделирования (рис. 4а). На рис. 11б показаны спектры эхосигналов, которые смещается в область низких частот из-за частотно-зависимого коэффициента затухания при увеличении числа отражений.

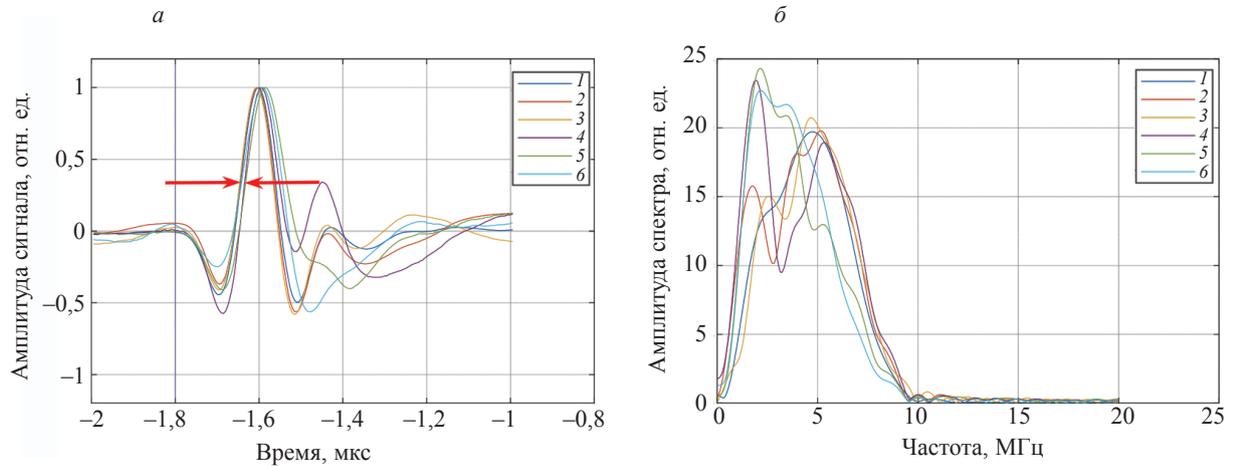


Рис. 11. Эхосигналы и их спектры на рабочей частоте 5 МГц в разновысотном образце в ступеньке толщиной 16 мм.

На рис. 12 представлены результаты измерений скорости продольной волны для толщин 3,999, 8, 11,99 и 15,999 мм методом по пересечению нуля штриховыми линиями: красного цвета (4) для частоты 10 МГц и синего цвета (3) для частоты 5 МГц. Результаты измерений предлагаемым адаптивным алгоритмом показаны сплошными линиями: красного цвета (2) для частоты 10 МГц и

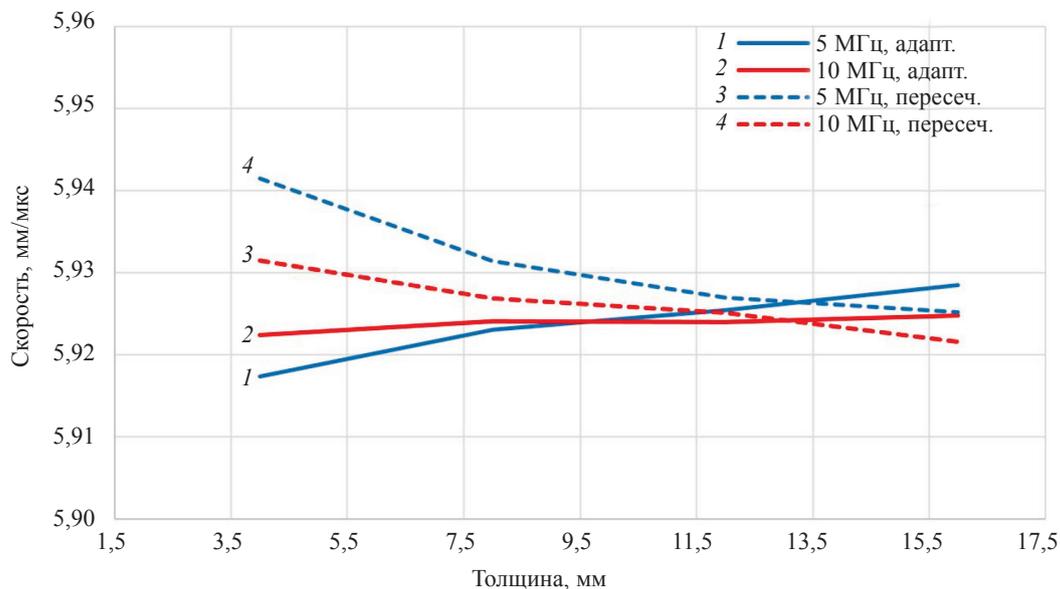


Рис. 12. Зависимость скорости продольной волны от толщины ступеньки и числа отражений на частоте 5 МГц и 10 МГц.

синего цвета (1) для частоты 5 МГц. При измерениях на частоте 10 МГц значения скорости продольной волны, полученные с использованием метода по пересечению нуля, с увеличением толщины ступенек уменьшаются из-за частотно-зависимого затухания. Соответственно, для толщины 3,999 мм скорость звука равна 5,932 мм/мкс, а для толщины 16 мм — 5,922 мм/мкс. Среднее значение скорости по четырем ступенькам равно 5,927 мм/мкс ( $\Delta = \pm 0,005$  мм/мкс,  $\delta = \pm 0,08$  %). При измерениях на частоте 5 МГц эта тенденция сохраняется: для толщины 3,999 мм скорость распространения продольной волны равна 5,942 мм/мкс, а для толщины 16 мм — 5,925 мм/мкс. Среднее значение скорости равно 5,933 мм/мкс ( $\Delta = \pm 0,008$  мм/мкс,  $\delta = \pm 0,14$  %). При использовании адаптивного метода при измерениях на частоте 10 МГц значения скорости распространения продольной волны изменяются незначительно: для толщины 3,999 мм скорость звука равна 5,924 мм/мкс, а для толщины 16 мм — 5,925 мм/мкс. Среднее значение скорости равно 5,9245 мм/мкс ( $\Delta = \pm 0,001$  мм/мкс,  $\delta = \pm 0,02$  %). При измерениях на частоте 5 МГц для ступеньки толщиной 3,99 мм скорость звука равна 5,917 мм/мкс, а для толщины 16 мм — 5,929 мм/мкс. Среднее значение скорости по четырем ступенькам равно 5,9236 мм/мкс ( $\Delta = \pm 0,006$  мм/мкс,  $\delta = \pm 0,09$  %).

В табл. 2 сведены оценки значения скорости продольной волны, полученные с помощью толщиномера Echotest 1076 Basic и системы АВГУР-АРТ. Предлагаемый адаптивный алгоритм имеет меньший разброс значений скорости продольной волны, как для частоты 5 МГц, так и для частоты 10 МГц. Значение скорости продольной волны в этом образце можно полагать равной 5,926 мм/мкс.

Таблица 2

Значения скорости продольной волны в разновысотном образце

Аппаратура	Echotest 1076 Basic		АВГУР-АРТ			
			По пересечению нуля		Адаптивный метод	
	4 МГц	8 МГц	5 МГц	10 МГц	5 МГц	10 МГц
Среднее значение скорости, мм/мкс	5,924	5,931	5,933	5,927	5,925	5,927

## 5.2. Образец ISO 19675 PAUT BLOCK

Измерения проводились в образце ISO 19675 PAUT BLOCK, изготовленного из стали марки Ст20. Его толщина была измерена цифровым штангенциркулем и равна  $99,92 \pm 0,01$  мм. Ширина образца измерялась цифровым микрометром и равна  $25,025 \pm 0,002$  мм.

### 5.2.1. Измерения скорости распространения продольной волны

Измерения толщиномером Echotest 1076 Basic с ПЭП на частоту 4 МГц проводились вдоль (99,92 мм) и поперек образца (25,025 мм). С увеличением толщины скорость продольной волны уменьшилась на 0,019 мм/мкс ( $\delta = -0,32$  %), что объясняется либо частотно-зависимым затуханием, либо анизотропией образца. Среднее значение скорости продольной волны равно 5,931 мм/мкс ( $\Delta = \pm 0,0095$ ,  $\delta = \pm 0,16$  %). Аналогичные измерения, проведенные системой АВГУР-АРТ с ПЭП на частоту 2,5 МГц и обработкой эхосигналов адаптивным алгоритмом, с увеличением толщины дают существенно меньший разброс измерения скорости звука, равный  $\Delta = \pm 0,001$  мм/мкс ( $\delta = \pm 0,02$  %) при средней скорости 5,936 мм/мкс. Это позволяет сделать вывод, что образец в указанных направлениях можно считать практически изотропным. Результаты измерений сведены в табл. 3.

Таблица 3

Значения скорости продольной волны в образце ISO 19675 PAUT BLOCK, мм/мкс

Толщина, мм	Аппаратура	Echotest 1076 Basic	АВГУР-АРТ
		4 МГц	Адаптивный метод, 2,5 МГц
25,025		5,941	5,935
99,92		5,922	5,937
Среднее значение скорости, мм/мкс		5,931	5,936

### 5.2.2. Измерения скорости распространения поперечной волны

С помощью специального ПЭП на частоту 5 МГц системой АВГУР-АРТ была измерена скорость распространения поперечной волны (табл. 4). Среднее значение скорости поперечной волны, определенное по пересечению нуля, равно 3,238 мм/мкс ( $\Delta = \pm 0,003$  мм/мкс,  $\delta = \pm 0,09$  %). Среднее значение скорости поперечной волны, определенное адаптивным методом, равно 3,236 мм/мкс ( $\Delta = \pm 0,0031$  мм/мкс,  $\delta = \pm 0,1$  %). Измеренная скорость поперечной волны с увеличением толщины уменьшается из-за частотно-зависимого затухания для обоих методов измерений.

Таблица 4

Значения скорости поперечной волны в образце ISO 19675 PAUT BLOCK, мм/мкс

Толщина, мм	Аппаратура	АВГУР-АРТ	
		По пересечению нуля, 5 МГц	Адаптивный метод, 5 МГц
25,025		3,241	3,239
99,92		3,235	3,233
Среднее значение скорости, мм/мкс		3,238	3,236

### 5.3. Образец из рексолита с плоскопараллельными границами

Для проверки эффективности работы адаптивного алгоритма в объектах с высоким частотно-зависимым затуханием были проведены измерения скорости продольной волны в образце из рексолита толщиной  $15,24 \pm 0,002$  мм. Для измерения эхосигналов использовалась антенная решетка на частоту 5 МГц из 32 элементов и антенная решетка на частоту 10 МГц из 128 элементов.

Так как волновое сопротивление рексолита меньше, чем керамики и протектора, то эхосигналы меняют знак только при отражении от нижней свободной границы образца. Поэтому знаки у однократно- и двукратно отраженных от дна импульсов, которые отмечены выносками 1 и 2 на рис. 13, разные. Сильное частотно-зависимое затухание привело к заметному изменению формы, как было показано и в численном эксперименте (см. рис. 6).

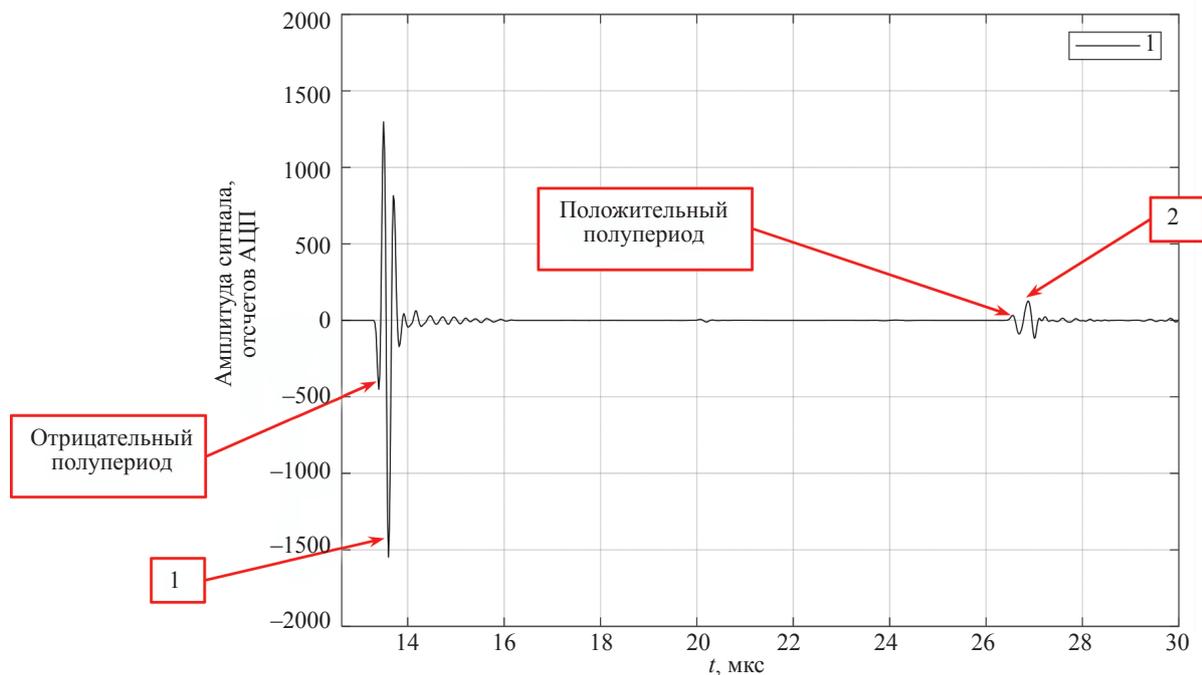


Рис. 13. Вид эхосигнала 17 элемента для антенной решетки на частоту 5 МГц.

Измерение скорости продольной волны проводилось с помощью толщиномера Echotest 1076 Basic и двух ПЭП на частоты 4 и 8 МГц. Средняя скорость продольной волны равна 2,320 мм/мкс ( $\Delta = \pm 0,01$  мм/мкс,  $\delta = \pm 0,4$  %). При измерениях системой АВГУР-АРТ использовался эхосигнал 17-го элемента антенной решетки на частоте 5 МГц (см. рис. 13) и 64-го элемента решетки на частоте 10 МГц, так что излучающие элементы решеток находились примерно в центре образца. Метод по пересечению нуля из-за заметного изменения формы сигнала показал наихудший результат и поэтому не приводится. Предлагаемый адаптивный метод обработки демонстрирует на порядок меньше разброс измерений равный  $\Delta = \pm 0,001$  мм/мкс ( $\delta = \pm 0,04$  %). Среднюю скорость продольной волны можно считать равной 2,324 мм/мкс. Результаты измерений сведены в табл. 5.

Таблица 5

Значения скорости продольной волны в рексолитовом образце, мм/мкс

Аппаратура	4 МГц	8 МГц	5 МГц	10 МГц
Echotest 1076 Basic	2,330	2,310		
АВГУР-АРТ, адаптивный метод			2,325	2,323
Среднее значение скорости, мм/мкс	2,320		2,324	

## 6. ВЫВОДЫ

Предложен алгоритм на основе построения модели сигнала с адаптивным словарем для определения времени прихода ультразвуковых импульсов для измерения скорости распространения продольной или поперечной волны.

Численный эксперимент с использованием эхосигналов, рассчитанных по модели Кельвина—Фойгта, показал, что предлагаемый адаптивный алгоритм определяет скорость распространения волны с точностью в три раза выше, чем метод по пересечению нуля.

В модельном эксперименте по измерению скорости звука в разновысотном образце ошибка адаптивного метода в несколько раз меньше ошибки измерений, проведенных двумя серийно выпускаемыми толщиномерами.

Измерения в образце ISO 19675 PAUT BLOCK и в образце из рексолита с плоскопараллельными гранями так же показали большую устойчивость адаптивного алгоритма определения скорости ультразвуковых волн к искажению формы эхосигнала из-за частотно-зависимого затухания.

В настоящий момент можно провести измерение многократно отраженного импульса от границ объекта контроля и, зная его толщину, рассчитать форму принятого эхосигнала в зависимости от скорости продольной волны. Скорость, при которой разница между измеренным и рассчитанным сигналом окажется минимальной, будет оценкой скорости в объекте. В зависимости от используемой модели излучения, распространения, отражения и приема звука можно учесть и дисперсию скорости звука, и частотно-зависимое затухание, и дифракционные эффекты и эффекты измерения формы импульса при отражении от дна. По-видимому, такой подход позволит наиболее точно оценить скорость распространения волны.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гук В.И., Наконечная О.А. Алгоритмы численного определения временных характеристик сигналов акустической эмиссии // Восточноевропейский университет экономики и менеджмента. Черкассы. 2012. № 6. С. 73—87.
2. Иванов Е.С., Пярсинен А.Т., Шагиев Н.М. Способ измерения интервалов времени между двумя импульсными сигналами (патент) / Пат. SU 429409. Заявка 1753530/18-10 от 29.02.1972. Опубл. 25.05.1972. 4 с.
3. Муравьев В.В., Злобин Д.В., Земсков Т.И., Безрученков Г.В., Сяктерева В.В. Реализация импульсного метода определения скорости ультразвука с высокой точностью // Интеллектуальные системы в производстве. 2021. Т. 19. № 2. С. 13—19. DOI: 10.22213/2410-9304-2021-2-13-19
4. Солдатов А.В., Иванов Н.Г. Оценка частоты сети в цифровых системах РЗА по переходу через ноль: характеристики точности // Релейная защита и автоматизация. 2021. № 4. 2013. С. 22—25.

5. Солдатов А.И., Шестаков А.В., Пономарев С.В. Применение методов огибающих второго и третьего порядков для определения временного положения эхо-импульса // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 317. № 2. С. 63—66.
6. Дядюнов А.Н., Чарикова Д.М. Обработка информации в импульсно фазовой радионавигационной системе // Научный вестник МГТУ ГА. 2011. № 164. С. 24—32.
7. Бычкова И.Ю., Бычков А.В., Славутский Л.А. Алгоритм корреляционной обработки сигналов при двухлучевом распространении ультразвука // Вестник Чувашского университета. 2017. № 1. С. 218—224.
8. Маранов Д. Методы статистики. 2013. Информационный портал. URL: <https://medstatistic.ru/methods/methods.html/> (дата обращения 12.10.2023).
9. Кибзун А.И. Задачи стохастического программирования с вероятностными критериями. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 774 с.
10. Орлов А.И. Двухвыборочный критерий Вилкоксона – анализ двух мифов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2014. № 104 (10). С. 1—21.
11. Гублер Е.В., Генкин А.А. Применение непараметрических критериев статистики в медико-биологических исследованиях. Л.: Медицина, 1973. 144 с.
12. Никулин М.С. О критерии хи-квадрат для непрерывных распределений // Теория вероятностей и ее применение. 1973. Т. 18. № 3. С. 559—568.
13. Чибисов Д.М. Лекции по асимптотической теории ранговых критериев. М.: МИАН, 2009. Вып. 14. 176 с.
14. Бурда Е.А., Богомоллов Д.Е., Науменко А.П. Энтропийный подход при фильтрации сигналов акустической эмиссии // Контроль. Диагностика. 2023. Т. 26. № 1. С. 9—14.
15. Леонидов В.В. Учебно-методический комплект по дисциплине «Цифровая обработка сигналов». 2019. URL: <https://leonidov.su/wp-content/uploads/2020/03/FFT-Lecture-V.V.-Leonidov.pdf> (дата обращения 12.10.2023).
16. Hu Hongwei, Tian Jia, Zeng Huijie, Yu Xiaofeng, Wang Xianghong. Ultrasonic Characterization Method of Carbon Nanotubes Orientation Using Sparse Representation // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2022. V. 58. No. 2. P. 96—107. [Ху Хунвэй, Тиан Цзя, Цзэн Хуицзе, Юй Сяофэн, Ван Сянхун. Ультразвуковой метод определения ориентации углеродных нанотрубок при использовании разреженного представления // Дефектоскопия. № 2. 2022. С. 28—40.]
17. Mallat S.G., Zhang Z. Matching Pursuits with Time-Frequency Dictionaries // IEEE Transactions on Signal Processing. № 12. 1993. P. 3397—3415.
18. Рабинович Е.В. Методы и средства обработки сигналов / Учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. 144 с.
19. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы / 3-е изд. М.: «Высшая школа», 2000. 462 с.
20. Болотникова О.В., Тарасов Д.В., Тарасов Р.В. Линейное программирование: симплекс-метод и двойственность / Учеб. пособие. Пенза : Изд-во ПГУ, 2015. 84 с.
21. Матренин П.В., Гриф М.Г., Секаев В.Г. Методы стохастической оптимизации. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. 67 с.
22. Xiao Fu, Wangsheng Liu, Bin Zhang, Hua Deng. Quantum Behaved Particle Swarm Optimization with Neighborhood Search for Numerical Optimization // Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering. V. 2013. Article ID 469723. 10 p.
23. Каталог ультразвуковых толщиномеров Karl Deutsch: URL: <https://karldeutsch.ru/product-category/толщиномеры-ультразвуковые/> (дата обращения 12.10.2023).
24. Каталог ультразвуковых толщиномеров, выпускаемых в НПК «АКС». URL: <https://acsys.nt-rt.ru/catalog/tolshhinomery> (дата обращения 12.10.2023).
25. Микрометр МКЦ-25 0,001 ЧИЗ. URL: <https://www.microntools.ru/p/fe/8f/67f4a1306f33a6422654cceb656/Описание%20типа.pdf> (дата обращения 12.10.2023).
26. Кварцевый генератор ЕСХ-53В-DU. URL: <https://ecsxtal.com/products/crystals/surface-mount-crystals/ecx-53b-du/> (дата обращения 14.09.2023).
27. Гитис М.Б., Химуни А.С. О дифракционных эффектах в ультразвуковых измерениях // Акустический журнал. 1968. Т. XIV. № 4. С. 489—513.
28. Базылев П.В., Луговой В.А., Снытко С.Л., Андрианова Н.С., Рудаков В.К. Эталонная установка для комплексных измерений акустических параметров твердых сред // Измерительная техника. 2023. № 2. С. 55—62. DOI: <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2023-2-55-62>
29. Официальный сайт компании ИНКОТЕС. URL: <http://www.encotes.ru/node/25> (дата обращения 12.10.2023).
30. Кристенсен Р. Введение в теорию вязкоупругости. М.: Мир, 1974. 228 с.
31. Максимов Ю.В., Легович Ю.С., Максимов Д.Ю. Моделирование демпферов из вязкоупругих материалов // Журнал технической физики. 2021. Т. 91. № 3. С. 388—394.
32. Официальный сайт фирмы «ЭХО+». URL: <https://echoplus.ru/> (дата обращения: 12.10.2023).
33. Официальный сайт компании Karl Deutsch. URL: <https://karldeutsch.ru/> (дата обращения 12.10.2023).
34. Официальный сайт компании «АКС». URL: <https://acsys.ru/> (дата обращения 12.10.2023).

## REFERENCES

1. *Guk V.I., Nakonechnaya O.A.* Algorithms for numerical determination of temporal characteristics of acoustic emission signals // Eastern European University of Economics and Management. Cherkasy. 2012. No. 6. P. 73—87.
2. *Ivanov E.S., Pyarvinen A.T., Shagiev N.M.* Method for measuring time intervals between two pulse signals (patent) / Pat. SU 429409. Application 1753530/18-10 dated 29.02.1972. Published 25.05.1972. 4 p.
3. *Muravyev V.V., Zlobin D.V., Zemskov T.I., Bezruchyankov G.V., Syaktereva V.V.* Implementation of the pulse method for determining the speed of ultrasound with high accuracy // Intelligent Systems in Production. 2021. V. 19. No. 2. P. 13—19. DOI: 10.22213/2410-9304-2021-2-13-19
4. *Soldatov A.V., Ivanov N.G.* Network frequency estimation in digital relay protection systems based on zero crossing: accuracy characteristics // Relay Protection and Automation. 2013. No. 4. P. 22—25.
5. *Soldatov A.I., Shestakov A.V., Ponomarev S.V.* Application of second and third-order envelope methods for determining the temporal position of an echo pulse // Proceedings of Tomsk Polytechnic University. 2010. V. 317. No. 2. P. 63—66.
6. *Dyadyunov A.N., Charikova D.M.* Information processing in the pulse-phase radio navigation system // Scientific Bulletin of Moscow State Technical University of Civil Aviation. 2011. No. 164. P. 24—32.
7. *Bychkova I.Yu., Bychkov A.V., Slavutsky L.A.* Algorithm for correlation processing of signals in two-beam ultrasonic propagation // Bulletin of Chuvash University. 2017. No. 1. P. 218—224.
8. *Marapov D.* Methods of statistics. 2013. Information portal. URL: <https://medstatistic.ru/methods/methods.html/> (accessed on 12.10.2023).
9. *Kibzun A.I.* Stochastic programming problems with probabilistic criteria. Moscow: FIZMATLIT, 2009. 774 p.
10. *Orlov A.I.* Wilcoxon two-sample test — analysis of two myths // Polythematic Network Electronic Scientific Journal of Kuban State Agrarian University. 2014. No. 104 (10). P. 1—21.
11. *Gubler E.V., Genkin A.A.* Application of nonparametric statistics criteria in medical and biological research. Leningrad: Medicine, 1973. 144 p.
12. *Nikulin M.S.* On the chi-square criterion for continuous distributions // Theory of Probability and its Applications. 1973. V. 18. No. 3. P. 559—568.
13. *Chibisov D.M.* Lectures on the asymptotic theory of rank criteria. Moscow: MIAN, 2009. Issue 14. 176 p.
14. *Burda E.A., Bogomolov D.E., Naumenko A.P.* Entropy approach in filtering acoustic emission signals // Control. Diagnostics. 2023. V. 26. No. 1. P. 9—14.
15. *Leonidov V.V.* Educational and methodical complex on the discipline "Digital Signal Processing". 2019. URL: <https://leonidov.su/wp-content/uploads/2020/03/FFT-Lecture-V.V.-Leonidov.pdf> (accessed on 12.10.2023).
16. *Hu Hongwei, Tian Jia, Zeng Huijie, Yu Xiaofeng, Wang Xianghong.* Ultrasonic Characterization Method of Carbon Nanotubes Orientation Using Sparse Representation // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2022. V. 58. No. 2. P. 96—107.
17. *Mallat S.G., Zhang Z.* Matching Pursuits with Time-Frequency Dictionaries // IEEE Transactions on Signal Processing. 1993. No. 12. P. 3397—3415.
18. *Rabinovich E.V.* Methods and means of signal processing. Tutorial. Novosibirsk: Publishing House of NSTU, 2009. 144 p.
19. *Baskakov S.I.* Radio circuits and signals / 3rd ed. Moscow: "Higher School", 2000. 462 p.
20. *Bolotnikova O.V., Tarasov D.V., Tarasov R.V.* Linear programming: simplex method and duality. Tutorial. Penza: Publishing House of PSU, 2015. 84 p.
21. *Matrenin P.V., Grif M.G., Sekaev V.G.* Methods of stochastic optimization. Novosibirsk: Publishing House of NSTU, 2016. 67 p.
22. *Xiao Fu, Wangsheng Liu, Bin Zhang, Hua Deng.* Quantum Behaved Particle Swarm Optimization with Neighborhood Search for Numerical Optimization // Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering. V. 2013. Article ID 469723. 10 p.
23. *Karl Deutsch* Ultrasonic Thickness Gauge Catalog: URL: <https://karldeutsch.ru/product-category/толщиномеры-ультразвуковые/> (accessed on 12.10.2023).
24. *Catalog of ultrasonic thickness gauges produced by NPK "AKS".* URL: <https://acsys.nt-rt.ru/catalog/tolshhinomery> (accessed on 12.10.2023).
25. *Micrometer MKC-25 0.001 CHIZ.* URL: <https://www.microntools.ru/p/fe/8f/67f4a1306f33a6422654cсебс656/Описание%20типа.pdf> (accessed on 12.10.2023).
26. *Quartz generator ECX-53B-DU.* URL: <https://ecsxtal.com/products/crystals/surface-mount-crystals/ecx-53b-du/> (accessed on 14.09.2023).
27. *Gitis M.B., Khimunin A.S.* On diffraction effects in ultrasonic measurements // Acoustic Journal. 1968. V. XIV. No. 4. P. 489—513.
28. *Bazylev P.V., Lugovoy V.A., Snytko S.L., Andrianova N.S., Rudakov V.K.* Reference setup for comprehensive measurements of acoustic parameters of solid media // Measuring Equipment. 2023. No. 2. P. 55—62. DOI: <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2023-2-55-62>

29. Official website of the company «INKOTES». URL: <http://www.encotes.ru/node/25> (accessed on 12.10.2023).
  30. *Kristensen R.* Introduction to the theory of viscoelasticity. Moscow: Mir, 1974. 228 p.
  31. *Maximov Yu.V., Legovich Yu.S., Maximov D.Yu.* Modeling of dampers from viscoelastic materials // Journal of Technical Physics. 2021. V. 91. No. 3. P. 388–394.
  32. Official website of the company «ECHO+». URL: <https://echoplus.ru/> (accessed on 12.10.2023).
  33. Official website of Karl Deutsch company. URL: <https://karldeutsch.ru/> (accessed on 12.10.2023).
  34. Official website of the company «AKS». URL: <https://acsys.ru/> (accessed on 12.10.2023).
-

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АДАПТИВНЫХ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2024 г. Р.В. Ромашко<sup>1,\*</sup>, О.В. Башков<sup>1,2,\*\*</sup>, Т.А. Ефимов<sup>1,\*\*\*</sup>, М.Н. Безрук<sup>1,\*\*\*\*</sup>,  
Д.А. Бобруйко<sup>1,\*\*\*\*\*</sup>, Н.В. Макарова<sup>1,\*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН,  
Россия 690041 Владивосток, ул. Радио, 5

<sup>2</sup>Комсомольский-на-Амуре государственный университет,  
Россия 681013 Комсомольск-на-Амуре, просп. Ленина, 27

E-mail: \*romashko@iacp.dvo.ru; \*\*bashkov@knastu.ru; \*\*\*efimov@iacp.dvo.ru; \*\*\*\*bezmisha@iacp.dvo.ru;  
\*\*\*\*\*bobruiyko@iacp.dvo.ru; \*\*\*\*\*makarova@iacp.dvo.ru

Поступила в редакцию 07.12.2023; после доработки 08.12.2023

Принята к публикации 08.12.2023

Представлены результаты экспериментального исследования работы волоконно-оптических датчиков (ВОД) акустической эмиссии, внедряемых в структуру полимерных композиционных материалов (ПКМ). Проведена оценка надежности и отказоустойчивости ВОД при критических механических нагрузках на ПКМ, а также исследовано влияние наличия ВОД, внедренного в структуру ПКМ, на механические характеристики материала. Для демодуляции сигналов ВОД акустической эмиссии использованы принципы адаптивной голографической интерферометрии, базирующейся на двухволновом взаимодействии на динамической голограмме, формируемой в фоторефрактивном кристалле.

*Ключевые слова:* полимерный композиционный материал, неразрушающий контроль, акустическая эмиссия, оптоволоконный датчик, адаптивный интерферометр.

## FEATURES OF APPLICATION OF ADAPTIVE INTERFEROMETRIC FIBER SENSORS OF ACOUSTIC EMISSION TO MONITOR THE CONDITION OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS

R.V. Romashko<sup>1,\*</sup>, O.V. Bashkov<sup>1,2,\*\*</sup>, T.A. Efimov<sup>1,\*\*\*</sup>, M.N. Bezruk<sup>1,\*\*\*\*</sup>, D.A. Bobruyko<sup>1,\*\*\*\*\*</sup>,  
N.V. Makarova<sup>1,\*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Institute of Automation and Control Processes FEB RAS,  
Russia 690041 Vladivostok, Radio street, 5

<sup>2</sup>Komsomolsk-na-Amure State University,  
Russia 681013 Komsomolsk-na-Amure, Prospekt Lenina, 27

E-mail: \*romashko@iacp.dvo.ru; \*\*bashkov@knastu.ru; \*\*\*efimov@iacp.dvo.ru;  
\*\*\*\*bezmisha@iacp.dvo.ru; \*\*\*\*\*bobruiyko@iacp.dvo.ru; \*\*\*\*\*makarova@iacp.dvo.ru

The results of an experimental study of the operation of fiber optic sensors (FOS) of acoustic emission introduced into the structure of polymer composite materials (PCM) are presented. The reliability and fault tolerance of FOS under critical mechanical loads on PCM was assessed, and the influence of the presence of FOS embedded into the structure of PCM on the mechanical characteristics of the material was investigated. For demodulation of FOS output signals, the principles of adaptive holographic interferometry based on two-wave mixing at dynamic hologram formed in a photorefractive crystal are used.

*Keywords:* polymer composite material, NDT, acoustic emission, fiber optic sensor, adaptive interferometer.

DOI: 10.31857/S0130308224010023

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время полимерные композиционные материалы (ПКМ) становятся все более востребованными современной промышленностью. Внимание к этим материалам обусловлено тем, что ПКМ удовлетворяют жестким, порой противоречащим друг другу требованиям, таким как обеспечение малого веса конструкций при сохранении максимальной прочности и упругости, а также надежности и долговечности работы конструкций в тяжелых условиях, в том числе при

высоких температурах и в агрессивных средах [1]. Однако при сильных, особенно циклических, механических нагрузках внутренняя структура ПКМ может испытывать необратимые изменения, проявляющиеся в появлении внутри материала пор, трещин, отслоений и других дефектов, что неизбежно влечет собой падение прочностных характеристик материала. С учетом того, что такие изменения могут протекать катастрофически быстро, повышается актуальность разработки экспресс-методов диагностики ПКМ для обеспечения безопасности и надежности их использования.

Одним из перспективных методов диагностики и неразрушающего контроля является метод акустической эмиссии (АЭ), который позволяет обнаруживать и контролировать появление и развитие дефектов и трещин в конструкционных материалах на ранних стадиях. Этот метод использует акустические сигналы, сопровождающие появление внутренних дефектов или структурных изменений материала. За последние годы разработаны множество подходов и алгоритмов анализа данных АЭ для обнаружения и локализации развивающихся дефектов в ПКМ [2—5].

Классические методы регистрации сигналов АЭ базируются на использовании пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП) [6]. Высокая чувствительность ПЭП АЭ делает их перспективными для исследования свойств материалов на стадии изготовления или испытания, однако значительный вес, габариты и низкая помехозащищенность ПЭП затрудняют их применение для контроля элементов конструкций непосредственно в процессе эксплуатации последних. Кроме того, значительная экстинкция акустических сигналов в ПКМ обуславливает необходимость использования множества точечных ПЭП для диагностики протяженных элементов и конструкций [7]. В свою очередь, альтернативный подход в построении АЭ систем неразрушающего контроля базируется на основе применения для регистрации сигналов АЭ волоконно-оптических датчиков (ВОД) [8—10]. В отличие от традиционных для АЭ контроля пьезоэлектрических датчиков ВОД имеют ряд преимуществ, таких как малый вес, гибкость, устойчивость к электромагнитным помехам, агрессивным средам и высоким температурам [11]. Кроме того, протяженные ВОД АЭ, обладающие распределенной чувствительностью, способны обеспечить регистрацию акустических сигналов по всей длине укладки датчика на объекте исследования, что в итоге повышает эффективность системы диагностики в целом [12, 13]. При этом сами волоконные световоды, будучи внедренными в ПКМ на стадии его изготовления, могут выполнять не только функцию сенсора, но и армирующего волокна [14, 15], а применение методов адаптивной голографической интерферометрии для детектирования сигналов волоконно-оптических датчиков АЭ [16] открывает перспективы для использования последних в задаче диагностики элементов из ПКМ непосредственно в процессе их эксплуатации.

Вместе с тем механическая нагрузка, под воздействием которой находится ПКМ, может приводить к ухудшению метрологических параметров ВОД, внедренных в структуру композитного материала, и тем самым ограничивать область их применения в задачах неразрушающего контроля. С другой стороны, открытым остается вопрос влияния волоконных световодов, внедряемых в структуру ПКМ, на прочностные свойства последнего. В этой связи в настоящей работе выполнено экспериментальное исследование влияния механических напряжений, возникающих в нагруженном ПКМ, на чувствительность интегрированных в его структуру волоконно-оптических чувствительных сенсоров АЭ. Кроме этого, выполнено исследование влияния плотности укладки ВОД в структуре ПКМ на его механические свойства.

## ОБРАЗЦЫ ПКМ И ПРИНЦИП РЕГИСТРАЦИИ АЭ

Образцы ПКМ, использованные в настоящем исследовании, изготавливали методом вакуумной инфузии из стеклоткани марки «СТ-62004», 10 слоев которой пропитывали эпоксивинилэфирной смолой на основе бисфенола А марки «Derakane 411-350». Из полученных таким образом плит ПКМ толщиной 2 мм вырезали полосы шириной 16 мм и длиной 150 мм.

Система регистрации сигналов АЭ в ПКМ основана на использовании волоконно-оптического датчика, чувствительным элементом которого является протяженный кварцевый волоконный световод, интегрированный внутрь композиционного материала на стадии его изготовления. В работе для реализации датчика использовали многомодовый волоконный световод (сердцевина диаметром 62,5 мкм, оболочка — 125 мкм) длиной 1 м, центральную часть которого (15 см) размещали внутри изготавливаемого образца ПКМ вдоль его длинной стороны между 5-м и 6-м слоями стеклоткани.

Оптическая схема системы регистрации АЭ показана на рис. 1. Волны АЭ, генерируемые развивающимися в материале дефектами, распространяясь по образцу ПКМ, воздействуют и на материал волоконного световода, приводя к модуляции фазы проходящего по нему лазерного излучения (длина волны 1064 нм). Далее фазомодулированный объектный световой пучок, полученный

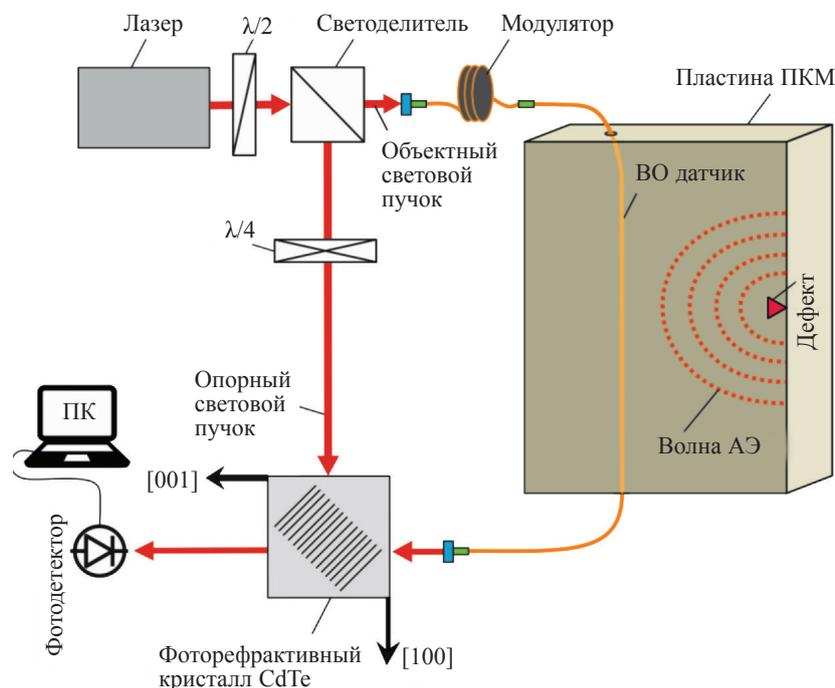


Рис. 1. Оптическая схема системы регистрации АЭ на основе волоконно-оптического датчика и адаптивного голографического интерферометра.

на выходе волоконного световода, направляется в фоторефрактивный кристалл теллурида кадмия (CdTe), где его интерференция с опорным пучком приводит к формированию динамической объемной фоторефрактивной голограммы [17]. В свою очередь, взаимодействие объектной и опорной волн на голограмме приводит к преобразованию модуляции фазы объектного пучка в модуляцию его интенсивности, которая регистрируется фотодетектором. Таким образом, использование волоконно-оптического световода в схеме адаптивного голографического интерферометра позволяет обеспечить регистрацию акустических сигналов, возникающих в ПКМ.

Для демонстрации возможности регистрации волоконно-оптической системой акустических сигналов, в оптический тракт объектного пучка посредством калиброванного пьезоэлектрического модулятора вводилась модуляция фазы световой волны на частоте 50 кГц и амплитудой 0,2 рад, что эквивалентно акустическому давлению 50 мПа. На рис. 2 на вставке «тестовый сигнал» показан зарегистрированный при этом выходной сигнал адаптивного интерферометра, отношение сигнал/шум которого составило 6 дБ, что является приемлемым для проведения измерений.

### РАБОТА ВОД В КОМПОЗИТАХ В НАГРУЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

Для того, чтобы определить, насколько оптическое волокно и соответственно ВОД АЭ на его основе, будучи внедренным в ПКМ, способно выдерживать механические нагрузки и обеспечивать при этом эффективную регистрацию волн АЭ, проводились следующие экспериментальные исследования. Образец ПКМ подвергался механическому нагружению на изгиб, при этом с помощью ВОД регистрировались сигналы АЭ, генерируемые возникающими внутри ПКМ дефектами. Для контроля изменений метрологических характеристик самого ВОД, интегрированного в образец ПКМ, а также его устойчивости и надежности, использовался вышеописанный подход с внесением дополнительной фазовой тестовой модуляции (50 кГц, 0,2 рад).

Механические испытания образца ПКМ проводились с использованием трехточечного изгиба на универсальной испытательной машине SHIMADZU AG-X plus с максимальным усилием

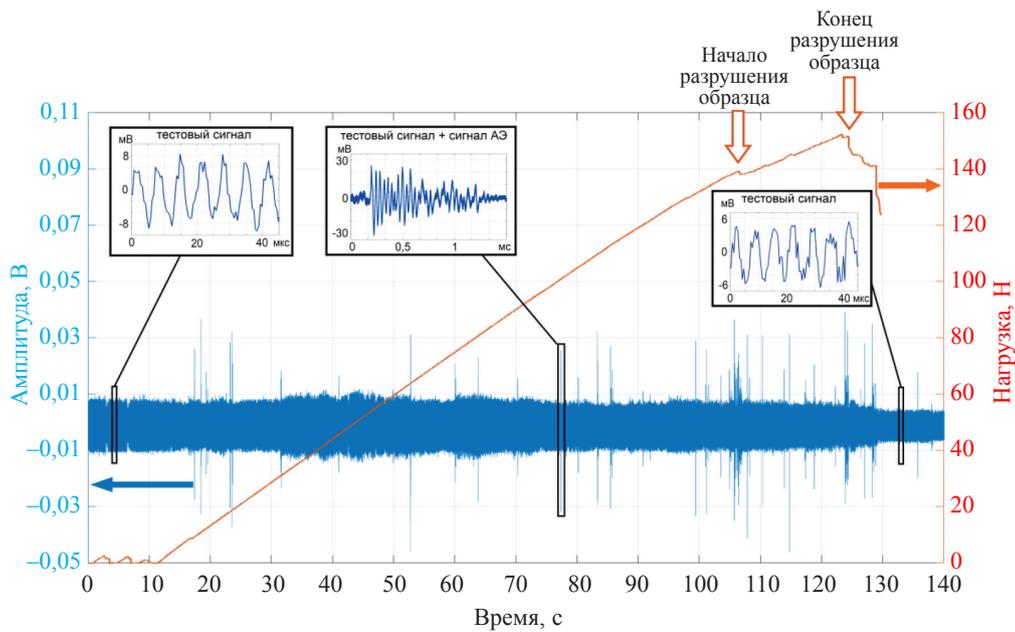


Рис. 2. Динамика изменения сигнала в чувствительном элементе ВОД АЭ, интегрированном в образец ПКМ, в процессе его нагружения в схеме трехточечного изгиба.

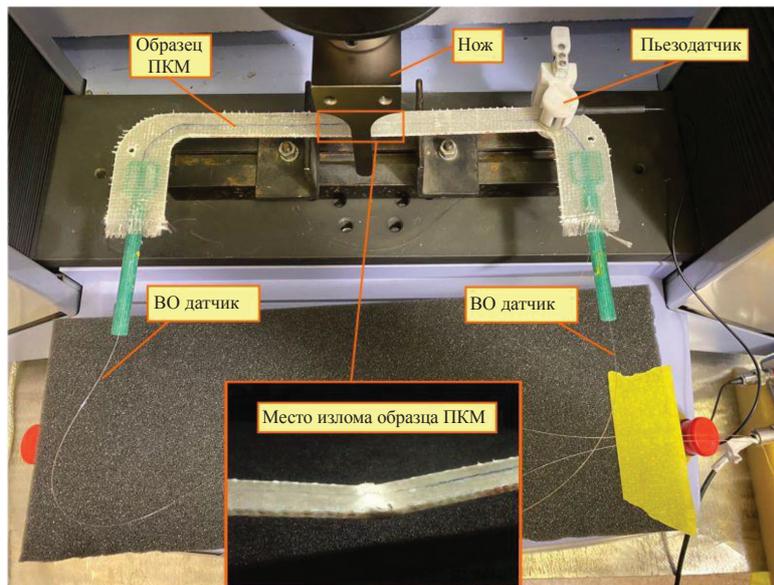


Рис. 3. Образец ПКМ с внедренным в его структуру ВОД в процессе испытания на трехточечный изгиб.

растяжения—сжатия 10 кН (рис. 3). В процессе испытаний образец ПКМ непрерывно нагружался до момента его разрушения (сила нагружения не менее 155 Н). На рис. 2 представлена осциллограмма сигнала, зарегистрированного ВОД в течение всего периода нагружения образца. Как видно из рисунка, нагрузка начала прикладываться к образцу в момент времени 12 с и увеличивалась со скоростью 1,5 Н/с. Начиная с момента времени 17 с, в образце начался процесс образования дефектов, сопровождающихся генерацией сигналов АЭ, регистрируемых ВОД. На вставке рис. 2 «тестовый сигнал + сигнал АЭ» показана развертка типового сигнала, полученного при испытании одного из образцов. Как видно, уровень зарегистрированного сигнала АЭ значительно превышает уровень тестового сигнала при отношении сигнал/шум не хуже 12 дБ. С момента времени 105 с начинается разрушение образца, которое сопровождается повышением

частоты появления единичных событий АЭ, превышающих общий уровень шума. Скорость приращения нагрузки при этом замедляется. В интервале времени 123—130 с происходит разрушение (излом) образца в центральной его части в области приложения изгибающей нагрузки. В связи с тем, что ПКМ имеет волокнистую структуру, полного разрушения образца с разделением на две части не происходит. Разрушенный образец показан на вставке рис. 3. При этом волоконный световод, внедренный в образец, после его разрушения сохранил свою целостность и продолжил функционирование, что подтверждается дальнейшей регистрацией сигналов АЭ. Важно отметить, что флуктуации амплитуды тестового сигнала за весь период измерений не превысили 15 %, что указывает на высокую помехозащищенность ВОД на основе адаптивного голографического интерферометра. Более того, после разрушения образца тестовый сигнал сохранился (см. вставку «тестовый сигнал» в момент времени 133 с), хотя и снизился на 2,4 дБ, что свидетельствует о высокой надежности и отказоустойчивости датчика, способного сохранить работоспособность даже после разрушения образца.

### ОЦЕНКА СТРУКТУРНОЙ ПРОЧНОСТИ ПКМ С ВНЕДРЕННЫМИ ВОД

Внедренные в структуру композиционного материала волоконные световоды сами могут играть роль технологических дефектов, приводящих к искажению структуры слоев, а также способных вызывать локальную концентрацию напряжений и деформации, что в итоге может негативно сказаться на прочностных характеристиках ПКМ. В процессе изготовления композитных материалов область вокруг оптического волокна может заполняться эпоксидной смолой, создавая «смоляные карманы», которые часто являются местами концентрации напряжений при нагрузках. Таким образом, возникает необходимость исследования влияния интегрированных в структуру ПКМ оптоволоконных чувствительных элементов на его механические свойства.

С этой целью был проведен сравнительный анализ результатов механических испытаний по схеме трехточечного изгиба 16-ти десятислонных образцов ПКМ с различным числом (от 0 до 5) встроенных в их структуру стандартных оптических волокон диаметром 125 мкм, а именно: 3 образца без волокон, 4 образца с одним волокном, 4 образца с двумя волокнами и 5 образцов с пятью волокнами. Эффективная плотность укладки оптических волокон в поперечном сечении ПКМ составила: для образцов с одним волокном —  $3,3 \text{ см}^{-2}$ , для образцов с двумя волокнами —  $6,7 \text{ см}^{-2}$ , для образцов с пятью волокнами —  $16,7 \text{ см}^{-2}$ . Как и в предыдущем эксперименте, оптические волокна были интегрированы между 5 и 6 слоями стеклоткани вдоль длинной стороны образцов.

В испытаниях на статический изгиб к образцам прикладывалась возрастающая нагрузка в диапазоне 0—200 Н вплоть до их разрушения. По результатам испытаний определены экспериментальные значения предела прочности образцов с разным числом внедренных волоконных световодов. Анализ полученных результатов (рис. 4) показал отсутствие, в пределах статистической ошибки, закономерной зависимости предела прочности образца ПКМ, при котором происходит его разрушение, от числа встроенных в структуру ПКМ волоконных световодов.

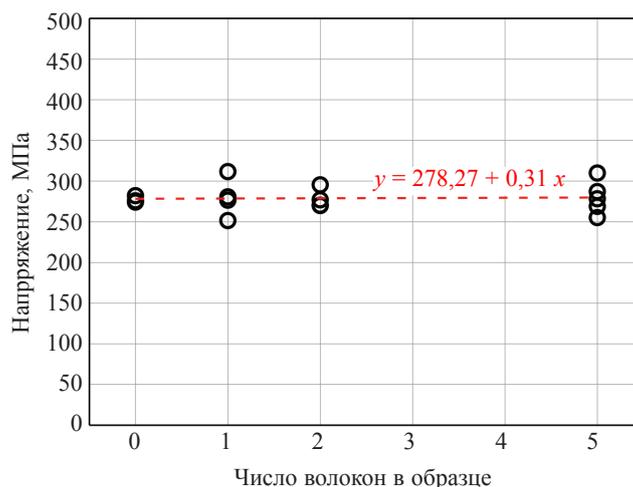


Рис. 4. Диаграмма значений предела прочности образцов ПКМ с разным количеством внедренных волоконных световодов при испытании на изгиб.

Полученные результаты показали, что увеличение плотности укладки в образцах ПКМ волоконных чувствительных элементов не приводит к ухудшению его механических свойств. Возможным фактором, который способствует такому поведению композиционного материала, является использование для его изготовления биаксиальной ткани, обладающей специфической структурой армирования и обеспечивающей наличие достаточного свободного пространства для укладки оптического волокна, что создает условия для его более эффективной интеграции в структуру материала без образования смоляных карманов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в настоящей работе представлены результаты исследований, направленных на разработку и анализ новых подходов к созданию волоконно-оптических распределенных систем регистрации акустической эмиссии. Установлено, что волоконно-оптические датчики, встроенные в структуру ПКМ в процессе изготовления, сохраняют свою работоспособность при приложении к деформируемому материалу механической нагрузки и обеспечивают регистрацию сигналов АЭ от начала возникновения повреждений в композиционном материале и вплоть до его разрушения. Показано, что при одновременном внедрении в структуру ПКМ нескольких плотно размещенных волоконных световодов, материал сохраняет свои механические свойства и изменения предела прочности, определенного по результатам трехточечного изгиба, не происходит.

Полученные результаты могут быть использованы для развития новых систем неразрушающего контроля элементов ответственных инженерных и технических конструкций непосредственно в процессе их эксплуатации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант РФФ 21-19-00896).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колобков А.С. Полимерные композиционные материалы для различных конструкций авиационной техники // Труды ВИАМ. 2020. № 6—7 (89). С. 38—44.
2. Gutkin R., Green C.J., Vangrattanachai S., Pinho S.T., Robinson P., Curtis P.T. On acoustic emission for failure investigation in CFRP: Pattern recognition and peak frequency analyses // Mechanical Systems and Signal Processing. 2011. V. 25(4). P. 1393—1407. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2010.11.014>
3. Sause M.G.R., Müller T., Horoschenkoff A., Horn S. Quantification of failure mechanisms in mode-I loading of fiber reinforced plastics utilizing acoustic emission analysis // Composites Science and Technology. 2012. V. 72(2). P. 167—174. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.10.013>
4. Surgeon M., Wevers M. Modal analysis of acoustic emission signals from CFRP laminates // NDT & E International. 1999. V. 32(6). P. 311—322. [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(98\)00077-2](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(98)00077-2)
5. Sause M.G.R., Schmitt S., Kalafat S. Failure load prediction for fiber-reinforced composites based on acoustic emission // Composites Science and Technology. 2018. V. 164. P. 24—33. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.04.033>
6. Шаранов В.М., Мусиенко М.П., Шаранова Е.В. Пьезоэлектрические датчики. М.: Техносфера, 2006. 628 с. (Мир электроники.) ISBN 5-94836-100-4.
7. Серьезнов А.Н., Муравьев В.В., Степанова Л.Н., Паньков А.Ф., Талдыкин С.В., Кожемякин В.Л., Попов С.И. Мультиплицированная многоканальная акустико-эмиссионная система // Дефектоскопия. 1996. № 8. С. 71—76.
8. Bashkov O.V., Romashko R.V., Khon H., Bezruk M.N., Zaikov V.I., Bashkov I.O. Registration of acoustic emission waves in anisotropic composite plates by fiber-optic sensors // Proc. SPIE. 2019. V. 11024. P. 143—147.
9. Sorgente M., Zadeh A.R., Saidoun A. Performance comparison between fiber-optic and piezoelectric acoustic emission sensors // Optics11 white paper. 2020.
10. Chen Rongsheng, Bradshaw Tim, Badcock Rod, Cole Phil, Jarman Paul, Pedder Don, Fernando Gerard. Linear location of acoustic emission using a pair of novel fibre optic sensors // J. Phys.: Conf. Ser. 2005. V. 15. P. 232—236.
11. Bado M.F., Casas J.R. A Review of recent distributed optical fiber sensors applications for civil engineering structural health monitoring // Sensors. 2021. V. 21. Art. No.1818. <https://doi.org/10.3390/s21051818>
12. Verstrynghe E., Lacidogna G., Accornero F., Tomor A. A review on acoustic emission monitoring for damage detection in masonry structures // Construction and Building Materials. 2021. V. 268. P. 121089.
13. Башков О.В., Ромашко Р.В., Заиков В.И., Панин С.В., Безрук М.Н., Кхун Х.Х.А., Башков И.О. Детектирование сигналов акустической эмиссии волоконно-оптическими интерференционными преобразователями // Дефектоскопия. 2017. № 6. С. 18—25.

14. *Koshelova N.A., Serovaev G.S.* Влияние внедренного оптоволоконна на внутреннюю структуру полимерного композиционного материала // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. 2021. № 1. С. 54—63. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2021.1.5>
15. *Huang Minghua, Zhou Zhi, Huang Ying, Ou Jinping.* A distributed self-sensing FRP anchor rod with built-in optical fiber sensor // Measurement. 2013. V. 46. P. 1363—1370.
16. *Kamshilin A.A., Romashko R.V., Kulchin Y.N.* Adaptive interferometry with photorefractive crystals // J. Appl. Phys. 2009. V. 105. P. 031101.
17. *Di Girolamo S., Kamshilin A.A., Romashko R.V., Kulchin Y.N., Launay J.C.* Sensing of multimode-fiber strain by a dynamic photorefractive hologram // Optics Letters. 2007. V. 32. P. 1821—1823.

## REFERENCES

1. *Kolobkov A.S.* Polymer composite materials for various aircraft structures (review) // Proceedings of VIAM. 2020. Issue 6—7 (89). P. 38—44. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-67-38-44>.
2. *Gutkin R., Green C.J., Vangrattanachai S., Pinho S.T., Robinson P., Curtis P.T.* On acoustic emission for failure investigation in CFRP: Pattern recognition and peak frequency analyses // Mechanical Systems and Signal Processing. 2011. V. 25 (4). P. 1393—1407. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.11.014>.
3. *Sause M.G.R., Müller T., Horoschenkoff A., Horn S.* Quantification of failure mechanisms in mode-I loading of fiber reinforced plastics utilizing acoustic emission analysis // Composites Science and Technology. 2012. V. 72 (2). P. 167—174. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.10.013>.
4. *Surgeon M., Wevers M.* Modal analysis of acoustic emission signals from CFRP laminates // NDT & E International. 1999. V. 32 (6). P. 311—322. [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(98\)00077-2](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(98)00077-2).
5. *Sause M.G.R., Schmitt S., Kalafat S.* Failure load prediction for fiber-reinforced composites based on acoustic emission // Composites Science and Technology. 2018. V. 164. P. 24—33. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.04.033>.
6. *Sharapov V.M., Musienko M.P., Sharapova E.V.* Piezoelectric sensors. Moscow: TECHNOSPHERA, 2006. 628 p. (Mir elektroniki). ISBN 5-94836-100-4. (in Russian)
7. *Seryoznov A.N., Muravyov V.V., Stepanova L.N., Pankova A.F., Taldykin S.V., Kozhemyakin V.L., Popov S.I.* Multiplexed multichannel acoustic-emission system // Russian Journal of Nondestructive Testing. 1996. Is. 8. P. 71—76.
8. *Bashkov O.V., Romashko R.V., Khon H., Bezruk M.N., Zaikov V.I., Bashkov I.O.* Registration of acoustic emission waves in anisotropic composite plates by fiber-optic sensors // Proc. SPIE. 2019. V. 11024. P. 143—147. <https://doi.org/10.1117/12.2518272>.
9. *Sorgente M., Zadeh A.R., Saidoun A.* Performance comparison between fiber-optic and piezoelectric acoustic emission sensors // Optics11 white paper. 2020.
10. *Chen Rongsheng, Bradshaw Tim, Badcock Rod, Cole Phil, Jarman Paul, Pedder Don, Fernando Gerard.* Linear location of acoustic emission using a pair of novel fibre optic sensors // J. Phys.: Conf. Ser. 2005. V. 15. P. 232—236. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/15/1/039>.
11. *Bado M.F., Casas J.R.* A Review of recent distributed optical fiber sensors applications for civil engineering structural health monitoring // Sensors. 2021. V. 21. Art. No. 1818. <https://doi.org/10.3390/s21051818>
12. *Verstryngge E., Lacidogna G., Accornero F., Tomor A.* A review on acoustic emission monitoring for damage detection in masonry structures // Construction and Building Materials. 2021. V. 268. P. 121089. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121089>
13. *Bashkov O.V., Romashko R.V., Zaikov V.I., Panin S.V., Bezruk M.N., Khun K., Bashkov I.O.* Detecting acoustic-emission signals with fiber-optic interference transducers // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2017. V. 53. P. 415—421. <https://doi.org/10.1134/S1061830917060031>.
14. *Koshelova N.A., Serovaev G.S.* The influence of embedded optical fiber on the internal structure of polymer composite material // Perm Federal Research Centre Journal. 2021. Is. 1. P. 54—63. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2021.1.5>
15. *Huang Minghua, Zhou Zhi, Huang Ying, Ou Jinping.* A distributed self-sensing FRP anchor rod with built-in optical fiber sensor // Measurement. 2013. V.46. P. 1363—1370. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2012.12.012>
16. *Kamshilin A.A., Romashko R.V., Kulchin Y.N.* Adaptive interferometry with photorefractive crystals // J. Appl. Phys. 2009. V. 105. P. 031101. <https://doi.org/10.1063/1.3049475>
17. *Di Girolamo S., Kamshilin A.A., Romashko R.V., Kulchin Y.N., Launay J.C.* Sensing of multimode-fiber strain by a dynamic photorefractive hologram // Optics Letters. 2007. V. 32. P. 1821—1823. <https://doi.org/10.1364/OL.32.001821>

## ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ АДДИТИВНЫХ ПРОИЗВОДСТВ МЕТОДАМИ НЕЙТРОННОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

© 2024 г. М.М. Мурашев<sup>1,\*</sup>, В.Т. Эм<sup>1,\*\*</sup>, В.П. Глазков<sup>1,\*\*\*</sup>, И.В. Шишковский<sup>2,\*\*\*\*</sup>,  
К.И. Макаренко<sup>3,4,\*\*\*\*\*</sup>, Е.А. Сульянова<sup>1,\*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,  
Россия 123182 Москва, пл. Академика Курчатова, 1

<sup>2</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Россия 443011 Самара, ул. Ново-Садовая, 221

<sup>3</sup>Сколковский институт науки и технологий, Россия 121205 Москва, Большой бульвар, 30, стр.1

<sup>4</sup>Университет науки и технологий МИСИС, Россия 119049 Москва, Ленинский просп., 4

E-mail: \*mihail.mmm@inbox.ru; \*\*vtem9@mail.ru; \*\*\*vivadin@yandex.ru;

\*\*\*\*shishkovsky@gmail.com; \*\*\*\*\*konstantin.makarenko@skoltech.ru;

\*\*\*\*\*sulyanova.e@crys.ras.ru

Поступила в редакцию 01.11.2023; после доработки 10.11.2023

Принята к публикации 10.11.2023

Приведены результаты исследований методами нейтронной визуализации на экспериментальных установках исследовательского реактора ИР-8 НИЦ «Курчатовский институт» (НИЦ КИ) металлических образцов, полученных с помощью аддитивных технологий. Показаны преимущества и недостатки методов нейтронной визуализации на монохроматических (станция ДРАКОН) и полихроматических (томограф ПОНИ) нейтронах при изучении внутренней структуры таких образцов.

*Ключевые слова:* нейтронная томография, неразрушающий контроль, аддитивные технологии, нейтронные методы исследования.

## STUDY OF ADDITIVE MANUFACTURING PRODUCTS USING NEUTRON IMAGING

© 2023 г. M. Murashev<sup>1,\*</sup>, V. Em<sup>1,\*\*</sup>, V. Glazkov<sup>1,\*\*\*</sup>, I. Shishkovsky<sup>2,\*\*\*\*</sup>,  
K. Makarenko<sup>3,4,\*\*\*\*\*</sup>, E.A. Sulyanova<sup>1,\*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>National Research Center «Kurchatov Institute», Akademika Kurchatova pl., 1, Moscow 123182 Russia

<sup>2</sup>P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Novo-Sadovaya st., 221, Samara, 443011 Russia,

<sup>3</sup>Skolkovo Institute of Science and Technology, Bolshoy Boulevard, 30, p. 1, Moscow 121205 Russia

<sup>4</sup>National University of Science and Technology MISIS, Leninskiy Prospekt, 4, Moscow 119049 Russia

E-mail: \*mihail.mmm@inbox.ru; \*\*vtem9@mail.ru; \*\*\*vivadin@yandex.ru;

\*\*\*\*shishkovsky@gmail.com; \*\*\*\*\*konstantin.makarenko@skoltech.ru;

\*\*\*\*\*sulyanova.e@crys.ras.ru

The article presents the results of studies of additively manufactured metal samples using neutron imaging at the IR-8 research reactor of the National Research Center “Kurchatov Institute” (NRC KI). The advantages and disadvantages of neutron imaging using monochromatic (DRAGON station) and polychromatic (PONI tomograph) neutrons when studying internal structure of the samples are demonstrated.

*Keywords:* neutron imaging, non-destructive testing, additive manufacturing, neutron research methods.

DOI: 10.31857/S0130308224010039

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время аддитивные технологии (АТ) являются одним из наиболее динамично развивающихся направлений современной промышленности. Это объясняется тем, что они позволяют значительно уменьшить материалоемкость, трудоемкость и время изготовления деталей по сравнению с традиционными технологиями, основанными на удалении первичного материала (точение, фрезерование, шлифование, строгание). С помощью АТ можно получить принципиально новые материалы (например, градиентные) или конструкции (например, сетчатые структуры), которые трудно или невозможно получить традиционными методами. АТ изделия создаются путем

последнего (толщина слоя — несколько десятков микрон) наплавления металла до нужной толщины. Поскольку создание АТ материала происходит при больших градиентах температур и высоких скоростях нагрева/охлаждения, в изделиях образуются большие (близкие к пределу текучести материала) остаточные напряжения, которые могут сильно изменить прочностные свойства и геометрические параметры материала, а также привести к образованию трещин [1, 2]. В НИЦ КИ исследование напряженно-деформированного состояния в объемных материалах и изделиях, в том числе полученных методами АТ, проводится неразрушающим методом стрессдифрактометрии на нейтронном дифрактометре СТРЕСС реактора ИР-8 [3].

Металлические порошки, из которых методами АТ изготавливаются детали, имеют высокую удельную поверхность, что обуславливает перенос адсорбированных на поверхности порошинок загрязняющих веществ в объем готового изделия. Неоптимальный выбор скоростного и температурного режима печати приводит к образованию пор в образце. Количество пор и включений во многом определяет итоговые механические свойства готового изделия [4]. По этой причине контроль АТ изделий, в том числе неразрушающими методами, является актуальной задачей. Зачастую для неразрушающего контроля используют метод гамма-томографии [5—9]. Для проникновения сквозь десятки миллиметров материала необходимо использовать гамма-излучение с высокой энергией (>300 кэВ). Однако с увеличением энергии падающего излучения ухудшается пространственное разрешение. Поэтому для исследования габаритных металлических изделий (с размерами от  $\approx 20$  мм в направлении просвечивания) лучше подходят методы нейтронной визуализации.

Цель настоящей работы — изучить возможности имеющихся на реакторе ИР-8 НИЦ КИ методов нейтронной визуализации (НВ) на монохроматических (станция ДРАКОН) и полихроматических (томограф ПОНИ) нейтронах для исследования дефектов в металлических деталях и объектах, полученных методами АТ. Представлено обсуждение результатов НВ в сравнении с режимами АТ градиентных и сетчатых образцов.

## МАТЕРИАЛЫ, РЕЖИМЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

### Методы нейтронной визуализации

Тепловые нейтроны по своей природе имеют высокую проникающую способность для большинства металлических материалов (до 70 мм в стали, до 90 мм в титане, свыше 300 мм в алюминии и т.д.). По этой причине методы нейтронной визуализации за последние 20—30 лет превратились в мощный инструмент неразрушающего контроля металлических объектов и изделий в разных областях науки и производства.

Метод нейтронной визуализации, в частности метод нейтронной радиографии, основан на просвечивании исследуемого объекта коллимированным нейтронным пучком. Прошедшие через образец нейтроны, ослабленные поглощением и рассеиванием, регистрируются детектором, расположенным в плоскости, перпендикулярной направлению просвечивания [10], формируя теневое изображение объекта (рис. 1). За счет разной степени ослабления интенсивности нейтронного пучка при прохождении через образец, имеющий неоднородное распределение химического состава и/или плотности, можно получить информацию о его внутренней структуре. Помимо

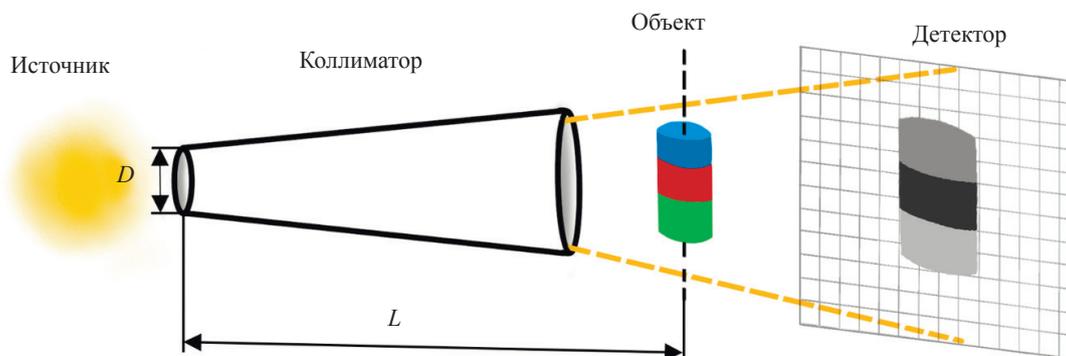


Рис. 1. Принцип метода нейтронной радиографии:  $D$  — апертура, ограничивающая размер источника нейтронов;  $L$  — расстояние от апертуры до объекта. Коэффициент коллимации  $L/D$  является определяющей характеристикой приборов нейтронной визуализации, от которого напрямую зависит пространственное разрешение.

высокой проникающей способности нейтроны имеют нелинейную зависимость полного сечения взаимодействия от номера элемента в периодической таблице Менделеева. Это позволяет визуализировать контраст даже между материалами, в состав которых входят элементы с разницей атомных номеров, равной 1, что затруднительно в рентгеновском методе.

Метод нейтронной радиографии имеет ограниченное применение, поскольку информация представляется в двумерном виде, и зачастую невозможно определить расположение ослабляющих центров внутри объекта. Для трехмерного представления картины ослабления нейтронов внутри образца применяют метод нейтронной томографии, который заключается в преобразовании массива двумерных радиографических изображений, полученных при вращении объекта вокруг своей оси от 0 до 180° с равным шагом. Математическая реконструкция с использованием обратного преобразования Радона [11] позволяет создать массив томографических слоев объекта. Каждый пиксель полученных томографических изображений несет информацию о степени ослабления нейтронов в данной точке. Чем светлее пиксель, тем сильнее ослабление.

Ослабление нейтронного излучения определяется полным сечением взаимодействия нейтрона с веществом, которое состоит из сечения когерентного и некогерентного рассеяния, а также сечения поглощения [10]. Для поликристаллических образцов с изменением длины волны падающих на образец нейтронов изменяется сечение упругого когерентного рассеяния, тем самым изменяется и полное сечение взаимодействия. При  $\lambda \leq 2d_{hkl}$  ( $\lambda$  — длина волны нейтронов;  $d_{hkl}$  — межплоскостное расстояние;  $h, k, l$  — миллеровские индексы плоскости), когда для кристаллической плоскости ( $hkl$ ) выполняется условие Вульфа—Брэгга  $\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta$  ( $\theta$  — брэгговский угол рассеяния), происходит рассеивание нейтронов, тем самым они отклоняются от траектории прямого пучка и не попадают на детектор. При  $\lambda > 2d_{hkl}$  нейтроны не рассеиваются и проходят через материал, поэтому при  $\lambda = 2d_{hkl}$  происходит скачкообразное изменение сечения рассеяния (брэгговский скачок). Зависимость полного сечения взаимодействия от длины волны нейтронов имеет пилообразную форму. Положение брэгговских скачков определяется межплоскостным расстоянием  $2d_{hkl}$  отражающих плоскостей и зависит от кристаллической структуры материала. Для различных кристаллических структур в поликристаллическом образце можно подобрать длину волны нейтронов таким образом, чтобы получить контраст между ними, даже при одинаковом химическом составе [12]. Наибольший интерес представляют собой изделия из сплавов с преобладающим сечением когерентного рассеяния нейтронов, например из стали. Это открывает широкий круг возможностей для визуализации текстуры [13] и распределения фаз в стальных образцах [14—18]. Методика дифракционно-контрастной визуализации реализована на станции ДРАКОН.

### Установки нейтронной визуализации на реакторе ИР-8 НИЦ КИ

На исследовательском реакторе ИР-8 запущены два прибора нейтронной визуализации — станция ДРАКОН и нейтронный томограф ПОНИ.

Станция ДРАКОН [19] (рис. 2) предназначена для визуализации макроструктуры объектов методами нейтронной радиографии и томографии на монохроматических нейтронах с субмиллиметровым пространственным разрешением. Прибор расположен на горизонтальном экспериментальном канале № 8. В устройство станции входит блок двухкристального монохроматора, что позволяет проводить эксперименты на монохроматических нейтронах с изменением длины волны падающего на образец нейтронного излучения в диапазоне 1,8 — 5 Å.

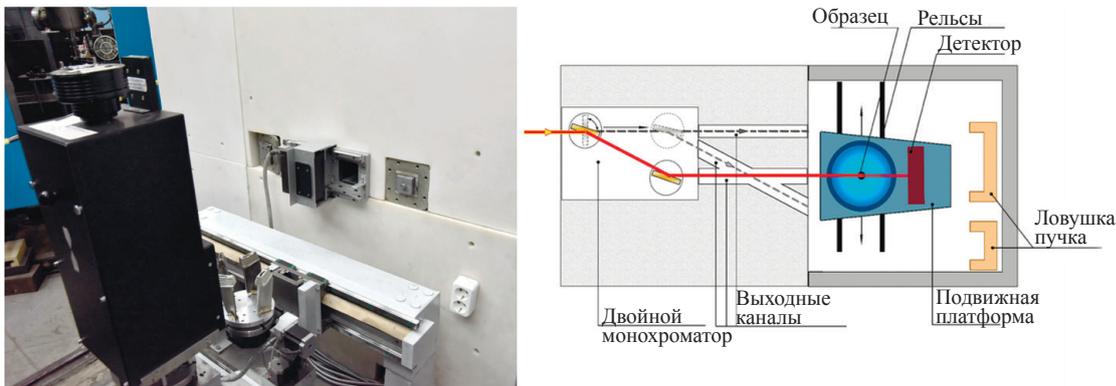


Рис. 2. Станция ДРАКОН.

На сегодняшний день станция ДРАКОН является единственным на территории России и стран СНГ и одним из одиннадцати в мире прибором на монохроматических нейтронах.

На станции имеются три выходных нейтронных пучка: монохроматический нейтронный пучок с фиксированной длиной волны тепловых нейтронов  $\lambda \sim 1 \text{ \AA}$ ; монохроматический нейтронный пучок с возможностью изменения длины волны в диапазоне  $\lambda = 1,8 \text{ — } 5 \text{ \AA}$ ; полихроматический нейтронный пучок высокой интенсивности.

Размер нейтронных пучков на выходе составляет  $75 \times 75 \text{ мм}$  (монохроматические пучки) и  $50 \times 50 \text{ мм}$  (полихроматический пучок). Регистрация радиографических проекций производится позиционно-чувствительным детектором, состоящим из сцинтилляционного экрана на основе смеси  $\text{ZnS(Ag)}$  и  ${}^6\text{LiF}$  толщиной  $200 \text{ мкм}$ , зеркала, объектива и ПЗС-матрицы с разрешением  $2048 \times 2048$  пикселей и динамическим диапазоном 16 бит. Пространственное разрешение в зависимости от размера исследуемого объекта — от  $200 \text{ мкм}$ .

В 2021 году на реакторе ИР-8 был запущен нейтронный томограф ПОНИ, предназначенный для проведения экспериментов по нейтронной визуализации высокого разрешения с использованием полихроматического пучка нейтронов. Прибор расположен на касательном горизонтальном экспериментальном канале 7б. Нейтронный пучок формируется бериллием, расположенным в полости канала вблизи активной зоны реактора. Использование касательного канала позволило уменьшить вклад фона от гамма-квантов и быстрых нейтронов.

Размер нейтронного пучка на выходе составляет  $120 \times 120 \text{ мм}$ . Регистрация радиографических проекций производится детектором, аналогичным детектору станции ДРАКОН, за исключением более тонкого сцинтилляционного экрана толщиной  $100 \text{ мкм}$ .

Высокая степень коллимации нейтронного пучка ( $L/D = 600$ ) позволяет получать радиографические изображения с пространственным разрешением до  $40 \text{ мкм}$ . На сегодняшний день пространственное разрешение ограничено детекторной системой и составляет  $\approx 180 \text{ мкм}$ . Тем не менее высокая коллимация пучка значительно уменьшает вклад размера образца в пространственное разрешение. Таким образом, для объектов с максимальным размером до  $100 \text{ мм}$  в направлении падающего нейтронного пучка пространственное разрешение составляет до  $200 \text{ мкм}$ , что в случае с металлическими образцами недостижимо для рентгеновских и гамма томографов.

### Образцы

В данной работе приведены результаты исследований четырех образцов, полученных с помощью АТ во Всероссийском научно-исследовательском институте авиационных материалов (ВИАМ) — НИЦ «Курчатовский институт» и Сколковском институте науки и технологий.

Образец с сетчатой структурой (рис. 3) размером  $65 \times 20 \times 20 \text{ мм}$  изготовлен в ВИАМ методом селективного лазерного плавления (СЛП) из нержавеющей аустенитной стали марки CL20es.



Рис. 3. Образец с сетчатой структурой из сплава марки CL20es.

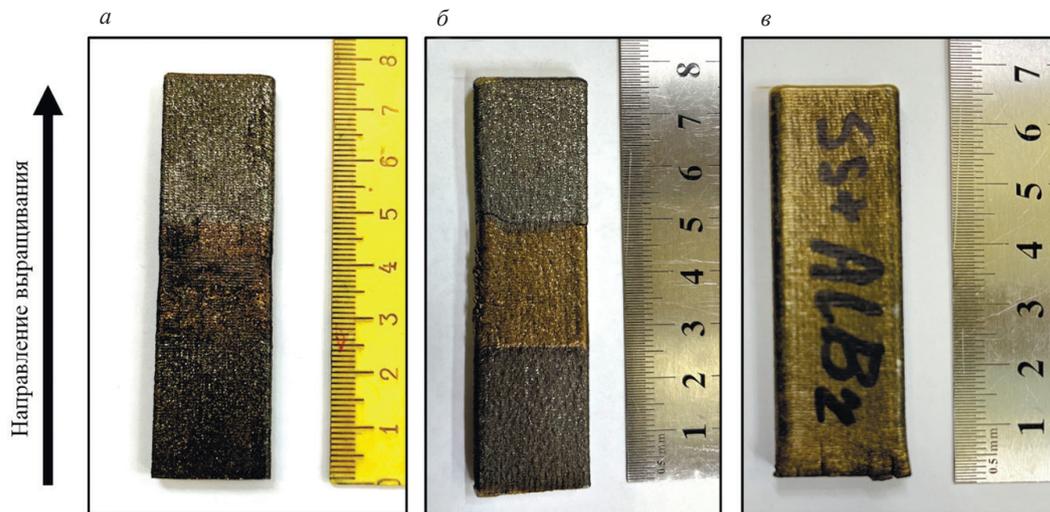


Рис. 4. Образцы из функционально-градиентных материалов, полученные методом прямого лазерного выращивания, стрелкой обозначено направление выращивания.

Три других образца изготовлены технологией прямого лазерного выращивания (ПЛВ). Образец А (рис. 4а) с размерами 75×20×6 мм имеет переход от нержавеющей стали 316L аустенитно-ферритного типа с возвратом к ней через 3 переходные области, состоящие из смеси алюминиевой бронзы (БрАЖ9,5-1) и нержавеющей стали 316L в соотношении: 25 и 75; 50 и 50; 25 и 75 %. Образец Б (рис. 4б) с размерами 75×20×6 мм имеет переход от чистой 316L с возвратом к ней через переходную область, состоящую из чередующихся слоев алюминиевой бронзы и стали. Образец В (рис. 4в) с размерами 61×21×6 мм имеет чередование слоев SS316L и алюминиевой бронзы. Толщина одного слоя при печати всех образцов составляла 250 мкм.

### Материалы

В качестве исходного материала для изготовления методом СЛП образца с сетчатой структурой (см. рис. 3) использована металлопорошковая композиция стали марки CL20es фракции 10—63 мкм со средним размером частиц 36 мкм. Химический состав стали марки CL20es приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав стали марки CL20es

Элемент	Fe	Cr	Ni	Mo	Mn
Содержание, %	Основа	16,5—18,5	10,0—13,0	2,0—2,5	0—2,0
Элемент	Si	P	C	S	
Содержание, %	0—1,0	0—0,045	0—0,030	0—0,030	

Таблица 2

Химический состав алюминиевой бронзы

Элемент	Cu	Al	Fe	Zn	Pb	Sn	Si	Sb
Содержание, %	Основа	9,5	1,0	0,05	0,02	0,05	0,1	0,05

В качестве материалов для образцов, изготовленных технологией ПЛВ, как было сказано ранее, использованы порошки нержавеющей стали марки 316L [21] (фракция 50—150 мкм) производства фирмы Höganäs (Бельгия) и алюминиевой бронзы Пр-БрАЖ9,5-1 (фракция 25—45 мкм) производства АО «Полема» (Тула). Химический состав алюминиевой бронзы приведен в табл. 2.

### Режимы 3D-печати

СЛП выполнялось на установке Concept Laser M2 Cusing по разработанному оптимальному режиму сплавления (толщина слоя 30 мкм, объемная плотность энергии лазерного луча 83 Дж/мм<sup>3</sup>), обеспечивающему минимальную остаточную пористость. Образцы с размерами 20×20×70 мм выращены на базовой плите из стали 316L путем послойного наплавления горизонтальных слоев порошка металла. После изготовления образцы с помощью отрезного круга отделены от базовой плиты и поддерживающих конструкций.

ПЛВ производилось на установке InssTek MX-1000 (Южная Корея) в режиме direct metal tooling (DMT) [22]. Этот режим позволяет осуществлять in-situ видеоконтроль процесса и корректировать параметры на лету в проблемных местах (на краях детали, при повороте траектории сканирования и т.п.). Иттербиевый волоконный лазер производства IPG Photonics (США, РФ) мощностью 1 кВт, работающий в непрерывном режиме, использован в качестве источника лазерного излучения. Полное описание режимов обработки, соответствующих каждому материалу, приведено в [22]. Данные режимы были оптимизированы в ходе ранее проведенных экспериментов [21, 22].

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Сетчатая структура позволяет достичь высоких механических свойств изделия, но при этом затрудняет его контроль. Образец с сетчатой структурой (см. рис. 3) исследовался на станции ДРАКОН. Были получены 360 радиографических изображений объекта при его повороте от 0 до 180° с шагом 0,5°, время экспозиции — 120 с, общее время эксперимента составило ≈ 13,5 ч. Длина волны нейтронного излучения составляла ≈ 1 Å, что соответствовало наименьшему ослаблению нейтронов образцом. По полученным томографическим изображениям образца (рис. 5) удалось обнаружить его внутренние дефекты, а именно несколько рядов более тонких перегородок внутри объекта. Дефекты связаны с технологией производства и могут привести к ухудшению механических свойств изделия. Других внутренних дефектов (пор, трещин, включений) размерами от 200 мкм обнаружено не было.

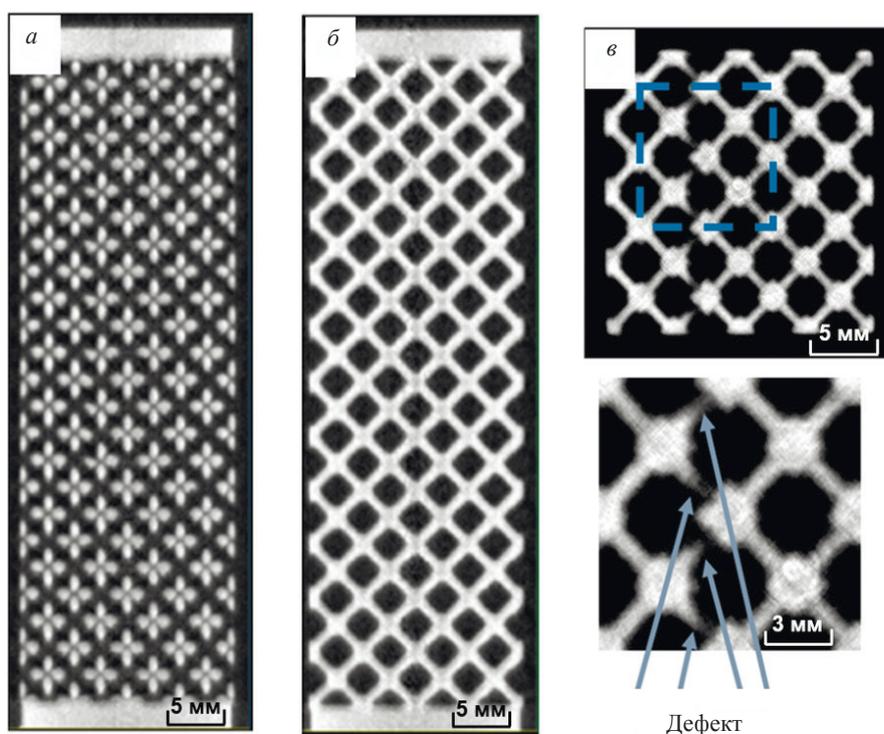


Рис. 5. Томографические изображения образца с сетчатой структурой из сплава марки CL20es в трех взаимно перпендикулярных проекциях (а—в). Дефекты печати отмечены стрелками.

На нейтронном томографе «ПОНИ» исследовали 3 образца из функционально-градиентных материалов, полученных методом ПЛВ в Сколковском институте науки и технологий.

Для каждого образца получены 360 радиографических изображений при повороте от 0 до 180° с шагом 0,5°, время экспозиции — 240 с. Общее время эксперимента составило ≈24 ч.

Образец А дополнительно исследовался на станции ДРАКОН с использованием монохроматического нейтронного излучения. Идея эксперимента заключалась в определении длины волны нейтронного излучения, при которой на радиографическом изображении наблюдался бы наилучший контраст между областями с разным составом, и последующей томографической съемке при этой длине волны. Изменяя длину волны нейтронов в диапазоне  $\lambda = 1,8\text{—}4,5 \text{ \AA}$  с шагом 0,01 Å (время экспозиции на один кадр — 120 с), определили, что наилучший контраст наблюдается при длине волны  $\lambda \approx 2,74 \text{ \AA}$ . Затем на этой длине волны провели томографическую съемку: были получены 360 радиографических изображений при повороте образца от 0 до 180° с шагом 0,5°, время экспозиции — 200 с, общее время эксперимента составило ≈ 20 ч.

Радиографические изображения, полученные в ходе каждого эксперимента, обработаны с помощью программы ImageJ [20] с поправкой на фон детектора и профиль нейтронного пучка. Томографическая реконструкция проведена в программном комплексе Octopus Reconstruction. Размер одного вокселя составлял 65 мкм.

На полученных томографических изображениях образца А видно большое количество трещин (рис. 6), большая часть которых направлена вдоль направления выращивания. Такие продольные трещины располагаются в двух переходных областях (25 % алюминиевой бронзы и 75 % аустенитной стали), имеют выход на поверхность, большинство пересекают всю область вдоль направления выращивания. Размер трещин составляет ≈180 — 300 мкм, глубина — ≈2,5 — 3 мм при толщине образца 6 мм. На рис. 7 показаны поры, локализованные вблизи границы между областями аустенитной стали и смеси бронзы и аустенитной стали (25 и 75 %). Размер пор составляет от 180 до 350 мкм. Поры размерами менее 180 мкм не были визуализированы из-за ограничений в пространственном разрешении. Наличие трещин и пор говорит о неоптимальном выборе скоростного и температурного режимов изготовления образца либо о недостатке стратегии выращивания. Установление причин образования трещин вдоль направления выращивания требует дополнительных исследований. Можно предположить их связь с эпитаксиальным ростом зерна, обнаруженным в ходе проведенных ранее экспериментов.

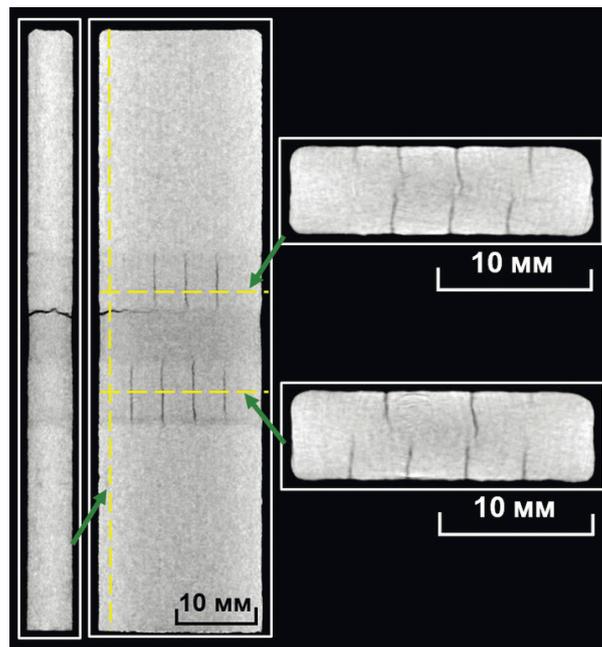


Рис. 6. Томографические изображения образца А в трех взаимно перпендикулярных проекциях. Пунктирными линиями показаны направления срезов.

На массиве радиографических изображений, полученных при различных длинах волн на станции ДРАКОН, в образце А обнаружено изменение контраста между областями с разным составом. Но даже изображение с наилучшим контрастом при длине волны  $\lambda \approx 2,74 \text{ \AA}$  незначительно отли-

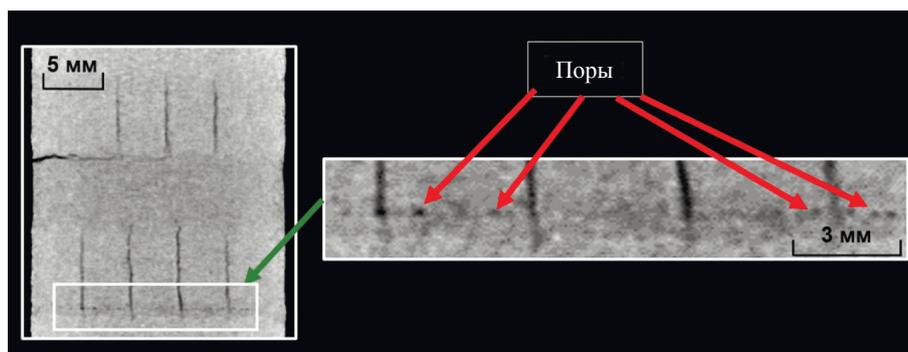


Рис. 7. Томографическое изображение образца А. В выделенной области видны поры вдоль одного слоя печати.

чается от изображения, полученного на полихроматическом нейтронном пучке. Тем не менее эксперимент по нейтронной томографии проведен при длине волны нейтронов  $\lambda \approx 2,74 \text{ \AA}$ .

На рис. 8 показано сравнение томографических изображений, полученных на монохроматическом (*a—z*) и полихроматическом (*д—ж*) нейтронных пучках. На изображениях *д—ж* образец выглядит однородным (за исключением внутренних дефектов), а на изображениях *a—z* образец имеет неоднородную зернистую структуру. Это говорит о том, что в процессе производства изделия образуются крупные зерна (кристаллиты), которые хорошо видны в областях, состоящих из чистой аустенитной стали (рис. 8б). При уменьшении концентрации аустенитной стали до 75 % (рис. 8в) количество крупных зерен уменьшается, а в области с отношением алюминиевой бронзы и аустенитной стали 50/50 (рис. 8з) крупные кристаллиты не наблюдаются (при пространственном разрешении станции  $\approx 200 \text{ мкм}$ ). Можно сделать вывод, что при печати однокомпонентным порошком (аустенитная сталь) при выбранном температурном и скоростном режиме образуются крупные кристаллиты. При этом добавление второго компонента (алюминиевой бронзы) препятствует их образованию.

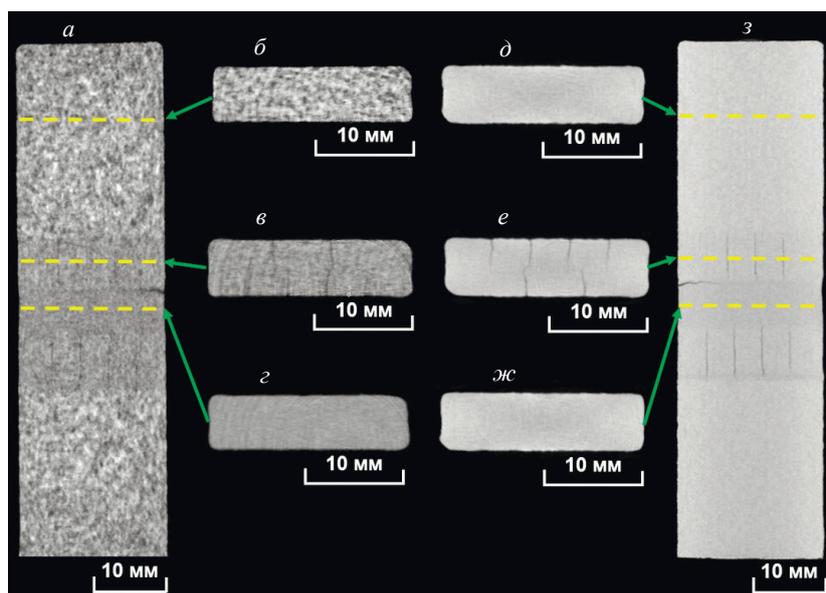


Рис. 8. Сравнение томографических изображений образца А, полученных на монохроматическом (*a—z*) и полихроматическом (*д—ж*) нейтронном пучке. Дополнительные томографические срезы: *б, д* — чистая аустенитная сталь; *в, е* — 25 % алюминиевой бронзы и 75 % аустенитной стали; *з, ж* — 50 % алюминиевой бронзы и 50 % аустенитной стали.

Использование монохроматического и полихроматического нейтронного излучения позволило получить взаимодополняющую информацию. На томографических изображениях, полученных на

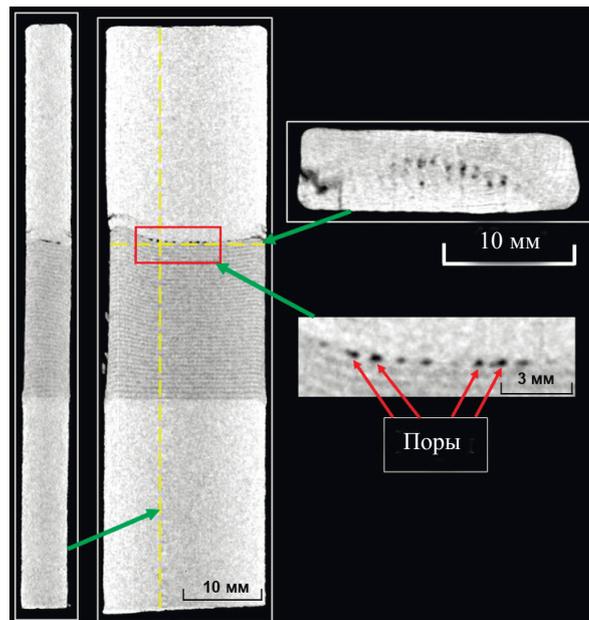


Рис. 9. Томографические изображения образца Б в трех взаимно перпендикулярных проекциях. Пунктирной линией показаны направления среза, в выделенной области отмечены обнаруженные поры.

полихроматическом нейтронном пучке, хорошо видны внутренние дефекты (поры, трещины). На изображениях, полученных на монохроматическом пучке, видны особенности, связанные с дифракционными эффектами (крупные кристаллиты), но ухудшается контраст между дефектами и материалом образца, что затрудняет определение пор и трещин.

На томографических изображениях образца Б (рис. 9) четко виден контраст между слоями из алюминиевой бронзы и стали. При удалении от подложки в зоне чередования материала слои перестают накладываться параллельно. Последний слой в области чередования имеет разницу по высоте от края образца до его центра  $\approx 2$  мм. При этом геометрия слоев внутри и снаружи образца разная. Помимо этого, на границе области чередования слоев и области, состоящей из чистой аустенитной стали, как и в предыдущем образце, наблюдается наличие большого количества пор, которые достигают  $\approx 1,2$  мм вдоль слоев печати и  $\approx 250$  мкм — поперек. Поры расположены в глубине образца и не выходят наружу.

Наличие пор указывает на чрезмерно высокую скорость печати при недостаточном тепловложении в материал.

На рис. 10 показаны томографические изображения образца В. На изображениях видно чередование слоев разного состава. Внутренние дефекты не обнаружены (за исключением трещин, появившихся в процессе удаления образца с подложки). Геометрия слоев сохраняется на всем протяжении печати образца как снаружи, так и внутри.

На основе полученных результатов следует сделать заключение, что стратегия резкого перехода [21, 22] в технологии ПЛВ является неэффективной. Она приводит к образованию макро- и микроскопических дефектов в случае объединения больших (порядка нескольких десятков миллиметров) зон материалов с существенно отличающимися физикомеханическими характеристиками (например, коэффициент термического расширения), таких как сталь и бронза, в т.ч. имеющих нестабильный провал смешиваемости [23]. Зона градиентного перехода является местом наибольшей концентрации дефектов ввиду резкого изменения модуля упругости и коэффициента линейного температурного расширения при переходе от одного материала к другому [21]. Следует отметить, что трещинообразование преимущественно происходит не в первой зоне градиентного перехода, более близкой к подложке, а во второй. Это свидетельствует о существенном влиянии термической истории на качество формирования изделия и об отличии схем печати «сталь поверх бронзы» и «бронза поверх стали». Использование техники чередующихся слоев [21, 22] позволяет достичь хорошего перемешивания материалов, что увеличивает однородность изделия и предотвращает формирование внутренних дефектов. Однако в таком случае в образце не формируются макроскопические зоны из разных материалов, имеющих существен-

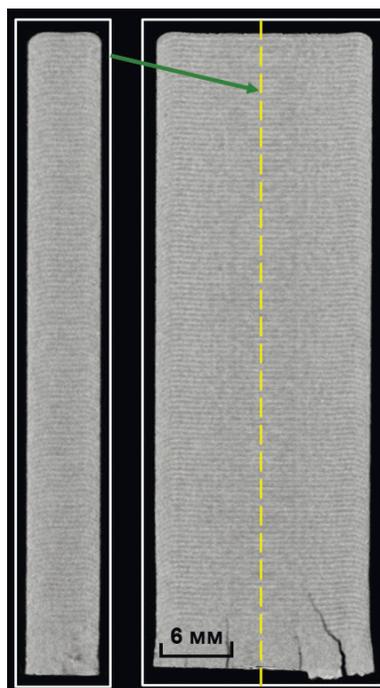


Рис. 10. Томографические изображения образца В в двух взаимно перпендикулярных проекциях, пунктирной линией показано направление среза.

но отличающиеся физикомеханические характеристики. Подобные сплавы с чередующимися слоями имеют как свой собственный спектр применений, так и могут быть использованы в качестве переходных зон в функционально-градиентных материалах [23].

## ВЫВОДЫ

Продемонстрированы возможности экспериментальных установок на реакторе ИР-8 НИЦ «Курчатовский институт» для исследований методами нейтронной визуализации внутренних дефектов размерами от 200 мкм в металлических изделиях, полученных с помощью аддитивных технологий.

Показано, что использование монохроматических и полихроматических нейтронных пучков позволяет получить взаимодополняющую информацию о внутренней структуре изделий. Для технологии ПЛВ экспериментально продемонстрированы недостатки метода непосредственного присоединения применительно к функционально-градиентным материалам. Они выражаются в интенсивном формировании макро- и микроскопических дефектов в зоне градиентного перехода, проявляющихся тем интенсивнее, чем более удалена данная зона от подложки.

Метод чередующихся слоев продемонстрировал бездефектную печать. В образцах, изготовленных путем резкого перехода, отмечено формирование вертикальных трещин, сонаправленных с направлением печати изделия. Данное явление требует проведения дополнительных исследований.

Работа выполнена на оборудовании УНУ НИК ИР-8. В части интерпретации результатов исследования образца с сетчатой структурой работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mercelis P., Kruth J.P.* Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting // *Rapid Prototyping Journal*. 2006. No. 12. P. 254—265.
2. *Patterson A.E., Messimer S.L., Farrington P.A.* Overhanging features and the SLM/DMLS residual stresses problem: Review and future research need // *Technologies*. 2017. V. 5. No. 2. P. 15—36.
3. *Карпов И.Д., Эм В.Т., Сумин В.В.* Измерение остаточных напряжений в международном стандартном образце VAMAS на дифрактометре СТРЕСС реактора ИР-8 // *Дефектоскопия*. 2019. №. 4. С. 61—66.

4. Савченко Н.Л., Воронцов А.В., Утяганова В.Р., Елисеев А.А., Рубцов В.Е., Колубаев Е.А. Особенности структурно-фазового состояния сплава Ti-6Al-4V при формировании изделий с использованием электронно-лучевой проволочной аддитивной технологии // *Обработка металлов. Технология, оборудование, инструменты*. 2018. Т. 20. № 3. С. 60—71.
5. Du Plessis A., Roux S., Waller J., Sperling P., Achilles N., Beerlink A., Métayer J., Sinico M., Probst G., Dewulf W., Bittner F., Endres H., Willner M., Drégelyi-Kiss A., Zikmund T., Laznovsky J., Kaiser J., Pinter P., Dietrich S., Lopez E., Fitzek O., Konrad P. Laboratory X-ray tomography for metal additive manufacturing: Round robin test // *Additive Manufacturing*. 2019. V. 30. P. 100837.
6. Petró S., Pagani L., Moroni G., Scott P.J. Conformance and nonconformance in segmentation-free X-ray computed tomography geometric inspection // *Precision Engineering*. 2021. V. 72. P. 25—40.
7. Xiangxi Gao, Chunhu Tao, Shengchuan Wu, Bingqing Chen, Sujun Wu. X-ray imaging of defect population and the effect on high cycle fatigue life of laser additive manufactured Ti6Al4V alloys // *International Journal of Fatigue*. 2022. V. 162. P. 106979.
8. Zhang Keqiang, Meng Qiaoyu, Zhang Xueqin, Qu Zhaoliang, He Rujie. Quantitative characterization of defects in stereolithographic additive manufactured ceramic using X-ray computed tomography // *Journal of Materials Science & Technology*. 2022. V. 118. P. 144—157.
9. Du Plessis A., Yadroitsev I., Yadroitsava I., Le Roux S.G. X-ray microcomputed tomography in additive manufacturing: a review of the current technology and applications // *3D Printing and Additive Manufacturing*. 2018. V. 5. No. 3. P. 227—247.
10. Тюфяков Н.Д., Штань А.С. Основы нейтронной радиографии. М.: Атомиздат, 1975. С. 256.
11. Anderson I.S., McGreevy R.L., Bilheux H.Z. Neutron imaging and applications. Berlin, Germany: Springer US, 2009. P. 987.
12. Мурашев М.М., Глазков В.П., Эм В.Т. Визуализация дифракционного контраста между ферритной и мартенситной фазами стали методом нейтронной радиографии // *Приборы и техника эксперимента*. 2021. № 3. С. 147—151.
13. Vicente Alvarez M.A., Laliena V., Malamud F., Campo J., Santisteban J. A novel method to obtain integral parameters of the orientation distribution function of textured polycrystals from wavelength-resolved neutron transmission spectra // *Journal of Applied Crystallography*. 2021. V. 54. No. 3. P. 903—913.
14. Van Tran K., Woracek R., Kardjilov N., Markötter H., Abou-Ras D., Pupilampu S., Förster C., Penumadu D., Dahlberg C.F., Banhart J., Manke I. Torsion of a rectangular bar: Complex phase distribution in 304L steel revealed by neutron tomography // *Materials & Design*. 2022. V. 222. P. 111037.
15. Woracek R., Penumadu D., Kardjilov N., Hilger A., Boin M., Banhart J., Manke I. Neutron Bragg edge tomography for phase mapping // *Physics Procedia*. 2015. V. 69. P. 227—236.
16. Allman B.E., McMahon P.J., Nugent K.A., Paganin D., Jacobson D.L., Arif M., Werner S.A. Phase radiography with neutrons // *Nature*. 2000. V. 408. No. 6809. P. 158—159.
17. Lehmann E.H., Frei G., Vontobel P., Josic L., Kardjilov N., Hilger A., Kockelmann W., Steuwer A. The energy-selective option in neutron imaging // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2009. V. 603. No. 3. P. 429—438.
18. Schulz M., Böni P., Calzada E., Mühlbauer M., Schillinger B. Energy-dependent neutron imaging with a double crystal monochromator at the ANTARES facility at FRM II // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2009. V. 605. No. 1—2. P. 33—35.
19. Соменков В.А., Глазков В.П., Эм В.Т., Гуреев А.И., Мурашев М.М., Садыков Р.А., Аксенов С.Н., Трунов Д.Н., Столяров А.А., Алексеев А.А., Кравчук Л.В. Установка для комплексной радиационной диагностики «Дракон» // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2019. № 9. С. 93—99.
20. Image Processing and Analysis in Java. URL: <https://imagej.nih.gov/ij/index.html> (дата обращения 24.04.2023).
21. Makarenko K., Dubinin O., Shornikov P., Shishkovsky I. Specific aspects of the transitional layer forming in the aluminium bronze — stainless steel functionally graded structures after laser metal deposition // *Procedia CIRP*. 2020. V. 94. P. 346—351.
22. Makarenko K.I., Konev S.D., Dubinin O.N., Shishkovsky I.V. Mechanical characteristics of laser-deposited sandwich structures and quasi-homogeneous alloys of Fe-Cu system // *Materials & Design*. 2022. V. 224. P. 111313.
23. Makarenko K., Dubinin O., Shishkovsky I. Direct Energy Deposition of Cu-Fe System Functionally Graded Materials: Miscibility Aspects, Cracking Sources, and Methods of Assisted Manufacturing / Chapter in book: *Advanced Additive Manufacturing*. Published in 2022 by IntechOpen (London, UK).

## REFERENCES

1. Mercelis P., Kruth J.P. Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting // *Rapid prototyping journal*. 2006. No. 12. P. 254—265.

2. *Patterson A.E., Messimer S.L., Farrington P.A.* Overhanging features and the SLM/DMLS residual stresses problem: Review and future research need // *Technologies*. 2017. V. 5. No. 2. P. 15—36.
3. *Karpov I.D., Em V.T., Sumin V.V.* Measuring Residual Stresses in Vamas International Calibration Block with the Stress Diffractometer of Ir-8 Reactor // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2019. V. 55. P. 328—333.
4. *Savchenko N.L., Vorontsov A.V., Utyaganova V.R., Eliseev A.A., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A.* Features of the structural-phase state of the alloy Ti-6Al-4V in the formation of products using wire-feed electron beam additive manufacturing // *OBRABOTKA METALLOV-METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE*. 2018. V. 20. №. 4. P. 60—71.
5. *Du Plessis A., Roux S., Waller J., Sperling P., Achilles N., Beerlink A., Métayer J., Sinico M., Probst G., Dewulf W., Bittner F., Endres H., Willner M., Drégelyi-Kiss A., Zikmund T., Laznovsky J., Kaiser J., Pinter P., Dietrich S., Lopez E., Fitzek O., Konrad P.* Laboratory X-ray tomography for metal additive manufacturing: Round robin test // *Additive Manufacturing*. 2019. V. 30. P. 100837.
6. *Petrò S., Pagani L., Moroni G., Scott P.J.* Conformance and nonconformance in segmentation-free X-ray computed tomography geometric inspection // *Precision Engineering*. 2021. V. 72. P. 25—40.
7. *Xiangxi Gao, Chunhu Tao, Shengchuan Wu, Bingqing Chen, Sujun Wu.* X-ray imaging of defect population and the effect on high cycle fatigue life of laser additive manufactured Ti6Al4V alloys // *International Journal of Fatigue*. 2022. V. 162. P. 106979.
8. *Keqiang Zhang, Qiaoyu Meng, Xueqin Zhang, Zhaoliang Qu, Rujie He.* Quantitative characterization of defects in stereolithographic additive manufactured ceramic using X-ray computed tomography // *Journal of Materials Science & Technology*. 2022. V. 118. P. 144—157.
9. *Du Plessis A., Yadroitsev I., Yadroitsava I., Le Roux S.G.* X-ray microcomputed tomography in additive manufacturing: a review of the current technology and applications // *3D Printing and Additive Manufacturing*. 2018. V. 5. No. 3. P. 227—247.
10. *Tufyakov N.D., Shtan A.S.* Basics of neutron radiography. Atomizdat, 1975, P. 256.
11. *Anderson I.S., McGreevy R.L., Bilheux H.Z.* Neutron imaging and applications // Berlin, Germany: Springer US, 2009. P. 987.
12. *Murashev M.M., Glazkov V.P., Em V.T.* Visualization of the Diffraction Contrast between the Ferrite and Martensitic Phases of Steel by the Method of Neutron Radiography // *Instruments and Experimental Techniques*. 2021. V. 64. №. 3. P. 491—495.
13. *Vicente Alvarez M.A., Laliena V., Malamud F., Campo J., Santisteban J.* A novel method to obtain integral parameters of the orientation distribution function of textured polycrystals from wavelength-resolved neutron transmission spectra // *Journal of Applied Crystallography*. 2021. V. 54. No. 3. P. 903—913.
14. *Van Tran K., Woracek R., Kardjilov N., Markötter H., Abou-Ras D., Puplampu S., Förster C., Penumadu D., Dahlberg C.F., Banhart J., Manke I.* Torsion of a rectangular bar: Complex phase distribution in 304L steel revealed by neutron tomography // *Materials & Design*. 2022. V. 222. P. 111037.
15. *Woracek R., Penumadu D., Kardjilov N., Hilger A., Boin M., Banhart J., Manke I.* Neutron Bragg edge tomography for phase mapping // *Physics Procedia*. 2015. V. 69. P. 227—236.
16. *Allman B.E., McMahon P.J., Nugent K.A., Paganin D., Jacobson D.L., Arif M., Werner S.A.* Phase radiography with neutrons // *Nature*. 2000. V. 408. No. 6809. P. 158—159.
17. *Lehmann E.H., Frei G., Vontobel P., Josic L., Kardjilov N., Hilger A., Kockelmann W., Steuwer A.* The energy-selective option in neutron imaging // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2009. V. 603. No. 3. P. 429—438.
18. *Schulz M., Böni P., Calzada E., Mühlbauer M., Schillinger B.* Energy-dependent neutron imaging with a double crystal monochromator at the ANTARES facility at FRM II // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2009. V. 605. No. 1—2. P. 33—35.
19. *Somenkov V.A., Glazkov V.P., Em V.T., Gureev A.I., Murashev M.M., Sadykov R.A., Axenov S.N., Trunov D.N., Stolyarov A.A., Alexeev A.A., Kravchuk L.V.* On the Complex Radiation Diagnostics Facility “Dragon” // *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2019. V. 13. P. 870—876.
20. Image Processing and Analysis in Java. URL: <https://imagej.nih.gov/ij/index.html> (date of the application 24.04.2023).
21. *Makarenko K., Dubinin O., Shornikov P., Shishkovsky I.* Specific aspects of the transitional layer forming in the aluminium bronze — stainless steel functionally graded structures after laser metal deposition // *Procedia CIRP*. 2020. V. 94. P. 346—351.
22. *Makarenko K.I., Konev S.D., Dubinin O.N., Shishkovsky I.V.* Mechanical characteristics of laser-deposited sandwich structures and quasi-homogeneous alloys of Fe-Cu system // *Materials & Design*. 2022. V. 224. P. 111313.
23. *Makarenko K., Dubinin O., Shishkovsky I.* Direct Energy Deposition of Cu-Fe System Functionally Graded Materials: Miscibility Aspects, Cracking Sources, and Methods of Assisted Manufacturing // Chapter in book: *Advanced Additive Manufacturing*. Published in 2022 by IntechOpen (London, UK).

## ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ ТЕРМОГРАФИИ И РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕФЕКТОВ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2024 г. А. Г. Дивин<sup>1,2,\*</sup>, С. В. Пономарев<sup>2</sup>, С. В. Мищенко<sup>2</sup>, Ю. А. Захаров<sup>1,2</sup>,  
Н. А. Карпова<sup>2</sup>, А. А. Самодуров<sup>1</sup>, Д. Ю. Головин<sup>1,\*\*</sup>, А. И. Тюрин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина,  
Россия 392036 Тамбов, ул. Интернациональная, 33

<sup>2</sup>Тамбовский государственный технический университет, Россия 392000 Тамбов, ул. Советская, 106/5  
E-mail: \*divin.ag@tstu.ru; \*\*nano@tsutmb.ru

Поступила в редакцию 16.11.2023; после доработки 24.11.2023  
Принята к публикации 01.12.2023

Метод точечной лазерной сканирующей термографии обладает высокой чувствительностью и позволяет надежно обнаруживать поверхностные и подповерхностные дефекты изделий из полимерных композиционных материалов. При реализации данного метода применение роботов-манипуляторов в качестве сканирующего устройства позволяет исследовать малогабаритные объекты контроля с криволинейной поверхностью или дообследовать сомнительные участки, выявленные другими методами. В статье приведены сведения о макете роботизированного комплекса для лазерной сканирующей термографии на основе пятиосевого робота-манипулятора, лазера мощностью до 3 Вт и длиной волны 405 нм, а также тепловизора СОХ СГ640. Предложена методика обработки экспериментальных данных и разработаны регрессионные модели, позволяющие определять поперечный размер дефектов вдоль траектории сканирования и глубину их залегания. Для апробации подхода был изготовлен контрольный образец из стеклотекстолита, содержащий искусственные дефекты типа «расслоение», в виде квадратов различных размеров. Коэффициент детерминации  $R^2$  регрессионных моделей оказался не хуже 0,94, а средняя квадратическая ошибка модели глубины дефекта и поперечного размера — не хуже  $\pm 0,2$  и  $\pm 1,5$  мм<sup>2</sup> соответственно.

*Ключевые слова:* дефектоскопия, термография, полимерные композиционные материалы, робот-манипулятор, лазер.

## APPLICATION OF LASER SCANNING THERMOGRAPHY AND REGRESSION ANALYSIS TO DETERMINE CHARACTERISTICS OF DEFECTS IN POLYMER COMPOSITE MATERIALS

A.G. Divin<sup>1,2,\*</sup>, S.V. Ponomarev<sup>2</sup>, S.V. Mishchenko<sup>2</sup>, Yu.A. Zakharov<sup>1,2</sup>, N.A. Karpova<sup>2</sup>,  
A.A. Samodurov<sup>1</sup>, D.Yu. Golovin<sup>1,\*\*</sup>, A.I. Tyurin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Derzhavin Tambov State University, Internatsionalnaya st., 33, Tambov, 392036, Russia

<sup>2</sup> – Tambov State Technical University, Sovetskaya str., 106/5, Tambov, 392000, Russia

E-mail: \*divin.ag@tstu.ru; \*\*nano@tsutmb.ru

The method of laser point scanning thermography is highly sensitive and allows for reliable detection of surface and subsurface defects in products made of polymer composite materials. When implementing this method, the use of robotic manipulators as a scanning device makes it possible to inspect small objects with a curved surface or to further examine questionable areas identified by other methods. The article provides information about the layout of a robotic complex for laser scanning thermography based on a five-axis robotic manipulator, laser power up to 3 W and wavelength 405 nm, as well as a COX CG640 thermal imager. A technique for processing experimental data has been proposed and regression models have been developed to make it possible to measure the size of defects along the trajectory and determine their location. To test the protocol, a control sample was made from fiberglass laminate, including artificial defects of the “delamination” type, in the form of squares of various sizes. The coefficient of determination  $R^2$  of regression models turned out to be no worse than 0.94, the root mean square error of the defect model and the transverse size were no worse than  $\pm 0.2$  and  $\pm 1.5$  mm<sup>2</sup>, respectively.

*Keywords:* flaw detection, thermography, polymer composite materials, robot manipulator, laser.

DOI: 10.31857/S0130308224010047

## ВВЕДЕНИЕ

Полимерные композиционные материалы широко применяются в авиа- и автомобилестроении для изготовления деталей, работающих в условиях повышенных нагрузок. При этом существенно возрастает роль контроля внутренних дефектов в материале изделия на всех этапах его жизненного цикла. Пропущенный дефект, например, расслоение, может привести к разрушению элемента конструкции в процессе эксплуатации изделия.

Одним из основных видов дефектоскопии является неразрушающий контроль материалов и изделий. Для обнаружения дефектов в изделиях из композиционных материалов часто применяют ультразвуковой [1], радиационный и термографический виды контроля [2]. Последний имеет преимущество при идентификации поверхностных и подповерхностных дефектов [3]. Существует ряд модификаций теплового метода, таких как импульсный [4], импульсно-фазовый [5], ступенчатый [6] способы термографии и др. [7]. Активно разрабатывают комбинированные методы ультразвуковой (УЗ) термотомографии, основанные на генерации тепловой энергии в дефектах за счет ультразвукового излучения и последующей тепловизионной регистрации и анализе поверхностных динамических температурных полей. Это позволяет определять характеристики дефектов малых размеров, «сомкнутых» («слипнутых») и др. [8]. Для идентификации подобных дефектов также используют метод электросиловой термографии [9].

В ходе контроля важное значение имеет не только факт обнаружения дефектов, но также определение их количественных характеристик, например, глубины залегания и поперечного размера (ширины). В настоящее время известно несколько способов оценки глубины залегания дефектов. Все они, как правило, основаны на использовании максимального температурного контраста, а также технологий машинного обучения или аналитических зависимостей [10]. Метод пикового температурного контраста [11] позволяет оценивать глубину на основе характерного времени достижения максимальной разности температур [12]. Однако при этом не учитывают тот факт, что как на величину температурного контраста, так и на время достижения его максимального значения влияют не только глубина залегания дефекта, но также его геометрические размеры (особенно при малых размерах).

В настоящей статье приводятся результаты исследования зависимости термографических данных от геометрических размеров и глубины залегания дефектов типа «расслоение». При этом применяют метод точечной сканирующей термографии, имеющий высокую чувствительность по сравнению с методами, основанными на тепловой стимуляции объекта контроля с применением галогенных ламп. В комбинации с другими методами контроля он позволяет наиболее достоверно диагностировать дефекты [13] и одновременно определять их глубину залегания и поперечный размер, чему до сих пор не уделялось достаточного внимания.

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБРАЗЦЫ

Для экспериментальных исследований был изготовлен тестовый образец (см. рис. 1), склеенный из четырех прямоугольных фрагментов электротехнического листового стеклотекстолита (ГОСТ 12652—74) толщиной 2 мм, в двух из которых предварительно фрезеровкой выбраны углубления в форме квадратов различных размеров и толщиной 1 мм. Таким образом, образец имел три группы дефектов, обозначенных как А, В и С, расположенных соответственно на глубинах 3, 2 и 1 мм от поверхности (см. табл. 1). При этом поверхность образца была покрыта черной краской для обеспечения лучшей поглощающей и излучательной способности.

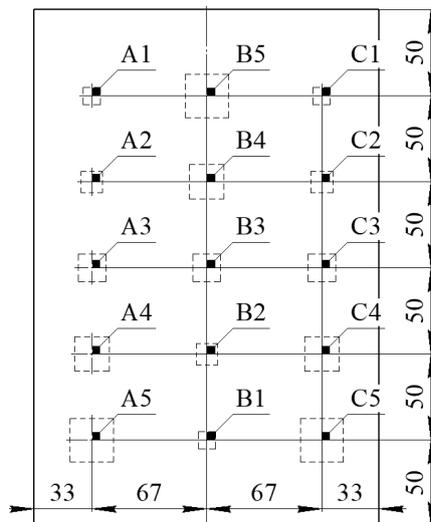


Рис. 1. Эскиз тестового образца.

Обозначения и характеристики дефектов тестового образца

Размеры дефекта, мм	Глубина залегания дефекта, мм		
	3±0,1	2±0,1	1±0,1
10×10	A1	B1	C1
12,5×12,5	A2	B2	C2
16×16	A3	B3	C3
20×20	A4	B4	C4
25×25	A5	B5	C5

Для экспериментального обнаружения дефектов тестового образца и определения их параметров разработана лабораторная установка (см. рис. 2), основой которой является робот-манипулятор 1 PASKAL DELTA 5X-ARMDUINO со сферической зоной обслуживания (далее — Delta 5X) производства компании ООО НПО «ПАСКАЛЬ УТ» (Россия). Delta 5X относится к классу манипуляторов, оснащенных системой прямого компьютерного управления класса PCNC (Personal Computer Numerical Control). Блок управления роботом 6 получает готовые данные от компьютера 5, осуществляет их интерпретацию и управление движением рабочим органом 2 (лазером), питаемым от блока питания 4 через дискретный выход блока управления 6. Управление выходной мощностью лазера осуществляется при помощи контроллера 3.

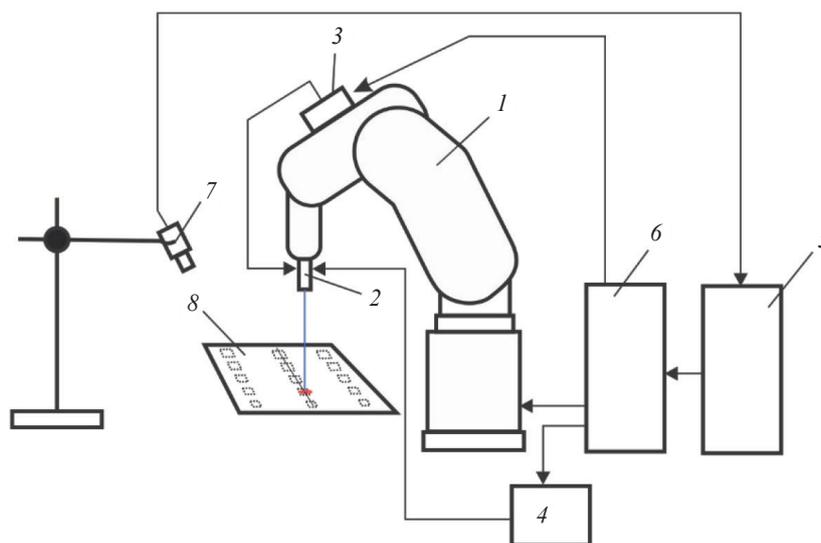


Рис. 2. Схема лабораторной установки:

1 — манипулятор; 2 — лазер; 3 — блок контроллера с ШИМ выходом; 4 — блок питания; 5 — компьютер; 6 — контроллер манипулятора; 7 — тепловизор; 8 — объект контроля.

Для получения информации о температурном поле объекта контроля 8 применяли тепловизионную камеру 7 COX CG640. Камера использует неохлаждаемый микроболометрический детектор длинноволнового диапазона с разрешением 640×480 пикселей, а также объектив с фокусным расстоянием от 20 мм, допускающий ручную фокусировку, и имеет температурную чувствительность не хуже 30 мК.

При проведении эксперимента температурное поле регистрировали с максимальной технической возможной частотой кадров для выбранной камеры — (20—30) Гц.

Скорость перемещения пятна нагрева диаметром 5 мм, перпендикулярно сторонам дефектов, составила 5 мм/с, что обеспечивало достаточный прогрев образца, и вместе с тем максимальная

температура в пятне нагрева не превышала максимально допустимую для материала используемого образца (155 °С).

Для обработки записей инфракрасной камеры применяли программное обеспечение собственной разработки «Анализатор термофильмов CRD», реализующее следующие основные функции:

- визуализация динамического температурного поля в поле зрения тепловизора в виде карты цветов;
- регистрация термограмм вдоль заданной траектории сканирования в заданные значения интервала времени после прохождения центральной точки пятна нагрева;
- регистрация температурного поля и его характеристик (максимального и минимального значений температуры, стандартного отклонения и др.) в заданной локальной области объекта контроля как функции времени.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

С применением вышеописанных программно-технических средств для всех дефектов контрольного образца были получены термограммы как функции времени и координаты  $x$ . В качестве примера на рис. 3 показаны температурные поля вдоль линии сканирования поверхности контрольного образца над дефектами С3, С4 в моменты времени через 4–20 с после теплового воздействия пятном лазера. Дефекты данного типа проявляют себя в виде пиков температуры, амплитуда которых зависит от интервала времени, прошедшего с момента прохождения пятна от лазера над дефектом, а также от характеристик самого дефекта, как это видно на рис. 4а и 4б.

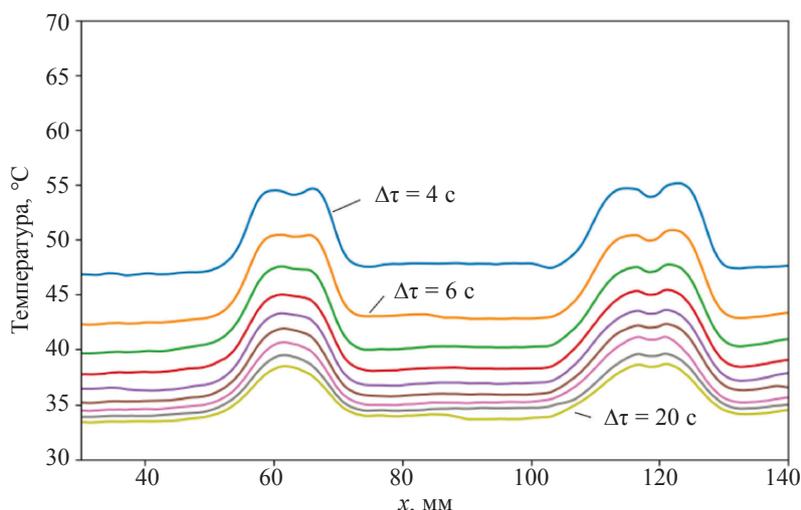


Рис. 3. Термограммы для дефектов С3 и С4.

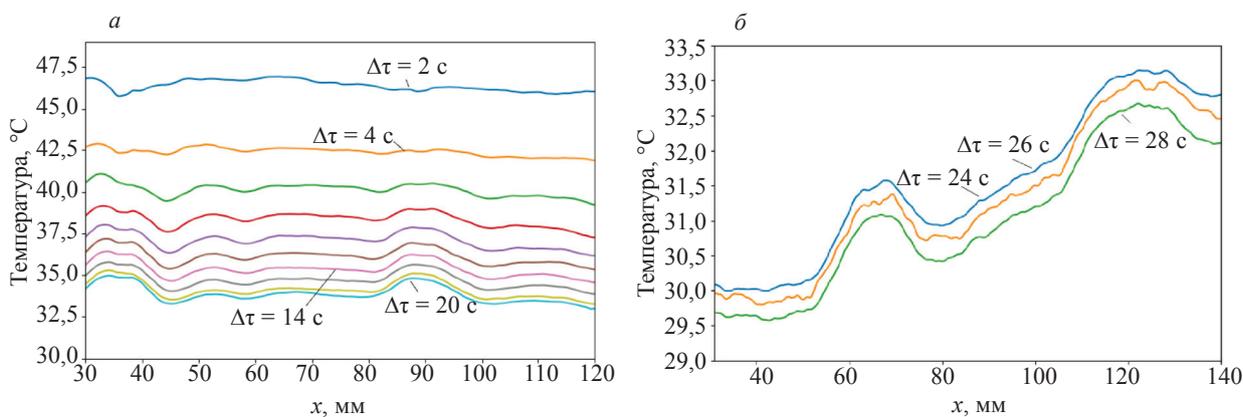


Рис. 4. Термограммы, полученные с интервалом времени 2 с для участков образца, содержащих дефекты В4, В5 (а) и А4, А5 (б).

Анализ термограмм для дефектов различных размеров и расположенных на различных глубинах позволил выявить следующие закономерности, характерные для активного теплового контроля:

- с увеличением глубины залегания дефекта растет время достижения максимальной разности температур между дефектной и бездефектной областями образца (температурного контраста);
- чем меньше глубина залегания дефекта, тем больше температурный контраст между дефектной и бездефектной областями образца;
- с увеличением глубины залегания происходит уменьшение влияния неоднородности поверхности образца и размера дефекта на температурное поле  $T(x, \tau)$ ;
- с уменьшением размеров дефекта уменьшается температурный контраст.

Для определения максимальной разности температур в дефектной и бездефектной зонах как функции времени вычисляли разность температур в соответствии с выражением:

$$\Delta T(\tau) = T_d(x_d, \tau - \Delta\tau) - T_r(x_r, \tau), \quad (1)$$

где  $\Delta T(\tau)$  — разность температур дефектной и бездефектной областей как функция времени;  $T_d(x_d, \tau)$  и  $T_r(x_r, \tau)$  — температуры в момент времени  $\tau$  для дефектной и бездефектной области в точке с координатами  $x_d$  и  $x_r$  соответственно;  $\Delta\tau$  — временной интервал между моментами начала нагрева в точках контроля с координатами  $x_d, x_r$ , принадлежащих соответственно дефектной и бездефектной областям.

По выражению (1) для всех дефектов было вычислено изменение температурного контраста во времени. Эти зависимости позволили определить максимальный контраст  $\Delta T_{\max}(\tau)$  и время  $\tau_{\max} - \Delta\tau_0$  его наступления после момента начала нагрева. Пример таких зависимостей для дефекта С5 показан на рис. 5.

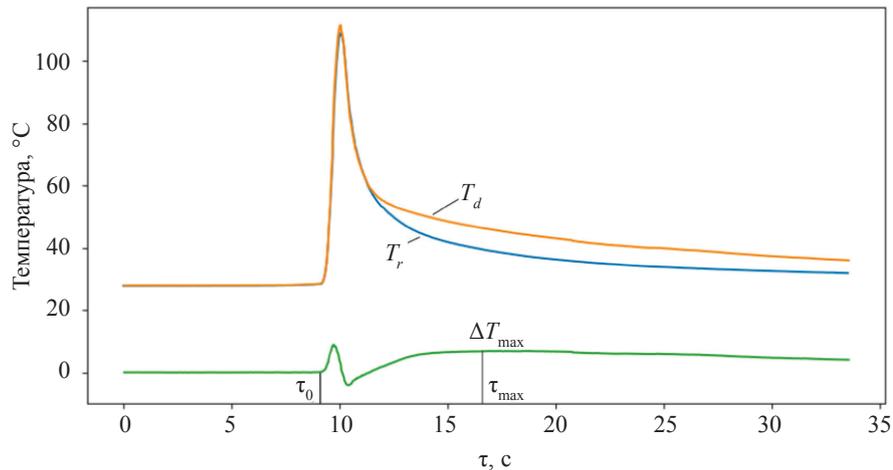


Рис. 5. Термограммы  $T_d(x_1, \tau - \Delta\tau)$ ,  $T_r(x_2, \tau)$  и температурный контраст  $\Delta T_{\max}(\tau)$ .

Для определения границ каждого дефекта был применен следующий алгоритм:

- 1) для каждой области локального максимума температуры на термограмме определяли значение  $\tau_{\max}$  и  $\Delta T_{\max}(\tau)$ ;
- 2) из массива термограмм для каждого значения координаты  $x$  траектории движения пятна нагрева выбирали значения температуры, соответствующие  $\tau_{\max}$  после начала нагрева. В результате чего получали термограмму в момент максимального температурного контраста (см. рис. 6);
- 3) для полученного распределения температур вычисляли первую производную  $dT(x, \tau_{\max})/dx$  (рис. 7): впервые такой способ был предложен в работе [14];
- 4) полученная производная содержит два экстремума — минимум  $x_{i2}$  и максимум  $x_{i1}$ . Их принимали в качестве границ дефектов. Соответственно, ширина дефекта  $w_m$  вычисляется как

$$w_m = x_{i2} - x_{i1}. \quad (2)$$

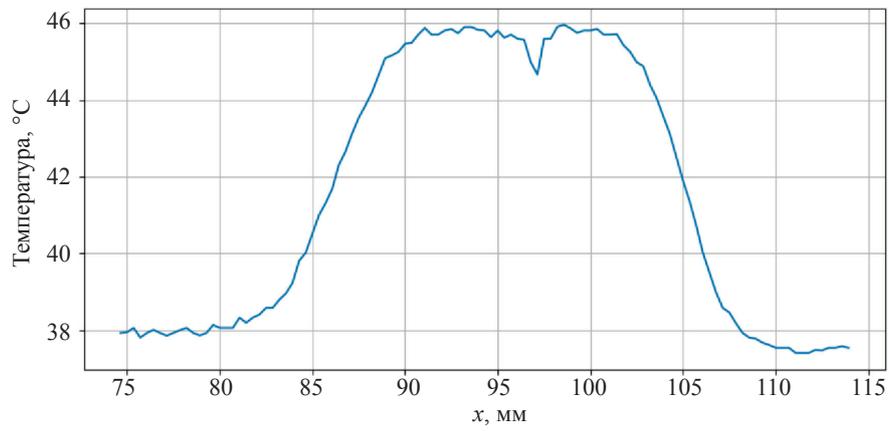


Рис. 6. Термограмма в зоне дефекта С4.

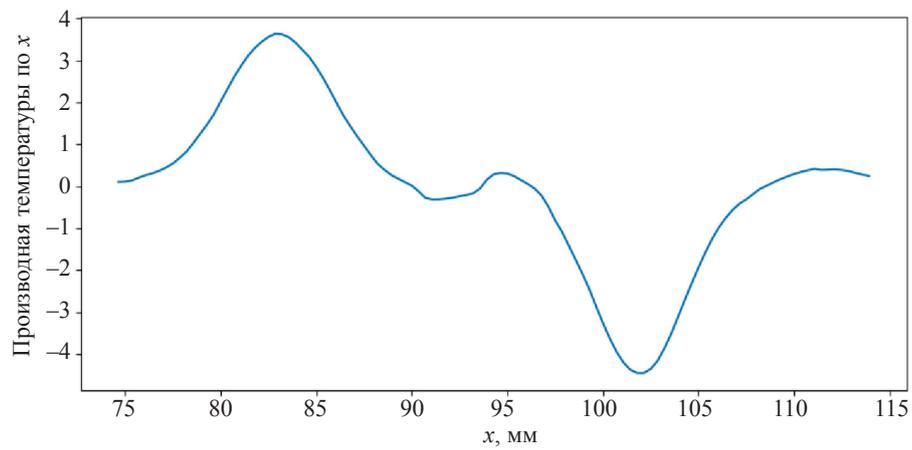


Рис. 7. График зависимости производной температурного поля по координате  $x$  для дефекта С4.

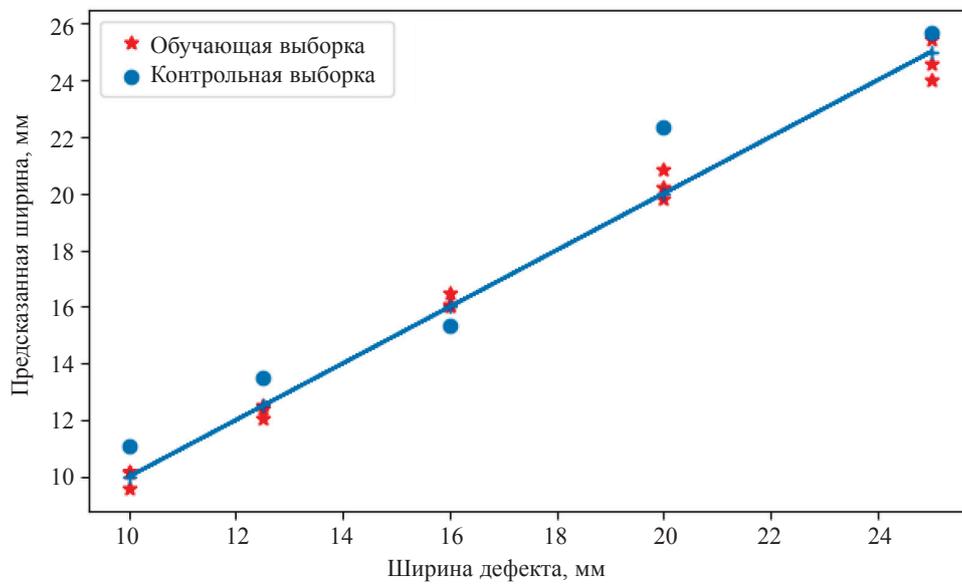


Рис. 8. Диаграмма рассеяния для регрессионной модели ширины дефекта.

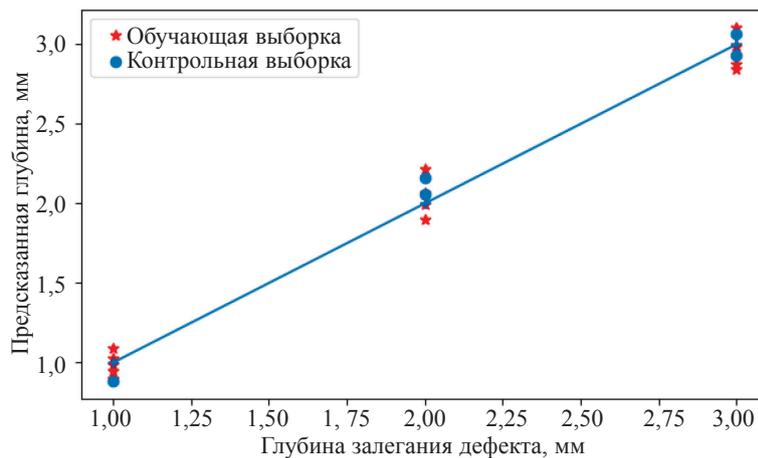


Рис. 9. Диаграмма рассеяния для регрессионной модели глубины залегания дефекта.

Эксперименты показали, что точность оценки ширины дефекта снижалась по мере увеличения глубины залегания дефекта из-за «сглаживания» термограммы и «размытия» контуров дефекта (рис. 9).

В связи с этим представляется целесообразным для прогноза действительной ширины дефекта, а также его глубины залегания, использовать многомерную линейную регрессионную модель, в которой в качестве признаков (предикторов) будут участвовать максимальный температурный контраст  $\Delta T_{\max}$ , время  $\tau_{\max} - \tau_0$  достижения максимального температурного контраста, а также вычисленная по формуле (2) ширина дефекта.

Для дефектов групп А, В и С на основе экспериментально полученных термограмм были определены значения  $\Delta T_{\max}$ ,  $\tau_{\max}$  и  $w_m$ , показанные в табл. 2 и использованные затем для обучения регрессионных моделей и оценки ширины дефекта и глубины его залегания.

Таблица 2

## Структура обучающей выборки для построения регрессионной модели

№	Дефект	Глубина залегания, мм	$\Delta T_{\max}$ , °С	$\tau_{\max} - \tau_0$ , с	Ширина дефекта, мм	
					Действительная	Оцененная ширина $w_m$
1	A1	3	0,56	24	10	7,1
2	A2	3	0,75	25	12,5	10
3	A3	3	0,82	24,1	16	13,6
4	A4	3	0,83	26	20	15,6
5	A5	3	0,91	26,5	25	17,2
6	B1	2	1,63	16,3	10	9,01
7	B2	2	1,76	17,4	12,5	11,0
8	B3	2	1,86	17,62	16	14,1
9	B4	2	2,06	18,9	20	17,7
10	B5	2	2,87	21	25	23,1
11	C1	1	4,74	6,95	10	9,8
12	C2	1	5,69	6,89	12,5	12,0
13	C3	1	6,9	8,07	16	15,6
14	C4	1	6,73	8,34	20	19,8
15	C5	1	8,43	8,052	25	23,2

Регрессионный анализ проводили средствами языка программирования Python и его библиотек. Для обучения была сформирована обучающая выборка, структура которой аналогична

табл. 2. Объем выборки оказался равным 60 строкам, по 20 результатов измерений на каждый признак. Для прогнозирования ширины дефектов была получена модель вида (3), диаграмма рассеяния для которой представлена на рис. 8:

$$\hat{w} = -0,0172 \cdot \Delta T_{\max} + 0,132 \cdot \tau_{\max} + 1,121 \cdot w_m - 2,09. \quad (3)$$

При этом метрики качества модели, такие как средняя квадратическая ошибка ( $MSE$ ) и коэффициент детерминации  $R^2$  составили соответственно  $\pm 0,185 \text{ мм}^2$  и  $0,95$ .

Для прогнозирования глубины залегания дефекта была получена модель (4), диаграмма рассеяния для которой представлена на рис. 9:

$$\hat{h} = 0,185 \cdot \Delta T_{\max} + 0,152 \cdot \tau_{\max} - 0,0421 \cdot \hat{w} - 0,42 \quad (4)$$

и следующие метрики качества:  $MSE = \pm 0,2 \text{ мм}^2$  и  $R^2 = 0,98$ .

Проведенные испытания по контрольной выборке из пяти измерений подтвердили работоспособность модели для конкретного тестового образца. Метрики качества для модели глубины дефекта оказались равными  $MSE = \pm 0,1 \text{ мм}^2$ ;  $R^2 = 0,983$ , а для ширины дефекта —  $MSE = \pm 1,71 \text{ мм}^2$ ;  $R^2 = 0,944$ .

## ВЫВОДЫ

В статье приведены результаты применения многомерного регрессионного анализа для прогнозирования ширины и глубины залегания дефектов типа «расслоение» для полимерных композиционных материалов на основе стеклопластика по экспериментально полученным данным от тепловизионной камеры с применением метода точечной сканирующей термографии. Очевидно, что более точные результаты идентификации дефектов могут дать численные или аналитические решения обратных задач теплопроводности при условии, что известны все параметры теплового воздействия, теплофизические характеристики материала и свойства его поверхности. Однако на практике эти задачи содержат множество неизвестных, поэтому для ряда случаев, когда не требуется высокая точность, проще применять модели, полученные с применением методов машинного обучения на основе набора исходных данных для признаков, оказывающих заметное влияние на определяемые параметры. Такие признаки можно определить эмпирически или на основе физических закономерностей.

Приведенные в статье результаты регрессионного анализа для прогнозирования ширины дефекта и глубины залегания показали достаточную для практики точность, что позволяет проводить мониторинг развития дефектов и делать выводы о пригодности предложенного метода при контроле конкретных типов изделий из полимерных композиционных материалов в конкретных условиях эксплуатации.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-19-00602 (<https://rscf.ru/project/20-19-00602/>) с использованием оборудования ЦКП ФГБОУ ВО «ТГУ имени Г.Р. Державина» и ЦКП «Робототехника» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shen Q., Omar M., Dongri S. Ultrasonic NDE Techniques for Impact Damage Inspection on CFRP Laminates // J. Mater. Sci. Res. 2011. V. 1. No. 1. DOI: 10.5539/jmsr.v1n1p2
2. Golovin Y.I., Golovin D.Y., Tyurin A.I. Dynamic Thermography for Technical Diagnostics of Materials and Structures // Russ. Metall. 2021. V. 2021. No. 4. DOI: 10.1134/S0036029521040091
3. Chulkov A., Vavilov V., Nesteruk D., Burleigh D., Moskovchenko A. A method and apparatus for characterizing defects in large flat composite structures by Line Scan Thermography and neural network techniques // Frat. ed Integrita Strutt. 2023. V. 17. No. 63. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.63.11
4. D'Accardi E., Palumbo D., Galietti U. Experimental Procedure to Assess Depth and Size of Defects with Pulsed Thermography // J. Nondestruct. Eval. 2022. V. 41. No. 2. DOI: 10.1007/s10921-022-00870-5
5. Maldague X.P.V. Introduction to NDT by active infrared thermography // Materials Evaluation. 2002. V. 60. No. 9.
6. Palumbo D., Cavallo P., Galietti U. An investigation of the stepped thermography technique for defects evaluation in GFRP materials // NDT E. Int. 2019. V. 102. DOI: 10.1016/j.ndteint.2018.12.011
7. Feuillet V., Ibos L., Fois M., Dumoulin J., Candau Y. Defect detection and characterization in composite materials using square pulse thermography coupled with singular value decomposition analysis and thermal quadrupole modeling // NDT E. Int. 2012. V. 51. DOI: 10.1016/j.ndteint.2012.06.003

8. Kaledin V.O., Vyachkina E.A., Vyachkin E.S., Budadin O.N., Kozel'skaya S.O. Applying Ultrasonic Thermotomography and Electric-Loading Thermography for Thermal Characterization of Small-Sized Defects in Complex-Shaped Spatial Composite Structures // Russ. J. Nondestruct. Test. 2020. V. 56. No. 1. DOI: 10.1134/S1061830920010052
9. Budadin O., Razin A., Aniskovich V., Kozelskaya S., Abramova E. New approaches to diagnostics of quality of structures from polymeric composite materials under force and shock impact using the analysis of temperature fields // Journal of Physics: Conference Series. 2020. V. 1636. No. 1. DOI: 10.1088/1742-6596/1636/1/012022
10. Angioni S.L., Ciampa F., Pinto F., Scarselli G., Almond D.P., Meo M. An Analytical Model for Defect Depth Estimation Using Pulsed Thermography // Exp. Mech. 2016. V. 56. No. 6. DOI: 10.1007/s11340-016-0143-4
11. D'Accardi E., Palumbo D., Galietti U. A comparison among different way to perform the lock-in multi-frequency test in a CFRP composite sample. 2020. DOI: 10.21611/qirt.2020.119
12. Zeng Z., Zhou J., Tao N., Feng L., Zhang C. Absolute peak slope time based thickness measurement using pulsed thermography // Infrared Phys. Technol. 2012. V. 55. No. 2—3. DOI: 10.1016/j.infrared.2012.01.005
13. Rellinger T., Underhill P.R., Krause T.W., Wowk D. Combining eddy current, thermography and laser scanning to characterize low-velocity impact damage in aerospace composite sandwich panels // NDT E. Int. 2021. V. 120. DOI: 10.1016/j.ndteint.2021.102421
14. Вавилов В.П., Шуряев В.В. Способ определения размеров дефектов при тепловом контроле // Дефектоскопия. 1979. № 11. С. 101—103.

## REFERENCES

1. Shen Q., Omar M., Dongri S. Ultrasonic NDE Techniques for Impact Damage Inspection on CFRP Laminates // J. Mater. Sci. Res. 2011. V. 1. No. 1. DOI: 10.5539/jmsr.v1n1p2
2. Golovin Y.I., Golovin D.Y., Tyurin A.I. Dynamic Thermography for Technical Diagnostics of Materials and Structures // Russ. Metall. 2021. V. 2021. No. 4. DOI: 10.1134/S0036029521040091
3. Chulkov A., Vavilov V., Nesteruk D., Burleigh D., Moskovchenko A. A method and apparatus for characterizing defects in large flat composite structures by Line Scan Thermography and neural network techniques // Frat. ed Integrita Strutt. 2023. V. 17. No. 63. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.63.11
4. D'Accardi E., Palumbo D., Galietti U. Experimental Procedure to Assess Depth and Size of Defects with Pulsed Thermography // J. Nondestruct. Eval. 2022. V. 41. No. 2. DOI: 10.1007/s10921-022-00870-5
5. Maldague X.P.V. Introduction to NDT by active infrared thermography // Materials Evaluation. 2002. V. 60. No. 9.
6. Palumbo D., Cavallo P., Galietti U. An investigation of the stepped thermography technique for defects evaluation in GFRP materials // NDT E. Int. 2019. V. 102. DOI: 10.1016/j.ndteint.2018.12.011
7. Feuillet V., Ibos L., Fois M., Dumoulin J., Candau Y. Defect detection and characterization in composite materials using square pulse thermography coupled with singular value decomposition analysis and thermal quadrupole modeling // NDT E. Int. 2012. V. 51. DOI: 10.1016/j.ndteint.2012.06.003
8. Kaledin V.O., Vyachkina E.A., Vyachkin E.S., Budadin O.N., Kozel'skaya S.O. Applying Ultrasonic Thermotomography and Electric-Loading Thermography for Thermal Characterization of Small-Sized Defects in Complex-Shaped Spatial Composite Structures // Russ. J. Nondestruct. Test. 2020. V. 56. No. 1. DOI: 10.1134/S1061830920010052
9. Budadin O., Razin A., Aniskovich V., Kozelskaya S., Abramova E. New approaches to diagnostics of quality of structures from polymeric composite materials under force and shock impact using the analysis of temperature fields // Journal of Physics: Conference Series. 2020. V. 1636. No. 1. DOI: 10.1088/1742-6596/1636/1/012022
10. Angioni S.L., Ciampa F., Pinto F., Scarselli G., Almond D.P., Meo M. An Analytical Model for Defect Depth Estimation Using Pulsed Thermography // Exp. Mech. 2016. V. 56. No. 6. DOI: 10.1007/s11340-016-0143-4
11. D'Accardi E., Palumbo D., Galietti U. A comparison among different way to perform the lock-in multifrequency test in a CFRP composite sample. 2020. DOI: 10.21611/qirt.2020.119
12. Zeng Z., Zhou J., Tao N., Feng L., Zhang C. Absolute peak slope time based thickness measurement using pulsed thermography // Infrared Phys. Technol. 2012. V. 55. No. 2—3. DOI: 10.1016/j.infrared.2012.01.005
13. Rellinger T., Underhill P.R., Krause T.W., Wowk D. Combining eddy current, thermography and laser scanning to characterize low-velocity impact damage in aerospace composite sandwich panels // NDT E. Int. 2021. V. 120. DOI: 10.1016/j.ndteint.2021.102421
14. Vavilov V.P., Shiryayev V.V. The method for determining defect size in thermal testing // Defektoskopiya. 1979. No. 11. P. 101—103.

## КОНТРОЛЬ ПРЕССОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ОСНОВЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИХ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ ТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

© 2024 г. С.А. Бехер<sup>1</sup>, А.А. Попков<sup>1</sup>, А.С. Выплавень<sup>1</sup>, В.Н. Федоринин<sup>2,\*</sup>,  
В.И. Сидоров<sup>2</sup>, С.П. Шляхтенков<sup>1,\*\*</sup>, И.Ю. Кинжагулов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет путей сообщения, Россия 630049 Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191

<sup>2</sup>Филиал ИФП СО РАН «Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники», Россия 630090 Новосибирск, просп. акад. Лаврентьева, 2/1

<sup>3</sup>Национальный исследовательский университет ИТМО, Россия 197101 Санкт-Петербург, Кронверкский просп., 49, литера А  
E-mail: \*fedorinin55@mail.ru; \*\*shlyakhtenkow@gmail.com

Поступила в редакцию 23.11.2023; после доработки 05.12.2023  
Принята к публикации 08.12.2023

Приведены результаты экспериментальных исследований возможности использования тензометрии при локальном импульсном тепловом воздействии для контроля натяга прессовых соединений колец подшипников с валами. Изготовлены образцы прессовых соединения с натягами в диапазоне от 38 до 118 мкм. В результате исследования закономерностей распространения теплового потока в кольцах подшипников и образцах натяга контактным методом и средствами тепловизионного контроля показана возможность разделения деформаций, связанных с влиянием температуры на область измерения деформаций и градиента температуры в области нагрева. Экспериментально реализованы способы контроля прессового соединения при воздействии на кольцо нагревателя с запасом тепловой энергии 80 кДж и температурой 200 °С и измерением деформаций кольца и вала оптико-поляризационным датчиком с базой 60 мм и ценой наименьшего разряда  $2 \times 10^{-7}$  относительных единиц деформаций. Установлена корреляционная связь времени достижения максимума локальных деформаций вала с натягами прессовых соединений и знака деформаций кольца подшипника с плотностью прессовой посадки, зазором между кольцом и валом.

*Ключевые слова:* прессовые соединения, неразрушающий контроль, тепловое воздействие, механические напряжения, трение, деформации, оптико-поляризационный датчик.

## INSPECTION OF PRESS JOINTS BASED ON THE ANALYSIS OF THEIR DEFORMATION PATTERNS UNDER LOCAL THERMAL LOADING

© 2024 г. S.A. Becher<sup>1</sup>, A.A. Popkov<sup>1</sup>, A.S. Vyplaven<sup>1</sup>, V.N. Fedorinin<sup>2,\*</sup>, V.I. Sidorov<sup>2</sup>, S.P. Shlyakhtenkow<sup>1,\*\*</sup>, I.Y. Kinzhagulov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Siberian transport university, Russian Federation 630049 Novosibirsk, str. Dusi Kovalchuk, 191

<sup>2</sup>Branch of IFP SB RAS “Design and Technological Institute of Applied Microelectronics”, Russia 630090 Novosibirsk, ak. Lavrentieva ave., 2/1,

<sup>3</sup>ITMO National Research University, Russia 197101, St. Petersburg, Kronverksky Prospekt, 49, litera A  
E-mail: \*fedorinin55@mail.ru; \*\*shlyakhtenkow@gmail.com

The results of experimental studies of the possibility of using strain gauges under local pulsed thermal loading to evaluate the tension of the press connections of bearing rings with shafts are presented. Samples of press joints with tightness in the range from 38 to 118 microns were made. As a result of the study of the patterns of heat flow propagation in bearing rings and tension samples by contact method and means of thermal imaging, the possibility of separating deformations associated with the influence of temperature on the deformation measurement area and the temperature gradient in the heating area is shown. The methods of inspecting the press joint when exposed to a heater ring with a heat power capacity of 80 kJ and a temperature of 200°C and measuring the deformations of the ring and shaft by an opto-polarizing sensor with a base of 60 mm and a resolution of  $2 \times 10^{-7}$  — 7 relative deformations have been experimentally implemented. A correlation has been established between the time of reaching the maximum of local deformations of the shaft with the tightness of the press joints and the sign of deformations of the bearing ring with the tightness of the press fit, the gap between the ring and the shaft.

*Keywords:* press connections, non-destructive testing, thermal effects, mechanical stresses, friction, deformations, optical-polarizing sensor.

DOI: 10.31857/S0130308224010056

## ВВЕДЕНИЕ

Проблема внутреннего напряженно-деформированного состояния [1] сопряженных тел напрямую связана с вопросами прочности и надежности конструкций. Задача определения параметров состояния является актуальной для таких отраслей как энергетика, транспорт, машиностроение [2]. В конструкциях машин, механизмов и строительных сооружениях широко применяются прессовые и резьбовые соединения, неподвижность которых обеспечивается силами трения [3, 4]. Необходимый уровень этих сил создается упругими механическими напряжениями [5, 6], формируемыми на этапе монтажа [7]. Надежность [8] таких соединений напрямую зависит от точности измерения размеров перед сборкой [9—11], формы сопрягаемых поверхностей [12] и способности деталей сохранять [13] остаточные механические напряжения на уровне, достаточном для обеспечения неподвижности [14, 15].

В процессе эксплуатации при воздействии ударных [16] и вибрационных нагрузок, износов, развития трещин под напряжением [17], коррозии и повышенного нагрева упругие механические напряжения снижаются. Это приводит к пропорциональному уменьшению сил трения [18]. Когда эти силы становятся ниже рабочих нагрузок, нарушается неподвижность соединения, что является причиной отказов технических средств в эксплуатации. Для их предотвращения необходим периодический контроль сил трения как в прессовых, так и в резьбовых соединениях. Контроль соединений может быть выполнен в процессе прессования [19—21] или при демонтаже [5, 22] по максимальной силе запрессовки. Однако многократные операции демонтажа и повторного монтажа соединений с натягом при плановых видах ремонта оборудования повреждают поверхности деталей и негативно сказывается на их сроке службы [22].

Для контроля прессовых соединений в эксплуатации наибольшее распространение получили акустические методы неразрушающего контроля. Ультразвуковой метод позволяет оценить параметры переходного слоя между деталями [23—25], метод акустоупругости — упругие напряжения в элементах прессовых соединений [26—28]. Акустические методы имеют ряд ограничений, связанных с геометрией объекта контроля, влиянием структуры материала, необходимостью использования сложной и дорогостоящей аппаратуры для измерения малых изменений скоростей распространения методом акустоупругости.

Контроль прессовых соединений может быть выполнен средствами тензометрии с использованием локального импульсного нагружения, в том числе теплового [29]. В этом методе о плотности прессового соединения судят по изменениям механических деформаций элементов соединений при внешнем воздействии [30].

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Цель работы — расчетно-экспериментальные исследования динамики развития механических напряжений в упругом материале при локальном импульсном тепловом воздействии для определения внутренних напряжений сопряженных поверхностей тел вращения и поиск решений, позволяющих определить остаточные напряжения и состояние поверхности прессовых соединений без нарушения их целостности.

## МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

При контакте двух объектов  $A$  и  $B$  с нормальными к их общей границе напряжениями  $\sigma_{yy}^D$  возникают касательные напряжения трения  $\sigma_{yx}^{тр}$  (рис. 1). Максимальные значения напряжений трения ограничены известным соотношением:

$$|\sigma_{yx}^{тр}| \leq \mu \cdot |\sigma_{yy}^D|, \quad (1)$$

где  $\mu$  — коэффициент трения, который зависит от свойств материалов, состояния поверхностей и среды между ними.

Локальное переменное во времени тепловое воздействие на объект  $A$  создает упругие механические напряжения (рис. 1). Возникающие при этом деформации объекта  $A$  зависят как от уровня этих механических напряжений, так и от условий на границе с объектом  $B$ . Значительное увеличение локальных деформаций выше начальных упругих деформаций приводит к локальному отрыву поверхности объекта  $A$  относительно объекта  $B$ , а превышение касательными напряжениями предельного значения трения способно вызвать локальное «проскальзывание» поверхности объекта  $A$

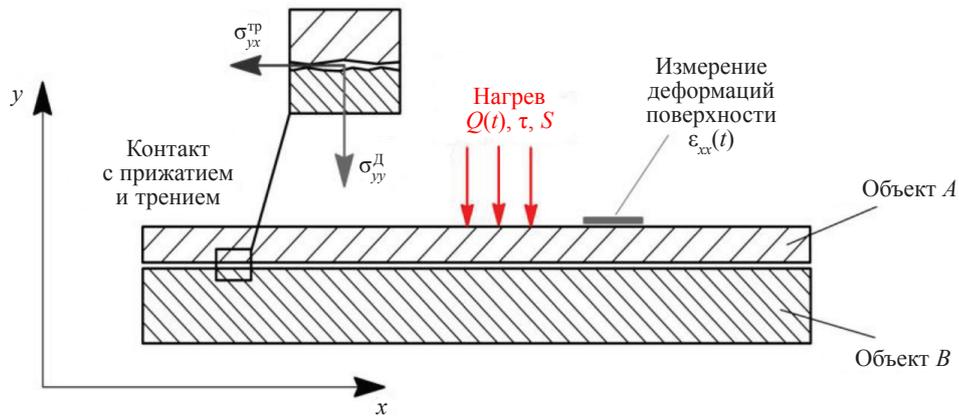


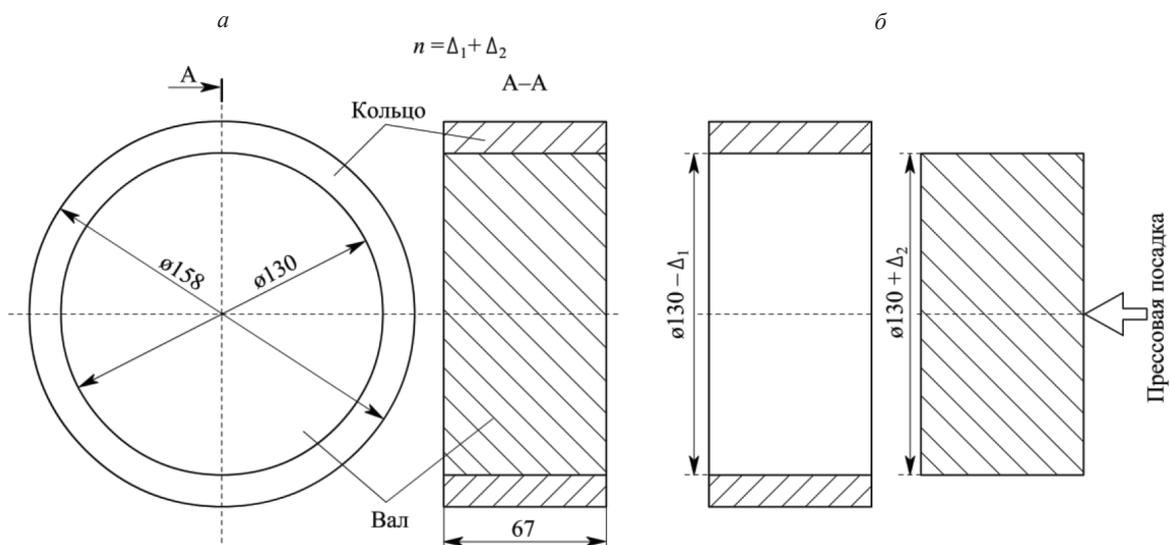
Рис. 1. Постановка задачи.

относительно объекта *B*. Таким образом, решение обратной задачи о деформировании элементов соединения в процессе локального импульсного нагрева при выполнении условия (2) позволит оценить надежность соединения по интегральному показателю: уровню максимальных напряжений трения.

### Методика эксперимента и оборудование

Предметом исследования являлись механические деформации (напряжения), формируемые в зоне сопряжения поверхностей тел вращения. Объект исследования — специально изготовленная контрольная группа колец, которые напрессовывались на валы с заранее определенной разностью диаметров валов и колец (рис. 2). Перед прессованием измеряли отклонения диаметров от их номинального значения 130,000 мм с погрешностью не более 5 мкм. Натяг определяли как сумму абсолютных значений положительного отклонения диаметра вала и отрицательного отклонения внутреннего диаметра кольца (см. рис. 2):

$$n = \Delta_1 + \Delta_2. \quad (2)$$

Рис. 2. Эскиз образцов соединений кольца с осью с натягом  $n$  после (а) и до (б) прессовой посадки.

Объекты испытаний

Номер образца	Качественная характеристика	Натяг, мкм	Максимальное усилие запрессовки, кН
1	Образец с «большим» натягом	118	10,4
2	Образец с «большим» натягом	105	10,5
3	Образец со «средним» натягом	67	7,1
4	Образец со «средним» натягом	65	3,7
5	Образец с «малым» натягом	38	6,3
6	Образец без натяга	–	–
7	Свободное кольцо	–	–

В процессе прессовой посадки контролировали максимальную силу запрессовки кольца на вал. Результаты измерения натяга и силы запрессовки образцов приведены в табл. 1. Корреляция максимального усилия запрессовки с натягом составила более 98 %, коэффициент пропорциональности, определенный методом наименьших квадратов, составил 0,071 кН/мкм. В контрольную группу входили также образец без натяга с зазором (20—40) мкм и свободное кольцо.

Испытываемые образцы устанавливали на свободное кольцо, выполняющее роль подставки, таким образом, чтобы обеспечить их устойчивое положение с четырьмя точками опоры (рис. 3). В верхней части кольца размещали фиксаторы, необходимые для постоянства положения нагревательного элемента на цилиндрической поверхности кольца. Тепловое воздействие осуществляли двумя типами нагревателей: стальным бруском 95×9×9 мм массой 0,057 кг и латунным цилиндром Ø55×80 мм массой 1,2 кг. На латунном цилиндре часть поверхности шлифовали таким образом, чтобы контакт с кольцом подшипника был аналогичен контакту стального бруска. Брусек и цилиндр предварительно нагревали до температуры (200±2) °С. Запас тепловой энергии стального бруска составил 4,2 кДж, латунного цилиндра — 81 кДж.

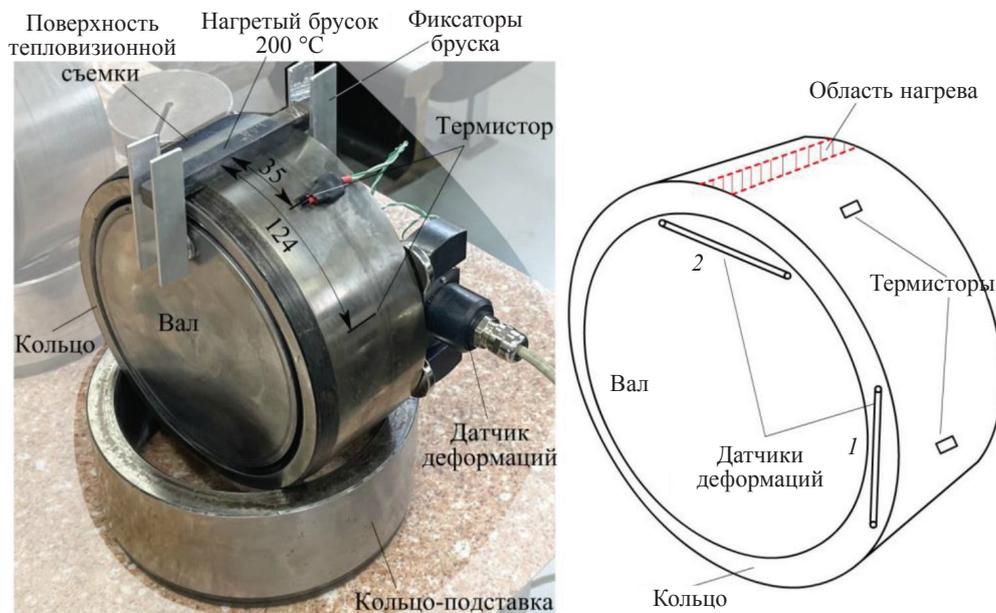


Рис. 3. Схема испытаний: образец прессового соединения с датчиком деформаций, термистором и нагревающим бруском (а); места измерения температуры и деформаций (б).

Для измерения температуры контактным способом на цилиндрической поверхности кольца на расстоянии 35 и 124 мм (1/4 окружности) закрепляли цифровой термистор с частотой дискретизации 1 Гц и ценой наименьшего разряда  $0,06\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Часть цилиндрической поверхности кольца предварительно окрашивали черной матовой краской (рис. 3а). В процессе испытаний тепловизионной камерой регистрировали распределение температуры через каждые 20 с. Инфракрасный тепловизор Testo 875-1i обеспечивал бесконтактное измерение температуры с погрешностью  $\pm 2$  до  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $\pm 2\%$  свыше  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  с температурной чувствительностью  $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Деформации поверхности кольца измерялись оптико-поляризационным датчиком деформаций [31] с частотой дискретизации 50 Гц (см. рис. 3). Уникальность используемого датчика [32] заключалась в высокой чувствительности, нереализуемой традиционными средствами тензометрии. Цена наименьшего разряда аналогоцифрового преобразователя составляла  $0,013\text{ мкм}$ . Датчик с базой 60 мм обеспечивал измерения деформаций с погрешностью не более  $4 \times 10^{-7}$  относительных единиц деформаций.

В работе использовали две измерительные схемы. В первой схеме датчик крепили с помощью неодимовых магнитов на торец кольца подшипника на расстоянии 1/4 окружности кольца от области нагрева (см. поз. 1 рис. 3), во второй схеме — на вал непосредственно под областью нагрева (см. поз. 2 рис. 3).

Моделирование тепловых и механических процессов в кольцах и прессовых соединениях было выполнено методом конечных элементов с разбиением на восемь тысяч тетрагональных элементов с размерами от 0,5 до 7 мм. Натяг изменяли в диапазоне от 5 до 110 мкм, а коэффициент трения пары кольцо—вал — от 0,01 до 0,15. Механические и тепловые свойства материала кольца и вала приняты одинаковыми и приведены в табл. 2.

Таблица 2

Физические свойства материала кольца и вала

Плотность, $\text{кг} / \text{м}^3$	Модуль упругости, $E, \text{ГПа}$	Коэффициент Пуассона, $\nu$	Коэффициент теплопроводности, $\text{Вт} / (\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$	Удельная теплоемкость, $\text{Дж} / (\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$	Коэффициент линейного расширения, $1/^{\circ}\text{C}$
7826	215	0,3	49	480	$12 \cdot 10^{-6}$

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Тепловая энергия передается от нагревателя цилиндрической поверхности кольца за счет теплопередачи. Температура, измеренная на поверхности кольца подшипника на расстоянии 35 мм от нагревателя, в первые 200 с монотонно возрастает (рис. 4а). Тепловая энергия в кольце подшипника также распространяется за счет теплопроводности. Максимальное изменение температуры в

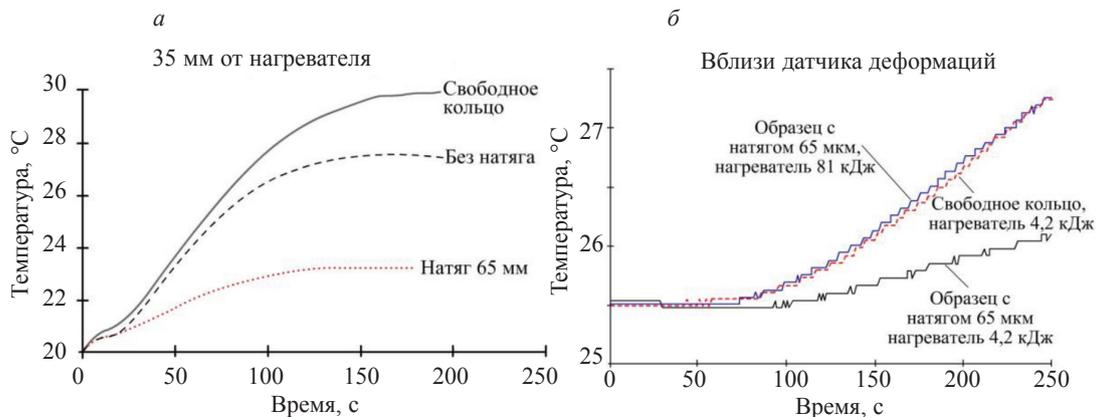


Рис. 4. Зависимость температуры от времени при испытаниях на расстоянии от нагретого бруска 35 мм (а) и 124 мм (б) рядом с датчиком деформаций.

кольцах, напрессованных на вал с натягом, в три раза меньше изменения температуры в свободном кольце. Отсутствие натяга также оказывает влияние на условие теплопередачи соединения кольцо—вал. В образце с зазором изменение температуры на поверхности кольца в 2,5 раза превышает изменение на образцах с натягом (рис. 4а). Вблизи датчика деформаций изменение температуры по уровню  $0,06\text{ }^{\circ}\text{C}$  наблюдается с задержкой около 60 с (рис. 4б), при этом приращение температуры за первые 200 с не превышает  $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Повышение энергоемкости нагревателя почти в 20 раз и теплопроводности в 2 раза увеличивает продолжительность нагрева и абсолютную величину потока тепловой энергии. По-видимому, это связано с большими максимальными значениями градиентов температур (см. рис. 4б), которые, в свою очередь, определяют приращение механических деформаций и напряжений материала объекта контроля.

Анализ термограмм поверхности кольца (рис. 5) показывает уменьшение температуры нагревателя с 200 до  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  за первые 100 с. Градиент температуры прямо пропорционален тепловому потоку, который в первые 25—30 с на расстояниях больше 50 мм от нагревателя не превышает цены наименьшего разряда тепловизора  $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Пространственное распределение температуры в начальный момент имеет прямоугольную форму и «расплывается» с течением времени со скоростью не более  $1,5\text{ мм/с}$ .

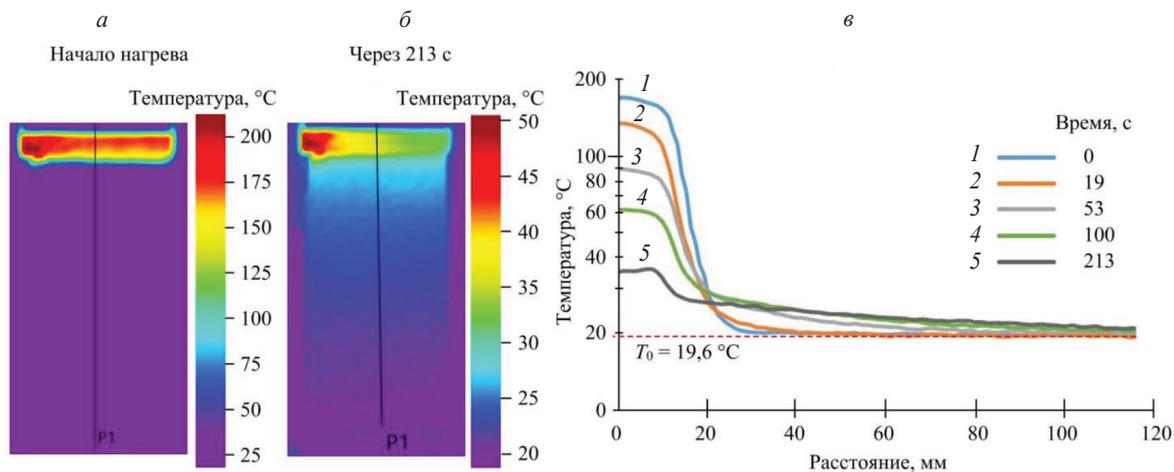


Рис. 5. Термограммы поверхности кольца через 20 с (а) и через 80 с (б) после начала нагрева и температурные профили в полулогарифмическом масштабе (в).

Необходимым условием реализации тензометрии при тепловом нагружении объекта является разделение во времени зоны нагрева и зоны измерения деформаций объекта. Это позволяет в процессе нагрева локальной области реализовать механическое нагружение, а упругие деформации зарегистрировать в ненагретой области. Данное условие выполняется на начальном этапе до 100 с от начала нагрева.

Временные зависимости деформаций свободного кольца подшипника и образца без натяга, измеренные датчиком поз. 1 на рис. 3б, при тепловом воздействии содержат два экстремума: один локальный максимум и один локальный минимум (рис. 6а). Здесь и далее положительные деформации соответствуют растяжению материала кольца, отрицательные — сжатию. На кольцах с прессовой посадкой с натягом больше  $38\text{ мкм}$  первый положительный максимум деформаций отсутствует. Установленный эффект может быть использован для обнаружения прессовых соединений с неплотным прилеганием кольца к валу, наличием зазора между частью поверхности кольца и вала.

Результаты конечно-элементного моделирования (рис. 7) качественно подтверждают экспериментальные данные (см. рис. 6). При локальном тепловом воздействии на поверхность кольца (рис. 7в, г) однозначно идентифицируются три этапа деформирования. На первом начальном этапе наблюдается неравномерное распределение температуры кольца по толщине (рис. 7б). При этом тепловое воздействие создает эквивалентный момент силы  $M$ . Кольцо приобретает эллипсность, при которой в одном сечении размер уменьшается, а в другом — увеличивается. Это вызывает

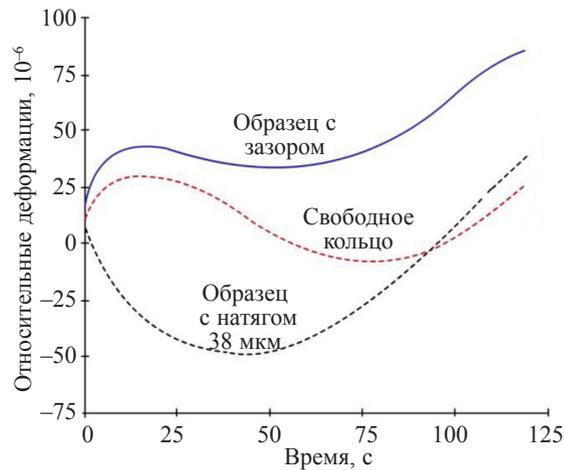


Рис. 6. Временные зависимости деформаций кольца подшипника, измеренные датчиком поз. 2 рис. 3б, при испытаниях свободного кольца, образца без натяга и образца с натягами.

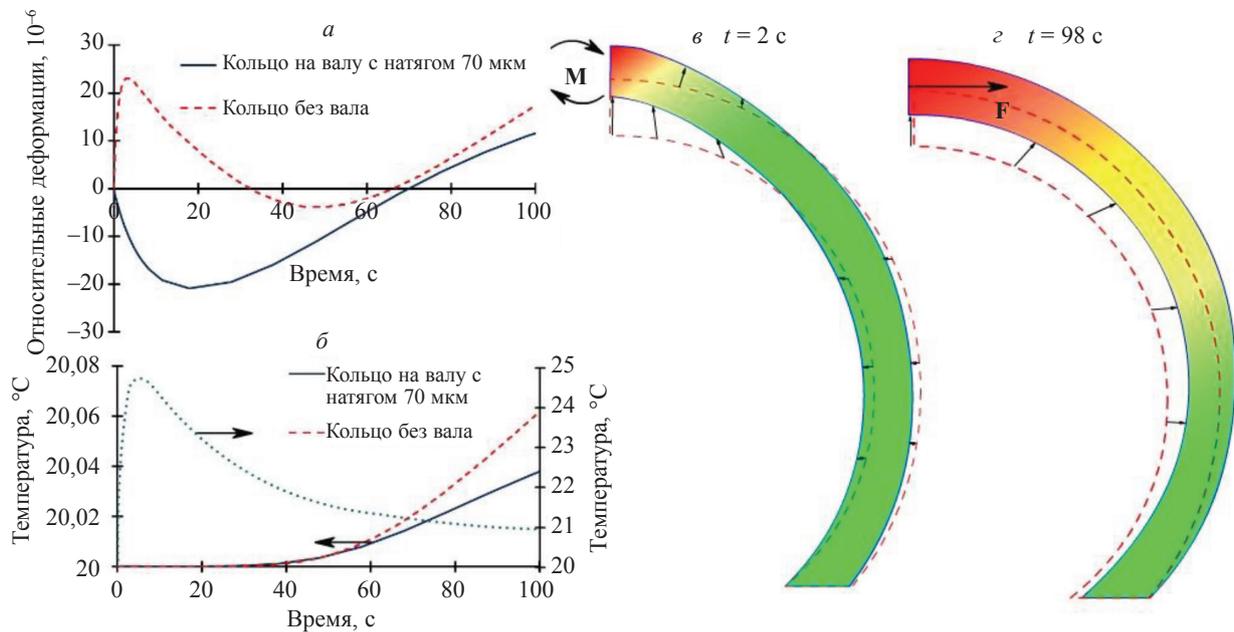


Рис. 7. Результаты моделирования методом конечных элементов свободного кольца подшипника и прессового соединения с натягом: зависимости деформаций (а) и температуры (б) от времени, форма свободного кольца и температурное поле через 2 с (в) и 98 с (г) после начала нагрева.

повышение показаний датчика деформаций на свободных кольцах и образцах с зазором. На образцах с натягом этот этап отсутствует, так как вал ограничивает уменьшение диаметра кольца.

На втором этапе (см. рис. 7г) температура кольца по толщине распределена достаточно равномерно и основной градиент температур направлен по окружности кольца, что эквивалентно нагружению горизонтальной силой  $F$  (см. рис. 7г). При этом датчик регистрирует уменьшение деформаций. На последнем третьем этапе линейные размеры кольца увеличиваются в результате теплового расширения. Рассчитанные временные зависимости относительных деформаций (рис. 7а) и температуры (см. рис. 7б) соответствуют экспериментальным результатам (см. рис. 6).

Связь параметров сигналов деформаций (рис. 8) с натягами образцов исследовали экспериментально по схеме, в которой датчик деформаций устанавливали на вал непосредственно под нагреваемым участком кольца (см. поз. 2 рис. 3). Полученные зависимости интерпретировали в рамках

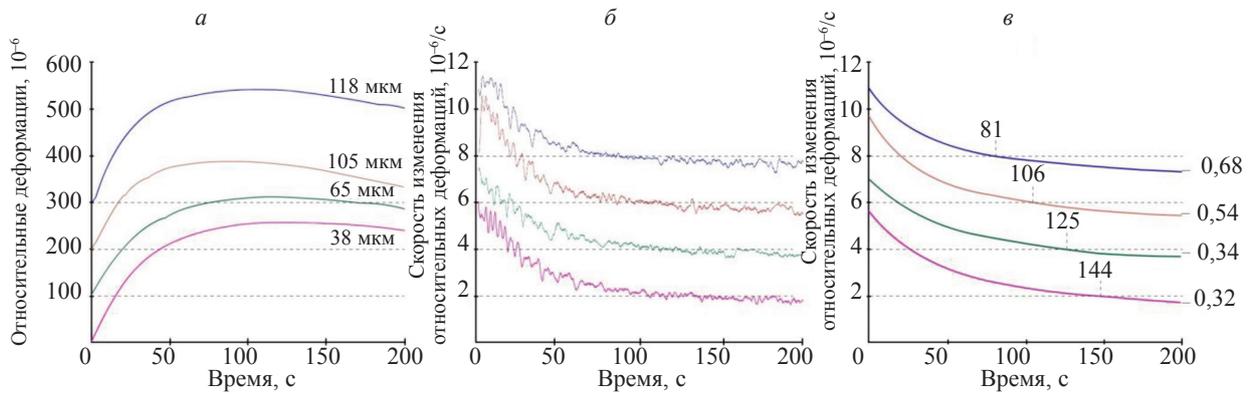


Рис. 8. Временные зависимости деформаций (а) валов прессовых соединений с различными натягами, измеренные датчиком поз. 2 рис. 3б, и скорости изменения деформаций, усредненные на интервале 2 с (б) и 50 с (в).

плоской модели. Анализируются только деформации и напряжения в плоскости боковой поверхности кольца и вала. Особенность рассматриваемой задачи термоупругих деформаций связана с импульсным воздействием теплового источника и неосесимметричным распределением температуры. Квазистатическое решение предполагает, что скорость распространения деформаций, вызванных действиями внешних сил, значительно выше скорости деформаций в точке измерения, вызванных изменением температуры в этой точке.

При тепловом воздействии на элемент кольца локальные изменения температуры  $\Delta T$  создают деформации во всем образце, которые эквивалентны действиям в нагретом элементе материала объемных сил: радиальных и касательных. Деформации вала во времени развиваются немонотонно (см. рис. 8). На начальном этапе нагрева регистрируется растяжение вала, затем на интервале от 80 до 145 с наблюдается локальный максимум и снижение уровня деформаций на 5—10 % (рис. 8а). Уменьшение деформаций связано со уменьшением градиента температуры из-за остывания нагревателя.

Для оценки временных параметров сигналов деформаций рассчитана их скорость изменения в скользящем окне длительностью 2 с (рис. 8б) и 50 с (рис. 8в). Временная зависимость скорости деформаций (рис. 8б) содержит нестационарные пульсации, которые наблюдаются только в области высоких значений скорости изменения деформаций. На интервале от 80 до 145 с, где скорость близка к нулю и, следовательно, изменения напряжений в материале кольца не происходит, амплитуда пульсации не превышает 10 % их максимального значения. Пульсации скорости отражают дискретный характер локального «проскальзывания» кольца и вала, когда напряжение на границе превышает силы трения.

Время достижения максимума деформаций определяли по изменению знака скорости (см. рис. 8в), рассчитанной в скользящем окне длительности 50 с, что позволило сгладить пульсации. Эти времена коррелируют с натягами прессовых соединений с коэффициентом корреляции 0,97 и коэффициентом пропорциональности — 0,71 мкм/с. В образцах с высокими значениями натяга реализуются большие значения нормальных напряжений и напряжений трения на границе соединения. В этих условиях для деформирования вала в таких прессовых соединениях требуются более высокие градиенты температуры. Поэтому процессы деформирования вала останавливаются при снижении градиента температуры, связанном с исчерпанием запаса тепловой энергии нагревателя.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Экспериментальные исследования динамики развития механических напряжений в упругой среде методами тензометрии при локальном импульсном тепловом воздействии доказывают возможность решать задачи контроля остаточных внутренних напряжений сопряженных поверхностей тел вращения. Экспериментально установлено, что зазор в прессовом соединении оказывает значительное влияние на распределение деформаций в кольце подшипника и их временные зависимости. В прессовых соединениях с плотной посадкой на начальном этапе материал вне зоны

нагрева сжимается, локальные деформации отрицательные, а в соединениях с зазором — растягивается, деформации положительные. Обоснована корреляция времени достижения максимума деформаций вала с натягом прессового соединения с коэффициентом корреляции, равным 0,97.

Достоверность контроля прессовых соединений напрямую зависит от возможности разделения локальных температурных деформаций в месте установки датчика и деформаций объекта, связанных с градиентом температур в области нагрева. Экспериментально-расчетным способом показана возможность пространственного разделения зон теплового воздействия и измерения деформаций за счет достаточно медленной скорости распространения теплового потока.

Необходимым условием организации контроля прессовых соединений является создание в объекте необходимого градиента температуры и соответствующего ему уровня нормальных и касательных деформаций на границе соединения. Связь регистрируемых деформаций с натягом может быть установлена только при условии, что напряжения превышают начальные нормальные напряжения на границе соединения и напряжения трения, вызванные прессовой посадкой.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на численное решение обратной задачи о деформировании прессового соединения для оптимизации способа нагрева и выбора оптимальной области измерения деформаций, исследования дискретных процессов, возникающих при трении сопряженных поверхностей.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-10110, <https://rscf.ru/project/23-29-10110/> и финансовой поддержки Правительства Новосибирской области.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Carpenter Chris*. Fatigue Testing of Shrink-Fit Couplings for Joining High-Strength-Steel Riser Pipe // *Journal of Petroleum Technology*. 2015. V. 65. P. 108—111.
2. *Безъязычный В.Ф., Федулов В.М.* Методика технологического обеспечения эксплуатационных показателей при сборке соединений с натягом // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 2020. № 6. С. 270—276.
3. *Hehe Kang, Zhi-Min Li, Tao Liu, Guang Zhao, Jianping Jing, Wei Yuan*. A novel multiscale model for contact behavior analysis of rough surfaces with the statistical approach // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2021. V. 212.
4. *Kogu Lior, Etsion Izhak*. A Finite Element Based Elastic-Plastic Model for the Contact of Rough Surfaces // *Tribology Transactions*. 2003. V. 46. No. 3. P. 383—390.
5. *Кулиев С.А., Мамедов А.Ф.* Определение напряжений в ступице соединения с натягом при нагружении // *Вестник машиностроения*. 2019. № 7. С. 27—30.
6. *Рожкова Е.А., Четвериков С.В.* Методика проведения экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния профильных соединений с натягом // *Вестник Российского университета дружбы народов*. Серия: Инженерные исследования. 2018. Т. 19. № 1. С. 46—58.
7. *Мамедов, А. Ф.* Расчет соединения с натягом на ударную нагрузку // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2019. № 4. С. 85—87.
8. *Матлин М.М., Казанкин В.А., Казанкина Е.Н.* Методы повышения эффективности контроля затяжки резьбовых соединений // *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. 2020. № 7. С. 40—42.
9. *Boutoutaou H., Bouaziz M., Fontaine J.F.* Modeling of interference fits taking form defects of the surfaces in contact into account // *Materials & Design*. 2011. V. 32. No. 7. P. 3692—3701.
10. *Wang X., Lou Z., Wang X., Wang Y., Hao X., Wang Z.* Automatic press-fit assembly of small precision interference fitting parts: armature of electro-hydraulic servo valve // *Assembly Automation*. 2019. V. 39. No. 5. P. 986—998.
11. *Kupriyanov O., Trishch R., Dichev D., Hrinchenko H.* Experimental Studies on the Form Error Effect of the Part Mounting Surface on the Strength Quality Parameter of the Interference Fit Joints // *Advanced Manufacturing Processes V*. 2023. V. 10.
12. *Bedlaoui Allal, Boutoutaou Hamid*. Effect of interference and form defect on the cohesion of the shrink-fit assembly // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023. V. 128.
13. *Букеткин Б.В., Семенов-Ежов И.Е., Шуршов А.А.* Релаксация напряжений в болтовых соединениях с радиальным натягом // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2019. № 10 (94). С. 1.
14. *Arslan M.A.* Coupled thermal/structural contact analyses of shrink-fit tool holder // *Journal of Engineering Manufacture*. 2014. V. 228 (5). P. 715—724.
15. *Wang X., Lou Z., Wang X., Hao X., Wang Y.* Prediction of stress distribution in press-fit process of interference fit with a new theoretical model // *Journal of Mechanical Engineering Science*. 2019. V. 233 (8). P. 2834—2846.
16. *Saeedi R., Sadeghi M.* Investigation of insert-hole interference fit influence on downhole drilling bit failure // *Journal of Engineering Manufacture*. 2020. V. 234 (14). P. 1752—1761.

17. *Santus C.* Initial orientation of the fretting fatigue cracks in shrink-fit connection specimens // *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2019. V. 13(48). P. 442—450.
18. *Saeed Muhammad, Falter Jan, Dausch Valesko, Wagner Markus, Kreimeyer Matthias, Eisenbart Boris.* Artificial intelligence techniques for improving cylindrical shrink-fit shaft-hub couplings // *Proceedings of the Design Society*. 2023. V. 3. P. 645—656.
19. *Zhou D., Lan S., Gao X.* et al. Nondestructive Surface Threshold Definition for Remanufacturing Disassembly of Interference Fit // *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 2018. V. 19. P. 1735—1743.
20. *Bo You, Zhifeng Lou, Yi Luo, Yang Xu, Xiaodong Wang.* Prediction of Pressing Quality for Press-Fit Assembly Based on Press-Fit Curve and Maximum Press-Mounting Force // *International Journal of Aerospace Engineering*. 2015. V. 2015. P. 10.
21. *Матлин М.М., Казанкина Е.Н., Казанкин В.А., Мозгунова А.И.* Устройство для определения давления в соединении с натягом // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2018. № 9 (219). С. 80—83.
22. *Yang Liu, Mingxuan Li, Xiaofeng Lu, Qingsheng Li, Xiaolei Zhu.* Pull-out performance and optimization of a novel Interference-fit rivet for composite joints // *Composite Structures*. 2021. V. 269.
23. *Wang Xingyuan, Liu Jiaying, Lu Shujie, Wang Yue, Wang Xiaodong, Lou Zhifeng, Zhang Lixun.* Connection force measurement of precision small interference components using ultrasound // *Journal of Mechanical Engineering Science*. 2023.
24. *Муравьева О.В., Волкова Л.В., Муравьев В.В.* Чувствительность электромагнитно-акустического метода многократной тени с использованием рэлеевских волн при контроле труб нефтяного сортамента // *Дефектоскопия*. 2020. № 12. С. 48—57.
25. *Муравьев В.В., Волкова Л.В., Платунов А.В., Булдакова И.В., Гуцина Л.В.* Исследования структурного и напряженно-деформированного состояния рельсов текущего производства методом акустопругости // *Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова*. 2018. Т. 21. № 2. С. 13—23.
26. *Бехер С.А., Степанова Л.Н., Рыжова А.О., Бобров А.Л.* Контроль натяга колец подшипников поверхностными волнами с использованием эффекта акустопругости // *Дефектоскопия*. 2021. № 4. С. 13—21.
27. *Буйносов А.П., Ветлугина О.И., Гузенкова Е.А.* Разработка ультразвукового способа контроля натяга бандажа на ободу колесного центра при насаженных бандажах // *Наука и образование транспорта*. 2022. № 1. С. 13—15.
28. *Булдакова И.В., Волкова Л.В., Муравьев В.В.* Распределение напряжений в образцах труб магистральных газопроводов со сварным соединением // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2020. Т. 18. № 1. С. 4—8.
29. *Król Roman, Siemiątkowski Zbigniew.* The analysis of shrink-fit connection – the methods of heating and the factors influencing the distribution of residual stresses // *Heliyon*. 2019. V. 5. No. 11.
30. *Wu X., Li C., Sun S., Tong R., Li Q.* A Study on the Heating Method and Implementation of a Shrink-Fit Tool Holder // *Energies*. 2019. No. 12.
31. *Федоринин В.Н., Сидоров В.И.* Поляризационные оптические датчики для измерения физических величин // *Журнал аналитической химии*. 2005. Т. 55. № 7.
32. *Федоринин В.Н., Бехер С.А., Выплавень В.С.* Оптическая тензометрия в задаче взаимодействия колесо-рельс // *Автометрия*. 2023. Т. 59. № 3. С. 33—42.

#### REFERENCE

1. *Carpenter Chris.* Fatigue Testing of Shrink-Fit Couplings for Joining High-Strength-Steel Riser Pipe // *Journal of Petroleum Technology*. 2015. V. 65. P. 108—111.
2. *Bezyazychnyj V.F., Fedulov V.M.* The methodology of technological support of operational indicators in the assembly of joints with tension // *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii*. 2020. № 6. P. 270—276.
3. *Hehe Kang, Zhi-Min Li, Tao Liu, Guang Zhao, Jianping Jing, Wei Yuan.* A novel multiscale model for contact behavior analysis of rough surfaces with the statistical approach // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2021. V. 212.
4. *Lior Kogu, Izhak Etsion.* A Finite Element Based Elastic-Plastic Model for the Contact of Rough Surfaces // *Tribology Transactions*. 2003. V. 46. No. 3. P. 383—39.
5. *Kuliev S.A., Mamedov A.F.* Determination of stresses in the connection hub with tension during loading // *Vestnik mashinostroeniya*. 2019. No. 7. P. 27—30.
6. *Rozhkova E.A., Chetverikov S.V.* The method of conducting experimental studies of the stress-strain state of profile joints with tension // *Vestnik Rossijskogo universiteta družby` narodov. Seriya: Inzhenerny`e issledovaniya*. 2018. V. 19. No. 1. P. 46—58.
7. *Mamedov A.F.* Calculation of the connection with tension to the shock load // *Problemy` mashinostroeniya i avtomatizacii*. 2019. No. 4. P. 85—87.
8. *Matlin M.M., Kazankin V.A., Kazankina E.N.* Methods for improving the effectiveness of tightening control of threaded connections // *Ximicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie*. 2020. № 7. P. 40—42.

9. *Boutoutaou H., Bouaziz M., Fontaine J.F.* Modeling of interference fits taking form defects of the surfaces in contact into account // *Materials & Design*. 2011. V. 32. No. 7. P. 3692—3701.
10. *Wang X., Lou Z., Wang X., Wang Y., Hao X., Wang Z.* Automatic press-fit assembly of small precision interference fitting parts: armature of electro-hydraulic servo valve // *Assembly Automation*. 2019. V. 39. No. 5. P. 986—998.
11. *Kupriyanov O., Trishch, R., Dichev D., Hrinchenko H.* Experimental Studies on the Form Error Effect of the Part Mounting Surface on the Strength Quality Parameter of the Interference Fit Joints // *Advanced Manufacturing Processes V*. 2023. V. 10.
12. *Bedlaoui Allal, Boutoutaou Hamid.* Effect of interference and form defect on the cohesion of the shrink-fit assembly // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023. V. 128.
13. *Buketkin B.V., Semenov-Ezhov I.E., Shirshov A.A.* Stress relaxation in bolted joints with radial tension // *Inzhenerny'j zhurnal: nauka i innovacii*. 2019. № 10 (94). P. 1.
14. *Arslan M.A.* Coupled thermal/structural contact analyses of shrink-fit tool holder // *Journal of Engineering Manufacture*. 2014. V. 228 (5). P. 715—724.
15. *Wang X., Lou Z., Wang X., Hao X., Wang Y.* Prediction of stress distribution in press-fit process of interference fit with a new theoretical model // *Journal of Mechanical Engineering Science*. 2019. V. 233(8). P. 2834—2846.
16. *Saeedi R., Sadeghi M.* Investigation of insert-hole interference fit influence on downhole drilling bit failure // *Journal of Engineering Manufacture*. 2020. V. 234 (14). P. 1752—1761.
17. *Santus C.* Initial orientation of the fretting fatigue cracks in shrink-fit connection specimens // *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2019. V. 13 (48). P. 442—450.
18. *Saeed Muhammad, Falter Jan, Dausch Valesko, Wagner Markus, Kreimeyer Matthias, Eisenbart Boris.* Artificial intelligence techniques for improving cylindrical shrink-fit shaft-hub couplings // *Proceedings of the Design Society*. 2023. V. 3. P. 645—656.
19. *Zhou D., Lan S., Gao X. et al.* Nondestructive Surface Threshold Definition for Remanufacturing Disassembly of Interference Fit // *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 2018. V. 19. P. 1735—1743.
20. *Bo You, Zhifeng Lou, Yi Luo, Yang Xu, Xiaodong Wang.* Prediction of Pressing Quality for Press-Fit Assembly Based on Press-Fit Curve and Maximum Press-Mounting Force // *International Journal of Aerospace Engineering*. 2015. V. 2015. P. 10.
21. *Matlin M.M., Kazankina E.N., Kazankin V.A., Mozgunova A.I.* Device for determining pressure in connection with tension // *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta*. 2018. No. 9 (219). P. 80—83.
22. *Yang Liu, Mingxuan Li, Xiaofeng Lu, Qingsheng Li, Xiaolei Zhu.* Pull-out performance and optimization of a novel Interference-fit rivet for composite joints // *Composite Structures*. 2021. V. 269.
23. *Wang Xingyuan, Liu Jiaying, Lu Shujie, Wang Yue, Wang Xiaodong, Lou Zhifeng, Zhang Lixun.* Connection force measurement of precision small interference components using ultrasound // *Journal of Mechanical Engineering Science*. 2023.
24. *Muraveva O.V., Volkova L.V., Muravev V.V.* Sensitivity of the electromagnetic-acoustic multiple shadow method using Rayleigh waves in the control of oil grade pipes // *Defektoskopiya*. 2020. No. 12. P. 48—57.
25. *Muravev V.V., Volkova L.V., Platunov A.V., Buldakova I.V., Gushhina L.V.* Studies of the structural and stress-strain state of rails of current production by the method of acoustoelasticity // *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*. 2018. V. 21. No. 2. P. 13—23.
26. *Bekher S.A., Stepanova L.N., Ry`zhova A.O., Bobrov A.L.* Control of bearing ring tension by surface waves using the acoustoelasticity effect // *Defektoskopiya*. 2021. No. 4. P. 13—21.
27. *Buinosov A.P., Vetlugina O.I., Guzenkova E.A.* Development of an ultrasonic method for monitoring the tension of the bandage on the rim of the wheel center with the bandages attached // *Nauka i obrazovanie transportu*. 2022. No. 1. P. 13—15.
28. *Buldakova I.V., Volkova L.V., Muravev V.V.* Stress distribution in pipe samples of main gas pipelines with welded connection // *Intellektualnye sistemy v proizvodstve*. 2020. V. 18. № 1. P. 4—8.
29. *Król Roman, Siemiątkowski Zbigniew.* The analysis of shrink-fit connection – the methods of heating and the factors influencing the distribution of residual stresses // *Heliyon*. 2019. V. 5, No. 11.
30. *Wu X., Li C., Sun S., Tong R., Li Q.* A Study on the Heating Method and Implementation of a Shrink-Fit Tool Holder // *Energies*. 2019. No. 12.
31. *Fedorinin V.N., Sidorov V.I.* Polarizing optical sensors for measuring physical quantities // *Zhurnal analiticheskoi khimii*. 2005. V. 55. No. 7.
32. *Fedorinin V.N., Bekher S.A., Vyplaven V.S.* Optical strain gauge in the problem of wheel-rail interaction // *Avtometriia*. 2023. V. 59. No. 3. P. 33—42.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В ПЕРЬЯХ ПОДОШВЫ РЕЛЬСОВ МАГНИТНЫМ МЕТОДОМ

© 2024 г. А.А. Марков<sup>1</sup>, В.В. Мосягин<sup>1</sup>, А.Г. Антипов<sup>2</sup>, Г.А. Иванов<sup>3,\*</sup>

<sup>1</sup>АО «Радиоавионика», Россия 190005 Санкт-Петербург, Троицкий просп., 4б

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Россия 199034 Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский горный университет, Россия 199106 Санкт-Петербург, линия 21-я В.О., 2  
E-mail: \*george97ivanov@yandex.ru

Поступила в редакцию 16.08.2023; после доработки 11.12.2023

Принята к публикации 12.12.2023

Исследована возможность обнаружения дефектов в виде поперечных трещин в перьях подошвы при сплошном (непрерывном) контроле рельсов при их эксплуатации. В качестве альтернативы ультразвуковому выбран магнитный метод контроля. Выполнено компьютерное моделирование, по результатам которого разработан и изготовлен действующий макет системы намагничивания и регистрации сигналов контроля. В лабораторных условиях проведены экспериментальные исследования обнаружения моделей трещин в перьях подошвы рельсов. Исследования подтвердили результаты компьютерного моделирования и доказали возможность обнаружения таких моделей трещин. Оценены минимальные размеры обнаруживаемых моделей трещин в подошве рельсов в зоне рельсовых скреплений и между ними.

*Ключевые слова:* поперечная трещина, рельсовая дефектоскопия, магнитный метод, метод рассеяния магнитного потока, подошва рельса.

## INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY DETECTION OF DEFECTS IN RAIL FOOT BY MFL METHOD

A.A. Markov<sup>1</sup>, V.V. Mosyagin<sup>1</sup>, A.G. Antipov<sup>2</sup>, G.A. Ivanov<sup>3,\*</sup>

<sup>1</sup>JSC «Radioavionica», Russia 190005 St.Petersburg, Troitskiy Avenue, 4b

<sup>2</sup>St.Petersburg State University, Russia 199034 St.Petersburg, University embankment, 7/9

<sup>3</sup>St. Petersburg Mining University, Russia 199106 St Petersburg, 2, 21st Line  
E-mail: \*george97ivanov@yandex.ru

The article investigates the possibility of detecting defects in the form of transverse cracks in the rail foot at continuous inspection of rails during their operation. Magnetic method is chosen as an alternative to ultrasonic inspection. Computer modeling was carried out, based on the results of which a working model of the magnetization system and registration of control signals was developed and manufactured. Experimental studies of detection of crack models in the rail foot were carried out in laboratory conditions. The studies confirmed the results of computer modeling and proved the possibility of detecting such crack models. The minimum sizes of detectable crack models in rail foot in the zone of rail fasteners and between them have been estimated.

*Keywords:* transverse crack, rail flaw detection, magnetic method, magnetic flux leakage method, rail foot.

DOI: 10.31857/S0130308224010064

## ВВЕДЕНИЕ

В последние годы изломы рельсов на эксплуатируемых железнодорожных линиях ОАО «РЖД» чаще всего происходят из-за дефектов в подошве рельса (рис. 1). На железнодорожной сети до 30 % официально зафиксированных изломов рельсов произошли из-за развития дефектов в подошве рельса [1]. В основном, это трещины коррозионно-усталостного происхождения [2], имеющие форму сегмента и развивающиеся от нижней поверхности подошвы рельса. Перечисленные выше факты свидетельствуют, что известные способы и устройства не обеспечивают надежное и своевременное обнаружение указанных дефектов. Действительно, с помощью акустического вида неразрушающего контроля ультразвуковыми (у.з.) дефектоскопами, широко используемых на сети ОАО «РЖД», удается выявлять трещины только в центральной части подошвы, в проекции шейки рельса. Минимальная высота сегмента трещины, подлежащей при сплошном контроле выявлению в проекции шейки, по нормативам составляет 6 мм.

Известные технические решения обнаружения дефектов в подошве эксплуатируемых рельсов в основном ориентированы на использование у.з. методов контроля. Эти решения можно разделить



Рис. 1. Пример излома рельса из-за поперечной трещины, развивающейся в пере подошвы.

на три группы по расположению пьезопреобразователей (ПЭП) на сканируемых поверхностях контролируемого рельса:

со сканированием с поверхности перьев подошвы [3];

со сканированием с поверхности катания [4—8];

комбинированные, с использованием ПЭП, озвучивающих сечения перьев подошвы путем перемещения по поверхности катания (с головки рельса) и по поверхностям перьев подошвы [9, 10].

Решения [3, 4], базирующиеся на использовании контактных у.з. ПЭП, малоприменимы на практике из-за значительной загрязненности и неровности поверхностей перьев подошвы и больших объемов работ по их предварительной очистке<sup>1</sup>. Поэтому эти решения можно отнести к способам, позволяющим осуществлять поиск дефектов на локальных участках рельсов (длиной от 0,2 до 1,5 м).

Способ сканирования с поверхности катания широко используется при сплошном контроле рельсов. Причем направить у.з. колебания с поверхности катания через шейку рельса в перья подошвы удастся как контактными ПЭП [4, 6], так и бесконтактными электромагнитоакустическими (ЭМА) преобразователями [5], и «специальными многослойными» фазированными решетками [7]. Все это требует излучения достаточно мощных зондирующих импульсов и приема искомых сигналов на повышенной чувствительности. Однако эффективно разделить принятые сигналы от потенциальных дефектов на фоне многочисленных отражений от коррозионных повреждений подошвы, возможных вмятин от клемм и подкладок рельсовых креплений практически не удастся.

Колесные у.з. преобразователи [8], адаптированные к поверхностям выкружки шейки и пера подошвы, являются перспективным вариантом сплошного сканирования перьев. Однако эта технология требует создания специальных узких колесных преобразователей с возможностью их размещения в ограниченном пространстве между шейкой рельса и габаритными элементами рельсовых креплений (клеммными болтами). При этом должна быть разработана и специальная механика, позволяющая оперативно снимать устройство с рельса при приближении поезда и при преодолении зон болтовых стыков и стрелочных переводов. Вопросы очистки поверхности от загрязнений и обеспечения стабильного акустического контакта между оболочкой у.з. колеса и поверхностью пера подошвы по-прежнему являются определенной проблемой, характерной для всех у.з. методов с контактным вводом колебаний.

Таким образом, известные технические решения на базе у.з. методов в настоящее время не позволяют осуществлять надежный поиск и обнаружение дефектов в перьях подошвы при сплошном сканировании.

<sup>1</sup>Дополнительно операторы, имеющие опыт применения этих решений на практике, отмечают необходимость большого объема контактирующей жидкости (технического масла) для обеспечения приемлемого качества акустического контакта.

Альтернативным техническим решением задачи обнаружения дефектов в перьях подошвы рельсов может являться применение магнитного неразрушающего контроля. В соответствии с ГОСТ Р 55612—2013, магнитный неразрушающий контроль основан на регистрации магнитных полей рассеяния, возникающих над дефектами намагниченного исследуемого объекта контроля. Данная технология успешно используется для выявления коррозионных повреждений обшивки судов при плановых ремонтах [11], контроле днищ резервуаров для хранения нефтепродуктов [12] и других изделий из ферромагнитных материалов.

При скоростном контроле рельсов совмещенными (магнитный и ультразвуковой методы) вагонами-дефектоскопами [13] используют для регистрации данных рассеяния магнитного потока над поверхностью катания рельса как индукционные датчики, так и датчики Холла. При контроле головки рельсов магнитным методом обеспечивается достаточно надежное обнаружение поперечных трещин [14] глубиной до 20 мм от поверхности катания рельса, а в отдельных случаях — и до 25 мм [15]. Эмпирически установлено, что при магнитном контроле рельсов, уложенных в путь, необходимо намагнитить объект контроля до уровня примерно 1,0—1,2 Тл [16].

Учитывая, что задача разработки системы намагничивания перьев подошвы является весьма сложной и полностью нерешенной в мире, предлагается поэтапный подход. На первом этапе рассматриваются только рельсы типов Р65 или Р75 и контроль подошвы рельсов вне зон болтовых стыков и стрелочных переводов. Такой подход вполне оправдан, так как известно, что указанные типы рельсов на главных путях ОАО «РЖД» составляют более 80 %, а количество болтовых стыков, благодаря планомерному внедрению сварных стыков, неуклонно снижается.

В связи с этим в данной работе (в качестве альтернативы ультразвуковому контролю ручными дефектоскопами) исследуются вопросы возможности применения магнитных методов контроля для обнаружения поперечных трещин в перьях подошвы рельсов при сплошном или выборочном контроле. Как известно, магнитные методы контроля, в отличие от акустических, менее требовательны к состоянию поверхности изделий, температуре контроля, не требуют систем подачи и обогрева контактирующей жидкости.

## РАСЧЕТ СИСТЕМЫ НАМАГНИЧИВАНИЯ

Важным условием реализации магнитного метода является наличие эффективной системы намагничивания объекта контроля.

Ширина подошвы наиболее распространенного в России рельса Р65 составляет 150 мм, а высота пера подошвы — 11,25 мм [17], что незначительно отличается от размеров европейских рельсов типа UIC60 (ширина подошвы 150 мм, высота пера подошвы 11,5 мм [18]). В общем случае, при использовании редкоземельных магнитов (Nd—Fe—В) с индукцией 1,2 Тл [19] или электромагнитов условие намагничивания подошвы рельсов до уровня, при котором происходит вытеснение магнитного потока на несплошностях металла, реализуемо. Естественно, при этом полюса магнитной системы должны быть расположены непосредственно на перьях подошвы рельса — единственно доступных для сканирования поверхностях.

Возможность использования постоянных магнитов для намагничивающей системы следует признать неперспективной ввиду непростой конструкции системы размыкания магнитной цепи и сложности реализации процедуры оперативного съема магнитов с поверхности рельса. Использование электромагнита требует достаточно мощного источника тока (до 20 А), но все же позволяет решить проблемы снятия магнитного поля при съеме системы с рельса.

Одним из способов определить, какие дефекты в подошве рельса могут быть выявлены магнитным методом, а какие — нет, является компьютерное моделирование процесса рассеяния магнитного потока на несплошности в ферромагнетике. Полученные характеристики поля рассеяния позволяют симитировать сигнал твердотельного датчика, используемого на практике [20].

Для предварительной оценки возможности обнаружения поперечных трещин в перьях подошвы рельса магнитным методом проведены исследования посредством трехмерного моделирования процесса рассеяния магнитного потока на моделях трещин в перьях подошвы. Для расчетов использовалось специализированное программное обеспечение, реализующее метод конечных элементов применительно к системе уравнений Максвелла относительно векторов индукции и напряженности магнитного поля. Поскольку скорость перемещения намагничивающей системы и датчиков относительно рельса при контроле предполагалась относительно небольшой (до 200 мм/с), зависимость от времени искомых величин не рассматривалась, т.е. речь шла о чисто магнитостатической задаче. Это существенно сокращает объем необходимых вычислений по сравнению со случаем, когда подобных допущений не делается [21], однако не

позволяет учесть ряд магнитодинамических эффектов, таких как влияние вихревых токов на распределение магнитного поля в объекте контроля и, следовательно, на сигналы датчиков. Последующие экспериментальные исследования показали допустимость таких упрощений, поскольку изменение скоростей в диапазоне до 200 мм/с приводило лишь к малозначимым низкочастотным флуктуациям сигналов, не затрагивающим амплитуду импульсов от дефектов относительно базового уровня магнитного поля.

Связь между векторами напряженности магнитного поля и магнитной индукции в модели зависела от рассматриваемой области пространства. Внутри рельса и внутри магнитопровода отношение модулей указанных векторов полагалось нелинейным, определяемым уровнем поля в каждой отдельно взятой точке. Зависимости относительной магнитной проницаемости от напряженности поля, выражающие нелинейный характер связи между модулями векторов индукции и напряженности, показаны на рис. 2. Для всей остальной области пространства, т.е. для воздуха вокруг рельса и магнитопровода, равно как и внутри несплошности, относительная магнитная проницаемость устанавливалась постоянной и равной единице.

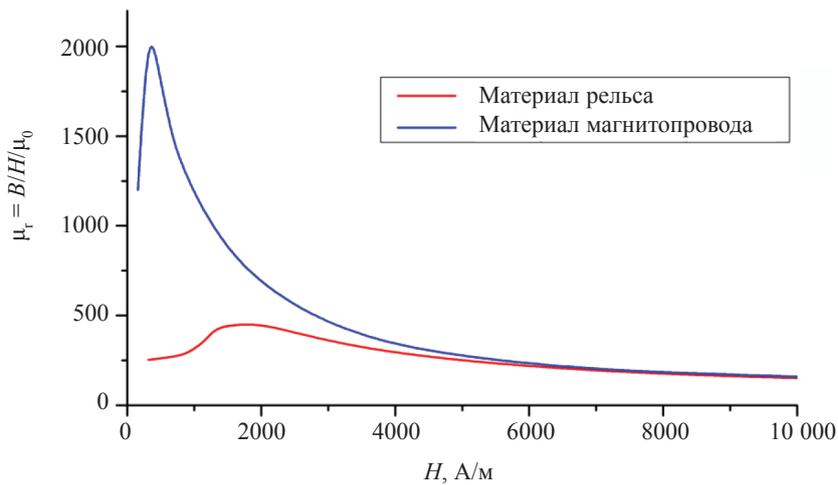


Рис. 2. Относительная магнитная проницаемость материалов магнитопровода и рельса в зависимости от напряженности магнитного поля, используемые при моделировании.

При реализации метода конечных элементов исследуемая область пространства покрывается неравномерной сеткой точек, в каждой из которых неизвестной является значение искомого вектора. В результате конечно-разностной аппроксимации операторов, входящих в решаемое дифференциальное уравнение, в каждом узле сетки между компонентами векторов в рассматриваемой точке и соседних с ней точках возникает линейное алгебраическое уравнение. В итоге задача сводится к решению системы алгебраических уравнений с весьма большим числом неизвестных одним из методов итераций. При решении такой системы алгебраических уравнений после каждой итерации сетка точек модифицируется — в нее добавляются узлы в тех областях пространства, где градиент полученного решения при переходе в соседние точки сильно изменяется. В нашем случае после нескольких итераций количество точек в сетке выросло приблизительно в 5 раз — с величины порядка 105 до полумиллиона.

На рис. 3 показана сетка точек на поверхности рельса, сформировавшаяся к концу итерационного процесса; особенно высокая концентрация узлов сетки наблюдается в месте контакта полюсов намагничивающей системы и подошвы рельса, поскольку именно в этих областях имеется значительное изменение направления векторов магнитной индукции, а их модули достаточно велики.

Намагничивающая система представляет собой П-образный электромагнит с адаптированной формой полюсных наконечников (рис. 4). Магнитодвижущая сила электромагнита взята равной 3500 Ампер-витков.

При этом уровень магнитной индукции в межполюсном пространстве может достигать уровня свыше 1,0 Тл (рис. 5), что вполне достаточно для обнаружения поперечных трещин.

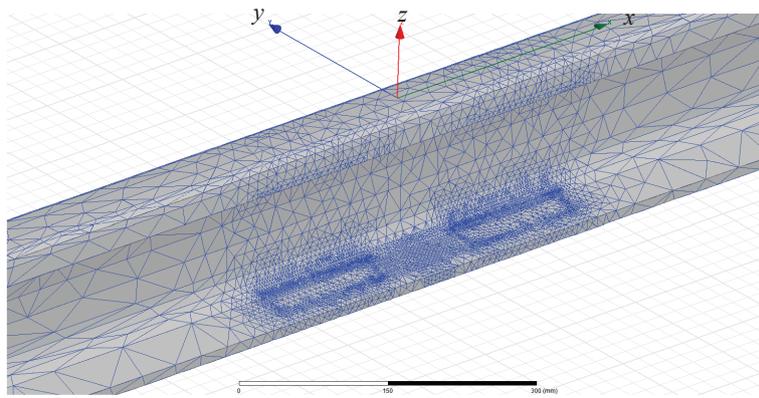


Рис. 3. Сетка точек на поверхности рельса при расчете методом конечных элементов.

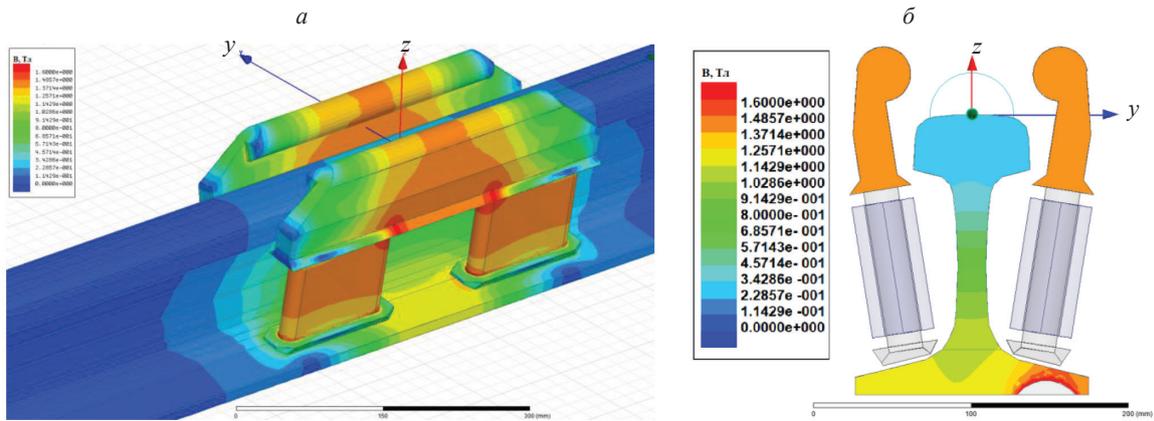


Рис. 4. Распределение магнитной индукции на поверхности рельса и на поверхностях двусторонней намагничивающей системы с сонаправленными магнитами (а); в поперечном сечении рельса и магнитопровода посередине между полюсами при наличии модели дефекта (б).

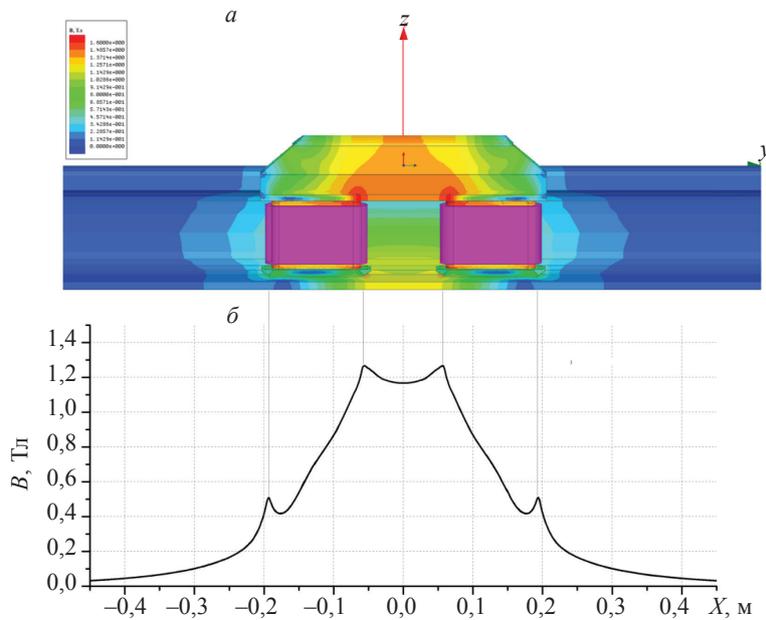


Рис. 5. Распределение магнитной индукции по продольной координате подошвы рельса (в 25 мм от края пера подошвы) при использовании двусторонней намагничивающей системы: П-образный электромагнит (а); график распределения магнитной индукции (б).

Как видно из рис. 5, наибольший уровень магнитной индукции 1,25 Тл приходится на подошву рельса под полюсами электромагнита, в то время как в середине межполюсного пространства уровень магнитной индукции составляет приблизительно 1,2 Тл.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЕЙ РАССЕЙВАНИЯ В ЗОНЕ ДЕФЕКТА ПОДОШВЫ РЕЛЬСА

На основании анализа статистики изломов из-за дефектов в подошве рельса, в качестве типичного дефекта рассмотрена модель трещины глубиной 10 мм, длиной 35 мм, раскрытием 1 мм, развивающейся от нижней поверхности подошвы (рис. 6а). Также взята модель трещины, развивающейся от боковой грани подошвы рельса глубиной 10 мм и раскрытием 1 мм (рис. 6б).

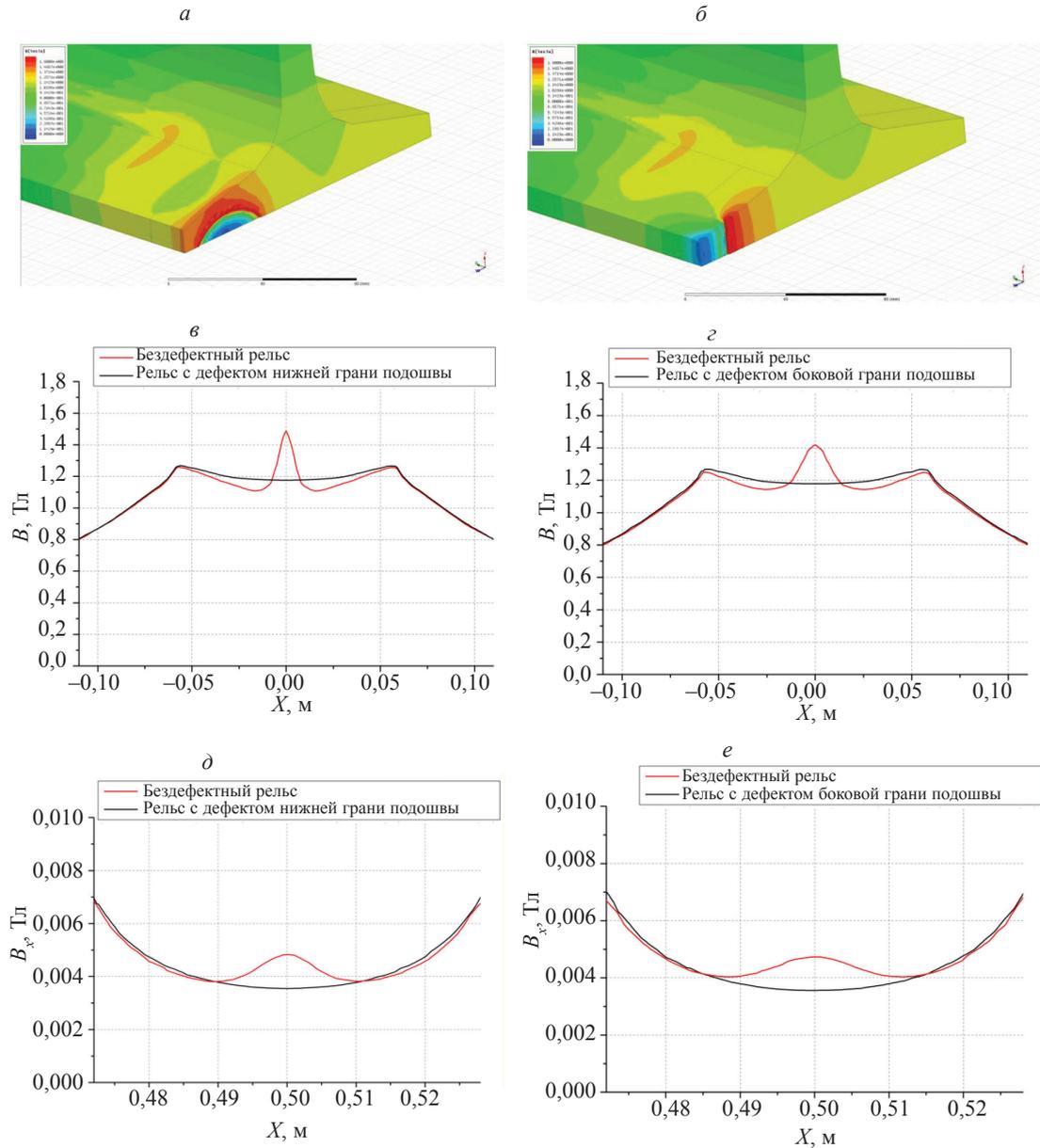


Рис. 6. Распределение магнитной индукции в окрестности дефектов подошвы рельса: *a, в, д* — модель трещины расположена в центральной части пера подошвы; *б, з, е* — на краю пера подошвы; *a, б* — магнитная индукция на поверхности и в поперечном сечении рельса; *в, з* — распределения по продольной координате магнитной индукции на поверхности пера подошвы; *д, е* — распределения по продольной координате тангенциальной составляющей магнитной индукции в воздухе в 2,5 мм над поверхностью пера подошвы.

Моделирование продемонстрировало, что при наличии несплошностей происходит вытеснение магнитного потока, которое может быть зафиксировано в виде сигналов при измерении тангенциальной составляющей магнитного поля датчиками, расположенными над верхней гранью подошвы рельса (рис. 6д, е).

Значения величины магнитной индукции, представленные на графиках рис. 6в—е, получены на расстоянии 25 мм от боковой грани подошвы (соответствующая точка в поперечном сечении рельса показана на рис. 7).

Таким образом, установлено, что данные модели трещин могут регистрироваться в виде сигналов с амплитудой около 20 % относительно уровня поля в воздухе на бездефектном участке.

Подробная оценка выявляемости моделей дефектов в проекции шейки не проводилась, т.к. эта область эффективно контролируется ультразвуковыми средствами контроля.

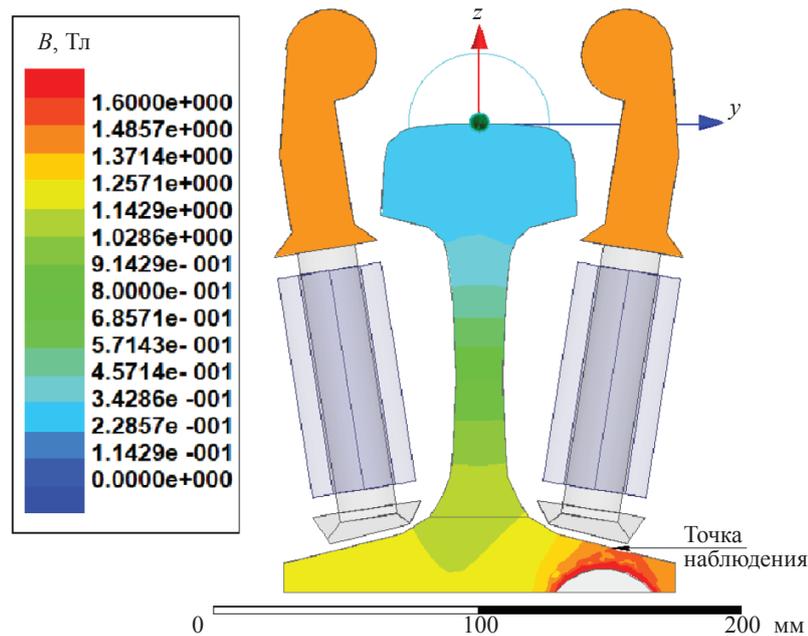


Рис. 7. Точка наблюдения (25 мм от боковой грани) за величиной магнитной индукции в процессе моделирования.

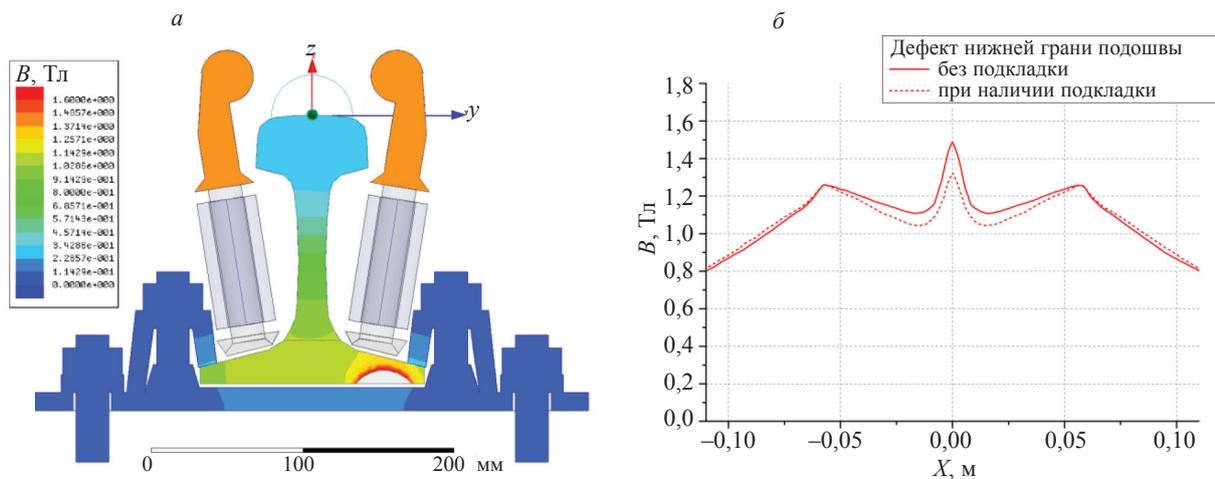


Рис. 8. Распределение магнитной индукции в поперечном сечении рельса, сердечников, рельсового крепления (а) и на верхней грани подошвы рельса по продольной координате, в 25 мм от боковой грани (б).

Отдельно оценена возможность обнаружения моделей дефектов в области рельсовых скреплений (рис. 8), так как отклик от дефекта ослабляется ввиду массивной металлической конструкции рельсовых скреплений.

Как видно из рис. 8б, магнитная индукция подошвы рельса уменьшается приблизительно на 13 % при наличии рельсового скрепления, однако все еще превышает уровень свыше 1,0 Тл. Возможность выявления дефектов при наличии рельсовых скреплений сохраняется.

### РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ МАКЕТА

В процессе проработки вариантов будущей конструкции системы намагничивания, способной обеспечить требуемый уровень намагниченности и проходящей рельсовые скрепления, промоделировано несколько вариантов П-образной системы намагничивания:

опирающейся на перья подошвы с полюсами в виде плоских широких пластин и электромагнитами, расположенными выше головки рельса;

с размещением катушек электромагнита в подголовочном пространстве;

с двумя вертикальными электромагнитами, размещенными в пространстве между шейкой рельса и скреплениями.

Последний вариант оказался наиболее удачным, именно этот вариант системы намагничивания с вертикальным размещением электромагнитов приведен на рис. 8а. Причем специальная форма электромагнитов спроектирована для возможности перевода намагничивающей системы в транспортное положение без соприкосновения с рельсом и скреплениями.

Для возможности опробования макета в лабораторных условиях два электромагнита были объединены единой пластиной, полюса электромагнитов дополнены опорными роликами (подшипниками) для возможности перемещения вдоль рельса, а также подшипниками с опорой на шейку рельса (рис. 9).

Основные данные системы намагничивания:

масса 36 кг;

магнитодвижущая сила 8 000 Ампер-витков;

сечение магнитопровода 25 см<sup>2</sup>;

межполюсное расстояние 258 мм;

ток в каждой из четырех катушек при питании от 12 В — 3А.

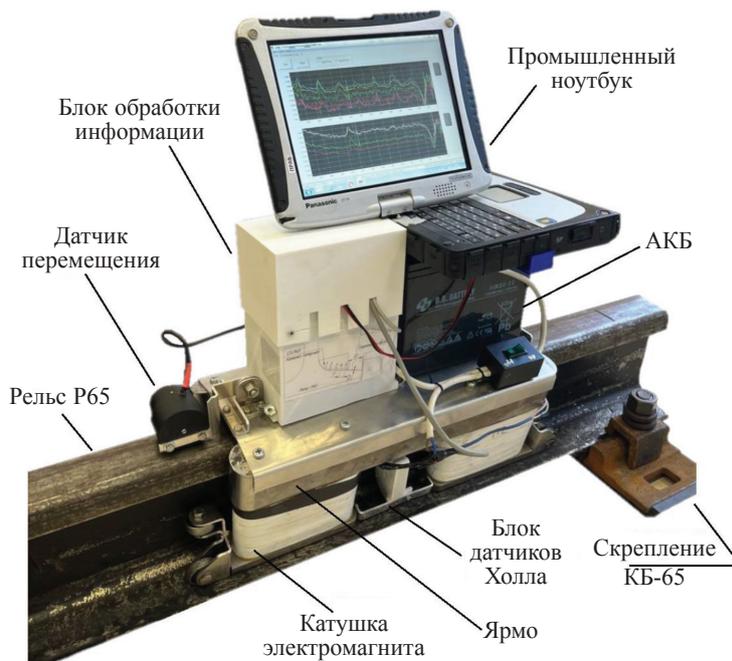


Рис. 9. Макет системы намагничивания и съема информации.



Рис. 10. Размещение датчиков Холла по поверхности перьев подошвы.

Разработаны электрические схемы и конструкция для системы съема информации, содержащей по пяти датчиков Холла (ДХ) на каждое перо, измеряющих тангенциальную составляющую индукции магнитного поля. Конструктивно на каждом пере между полюсами закреплен корпус, содержащий электронную плату с усилителями и ДХ (рис. 10).

Регистрация сигналов по всем десяти каналам производится с помощью внешнего АЦП (Е14-440), передающего оцифрованную информацию в компьютер по шине USB. Отображение данных осуществляется с помощью защищенного планшетного ноутбука Panasonic CF-19. Разработано специализированное программное обеспечение на базе библиотек от АЦП, предусматривающее цифровую низкочастотную фильтрацию сигналов от датчиков Холла.

Электропитание макета осуществляется от аккумуляторной батареи (АКБ).

### ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ЗАЗОРОВ ПОЛЮСОВ МАГНИТОВ И ДАТЧИКОВ С РЕЛЬСОМ

С помощью макета получены экспериментальные зависимости амплитуд сигналов от моделей дефектов от величины зазора между полюсами и рельсом (рис. 11) и зазора между ДХ и рельсом (рис. 12).

Как видно из рис. 11, при увеличении зазора между полюсами электромагнитов и пером подошвы рельса на каждый 1 мм относительная амплитуда сигнала на ДХ снижается примерно на 10 %. Полученные данные качественно согласуются с [22]. Легенда на графике обозначает расстояние ДХ от края пера, например, график «ДХ-35» соответствует расположению датчика на расстоянии 35 мм от края пера.

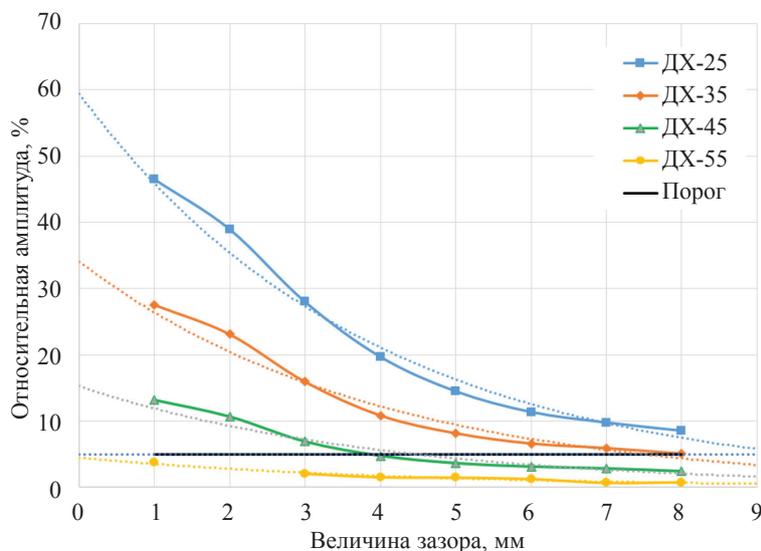


Рис. 11. Зависимость уровня относительной амплитуды сигнала от модели дефекта (высотой 9 мм в перо подошвы) при изменении величины зазора между полюсами электромагнита и пером подошвы.

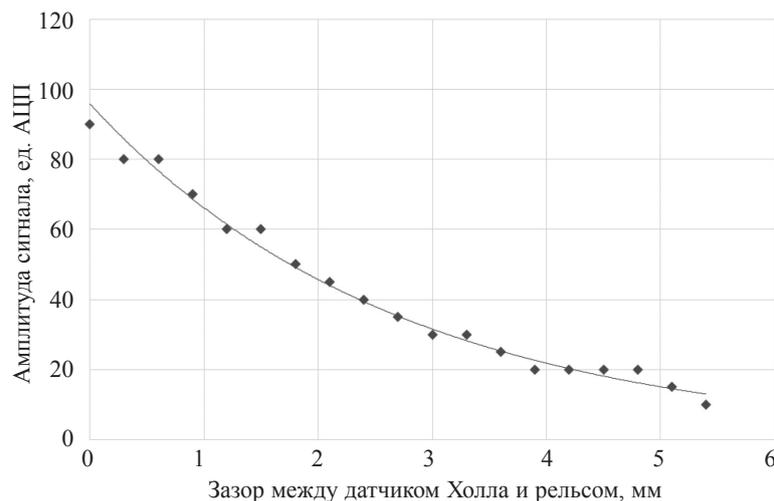


Рис. 12. График зависимости амплитуды сигнала датчика Холла от величины зазора между датчиком Холла и поверхностью пера подошвы.

Из рис. 12 следует, что при увеличении зазора между ДХ и рельсом на каждые 0,1 мм амплитуда сигнала падает на начальном отрезке (0—1 мм) примерно на 7 %.

На основании этих данных в макете установлены минимально допустимые для работы в лабораторных условиях зазоры 2,0 и 0,4 мм соответственно.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫЯВЛЯЕМОСТИ МОДЕЛЕЙ ТРЕЩИН

Для установления возможности выявления моделей трещин в отрезках рельсов и оценки минимальных выявляемых размеров изготовлены модели, расположенные в разных частях подошвы (перьях и центральной части) и имеющих различные геометрические размеры. Рассмотрим выявляемость моделей трещин в отрезке рельса, с шестью моделями трещин (рис. 13), цвет легенды соответствует позициям ДХ (см. рис. 10).

Выявляемость моделей трещин исследовалась как в зоне рельсовых скреплений (типа КБ-65), так и вне этой зоны.

Все изготовленные модели трещин выявлены вне зоны рельсовых скреплений. Как и ожидалось, наличие рельсовых скреплений (см. рис. 8) приводит к снижению уровня намагниченности металла рельса и, как следствие, к уменьшению амплитуды полезного сигнала от модели дефектов. Модели дефектов В—В (пропил глубиной всего 4 мм на краю пера), Г—Г (пропил в центральной части рельса в проекции шейки), Е—Е (вертикальное сверление — неплоскостной дефект) хоть и дают соответствующие отклики, однако амплитуда таких сигналов сопоставима с уровнем шумов.

Стоит отметить, что модель дефекта Г—Г также может быть уверенно обнаружена у.з. методом с поверхности катания рельса.

В целом, экспериментальные результаты подтвердили результаты компьютерного моделирования.

Доказано, что с помощью магнитного метода контроля возможно обнаружение моделей трещин в виде сегмента, развивающегося от нижней части пера глубиной от 4 мм вне зоны рельсовых скреплений и от 8 мм в зоне рельсовых скреплений, при любом их расположении в поперечном сечении рельса (в центральной части пера, на конце пера или в центральной части рельса, в проекции шейки или около нее).

Таким образом, проведенные компьютерное моделирование и экспериментальные исследования показывают потенциальную возможность обнаружения трещин в перьях подошвы магнитным методом и позволяют оценить выявляемые минимальные размеры трещин как в зоне скреплений, так и вне них.

В процессе выполнения работ промежуточные итоги неоднократно демонстрировались на специальном испытательном участке пути, где выявлены все плоскостные модели трещин, аналогичные моделям на рис. 13 с А—А по Д—Д.

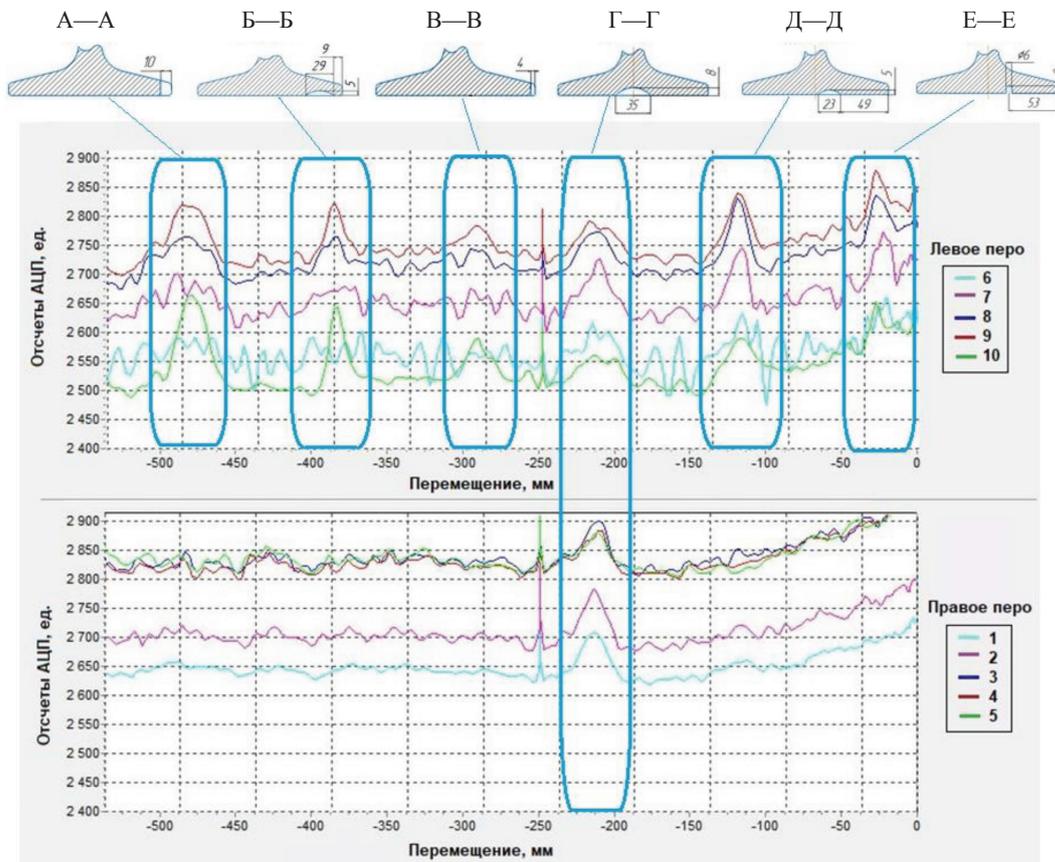


Рис. 13. Сигналы, полученные от моделей трещин при сканировании макетом: верхняя часть соответствует одному перу, нижняя — другому перу подошвы рельса (№ канала соответствует поз. ДХ на рис. 9).

Дополнительное повышение эффективности обнаружения дефектов в перьях подошвы можно выполнить путем сравнения отклонений уровней магнитного поля с правой и левой стороны рельса [23].

## ВЫВОДЫ

1. Компьютерное моделирование подтверждает теоретическую возможность обнаружения поперечных трещин в перьях подошвы рельсов магнитным методом.

2. Установлено, что для обнаружения трещин в перьях подошвы рельсов приемлемый уровень магнитной индукции (свыше 1,0 Тл) достигается при использовании установленных на подошве двух П-образных электромагнитов, полюса которых сонаправлены.

3. Сигналы от моделей трещин в подошве рельса, имитирующие плоскостные поперечные трещины, регистрируются с амплитудой около 8 % относительно уровня намагниченности на бездефектном участке подошвы рельса.

4. Если модель трещины расположена в центральной части ферромагнитного скрепления по длине рельса, вероятность ее обнаружения значительно снижается, главным образом из-за металлической шпальной подкладки.

5. Исследованы зависимости влияния зазоров между полюсами электромагнита и рельсов, между датчиками Холла и рельсом на величину сигналов от моделей трещин. В качестве оптимальных для условий эксплуатации приняты зазоры  $z = 2,0$  мм и  $\delta = 0,4$  мм соответственно.

6. Минимальная глубина трещин, развивающихся от боковых граней подошвы рельса, которые способен обнаружить изготовленный макет: от 4 мм вне зон рельсовых скреплений и от 8 мм в зоне скреплений. Для трещин, развивающихся от нижней грани подошвы рельса, от 5 мм глубиной и 20 мм длиной, независимо от наличия скреплений, за исключением трещин, находящихся в проекции шейки рельса.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шур Е.А., Борц А.И., Заграничек К.Л., Васильева С.А. Причины изломов рельсов // Путь и путевое хозяйство. 2021. № 5. С. 9—14. EDN WXQQDS.
2. Шур Е.А. Повреждения рельсов. М.: Интекст, 2012. 192 с. ISBN: 978-5-89277-108-5.
3. Ильин В.А., Таргонский К.Г. Способ ультразвукового контроля подошвы железнодорожных рельсов / Патент на изобретение № 2085936 С1. Оpubл. 27.07.1997.
4. Мосягин В.В., Марков А.А. Исследование возможности контроля перьев подошвы железнодорожных рельсов / Сб. научн. трудов. В мире неразрушающего контроля и диагностики материалов промышленных изделий и окружающей среды. Материалы IV Всероссийского с международным участием научно-практического семинара. СПб.: СЗТУ, 2003. С. 129.
5. Никифорова О.Ж., Брандис М.П., Лончак В.А., Никифорова Ж.Г. Ультразвуковой контроль подошвы железнодорожных рельсов посредством ЭМА-преобразователей // УЗДМ 2009. XX Петербургская конференция. СПб.—Репино, 26—28 мая 2009. С. 59—60.
6. Тарабрин В.Ф., Ильин В.А., Татаринцев В.О., Одынец С.А. Способ ультразвукового контроля подошвы рельса / Патент на изобретение № 2353924. Оpubл. 27.04.2009. Бюл. № 12.
7. Климов Я. Изучения без разрушения // Гудок. № 131 от 21 июля 2020. С. 5.  
URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1528362>
8. Марков А.А., Олейник В.Е., Разорвин В.Е., Ликсаков С.В. Устройство для ультразвуковой дефектоскопии рельсов / Патент на полезную модель № 89235. Оpubл. 27.11.2009.
9. Базулин Е.Г., Тарабрин В.Ф. Выбор метода ультразвукового контроля перьев подошвы рельса // Контроль. Диагностика. 2017. № 9. С. 20—31.
10. Марков А.А., Молотков С.Л. Способ ультразвукового контроля подошвы рельсов / Патент на изобретение № 2645818. С1. Оpubл. 28.02.2018. Бюл. № 7.
11. Сясько В.А. Об использовании технологии MFL для выявления коррозионных повреждений обшивки судов // В мире НК. 2015. Т. 18. № 3. С. 7—10. EDN UDJSMR.
12. Потапов А.И., Сясько В.А., Пудовкин О.П., Шаранова Д.А. Анализ погрешности измерений остаточной толщины днищ цилиндрических вертикальных резервуаров по технологии MFL с использованием метода конечных элементов // Контроль. Диагностика. 2016. № 11. С. 10—15. EDN XAAJBV. DOI: 10.14489/td.2016.11.pp.010-015
13. Марков А.А., Политай П.Г., Маховиков С.П., Алексеев Д.В., Кузнецова Е.А. Комплексный анализ состояния пути с помощью нового вагона-дефектоскопа АВИКОН-03 // В мире НК. 2013. № 3 (61). С. 74—79.
14. Шлеенков А.С., Булычев О.А., Пастухов А.Б., Шлеенков С.А. О возможности применения магнитной дефектоскопии рельсов в процессе их производства // Дефектоскопия. 2019. № 12. С. 49—55. EDN HZNDJEJ. DOI: 10.1134/S0130308219120066
15. Антипов А.Г., Марков А.А. Выявляемость дефектов в рельсах магнитным методом // Дефектоскопия. 2019. № 4. С. 21—29.
16. Антипов А.Г., Марков А.А. Оценка глубины выявления поперечных трещин магнитодинамическим методом в дефектоскопии рельсов // Дефектоскопия. 2014. № 8. С. 57—68. EDN SYRLMR. [Antipov A.G., Markov A.A. Evaluation of transverse cracks detection depth in MFL rail NDT // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2014. V. 50. No. 8. P. 481—490. DOI 10.1134/S1061830914080026. EDN UFNPIJ.]
17. ГОСТ Р 51685—2013. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2014. 95 с.
18. DIN EN 13674-1—2017. Railway applications — Track-Rail — Part 1: Vignole railway rails 46 kg/m and above.
19. Потапов А.И., Сясько В.А., Пудовкин О.П. Оптимизация параметров первичных измерительных преобразователей, реализующих технологию MFL // Дефектоскопия. 2015. № 8. С. 64—71. EDN VLQFUV.
20. Jia Y., Liang K., Wang P., Ji K., Xu P. Enhancement method of magnetic flux leakage signals for rail track surface defect detection. // IET Sci. Meas. Technol. V. 14. P. 711—717. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2018.5651>
21. Antipov A.G., Markov A.A. Using a Tail Field in High-Speed Magnetic Flux Leakage Testing // Journal of Nondestructive Evaluation. 2022. V. 41. Art. no. 2.
22. Муравьев В.В., Стрижак В.А., Балобанов Е.Н. К расчету параметров системы намагничивания электромагнитно-акустического преобразователя // Интеллектуальные системы в производстве. 2011. № 1(17). С. 197—205. EDN MNQMXH.
23. Марков А.А., Антипов А.Г., Мосягин В.В. Способ магнитной дефектоскопии подошвы рельсов. Патент № 2736177 С1 Российская Федерация, МПК G01N 27/82. № 2020119190. Заявл. 02.06.2020. Оpubл. 12.11.2020. Заявитель ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО "РАДИОАВИОНИКА". EDN JSVPTF.

## REFERENCES

1. *Shur E.A.* et al. Evolution of the Contact-Fatigue Defects Caused Rail Failure Rate // Russian Railway Science Journal. 2015. V. 3. P. 3—9.
2. *Shur E.A.* Rail damage. Moscow: Intext, 2012. 192 p. ISBN: 978-5-89277-108-5
3. *Ilyin V.A., Targonsky K.G.* Method for ultrasonic check of rail base / Patent for invention No. 2085936 C1. Published on 07/27/1997.
4. *Mosyagin V.V., Markov A.A.* Investigation of the possibility of controlling the feathers of the base of railway rails. Collection of scientific works. In the world of non-destructive testing and diagnostics of materials of industrial products and the environment // Materials of the IV All-Russian scientific and practical seminar with international participation. St. Petersburg: NWTU, 2003. P. 129.
5. *Nikiforenko O.J., Brandes M.P., Lonchak V.A., Nikiforenko J.G.* Ultrasonic inspection of the base of railway rails by means of EMA converters // UZDM 2009. XX St. Petersburg Conference. St. Petersburg — Repino, May 26—28, 2009. P. 59—60.
6. *Tarabrin V.F., Ilyin V.A., Tatarinov V.O., Odynets S.A.* Method of ultrasonic inspection of the base of the rail / Patent for invention No. 2353924. Published on 04/27/2009. Byul. No. 12.
7. *Klimov Ya.* Studying without destruction // Gudok. 2020. No. 131. dated July 21. P. 5. URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1528362>
8. *Markov A.A., Oleinik V.E., Razorvin V.E., Aksakov S.V.* Device for ultrasonic flaw detection of rails / Utility model patent No. 89235. Published on 11/27/2009.
9. *Bazulin E.G., Tarabrin V.F.* The choice of the method of ultrasonic inspection of the feathers of the base of the rail // Control. Diagnostics. 2017. No. 9. P. 20—31.
10. *Markov A.A., Molotkov S.L.* Method of ultrasonic inspection of the sole of rails. (2018).
11. *Syasko V.A.* On the use of MFL technology to detect corrosion damage to ship skin // In the world of non-destructive testing. 2015. V. 18. No. 3. P. 7—10.
12. *Potapov A.I.* et al. Analysis of the measurement error of the residual thickness of the bottoms of cylindrical vertical tanks using MFL technology using the finite element method // Control. Diagnostics. 2016. No. 11. P. 10—15. DOI: 10.14489/td.2016.11.pp.010-015
13. *Markov A.A.* et al. Comprehensive analysis of the condition of the track using the new AVICON-03M flaw detector car // In the World of non-destructive testing. 2013. No. 3. P. 74—79.
14. *Shleenkov A.S.* et al. On the possibility of using magnetic flaw detection of rails in the process of their production // Defektoskopiya. 2019. No. 12. P. 49—55.
15. *Antipov A.G., Markov A.A.* Detection of defects in rails by the magnetic method // Defektoskopiya. 2019. No. 4. P. 21—29.
16. *Antipov A.G., Markov A.A.* Evaluation of transverse cracks detection depth in MFL rail NDT // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2014. V. 50. No. 8. P. 481—490.
17. GOST R 51685-2013. Railway rails. General technical specifications, 2014. P. 12—13.
18. DIN EN 13674-1-2017. Railway applications - Track - Rail - Part 1: Vignole railway rails 46 kg/m and above.
19. *Potapov A.I., Syasko V.A., Pudovkin O.P.* Optimization of parameters of primary measuring transducers implementing MFL technology // Defektoskopiya. 2015. No. 8. P. 64—71.
20. *Jia Y., Liang K., Wang P., Ji K., Xu P.* Enhancement method of magnetic flux leakage signals for rail track surface defect detection. // IET Sci. Meas. Technol. V. 14. P. 711—717. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2018.5651>
21. *Antipov A.G., Markov A.A.* Using a tail field in high-speed magnetic flux leakage testing // Journal of Nondestructive Evaluation. 2022. No. 41. P. 1—9.
22. *Muravyev V.V., Strizhak V.A., Balabanov E.N.* To calculate the parameters of the magnetization system of an electromagnetic-acoustic transducer // Intelligent systems in Production. 2011. No. 1. P. 197—205.
23. *Markov A.A., Antipov A.G., Mosyagin V.V.* Method of rail base magnetic flaw detection / Patent for invention No. 2736177 C1. Published on 12/11/2020.

## ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС «MicroLab-Z2» ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕЙ ОЦЕНКИ СТРУКТУРНО-ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ МЕТАЛЛА КОНСТРУКЦИЙ

© 2024 г. А.Е. Зорин<sup>1,\*</sup>, В.И. Красеньков<sup>2,\*\*</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «УГТУ», Россия 169300 Ухта, ул. Первомайская, 13

<sup>2</sup>ООО «ОМИКОН Текнолоджис», Россия, Москва, ул. Маршала Соколовского, 10, корп.1

E-mail: \*zorinae86@rambler.ru; \*\*info@omicon-tech.ru

Поступила в редакцию 09.11.2023; после доработки 11.12.2023

Принята к публикации 15.12.2023

Поведение конструкции при воздействии внешних факторов определяется тремя ключевыми группами параметров строения ее металла (химических, структурных и деформационных). Получение информации о данных параметрах непосредственно на конструкции позволит эффективно решить задачу оценки ее фактического технического состояния. Задача неразрушающей оценки химического состава металла решается использованием портативных спектрометров. Для оценки двух других групп параметров разработан диагностический комплекс MicroLab-Z2. Он имеет два функциональных блока. Блок подготовки поверхности обеспечивает формирование на поверхности изделия площадки с шероховатостью, плоскостностью и уровнем вносимого механического наклепа, соответствующим лабораторной подготовке металлографических шлифов. Исследовательский блок представляет собой платформу, на которой установлены металлографический микроскоп и портативный микротвердомер. Он позволяет в любом пространственном положении выполнять металлографические исследования с увеличением до  $\times 1000$ , поверхностное микроиндентирование, измерение значений микротвердости при нагрузке 0—200 гс и оптическое изучение морфологии отпечатков. Достоверность данных, получаемых диагностическим комплексом MicroLab-Z2, подтверждена в ходе проведения сравнительных испытаний со стационарным оборудованием. С помощью разработанного устройства может быть выполнена оценка параметров структуры и загрязненности металла неметаллическими включениями, оценка степени упрочнения и охрупчивания металла, обнаружение процессов старения. Использование диагностического комплекса MicroLab-Z2 для оперативной неразрушающей оценки структурно-деформационных параметров металла конструкций позволит выйти на качественно иной уровень эффективности выполнения производственного и входного контроля выпускаемой продукции, оценки ремонтнопригодности дефектов, планирования ремонтных работ и других компенсирующих мероприятий, экспертизы промышленной безопасности.

*Ключевые слова:* оперативная диагностика металла, диагностический комплекс MicroLab-Z2, неразрушающая оценка состояния металла, подготовка поверхности металла, микротвердость, микроиндентирование, структура металла, деформационные параметры металла, охрупчивание металла, упрочнение металла, оценка фактического технического состояния.

## DIAGNOSTIC COMPLEX «MicroLab-Z2» FOR NON-DESTRUCTIVE EVALUATION OF STRUCTURAL AND DEFORMATION PARAMETERS OF METAL CONSTRUCTIONS

A.E. Zorin<sup>1,\*</sup>, V.I. Krasnenkov<sup>2,\*\*</sup>

<sup>1</sup>UGTU, Russia 169300 Ukhta, Pervomaiskaya str., 13

<sup>2</sup>OMICON Technologies LLC, Russia Moscow, Marshal Sokolovsky str., 10, building 1

E-mail: \*zorinae86@rambler.ru; \*\*info@omicon-tech.ru

The behavior of the construction under the influence of external factors is determined by three key groups of parameters of the metal composition (chemical, structural and deformation). Obtaining information about these parameters directly on the construction will effectively solve the problem of assessing its actual technical condition. The problem of non-destructive evaluation of the chemical composition of a metal is solved using portable spectrometers. The MicroLab-Z2 diagnostic complex has been developed to evaluate the other two groups of parameters. It has two functional blocks. The surface preparation unit ensures that the surface of the construction site has a roughness, flatness and level of applied mechanical hardening corresponding to the laboratory preparation of metallographic grinds. The research unit is a platform on which a metallographic microscope and a portable microhardness tester are installed. It allows metallographic researches with magnification up to  $\times 1000$ , surface microindentation, measurement of microhardness values at load of 0—200 gs and optical study of the morphology of imprints in any spatial position. The reliability of the data obtained by the MicroLab-Z2 diagnostic complex has been confirmed during comparative tests with stationary equipment. With the help of the developed device, an assessment of the structure parameters, contamination of metal with non-metallic inclusions, assessment of the degree of hardening and embrittlement of metal, detection of aging processes can be performed. The use of the MicroLab-Z2 diagnostic complex for operational non-destructive evaluation of structural and deformation parameters of metal constructions will allow us to reach a qualitatively different level of efficiency in performing production and input control of manufactured products, assessing the maintainability of defects, planning repairs and other compensating measures, and industrial safety expertise.

*Keywords:* operational diagnostics of metal, MicroLab-Z2 diagnostic complex, non-destructive assessment of metal condition, metal surface preparation, microhardness, microindentation, metal structure, deformation parameters of metal, embrittlement of metal, metal hardening, assessment of the actual technical condition.

**DOI:** 10.31857/S0130308224010071

## ВВЕДЕНИЕ

В процессе производства и эксплуатации ответственных металлических конструкций возникает необходимость оперативного контроля состояния их металла.

При изготовлении требуемые характеристики металла конструкции достигаются за счет строгого соблюдения всех технологических операций. Даже самые незначительные отступления от оптимальных режимов и технологий производства могут критическим образом сказаться на качестве изделия и даже целой партии. Как следствие, добиться стабильных и гарантированных свойств металла однотипных конструкций не удается. Находясь в пределах допустимых значений, они могут отличаться до 30—50 % и более в разных партиях [1—3]. С такой неопределенностью изделие поступает к заказчику и в ряде случаев может не обеспечить требуемую несущую способность или долговечность, нанеся в результате репутационные и финансовые потери производителю.

Эксплуатация также вносит свой вклад. Непроектные, циклические нагрузки, воздействие агрессивных сред, высоких и низких температур, появление дополнительных концентраторов напряжения могут привести к развитию негативных процессов в металле, снизив его работоспособность до критического уровня [4—6]. Как следствие, затрудняется принятие эффективных решений по ремонтно-техническому обслуживанию опасных производственных объектов, снижается достоверность прогнозирования их надежности и безопасности.

Известно, что поведение металла под действием внешних факторов определяется тремя ключевыми группами параметров его строения [7—11]:

- химических: содержание легирующих и микролегирующих элементов, вредных примесей (сера, фосфор) и т.д.;
- структурных: тип, параметры структуры, параметры неметаллических включений, ликвации хрупких фаз, микронесплошности и т.д.;
- деформационных: совокупный уровень упрочнения металла (дислокационного, твердорастворного, зернограничного и дисперсного) и его влияние на механизм и предельный уровень пластической деформации металла.

Т.е. комбинация представленных параметров оказывает определяющее влияние как на формирование механических свойств металла, так и на поведение реальной конструкции при эксплуатационных воздействиях.

В результате, получением данной информации может быть эффективно решены задачи достоверной оценки качества производимой продукции и ее фактического технического состояния в процессе эксплуатации.

До настоящего времени такой подход не находил практического развития, поскольку используемые для получения указанной информации методы и технологии должны быть оперативными и неразрушающими.

Оперативная неразрушающая оценка химического состава металла может быть выполнена с использованием разнообразных портативных оптико-эмиссионных или рентгенофлюоресцентных спектрометров, точность которых не уступает стационарному оборудованию [12].

Однако с определением двух других групп параметров (структурных и деформационных) до настоящего времени были сложности.

Целью настоящей работы являлась разработка диагностического комплекса MicroLab-Z2, позволяющего выполнять оперативную неразрушающую оценку структурно-деформационных параметров металла непосредственно на эксплуатируемой конструкции, без необходимости вывода ее из эксплуатации.

## ОПИСАНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

Общий вид диагностического комплекса MicroLab-Z2 приведен на рис. 1, а его основные технические характеристики — в табл. 1.

Диагностический комплекс имеет два функциональных блока: блок подготовки поверхности и исследовательский блок.

Блок подготовки поверхности представляет собой шпиндель мощностью 2,2 кВт, со скоростью

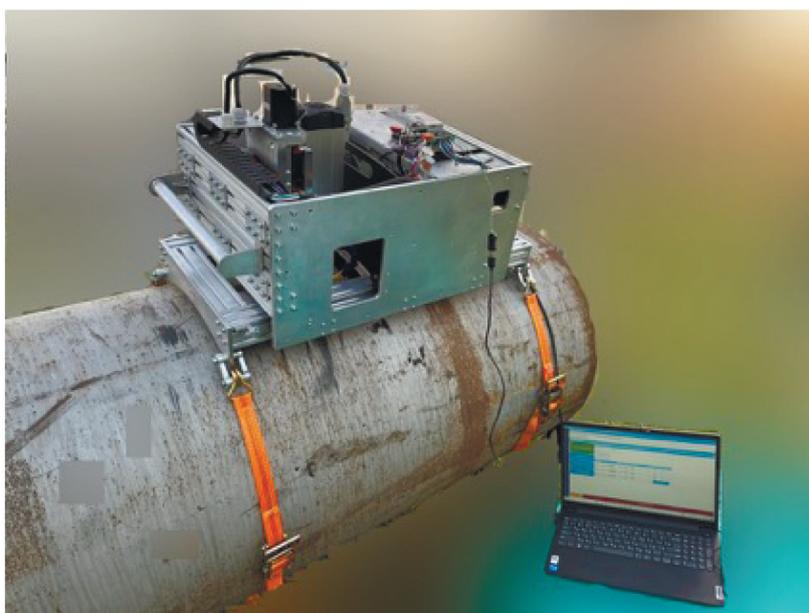


Рис. 1. Общий вид диагностического комплекса MicroLab-Z2.

Таблица 1

**Основные технические характеристики диагностического комплекса MicroLab-Z2**

№ п/п	Характеристика	Значение
1	Габаритные размеры (Д×Ш×В)	850×500×450 мм
2	Вес	42 кг
3	Питание	От сети/генератора 220 В
4	Допустимая температура эксплуатации	-20 — +50°С
5	Допустимое пространственное положение при работе	0 — 360°
6	Время подготовки поверхности	15 мин
7	Минимальный шаг снятия поверхности при подготовке	1 мкм
8	Максимальная глубина снятия поверхности при подготовке	8 мм
9	Шероховатость подготавливаемой поверхности	до Ra < 0,2
10	Точность выбора места для индентирования	1 мкм
11	Диапазон нагрузок на индентор	0 — 200 гс
12	Увеличение микроскопа	×50 — ×1000
13	Возможность фото/видеофиксации изображения	Да

вращения до 18000 об/мин и автоматизированным координатным перемещением по трем осям с точностью до 1 мкм (рис. 2).

Программа управления блоком подготовки поверхности позволяет задавать: координаты перемещения шпинделя; скорость перемещения и вращения шпинделя; алгоритм подготовки поверхности (количество проходов на одной глубине, глубину снимаемого слоя за 1 проход и общую и т.д.).

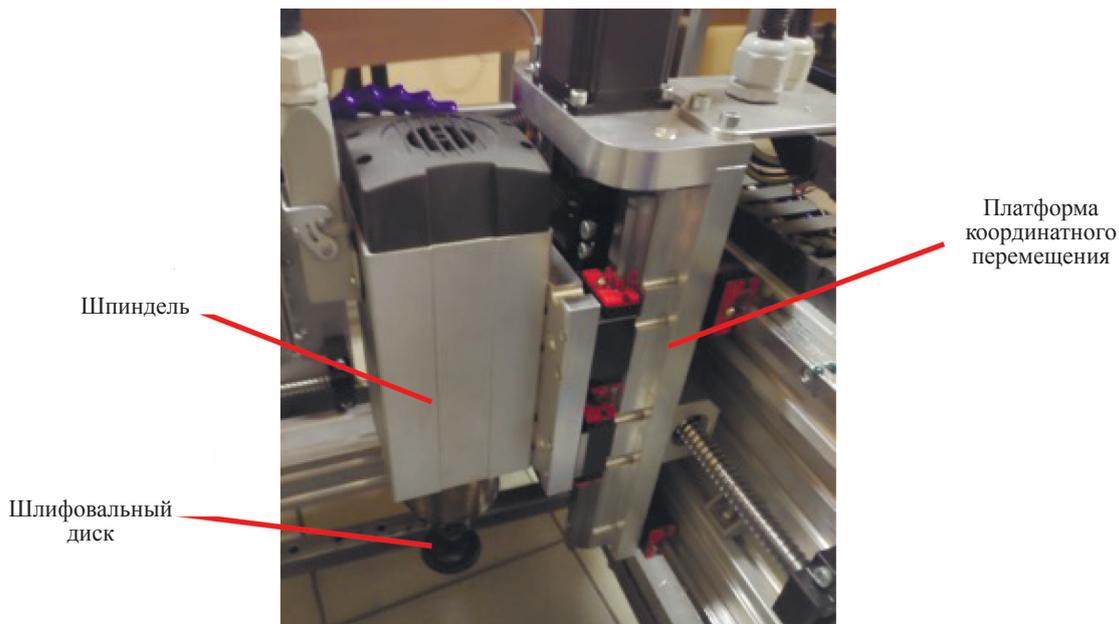


Рис. 2. Блок подготовки поверхности диагностического комплекса MicroLab-Z2.

Смена шлифовального/полировального инструмента производится вручную через специальное технологическое окно в корпусе. Через него же можно наблюдать за процессом подготовки поверхности, контролировать ее качество, а также выполнять травление отполированного металла.

Для проведения высокоточных исследований поверхности ее подготовка должна обеспечивать:

- минимизацию величины механического наклепа;
- формирование плоской площадки на определенной толщине изделия;
- формирование требуемой шероховатости ( $Ra < 0,32$  мкм).

Соблюдение данных требований достигается следующей последовательностью подготовки поверхности:

1. Шлифовка с использованием шлифовального круга 3М Cubitron II зернистостью Р60 в 3 прохода.
  2. Грубая полировка с использованием войлочного круга и пасты Magrol С94 в три прохода.
  3. Финишная полировка с использованием войлочного круга и пасты Magrol F62 в три прохода.
- Общий вид получаемой при этом площадки на поверхности трубы Ду 830 мм представлен на рис. 3.



Рис. 3. Общий вид подготавливаемой площадки на поверхности трубы Ду 830 мм.

При необходимости выполнения исследований на определенной глубине предварительно выполняется снятие нужной толщины металла с шагом до 0,5 мм за каждый проход.

Время подготовки поверхности по указанной технологии составляет не более 15 мин.

Для оценки качества подготавливаемой поверхности по вышеуказанной технологии были проведены тестовые испытания на темплете трубы стали 17Г1С диаметром 1220 мм.

Величина вносимого наклепа оценивалась проведением сравнительных замеров микротвердости поверхности темплета, подготовленной с использованием диагностического комплекса MicroLab-Z2, и по технологии лабораторной подготовки на шлифовально-полировальном станке Struers TegraPol:

- грубая шлифовка абразивным кругом в воде;
- тонкая шлифовка шлифовальной бумагой зернистостью P36/80/240/320 в воде;
- полировка в воде фетровым диском и алмазной суспензией с размером частиц 9/3/1 мкм.

Измерения значений микротвердости выполнялись при нагрузке в 50 гс на стационарном микротвердомере ПМТ-3М в соответствии с ГОСТ 9450—75 [13]. В обоих случаях наносилось по 30 отпечатков.

Среднее значение микротвердости на поверхности, подготовленной в лабораторных условиях, составило 167 кгс/мм<sup>2</sup>, а разброс значений — от 141 до 188 кгс/мм<sup>2</sup>. Среднее значение микротвердости на поверхности, подготовленной с использованием диагностического комплекса MicroLab-Z2, составило 165 кгс/мм<sup>2</sup>, с разбросом — от 147 до 190 кгс/мм<sup>2</sup>.

Таким образом, учитывая, что метод измерения микротвердости является чрезвычайно чувствительным к состоянию металла [14, 15], полученные результаты свидетельствуют о том, что величина наклепа, создаваемая на поверхности при шлифовке и полировке с использованием диагностического комплекса MicroLab-Z2, не превосходит величину наклепа, создаваемую при лабораторной подготовке образцов. Разница в разбросе значений микротвердости в данном случае может быть объяснена структурно-механической неоднородностью металла трубы по объему.

Контроль плоскостности поверхности выполнялся индикатором часового типа с чувствительностью в 1 мкм, установленным на станок ЧПУ с высокоточным перемещением по координатным осям. Подготовленная площадка размером 40×40 мм на вышеописанном темплете трубы сканировалась по сетке с шагом в 5 мм.

Измерения показали, что максимальное отклонение от горизонтальной плоскости по всей длине и ширине исследованной поверхности не превышает 2 мкм, причем данная погрешность накапливается плавно, без скачков и провалов внутри анализируемой площади.

Шероховатость поверхности контролировалась цифровым измерителем шероховатости Elcometer 7060 SurfTest SJ-201P. Усредненные данные 10 замеров в различных участках подготовленной площадки показали значение Ra = 0,18 мкм.

Важно отметить, что процесс подготовки поверхности с использованием диагностического комплекса MicroLab-Z2 может выполняться в любом пространственном положении и не предусматривает использования смазывающе-охлаждающей жидкости (СОЖ), что делает его удобным и приспособленным к производственным и полевым условиям. А высокая точность координатного перемещения дает возможность контролировать остаточную толщину изделия и не выходить за пределы ее минусового допуска (при подготовке бездефектной зоны металла).

Исследовательский блок представляет собой платформу, на которой установлены металлографический микроскоп и портативный микротвердомер (рис. 4). Как и блок подготовки поверхности, платформа имеет программное управление и обеспечивает координатное перемещение установленных на ней устройств по трем осям с точностью до 1 мкм.

Металлографический микроскоп имеет увеличение до ×1000 и оснащен окуляром с возможностью фото- и видеофиксации изображения.

Благодаря качеству подготовки получаемое изображение протравленной и непротравленной поверхности не уступает получаемому в стационарных условиях при изучении лабораторных металлографических шлифов (рис. 5).

Оптический анализ изображения также возможен в любом пространственном положении.

Установленный на исследовательской платформе портативный микротвердомер является запатентованным устройством [16], позволяющим в автоматизированном режиме в любом пространственном положении выполнять микроиндентирование и измерение значений микротвердости в диапазоне нагрузок на индентор 0 — 200 гс. Программные настройки позволяют регулировать такие параметры микроиндентирования, как величина усилия на индентор, скорость набора, время выдержки и скорость снятия нагрузки.

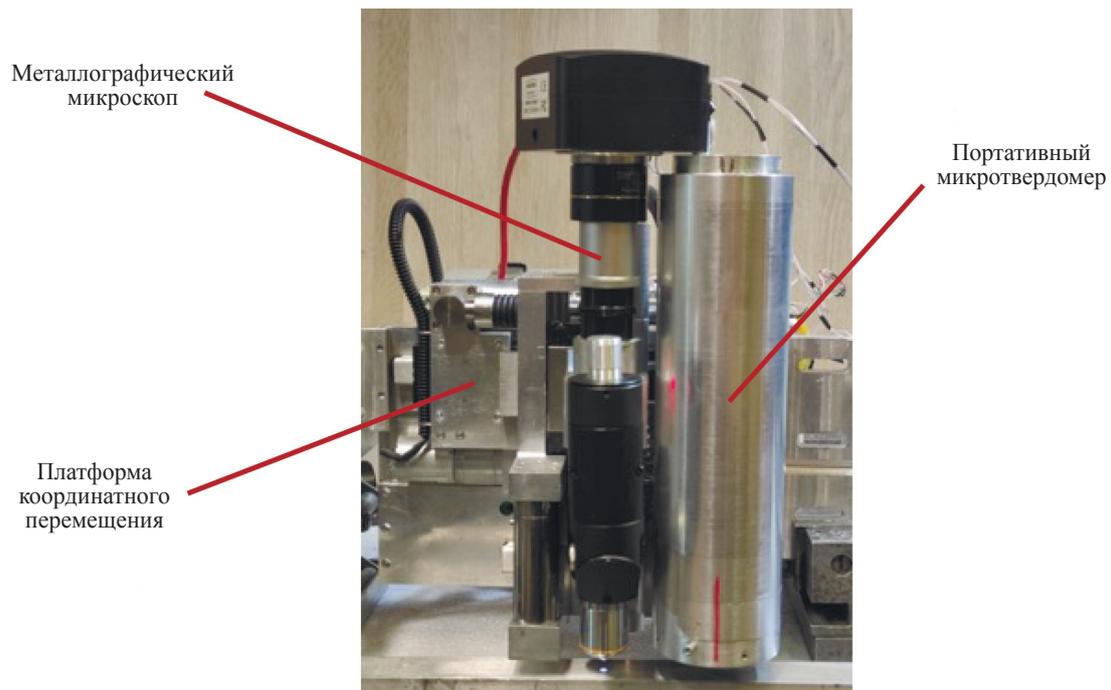
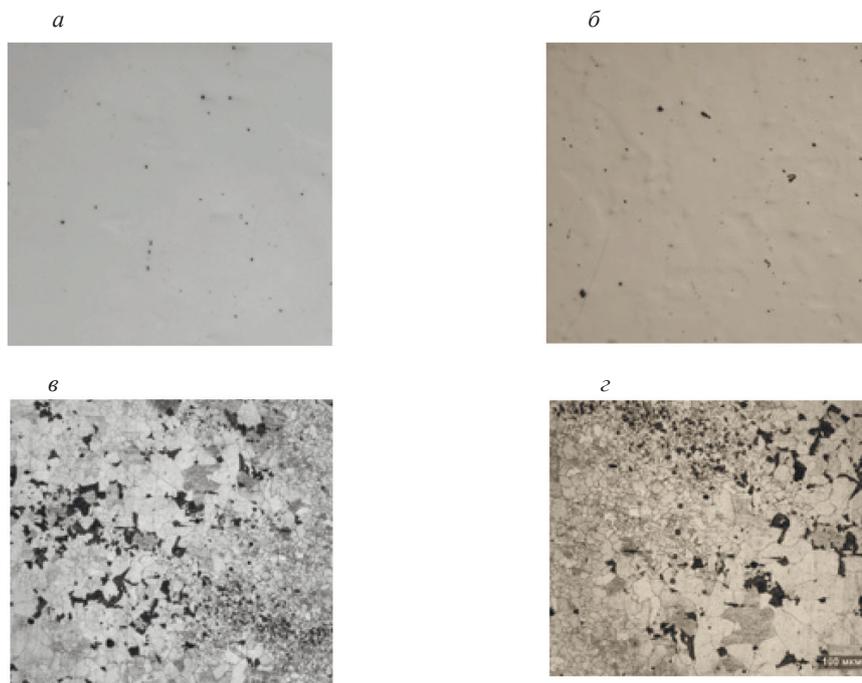


Рис. 4. Исследовательский блок.

Рис. 5. Изображение поверхности листа из стали 09Г2С ( $\times 200$ ):

*а, б* — соответственно изображение нетравленной и травленной поверхности, полученное на микроскопе диагностического комплекса MicroLab-Z2; *в, г* — соответственно изображение нетравленной и травленной поверхности, полученное на стационарном микроскопе NIKON MA200.

Данный прибор является глубоко модернизированной версией прототипа [17].

Микроскоп и микротвердомер могут автоматически позиционироваться в одну и ту же точку, что позволяет оптически исследовать поверхность, выбрать подходящие места для индентирования, а затем анализировать полученные отпечатки.

Возможность выполнения измерений микротвердости в любом пространственном положении обеспечивается за счет прецизионной механической балансировки подвижных элементов микротвердомера.

Задание нагрузки на индентор производится в два этапа. Сначала подается незначительная ее часть (около 5 % от плановой) для достижения контакта индентора с поверхностью, а при программной идентификации данного контакта подается основная часть усилия. Такой подход позволяет нивелировать погрешности, связанные с температурным расширением элементов микротвердомера, влияющие на абсолютные показания индукционного датчика, но не влияющие на разность показаний в момент касания поверхности и полного погружения индентора.

Для оценки точности и достоверности получаемых с использованием портативного микротвердомера значений были проведены комплексные испытания.

На первом этапе проводилась серия измерений на кристалле поваренной соли NaCl, характеризующейся стабильными значениями микротвердости и используемой для проверки стационарных микротвердомеров.

В соответствии с существующей методикой проверки были выполнены серии из 10 замеров микротвердости при нагрузке в 10 и 20 гс.

Полученные результаты показали, что во всех случаях значения микротвердости лежали в допустимом диапазоне значений 19—21 кгс/мм<sup>2</sup>. Среднеквадратичное отклонение при нагрузке в 10 гс составило 0,29 кгс/мм<sup>2</sup>, а при нагрузке в 20 гс — 0,17 кгс/мм<sup>2</sup>, что существенно ниже допустимого значения в 0,45 кгс/мм<sup>2</sup>.

На втором этапе проводились сравнительные испытания микротвердомера диагностического комплекса MicroLab-Z2 и стационарного микротвердомера ПМТ-3М на мере микротвердости МТВ-МЕТ.

Выполнялось по 30 измерений при нагрузках в 10, 30 и 50 гс.

Полученные результаты, представленные на рис. 6, показали, что разброс значений микротвердости, получаемых с использованием разработанного портативного микротвердомера, не только существенно ниже полученного на микротвердомере ПМТ-3М, но и находится в районе допустимых размахов случайной погрешности значений самой меры микротвердости МТВ-МЕТ (7 % при нагрузке в 10 гс и 5 % при нагрузке в 30 и 50 гс).

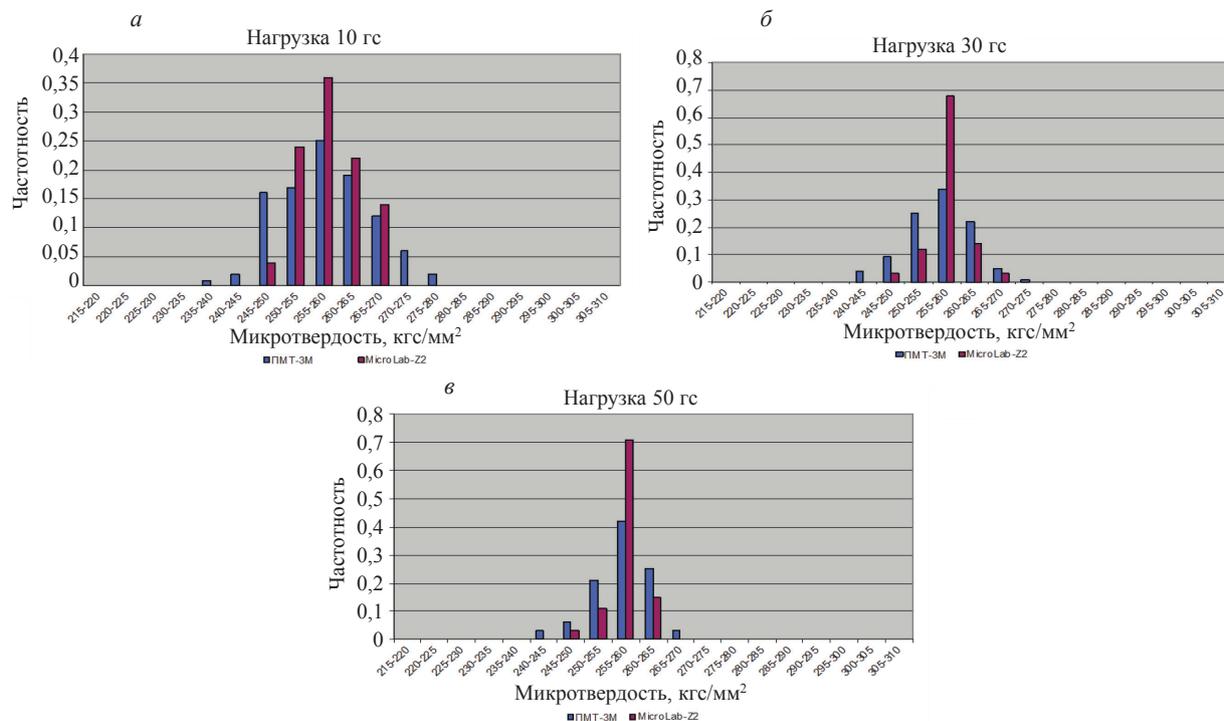


Рис. 6. Сравнительные гистограммы значений микротвердости, полученные с использованием микротвердомера диагностического комплекса MicroLab-Z2 и стационарного микротвердомера ПМТ-3М на мере микротвердости МТВ-МЕТ:

а — при нагрузке 10 гс; б — при нагрузке 30 гс; в — при нагрузке 50 гс.

Таким образом, диагностический комплекс MicroLab-Z2 представляет собой устройство, позволяющее с лабораторным качеством и точностью выполнять подготовку поверхности, ее металлографический анализ, измерение значений микротвердости и оптическое изучение морфологии отпечатков.

Важно отметить, что диагностический комплекс MicroLab-Z2 оснащен датчиками температуры и вибрации, что позволяет в режиме реального времени контролировать значения указанных параметров на всех этапах исследований и не допускать их влияния на получаемые результаты.

### РЕШАЕМЫЕ ЗАДАЧИ

С использованием диагностического комплекса MicroLab-Z2 может быть получена следующая информация:

- оценка загрязненности металла неметаллическими включениями по ГОСТ 1778—2022 [18];
- оценка параметров структуры основного металла и сварных соединений по ГОСТ 5639—82 [19], ГОСТ 5640—2020 [20], ГОСТ 8233—56 [21]. Для идентификации трудно различимых структурных составляющих (мартенсит, верхний/нижний бейнит и т.д.) используется измерение значений микротвердости в этих зонах;
- оценка величины наклепа металла по результатам сравнения значений микротвердости, полученных на анализируемой конструкции, со значениями, полученными на аналогичной конструкции в исходном состоянии. Либо при сравнении значений микротвердости различных зон металла конструкции (по площади или по толщине);
- оценка степени охрупчивания металла. Для пластичных металлов (сталей) степень охрупчивания определяется по специально разработанной методике [22]: по результатам анализа морфологии локализованных сдвигов рядом с отпечатком при микроиндентировании (рис. 7). Данный эффект отражает влияние различных видов упрочнения металла (дислокационного, зернограничного, дисперсного, твердорастворного) на механизм его пластической деформации: переход от однородной пластической деформации к локализованной и последующему разрушению. Для хрупких материалов степень охрупчивания может оцениваться по различным существующим методикам обработки длины, количества, морфологии трещин рядом с отпечатком, по нагрузке, приводящей к трещинообразованию, и т.д. [23—28];

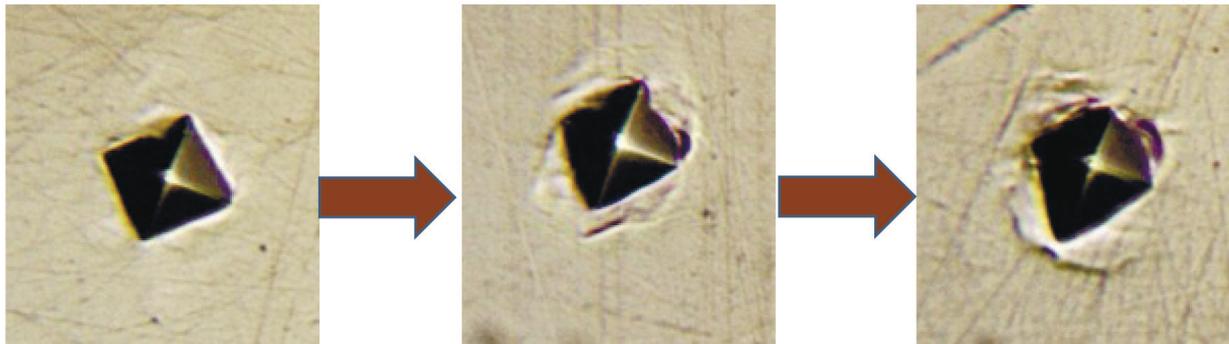


Рис. 7. Различная морфология локализованных сдвигов металла рядом с отпечатком при микроиндентировании (переход от однородной пластической деформации к локализованной).

– оценка протекания процессов старения металла. Может быть выполнена в ходе металлографического анализа структуры металла, по появлению характерных выделений на границах зерен (рис. 8) или более точно: по снижению значений микротвердости соответствующих структурных составляющих в анализируемом состоянии металла конструкции относительно базового [29].

Вышеуказанная информация может быть использована в рамках следующих работ:

1. *Выполнения входного или производственного контроля.* К примеру, проведение исследований на наружной или торцевой поверхности труб позволит формировать категории труб с повышенным металлургическим качеством, либо наоборот, выявлять продукцию с потенциально низкими механическими свойствами, металл которой целесообразно подвергнуть разрушающим испытаниям.

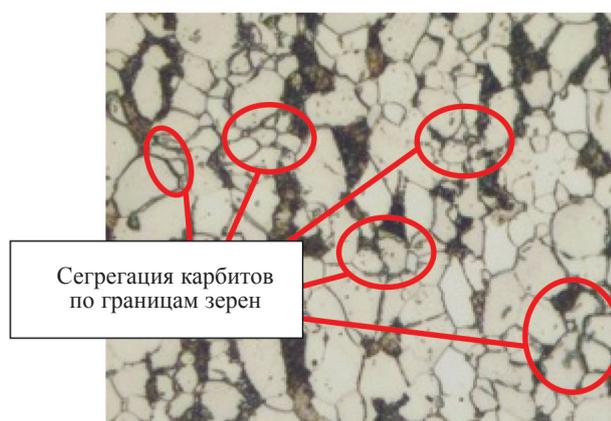


Рис. 8. Выделение карбидов по границам зерен феррита в результате старения стали 20 (увеличение  $\times 200$ ).

2. *Выполнения выборочного или капитального ремонта.* В частности, исследование состояния металла в дефектной зоне позволит обоснованно снижать коэффициенты запаса в рамках проведения расчетов на прочность и долговечность, что приведет к повышению эффективности выполнения ремонтных работ. Отдельно можно отметить перспективы ремонта трещин методом вышлифовки. В настоящее время трещины устраняются преимущественно путем вырезки, поскольку при вышлифовке в полевых условиях с использованием ручного оборудования нет возможности гарантировать полное устранение дефекта, а кроме того, нет возможности оценить состояние металла в дефектной зоне. В данном случае это является принципиально важным, поскольку зарождение трещины свидетельствует об исчерпании металлом запаса пластичности. Использование диагностического комплекса MicroLab-Z2 позволит контролировать полное устранение дефекта (посредством микроскопического анализа отполированной поверхности), а также оценить степень охрупчивания металла в зоне вышлифовки (путем выполнения микроиндентирования). Наличие различных нежелательных параметров структуры (микропор, микротрещин, закалочных структур и т.д.), а также высокая степень упрочнения и охрупчивания металла в зоне дефекта не позволит качественно отремонтировать его с использованием метода заварки. Соответственно, оценка структурно-деформационных параметров в зоне дефекта с использованием MicroLab-Z2 позволит расширить возможность использования данного метода ремонта.

3. *Выполнения экспертизы промышленной безопасности.* Предварительное установление эмпирической взаимосвязи между структурно-химическими и деформационными параметрами металла, а также его механическими свойствами, используемыми в расчетах остаточного ресурса конструкции, позволит по результатам проводимых обследований уточнить фактические механические свойства металла конструкции и вывести на качественно иной уровень достоверность прогнозирования срока ее безопасной эксплуатации.

В полевых условиях в подавляющем большинстве случаев исследования могут быть проведены только с наружной поверхности конструкции. Учитывая, что, как правило, там фиксируются максимальные напряжения, преимущественное протекание деградационных процессов и зарождение различных дефектов [30, 31], данные, полученные с поверхности (либо при анализе дефектной зоны — в зоне максимальной глубины дефекта), будут являться наиболее информативными.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как на этапе производства, так и в процессе эксплуатации ответственных металлоконструкций, оперативный контроль состояния металла является чрезвычайно важной задачей. Применение для этой цели представленного диагностического комплекса MicroLab-Z2 целесообразно, поскольку:

– обеспечивается возможность проведения оперативной неразрушающей оценки ключевых структурно-деформационных параметров металла конструкций в различных, в том числе дефектных зонах, без необходимости вывода конструкции из эксплуатации и вырезки из нее образцов;

- благодаря автоматизированному прецизионному координатному перемещению элементов, входящих в диагностический комплекс, обеспечивается высокая точность управления глубиной снимаемого слоя поверхности;
- качество подготовки поверхности, а также достоверность получаемых данных микроскопии и микроиндентирования не уступают результатам, получаемым в лабораторных условиях с применением стационарного оборудования;
- все подготовительные и исследовательские операции могут выполняться в любом пространственном положении.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лисин Ю.В. Трубы держат давление // Трубопроводный транспорт нефти. 2015. № 8. С. 5—14.
2. Мишетьян А.Р., Шабалов И.П., Чевская О.Н., Филиппов Г.А. Влияние условий трубного передела и структурного состояния на эксплуатационную надежность высокопрочных трубных сталей // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической информации. 2021. Т. 77. № 4. С. 455—463.
3. Хлыбов О.С. Прогноз и управление механическими свойствами проката методами вероятностно-моделирования // Металлург. 2020. № 4. С. 71—74.
4. Лисин Ю.В., Неганов Д.А., Суриков В.И., Гумеров К.М. Исследования изменений свойств металла трубопроводов в процессе эксплуатации: обобщение результатов и перспективные разработки Уфимской научной школы // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2017. Т. 7. № 2. С. 22—30.
5. Япчигулов Р.С., Алабердин И.Р. Изучение деградации механических свойств труб магистрального газопровода // Газовая промышленность. 2021. № 1 (811). С. 90—93.
6. Скородумов С.В., Неганов Д.А., Студёнов Е.П., Пошибаев П.В., Никитин Н.Ю. Статистический анализ результатов механических испытаний металла и труб магистральных трубопроводов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. Т. 88. № 1—1. С. 82—91.
7. Гольдштейн М.И., Фарбер В.М. Дисперсионное упрочнение стали. М.: Металлургия, 1979. 208 с.
8. Шмитт-Томас К.Г. Металловедение для машиностроения / Справочник. М.: Металлургия, 1995. 511 с.
9. Лаврентьев А.А., Ильин А.В. Трещиностойкость высокопрочных среднелегированных сталей и ее связь с характеристиками структуры металла / В сборнике: Приложение к журналу. Вестник Тамбовского университета. Сер. «Естественные и технические науки». Тамбов, 2018. С. 152—156.
10. Сыч О.В., Хлусова Е.И. Взаимосвязь параметров структуры с характеристиками работоспособности судостроительных сталей различного легирования // Вопросы материаловедения. 2020. № 4 (104). С. 17—31.
11. Гетманова М.Е., Ливанова О.В., Филиппов Г.А., Яндимиров А.А., Сухов А.В. Структурная неоднородность и вязкость разрушения колесной стали // Деформация и разрушение материалов. 2006. № 12. С. 32—37.
12. Зорин А.Е. Неразрушающая оценка механических характеристик металла ответственных конструкций на основании анализа его ключевых структурно-химических и деформационных параметров // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2023. Т.13. № 5. С. 402—410.
13. ГОСТ 9450—75 Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников.
14. Григорович В.К. Твердость и микротвердость металлов. М.: Наука, 1976. 232 с.
15. Хрущев М.М. Трение, износ и микротвердость материалов: Избранные работы. М.: КРАСАНД, 2012. 512 с.
16. Пат. 2738201 Российская Федерация СПК G01N 3/42 Портативный микротвердомер / А.Е. Зорин, С.Л. Виноградов; заявитель и патентообладатель ООО «ОМИКОН Текнолоджис»; заявл. 03.06.2020г., опубл. 09.12.2020г.
17. Зорин А.Е. Разработка портативного микротвердомера для выполнения неразрушающей оценки состояния металла газопроводов // Нефть, газ и бизнес. 2015. № 8. С. 35—38.
18. ГОСТ 1778—2022 Металлопродукция из сталей и сплавов. Металлографические методы определения неметаллических включений.
19. ГОСТ 5639—82 Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна.
20. ГОСТ 5640—2020 Сталь. Металлографический метод оценки микроструктуры проката стального плоского.
21. ГОСТ 8233—56 Сталь. Эталоны микроструктуры.
22. Зорин А.Е., Романцов А.С. Оценка охрупчивания конструкционных сталей методом микроиндентирования // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2023. Т. 89. № 9. С. 64—72.
23. Bulatov M., Shatsov A., Grigirev N., Malkov N. Strenght, crack resistance and optical loses of heat-treated silica fibers coated with non-ferrous metal // Optical Fiber Technology. 2023. V. 75. Art.103174.

24. Henry R., Le Roux N., Zacharie-Aubrun I. Indentation cracking in mono and polycrystalline cubic zirconia: Methodology of an apparent fracture toughness evaluation // *Material Science and Engineering: A*. 2022. V. 860. Art. 144261.
25. Вабищевич С.А., Вабищевич Н.В., Бринкевич Д.И. Микропрочностные свойства имплантированных монокристаллов кремния // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки*. 2012. № 12. С. 79—88.
26. Щербак Г.В., Мурашов А.А., Сметанин К.Е. Исследование анизотропии свойств режущей пластины, полученной по технологии керамической 3D-печати (LCM) из композита  $Al_2O_3/ZrO_2$  (ZTA) // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2021. Т. 87. № 11. С. 64—69.
27. Тюрин А.И., Поверина Г.В., Куприякин А.М. Влияние скорости относительной деформации на величину трещиностойкости Si и Ge при динамическом микроиндентировании // *Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки*. 2007. Т. 12. № 1. С. 84—87.
28. Lube T. Fracture Toughness Measurement // *Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses*. 2021. V. 1. P. 762—774.
29. Зорин А.Е. Разработка способа качественной оценки технического состояния металла конструкций // *Территория «НЕФТЕГАЗ»*. 2015. № 9. С. 46—50.
30. Зорин А.Е. Об особенностях накопления поврежденности металлом газопроводов в процессе эксплуатации // *Нефть, газ и бизнес*. 2012. № 7. С. 69—71.
31. Казаков Ю.В., Зорин А.Е., Зорин Н.Е. Сопrotивляемость газопроводов стресс-коррозионному разрушению // *Территория «НЕФТЕГАЗ»*. 2013. № 11. С. 46—50.

## REFERENCES

1. Lisin Yu.V. Pipes keep pressure // *Pipeline transportation of oil*. 2015. No. 8. P. 5—14.
2. Mishetyan A.R. Shabalov I.P., Chevskaya O.N., Filippov G.A. Influence of pipe conversion conditions and structural condition on operational reliability of high-strength pipe steels // *Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific and technical information*. 2021. V. 77. No. 4. P. 455—463.
3. Khlybov O.S. Prediction and control of mechanical properties of rolled products by probabilistic modeling methods // *Metallurg*. 2020. No. 4. P. 71—74.
4. Lisin Yu.V., Neganov D.A., Surikov V.I., Gumerov K.M. Studies of changes in the properties of pipeline metal during operation: generalization of results and promising developments of the Ufa Scientific school // *Science and technology of pipeline transport of oil and petroleum products*. 2017. V. 7. No. 2. P. 22—30.
5. Yarchigulov R.S., Alaberdin I.R. Studying the degradation of mechanical properties of pipes of the main gas pipeline // *Gas industry*. 2021. No. 1(811). P. 90—93.
6. Skorodumov S.V., Neganov D.A., Studenov E.P., Poshibaev P.V., Nikitin N.Yu. Statistical analysis of the results of mechanical tests of metal and pipes of main pipelines // *Factory laboratory. Diagnostics of materials*. 2022. V. 88. No. 1—1. P. 82—91.
7. Goldstein M.I., Farber V.M. Dispersion hardening of steel. M.: Metallurgy, 1979. 208 p.
8. Schmitt-Thomas K.G. Metallurgy for mechanical engineering. Handbook. M.: Metallurgy, 1995. 511 p.
9. Lavrentiev A.A., Ilyin A.V. Crack resistance of high-strength medium-alloy steels and its relation to the characteristics of the metal structure / In the collection: An appendix to the journal. *Bulletin of Tambov University. Ser. "Natural and technical sciences"* Tambov, 2018. P. 152—156.
10. Sych O.V., Khlusova E.I. Relationship of structure parameters with performance characteristics of shipbuilding steels of various alloying // *Issues of materials science*. 2020. No. 4 (104). P. 17—31.
11. Getmanova M.E., Livanova O.V., Fillipov G.A., Yandimirov A.A., Sukhov A.V. Structural heterogeneity and fracture toughness of wheel steel // *Deformation and destruction of materials*. 2006. No.12. P. 32—37.
12. Zorin A.E. Non-destructive evaluation of the mechanical characteristics of metal of critical structures based on the analysis of its key structural, chemical and deformation parameters // *Science and technology of pipeline transport of oil and petroleum products*. 2023. V.13. No. 5. P. 402—410.
13. GOST 9450—75 Measurement microhardness by indentation of diamond tips.
14. Grigorovich V.K. Hardness and microhardness of metals. M.: Nauka, 1976. 232 p.
15. Khrushchev M.M. Friction, wear and microhardness of materials: Selected works. M.: KRASAND, 2012. 512 p.
16. Pat. 2738201 Russian Federation SEC G01N 3/42 Portable microhardometer / A.E. Zorin, S.L. Vinogradov; applicant and patent holder of OMICON Technologies LLC; application 03.06.2020, publ. 09.12.2020.
17. Zorin A.E. Development of a portable microhardometer for performing non-destructive assessment of the state of metal of gas pipelines // *Oil, gas and business*. 2015. No. 8. P. 35—38.
18. GOST 1778-2022 Metal products made of steels and alloys. Metallographic methods for the determination of non-metallic inclusions.
19. GOST 5639—82 Steels and alloys. Methods for detecting and determining the grain size.
20. GOST 5640—2020 Steel. Metallographic method for evaluating the microstructure of rolled flat steel.
21. GOST 8233—56 Steel. Standards of microstructure.

22. *Zorin A.E., Romantsov A.S.* Evaluation of embrittlement of structural steels by microindentation method // *Zavodskaya lab. Diagnostics of materials*. 2023. V. 89. No. 9. P. 64—72.
23. *Bulatov M., Shatsov A., Grigirev N., Malkov N.* Strength, crack resistance and optical losses of heat-treated silica fibers coated with non-ferrous metal // *Optical Fiber Technology*. V. 75. 2023. Art.103174.
24. *Henry R., Le Roux N., Zacharie-Aubrun I.* Indentation cracking in mono and polycrystalline cubic zirconia: Methodology of an apparent fracture toughness evaluation // *Material Science and Engineering: A*. V. 860. 2022. Art. 144261.
25. *Vabishevich S.A., Vabishevich N.V., Brinkevich D.I.* Microproof properties of implanted silicon single crystals // *Bulletin of the Polotsk State University. Series C. Fundamental Sciences*. 2012. No.12. P. 79—88.
26. *Shcherbak G.V., Murashov A.A., Smetanin K.E.* Investigation of the anisotropy of the properties of a cutting plate obtained using ceramic 3D printing (LCM) technology from an Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZrO<sub>2</sub> composite (ZTA) // *Factory Laboratory. Diagnostics of materials*. 2021. V. 87. No. 11. P. 64—69.
27. *Tyurin A.I., Povinova G.V., Kupriyakin A.M.* The influence of the relative deformation rate on the crack resistance of Si and Ge during dynamic microindentation // *Bulletin of the Tambov University. Series: Natural and Technical Sciences*. 2007. V.12. No.1. P. 84—87.
28. *Lube T.* Fracture Toughness Measurement // *Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses*. 2021. V. 1. P. 762—774.
29. *Zorin A.E.* Development of a method for qualitative assessment of the technical condition of metal structures // *The territory of NEFTEGAZ*. 2015. No. 9. P. 46—50.
30. *Zorin A.E.* On the features of accumulation of metal damage to gas pipelines during operation // *Oil, gas and business*. 2012. No. 7. P. 69—71.
31. *Kazakov Yu.V., Zorin A.E., Zorin N.E.* Resistance of gas pipelines to stress-corrosion destruction // *The territory of NEFTEGAZ*. 2013. No. 11. P. 46—50.
-

**ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ ПОД РУКОВОДСТВОМ ОТДЕЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК РАН**

Главный редактор Костин В.Н. — д.т.н., ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, Россия

**Редакционный совет**

- Добман Герд — доктор, Фраунгоферовский институт, Саарбрюкен, Германия
- Клюев В.В. — академик РАН, МНПО “Спектр”, Москва, Россия
- Курмаев Э.З. — д.ф.-м.н., ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, Россия
- Новиков В.А. — д.т.н., БРУ, Могилев, Беларусь

**Редакционная коллегия**

- Смородинский Я.Г. — д.т.н., зам. гл. редактора, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, Россия
- Василенко О.Н. — к.т.н., отв. секретарь, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, Россия
- Арнольд В.К. — профессор, Саарский университет, Саарбрюкен, Германия
- Вавилов В.П. — д.т.н., ТПУ, Томск, Россия
- Вайнштейн И.А. — д.ф.-м.н., УрФУ, Екатеринбург, Россия
- Галахов В.Р. — д.ф.-м.н., ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, Россия
- Грум Янец — профессор, Университет Любляны, Словения
- Дымкин Г.Я. — д.т.н., ЛИИЖТ, Санкт-Петербург, Россия
- Жанг Х. — профессор, Харбинский институт технологий, Харбин, КНР
- Зацепин А.Ф. — к.т.н., УрФУ, Екатеринбург, Россия
- Крёнинг М.В. — профессор, Саарский университет, Саарбрюкен, Германия,  
профессор, университет Сан-Пауло, Бразилия
- Малдаг К. — профессор, университет Лавалья, Квебек, Канада
- Муравьев В.В. — д.т.н., ИжГТУ, Ижевск, Россия
- Ничипурук А.П. — д.т.н., ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, Россия
- Поволоцкая А.М. — к.т.н., ИМАШ УрО РАН, Екатеринбург, Россия
- Ринкевич А. Б. — член-корр. РАН, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, Россия
- Смирнов С.В. — д.т.н., ИМАШ УрО РАН, Екатеринбург, Россия
- Сясько В.А. — д.т.н., СПГУ, Санкт-Петербург

---

Адрес редакции: 620108, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18  
Телефоны: (343) 374-05-54; 378-36-02  
e-mail: defect@imp.uran.ru  
Сайт журнала: <http://defectoskopiya.ru>

Свидетельство о регистрации средства массовой информации  
ПИ № ФС77-79412 от 02 ноября 2020 г., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи,  
информационных технологий и массовых коммуникаций

---

Подписано в печать 08.04.2024 г.	Дата выхода в свет 2024 г.	Формат 60×88 1/8
Бум. писчая № 1	Гарнитура Таймс	Печать цифровая
Усл. печ. л.		Уч.-изд. л.
Цена договорная	Дополнительный тираж экз.	Заказ №

---

**УЧРЕДИТЕЛИ: РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
УРАЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РАН  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ МЕТАЛЛОВ УрО РАН**

---

Издатель: Российская академия наук, 119991 Москва, Ленинский просп., 14  
Исполнитель: ФГБУ «Издательство «Наука»:  
121099, г. Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1.  
Отпечатано в ФГБУ «Издательство «Наука»:  
121099, г. Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1.

**16+**