



ISSN 0130-3082

Российская Академия наук

Дефектоскопия



Неразрушающий контроль

Техническая диагностика

Анализ материалов

№ 11

2023



ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Журнал ежемесячный
Основан в феврале 1965 года
Екатеринбург

№ 11
2023

СОДЕРЖАНИЕ

Электромагнитные методы

- А.Н. Мушников, А.М. Поволоцкая, С.М. Задворкин, Л.С. Горулева, Е.А. Путилова.** Влияние упругопластического деформирования по схеме двухосного растяжения на магнитные характеристики никеля 3

Контроль проникающими веществами

- И.И. Кудинов, А.Н. Головков, В.В. Вахов, Д.С. Скоробогатько, А.С. Генералов.** Новый взгляд на контролепригодность деталей сложной геометрии при проведении капиллярного контроля 17

Оптические методы

- Чандан Кумар, Аджай Кумар Синха.** Автоматический контроль дефектов и веб-приложение средствами методов обработки изображений в бетонных конструкциях 31

По материалам XXXIV Уральской конференции «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)»

- В.А. Быченко, П.В. Серый, Д.Р. Фирюлин, И.Ю. Кинжагулов, И.В. Беркутов, И.Е. Алифанова.** Экспериментальные исследования изменения акустических свойств сферопластиков 48

- А.Е. Горбунов, А.Е. Ивкин, П.В. Соломенчук.** Тангенциальный вихретоковый преобразователь для контроля нахлесточных паяных соединений токоведущих шин электрических машин 54

- А.В. Катташева, Р.К. Вагапов, И.А. Ридель, Д.С. Кирпиченко, О.Ю. Манихин.** Опыт применения роликового многоэлементного преобразователя на фазированных решетках для оценки толщины стенки трубопровода 57

- К.Р. Муратов, И.А. Шаропина, И.С. Бевзюк, Р.А. Соколов, В.В. Проботюк.** Модель влияния дефекта каната на спектр его свободных поперечных колебаний 60

- С.П. Шляхтенков, С.А. Бехер.** Оценка влияния мешающих факторов на измерение глубины поверхностных трещин рельсов при ручном вихретоковом контроле 63

- Информация 66

ВЛИЯНИЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПО СХЕМЕ ДВУХОСНОГО РАСТЯЖЕНИЯ НА МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НИКЕЛЯ

© 2023 г. А.Н. Мушников^{1,*}, А.М. Поволоцкая^{1,2,**}, С.М. Задворкин^{1,***}, Л.С. Горюлева^{1,****},
Е.А. Путилова^{1,*****}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения
им. Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук, Россия 620049 Екатеринбург,
ул. Комсомольская, 34

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов
им. М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, Россия 620108 Екатеринбург,
ул. Софьи Ковалевской, 18

E-mail: *mushnikov@imach.uran.ru; **anna.povolotskaya.68@mail.ru; ***zadvorkin@imach.uran.ru;
****sherlarisa@yandex.ru; *****tuevaevgenya@mail.ru

Поступила в редакцию 28.07.2023; после доработки 25.09.2023

Принята к публикации 26.09.2023

Исследования проведены на испытательном стенде на базе созданной в ИМАШ УрО РАН оригинальной двухосной испытательной машины, предназначенной для определения физических свойств материалов в процессе упругопластического деформирования независимо по двум осям. Конечноэлементное моделирование напряженно-деформированного состояния крестообразного никелевого образца показало, что в центральной части при симметричном двухосном растяжении эквивалентные напряжения по Мизесу распределены равномерно. Результаты микроструктурных исследований указывают на то, что при двухосном деформировании при комнатной температуре в материале прошла динамическая рекристаллизация. Приведены результаты изучения закономерностей изменения гистерезисных магнитных характеристик, магнитострикции, параметров магнитных шумов Баркгаузена и электромагнитных параметров никеля при двухосном симметричном растяжении. Установлена однозначная связь коэрцитивной силы с эквивалентными напряжениями в области пластической деформации. Показано, что такие магнитные параметры, как максимум дифференциальной магнитной проницаемости и максимальная магнитная проницаемость, а также амплитуда и частота вихревого сигнала, определенного на частоте 10 кГц, демонстрируют монотонный характер изменения с ростом эквивалентных напряжений как при упругой, так и при пластической деформации.

Ключевые слова: упругопластическая деформация, никель, двухосное симметричное растяжение, коэрцитивная сила, магнитострикция.

EFFECT OF ELASTIC-PLASTIC DEFORMATION BY BIAXIAL TENSION ON THE MAGNETIC CHARACTERISTICS OF THE NICKEL

A.N. Mushnikov^{1,*}, A.M. Povolotskaya^{1,2,**}, S.M. Zadvorkin^{1,***}, L.S. Goruleva^{1,****},
E.A. Putilova^{1,*****}

¹Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

²M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg,
Russia

E-mail: *mushnikov@imach.uran.ru; **anna.povolotskaya.68@mail.ru; ***zadvorkin@imach.uran.ru,
****sherlarisa@yandex.ru, *****tuevaevgenya@mail.ru

The studies were carried out in a test facility based on the original biaxial testing machine created at the IES UB RAS, designed to determine the physical properties of materials during elastic-plastic deformation independently along two axes. Finite element modeling of the stress-strain state of a cruciform nickel specimen has shown that, under symmetric biaxial tension, equivalent von Mises stresses are uniformly distributed in the central part. The results of microstructural studies indicate that dynamic recrystallization takes place in the material during biaxial deformation at room temperature. The results of studying the behavior of the hysteretic magnetic characteristics, magnetostriction, Barkhausen magnetic noise parameters, and electromagnetic parameters of nickel under biaxial symmetrical tension have been presented. A unique relationship between the coercive force and equivalent stresses in the region of plastic deformation has been revealed. It has been shown that such magnetic parameters as maximum magnetic permeability and the maximum in the field dependence of differential magnetic permeability, as well as the amplitude and frequency of the eddy current signal determined at a frequency of 10 kHz, vary monotonically with increasing equivalent stresses under both elastic and plastic deformations.

Keywords: elastic-plastic deformation, nickel, symmetric biaxial tension, coercive force, magnetostriction.

DOI: 10.31857/S0130308223110015, **EDN:** XASYDY

ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных задач неразрушающего контроля является разработка надежных методов определения напряженно-деформированного состояния ферромагнитных объектов. При этом активное применение находят магнитные виды контроля, основой для использования которых служат установленные взаимосвязи между магнитными свойствами ферромагнетиков и параметрами их напряженного состояния. Проблематике оценки напряженно-деформированного состояния объектов из ферромагнитных материалов с помощью неразрушающих магнитных методов контроля посвящено множество работ российских и зарубежных авторов, отметим только некоторые из них [1—13]. Однако практически во всех перечисленных выше литературных источниках исследования ограничиваются теоретическим и экспериментальным изучением закономерностей изменения магнитных свойств различных ферромагнитных материалов от параметров их напряженного состояния в условиях одноосного нагружения в упругой или пластической областях деформаций. В то же время на практике чаще всего встречаются металлические конструкции, работающие в условиях сложного нагружения, и для них, как правило, присущи двухосные и трехосные напряженные состояния. Вопросы же влияния сложного нагруженного состояния, например, двухосного нагружения, на магнитные свойства ферромагнитных материалов в литературе освещены недостаточно полно, можно привести лишь несколько работ [14—24]. Следует отметить, что в данных работах также рассмотрены испытательные машины, позволяющие реализовать в образцах плоское напряженное состояние.

В ИМАШ УрО РАН создана оригинальная экспериментальная установка для двухосного деформирования, с помощью которой, ввиду отсутствия ферромагнитных деталей в рабочей зоне, возможно проводить испытания по схемам двухосного растяжения и сжатия. Установка позволяет осуществлять измерения как магнитных характеристик ферромагнитных материалов, так и других физических свойств. Подробное описание разработанной установки дано в работе [25]. Кроме того, в [25] приведены полученные с использованием данной установки результаты тестового эксперимента по определению закономерностей изменения коэрцитивной силы конструкционной стали 12Г2С в процессе упругого двухосного симметричного деформирования.

Как известно, магнитострикция железа и сплавов на его основе, характеризующаяся константами разного знака (положительной λ_{100} и отрицательной λ_{111}), при изменении приложенных магнитного поля и напряжений меняет не только величину, но может изменить и свой знак (см., например, [26]). Соответственно меняется и знак магнитоупругого вклада во внутреннюю энергию материала [27]. Данные обстоятельства влияют на распределение магнитных моментов в этих материалах, а именно, меняются условия формирования магнитной текстуры, следствием чего является немонотонность зависимостей магнитных характеристик данных материалов от растягивающих напряжений в упругой области [28], представляющей наибольший интерес с точки зрения эксплуатационных нагрузок. Неоднозначные зависимости магнитных параметров от приложенной растягивающей нагрузки в упругой области усложняют процесс корректного анализа получаемых результатов даже в простом случае одноосного нагружения, решение же задачи в условиях двухосного деформирования представляется еще более затруднительным.

Отличительной особенностью никеля, по сравнению с железом, является постоянство знака его магнитострикции. Знак магнитострикции никеля отрицательный и не зависит ни от величины напряженности магнитного поля, ни от приложенных механических напряжений [27]. Этот факт обуславливает рассмотрение никеля в качестве модельного материала для исследования влияния параметров плоского напряженного состояния на магнитные свойства ферромагнетиков.

Экспериментальные результаты по изучению характера поведения магнитных и магнитострикционных характеристик никеля при действии одноосных напряжений представлены в работах [29—31]. Однако публикаций, содержащих сведения о магнитоупругом поведении никеля при двухосном симметричном растяжении, авторами обнаружено не было.

В связи с этим, настоящая работа направлена на изучение влияния двухосного симметричного растяжения на изменение магнитных, электромагнитных и магнитострикционных характеристик никеля.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследования служил никель марки Н2 со следующим химическим составом, определенным на оптическом эмиссионном спектрометре SPECTROMAXx: С — 0,053 мас. %, Si — 0,026 мас. %, Mn — 0,009 мас. %, W — 0,101 мас. %, Ni — остальное. Для исследований из листо-

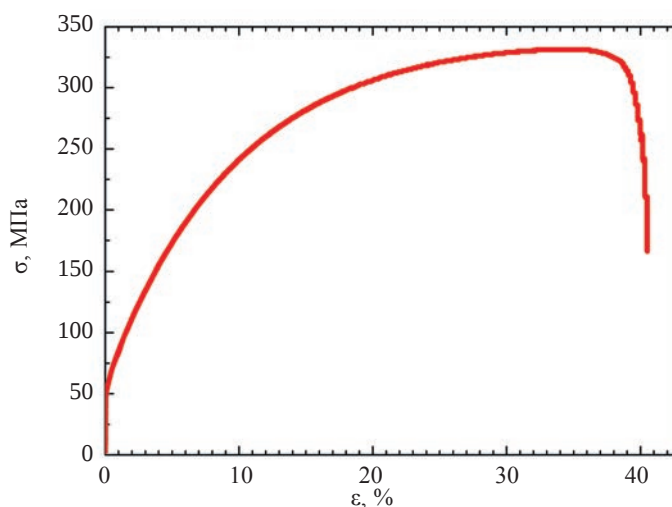


Рис. 1. Диаграмма «напряжение—деформация» никеля.

вого проката толщиной 6,15 мм был вырезан крестообразный образец. Для формирования рабочей зоны образца в центральной части креста были сделаны выборки круговой формы диаметром 40 мм и глубиной 1,15 мм с обеих сторон так, что толщина образца в центральной зоне составляла 3,85 мм. Образец отожгли в вакууме 2 ч при 750 °С с охлаждением в печи.

Для определения механических свойств материала был дополнительно изготовлен разрывной образец-свидетель, отожженный вместе с крестообразным образцом. На нем были проведены испытания в соответствии с ГОСТ 1497—84 на гидравлической испытательной машине Tinius Olsen Super L-60. Диаграмма деформирования представлена на рис. 1. Условный предел текучести исследованного материала равен 50 МПа, временное сопротивление — 330 МПа, относительное удлинение при разрыве — 40 %.

Основной цикл экспериментов с двухосным деформированием проводили на оригинальной двухосной испытательной машине [25]. В рабочей зоне испытательной машины отсутствуют элементы из ферромагнитных материалов, которые могли бы вносить искажения в результаты магнитных измерений.

Фотография испытуемого образца представлена на рис. 2. На образец был наклеен трафарет с целью обеспечения единообразного размещения намагничивающих и измерительных устройств в заранее определенных положениях.

Микроструктурные исследования проводили на образцах в исходном отожженном состоянии и после пластической деформации. Исследования проводили при помощи оптического микроскопа Neophot-21 и сканирующего микроскопа Tescan VEGA II XMU, оснащенного системой дифракционного (EBSD) анализа Advanced AZtecHKL. Подготовку образцов осуществляли посредством шлифовки на алмазных пастах разной дисперсности, последующей полировки на коллоидной кремниевой суспензии и окончательной полировки при помощи установки ионной полировки и травления Linda. Анализ EBSD-карт проводили с использованием программного обеспечения CHANNEL 5.

Рентгеноструктурные исследования осуществляли с помощью дифрактометра SHIMADZU XRD 7000 с использованием монохроматизированного K_{α} -излучения хромового анода на тех же образцах, что и микроструктурные исследования, т.е. образцах, соответствующих исходному состоянию и после снятия максимальной нагрузки. Макронапряжения определяли стандартизованным методом наклонной съемки (метод « $\sin^2\psi$ ») [32]. В ходе аттестации получено, что для исходного состояния образца характерны сжимающие макронапряжения, равные –120 МПа.

Для измерения петель магнитного гистерезиса и начальной кривой намагничивания, из которых в дальнейшем определяли коэрцитивную силу, максимальную относительную магнитную проницаемость и дифференциальную магнитную проницаемость, использовали П-образный электромагнит с измерительными катушками напряженности магнитного поля и магнитной индукции (ПМУ). Полюса электромагнита имели сечение 18×9 мм, межполюсное расстояние составляло 16 мм. Указанные габариты позволяли устанавливать ПМУ в круговой выборке образца и обе-

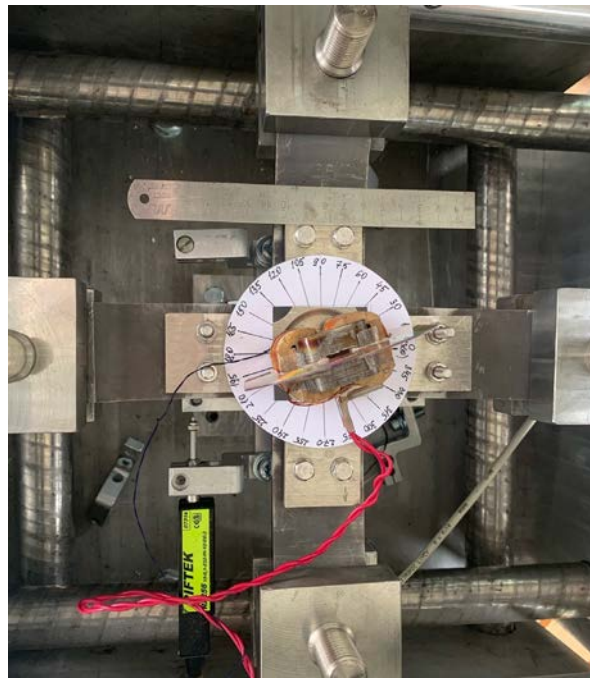


Рис. 2. Крестообразный образец с ПМУ в испытательной машине.

спечивали его промагничивание по всей толщине. Намагничивающая и измерительные катушки ПМУ были подключены к источнику стабилизированного постоянного тока и флюксометрам EF-5 магнитноизмерительного комплекса REMAGRAPH C-500. Частота изменения магнитного поля составляла 0,03 Гц. Нагружение проводили ступенчато (величины нагрузки и соответствующие им напряжения и деформации указаны в следующем разделе), при этом на каждом этапе нагружения гистерезисные магнитные свойства образца определяли, варьируя угол поворота ПМУ α от 0 до 360° с шагом 15°. Использовали следующую систему координат: углом α поворота ПМУ 0 и 180° соответствовало направление оси x , углом 90 и 270° — направление оси y . Оси x и y являлись осями приложения нагрузки. Принятая система координат и расположение ПМУ на образце схематично показаны на рис. 3.

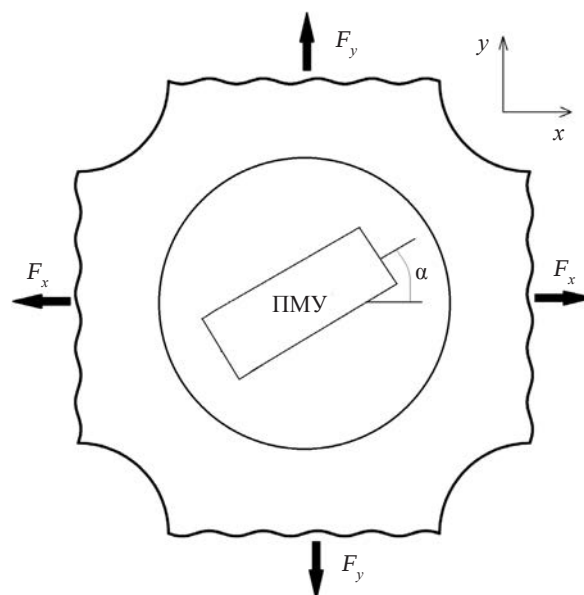


Рис. 3. Выбранная система координат и схема установки приставного магнитного устройства в рабочей зоне образца под углом α к оси x .

Тензорезисторы марки BF-3АА номинальным сопротивлением 350 Ом для измерений магнитострикции λ_x и λ_y (соответственно вдоль осей x и y) наклеивали с противоположной, по отношению к ПМУ, стороне круговой выборки в центральной части образца. Намагничивание образца при измерении магнитострикции осуществляли с помощью ПМУ, которым измеряли магнитные характеристики в квазистатическом магнитном поле H . Тензорезисторы включали в мостовую схему Уинстона с термокомпенсацией. Измерения величин λ_x и λ_y осуществляли на каждом этапе нагружения образца и при каждом повороте ПМУ на угол α к оси x , который варьировали в диапазоне от 0 до 360° с шагом 15°. Сигнал рассогласования мостовой схемы регистрировали с помощью разработанного в ИМАШ УрО РАН измерителя слабых токов [33].

При помощи анализатора Rollscan 300 определяли параметры магнитных шумов Баркгаузена — среднеквадратичные значения напряжения RMS и число скачков Баркгаузена N в переменном магнитном поле. Сечение полюсов анализатора составляло 3,5×8,0 мм, межполюсное расстояние — 3 мм. Амплитуду напряжения питания ПМУ анализатора Rollscan 300 (5 В) и частоту тока перемагничивания (95 Гц) подбирали так, чтобы обеспечить получение максимального сигнала при перемагничивании. Глубина промагничивания на частоте 95 Гц составляла примерно 2 мм. Параметры магнитных шумов Баркгаузена также определяли на каждом шаге нагружения образца при повороте ПМУ против часовой стрелки от 0 до 360° с шагом 15° с усреднением по 10 измерениям.

Для исследований материала методом вихревых токов использовали вихретоковый дефектоскоп «Вектор» производства НПЦ «КРОПУС», оснащенный дифференциальным преобразователем ВТ-4.03. Параметры вихретокового сигнала (амплитуду A и фазовый угол φ) определяли как среднее арифметическое по пяти измерениям на частотах 10 и 50 кГц. При измерениях на данных частотах толщина анализируемого слоя составила 0,2 и 0,1 мм соответственно.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

С помощью программного пакета COMSOL Multiphysics было выполнено конечноэлементное моделирование напряженно-деформированного состояния крестообразного никелевого образца. Результаты моделирования при максимальной нагрузке приведены на рис. 4. Из рис. 4а следует, что в зоне круговой выборки в центральной части образца при симметричном двухосном растяжении эквивалентные напряжения по Мизесу [34] близки к максимальным значениям и распределены по выборке равномерно.

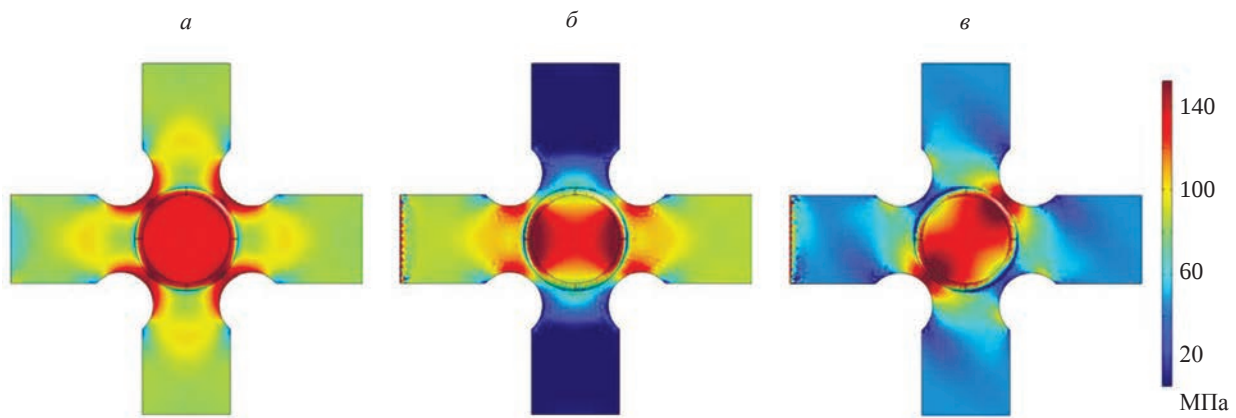


Рис. 4. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу (а), нормальных напряжений вдоль оси x (б) и под углом 45° (в) при симметричном двухосном растяжении.

Деформационные зависимости магнитных характеристик неинвариантны — они связаны с направлением внешнего магнитного поля [35], поэтому имеет смысл рассматривать отдельные компоненты тензора напряжений, в особенности нормальные напряжения в направлении магнитных измерений. На рис. 4б показано распределение нормальных напряжений σ_x для горизонтального направления оси x . Распределение напряжений σ_x в случае поворота системы координат на 45° представлено на рис. 4в. В обоих случаях в центре круговой выборки значения нормальных напряжений близки к 120 МПа.

Таблица 1

Величины нагрузки и соответствующие ей эквивалентные напряжения и деформация на каждом шаге нагружения

№ шага нагружения	Нагрузка по каждой из осей, кН	Эквивалентные напряжения $\sigma_{\text{экв}}$, МПа	Деформация, %
1	0	0	0
2	2,4	16	0,02
3	4,8	32	0,04
4	7,4	50	0,06
5	9,4	64	0,10
6	11,8	80	0,80
7	13,9	94	1,37
8	15,7	106	1,75
9	17,5	120	2,32
10	0 (после снятия нагрузки 17,5 кН)	0	2,13 (остаточная деформация)

В табл. 1 представлены величина нагрузки на каждом шаге нагружения, а также соответствующие ей значения интенсивности напряжений и деформации. Шаги нагружения с 1-го по 4-й отвечают упругой области нагружения, с 5-го шага по 9-й — стадии пластической деформации.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

1. Исследование микроструктуры никеля в исходном и деформированном состоянии

На рис. 5 представлены полученные при помощи оптической микроскопии структуры исследуемых образцов никеля в исходном состоянии и после двухосного деформирования. Как в исходном состоянии, так и после деформации наблюдается разноразмерная структура с зернами полиэдрической формы. Из рис. 5а видно, что в исходном отожженном состоянии помимо большеугловых границ заметны другие элементы структуры. Эти элементы можно трактовать как фрагменты межзеренных границ в исследуемом металле, сформированные до проведения отжига. Из сравнения рис. 5а и 5б видно, что количество этих структурных элементов после деформации значительно уменьшается, что может свидетельствовать о протекании в материале динамической рекристаллизации даже при комнатной температуре [36, 37]. Как видно из рис. 5б, произошла миграция границ зерен, взаимодействие дефектов с этой границей, что привело к укрупнению зерен и формированию зерен с более совершенной формой. Границы зерен приобретают более низкоэнергетическую конфигурацию, что выражается в наличии большого количества тройных стыков границ зерен под углом 120° .

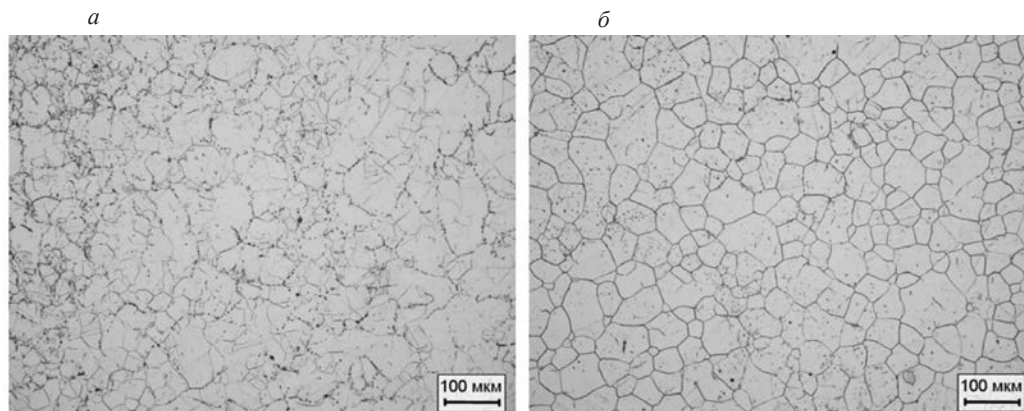


Рис. 5. Микроструктура исследуемых образцов никеля в исходном состоянии (а) и после двухосного деформирования (б).

Анализ обратных полюсных фигур никеля в исходном состоянии (рис. 6а) показывает, что параллельно плоскости образца ориентированы преимущественно плоскости $\{112\}$, вдоль оси y — оси $\langle 111 \rangle$, вдоль оси x — оси $\langle 110 \rangle$ и $\langle 302 \rangle$. Таким образом, для исследованного материала в отожженном состоянии характерна текстура типа $\{112\}\langle 111 \rangle$, что соответствует одному из типов текстуры прокатки ГЦК-металла [38]. Это также свидетельствует о неполноте прошедшей рекристаллизации в процессе отжига.

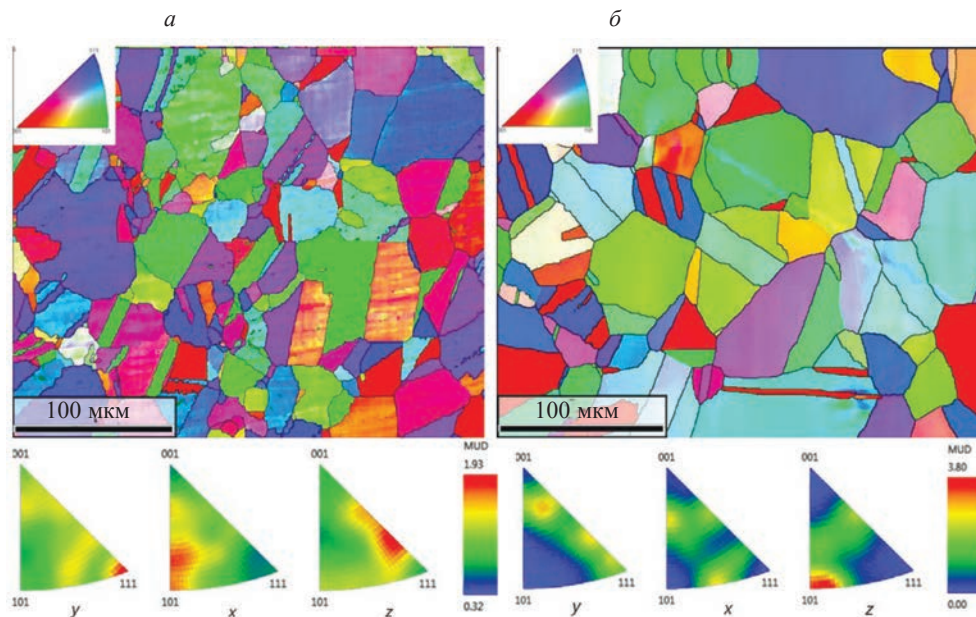


Рис. 6. EBSD-карты разориентировок и обратные полюсные фигуры для образцов никеля в исходном состоянии (а) и после двухосного симметричного растяжения (б).

После пластической деформации текстурное состояние образца изменилось (рис. 6б): параллельно плоскости образца ориентированы преимущественно плоскости $\{110\}$, вдоль оси x — оси $\langle 212 \rangle$ и $\langle 102 \rangle$, вдоль оси y — оси $\langle 112 \rangle$, $\langle 335 \rangle$ и $\langle 216 \rangle$. Смена типа текстуры может быть признаком динамической рекристаллизации.

По результатам рентгеноструктурного анализа было установлено, что макронапряжения сжатия, характеризующие среднее значение остаточных напряжений, после двухосного пластического деформирования увеличиваются по модулю примерно в 2 раза, причем вдоль обеих осей растяжения.

2. Влияние симметричного двухосного растяжения на магнитные и магнитострикционные характеристики при перемагничивании в постоянном поле

На рис. 7 в качестве примера представлены фрагменты предельных петель магнитного гистерезиса никелевого образца, измеренные в направлении $\alpha = 0$ в исходном состоянии и при упругопластическом двухосном симметричном растяжении. Можно отметить, что во всем интервале исследованных напряжений с ростом нагрузки форма петли магнитного гистерезиса становится более пологой, причем наиболее существенные изменения в форме петель магнитного гистерезиса происходят в упругой области, в пластической области с ростом приложенных напряжений форма петель изменяется слабо.

На рис. 8 и 9 представлены полярные диаграммы значений коэрцитивной силы H_c и максимальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{макс}}$, полученных на каждом шаге упругопластического двухосного симметричного растяжения, а также после снятия деформирующей нагрузки, при различных углах поворота ПМУ α .

В исходном состоянии и на начальном этапе нагружения, соответствующем упругой области деформации, наблюдается анизотропия коэрцитивной силы (кривые 1—4 на рис. 8а). Ее значения максимальны при $\alpha = 45^\circ$ вследствие особенности распределения остаточных напряжений в исход-

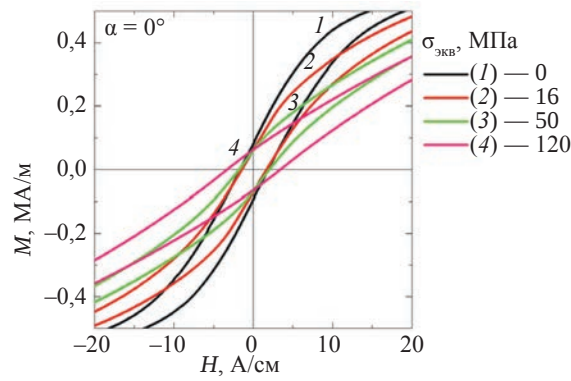


Рис. 7. Фрагменты петель магнитного гистерезиса никелевого образца при упругопластическом двухосном симметричном растяжении.

ном состоянии. Известно [30], что оси легкого намагничивания никеля соответствуют направлениям типа $\langle 111 \rangle$. Из рис. 6а видно, что в исходном состоянии преимущественная кристаллографическая ориентировка $\langle 111 \rangle$ как раз характерна для оси растяжения y . Вдоль оси x преимущественной кристаллографической ориентировкой является направление $\langle 101 \rangle$, намагничивание в направлении которого происходит труднее. При упругой деформации происходит уменьшение величины коэрцитивной силы во всех направлениях, средняя ее величина по сравнению с исходным состоянием снижается примерно на 8 %.

На этапе пластической деформации коэрцитивная сила монотонно возрастает вследствие роста плотности дефектов. Ее величина относительно исходного состояния увеличивается примерно в 1,9 раза. Кроме того, по мере роста нагрузки анизотропия коэрцитивной силы, характерная для области упругой деформации, практически исчезает. Таким образом, поведение коэрцитивной силы соответствует равномерному распределению эквивалентных напряжений в зоне измерений коэрцитивной силы. Необходимо еще раз отметить, что двухосное пластическое растяжение приводит к изменению текстурного состояния исследованного материала, причем вдоль координатных осей x и y отсутствуют преимущественные ориентации осей легкого намагничивания $\langle 111 \rangle$, осей трудного намагничивания $\langle 100 \rangle$ и «промежуточных» осей $\langle 110 \rangle$ (см. рис. 6б).

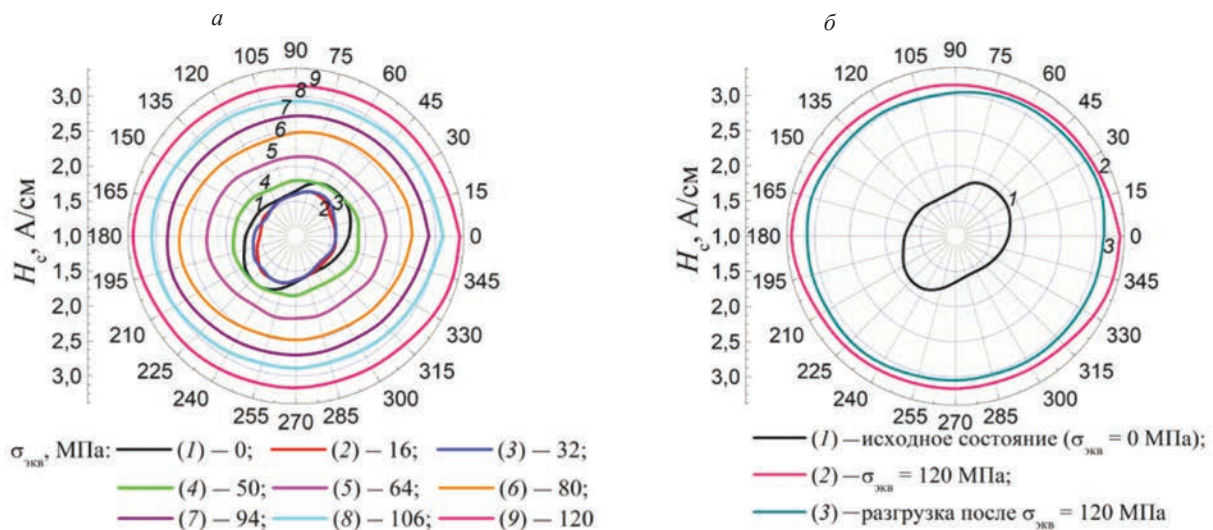


Рис. 8. Полярные диаграммы значений коэрцитивной силы образца при упругопластическом двухосном симметричном растяжении: при различных величинах эквивалентных напряжений (а); в исходном состоянии, при максимальной растягивающей нагрузке и после снятия нагрузки (б).

Как видно из рис. 8б, коэрцитивная сила пластически деформированного образца после снятия нагрузки лишь незначительно снижается по сравнению с H_c при максимальной нагрузке. Это обусловлено существенным, по сравнению с исходным состоянием, увеличением уровня остаточных напряжений в образце после пластической деформации и равномерным их распределением в центральной зоне образца.

В отличие от коэрцитивной силы, величины максимальной относительной магнитной проницаемости $\mu_{\text{макс}}$ демонстрируют однозначную зависимость от приложенных напряжений во всем диапазоне их изменения (рис. 9а). Средняя величина этой характеристики при максимальной исследованной степени пластической деформации относительно ненагруженного состояния уменьшается более, чем в два раза. Можно предположить, что на $\mu_{\text{макс}}$ значительное влияние оказывают величины нормальных и касательных напряжений, их распределение в зоне определения магнитных характеристик и в гораздо меньшей степени сказываются инвариантные характеристики напряженного состояния. Величина максимальной магнитной проницаемости образца после снятия нагрузки по сравнению с аналогичной величиной при максимальной нагрузке немного уменьшается (см. рис. 9б).

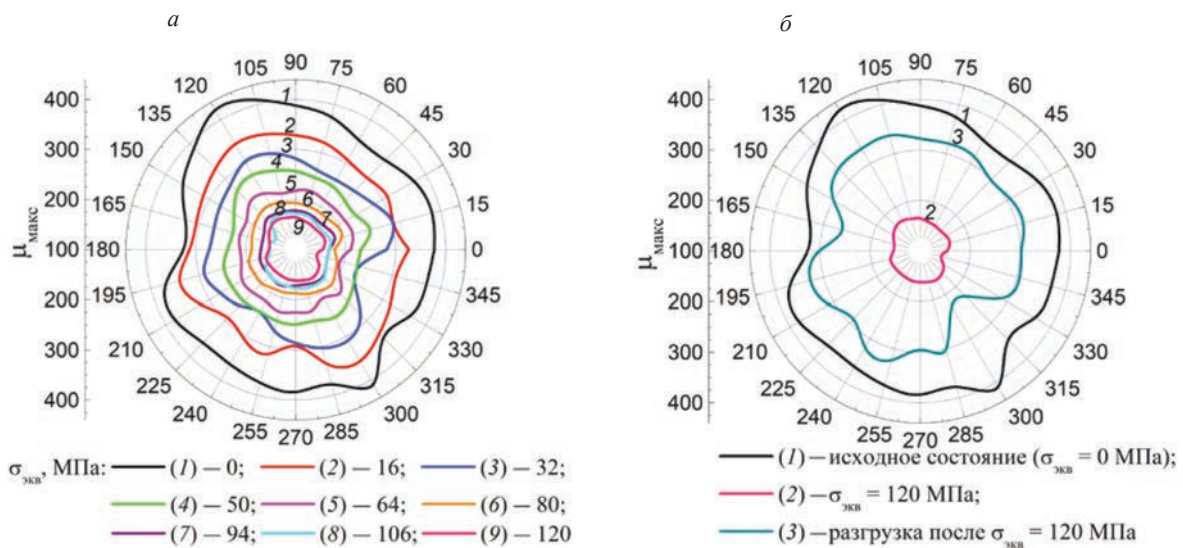


Рис. 9. Полярные диаграммы значений максимальной магнитной проницаемости образца при упругопластическом двухосном симметричном растяжении: при различных величинах эквивалентных напряжений (а); в исходном состоянии, при максимальной растягивающей нагрузке и после снятия нагрузки (б).

Анализ изменений полевых зависимостей дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{диф}}(H)$ (рис. 10а), полученных при двухосном симметричном растяжении материала и ориентации магнитного поля вдоль оси x (т.е. $\alpha = 0^\circ$), показал, что как в упругой, так и в пластической областях деформаций по мере увеличения нагрузки максимум дифференциальной магнитной проницаемости, формируемый в отрицательных полях, уменьшается по величине. При этом в упругой области расположение данного максимума наблюдается в меньших по абсолютной величине магнитных полях, а в области пластической деформации расположение максимума смещается в сторону больших значений напряженности магнитного поля. Монотонное изменение высоты пиков $\mu_{\text{диф макс}}$ с ростом эквивалентных напряжений более наглядно показано на рис. 10б. Кроме того, как видно из рис. 10а, на кривых $\mu_{\text{диф}}(H)$, соответствующих стадии пластической деформации (кривые 5—9), в положительных полях начинает формироваться второй пик, который с ростом степени пластической деформации становится более выраженным.

Исследования полевых зависимостей магнитострикции крестообразного никелевого образца под действием упругопластического двухосного симметричного деформирования в направлениях осей нагружения (λ_x и λ_y) проводили при различных углах α (от 0 до 360° с шагом 15°) и при различных величинах эквивалентных напряжений. В качестве примера на рис. 11 представлены экспериментальные кривые λ_x и λ_y , полученные при $\alpha = 90^\circ$.

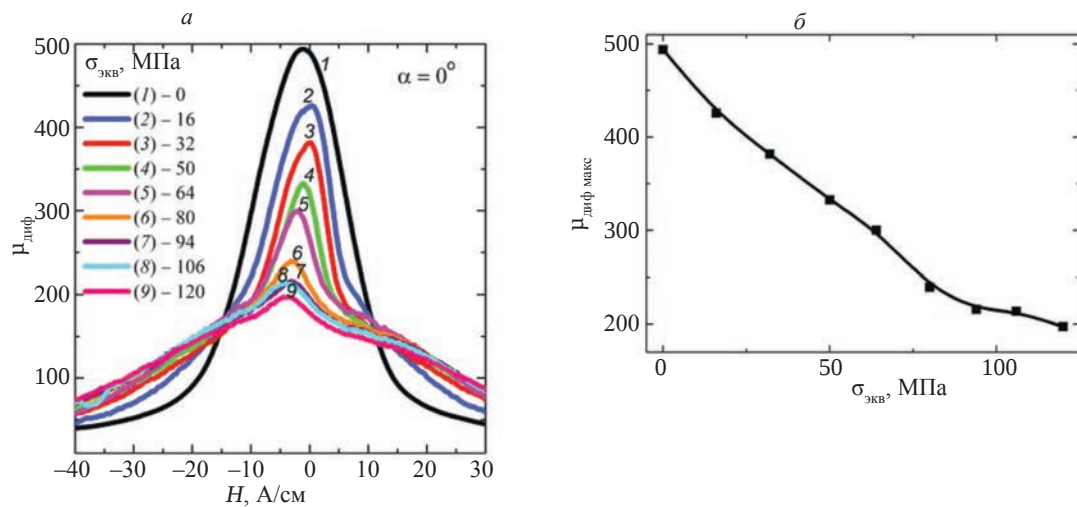


Рис. 10. Полевые зависимости дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{диф}}(H)$ при различных величинах эквивалентных напряжений (а); зависимость максимумов дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{диф макс}}$ от величины эквивалентных напряжений (б). Угол α равен 0° .

Полевые зависимости магнитострикции на рис. 11 имеют вид, характерный для материалов с отрицательной магнитострикцией: во всем диапазоне изменения напряженности магнитного поля значения λ_x и λ_y отрицательны и увеличиваются по модулю по мере увеличения H . В области слабых магнитных полей, где в основном преобладают процессы смещения доменных границ, представленные на рис. 11 кривые 2—9, соответствующие измерениям магнитострикции образца под действием растягивающей нагрузки, более пологие в сравнении с кривыми 1, соответствующими измерениям магнитострикции образца в исходном ненагруженном состоянии.

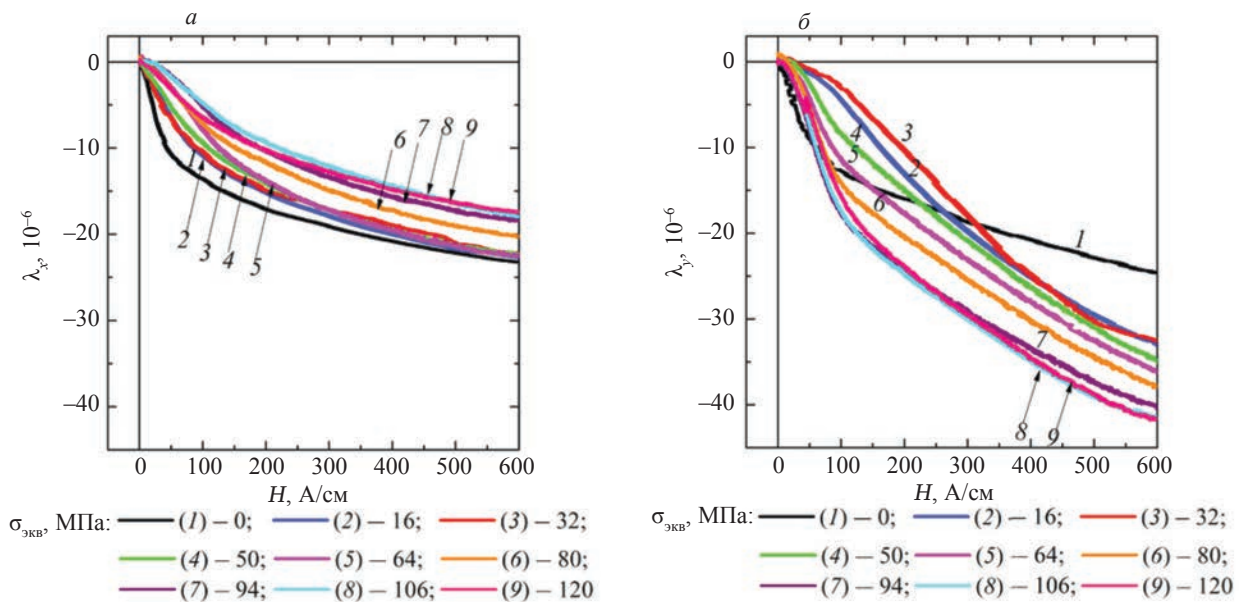


Рис. 11. Полевые зависимости магнитострикций λ_x (а) и λ_y (б) при различных величинах эквивалентных напряжений. Угол α равен 90° .

В максимально приложенном поле, как можно видеть из рис. 11, с ростом нагрузки, абсолютные значения λ_x уменьшаются, а абсолютные значения λ_y возрастают. Поведение λ_x в рассматриваемом нами примере (ориентация намагничивающего поля — вдоль оси y) характерно для продольной

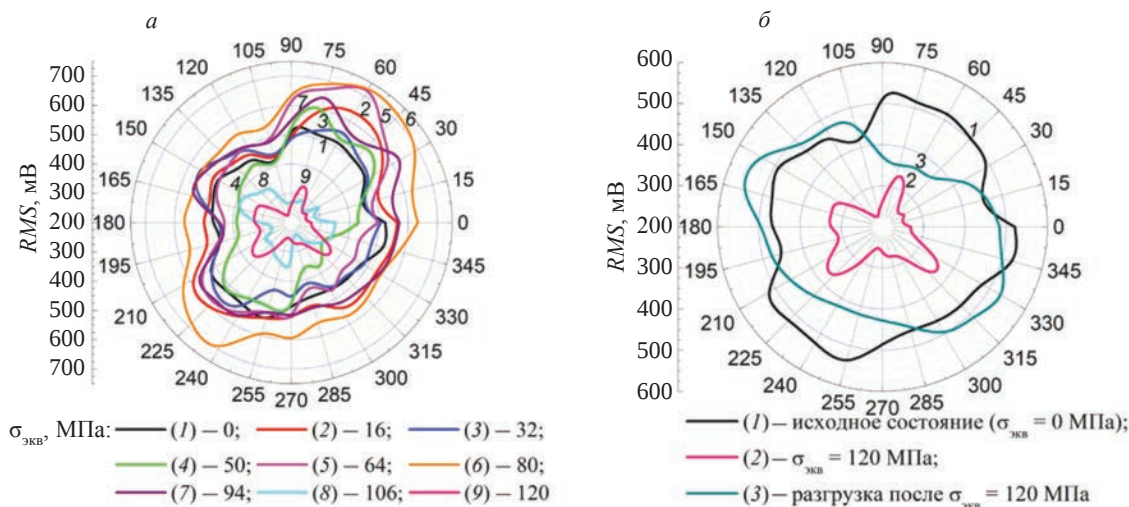


Рис. 12. Полярные диаграммы среднеквадратичных значений напряжения магнитных шумов Баркгаузена образца при упругопластическом двухосном симметричном растяжении: при различных величинах эквивалентных напряжений (а); в исходном состоянии, при максимальной растягивающей нагрузке и после снятия нагрузки (б).

магнитострикции никеля при одноосном сжатии, действующем в том же, продольном направлении, а поведение λ_y соответствует поведению продольной магнитострикции никеля при одноосном растяжении в продольном направлении.

3. Влияние симметричного двухосного растяжения на магнитные и электромагнитные характеристики при перематывании в переменном поле

Полярные диаграммы среднеквадратичных значений напряжений магнитных шумов Баркгаузена RMS и значений числа скачков Баркгаузена N в никелевом образце, полученные в условиях симметричного двухосного растяжения, а также после пластической деформации, приведены на рис. 12 и 13. Как видно из рис. 12 и 13, параметр RMS с ростом эквивалентных напряжений демонстрирует противоположный по сравнению с коэрцитивной силой характер изменения, в то время как параметр N при увеличении нагрузки качественно ведет себя так же, как и коэрцитивная сила: в упругой области деформаций значения N убывают, при переходе в область пластической деформации — увеличиваются. Исходная текстура в значительной степени отражается на параметре N : диаграммы имеют не округлую, а крестообразную форму под углом 45° .

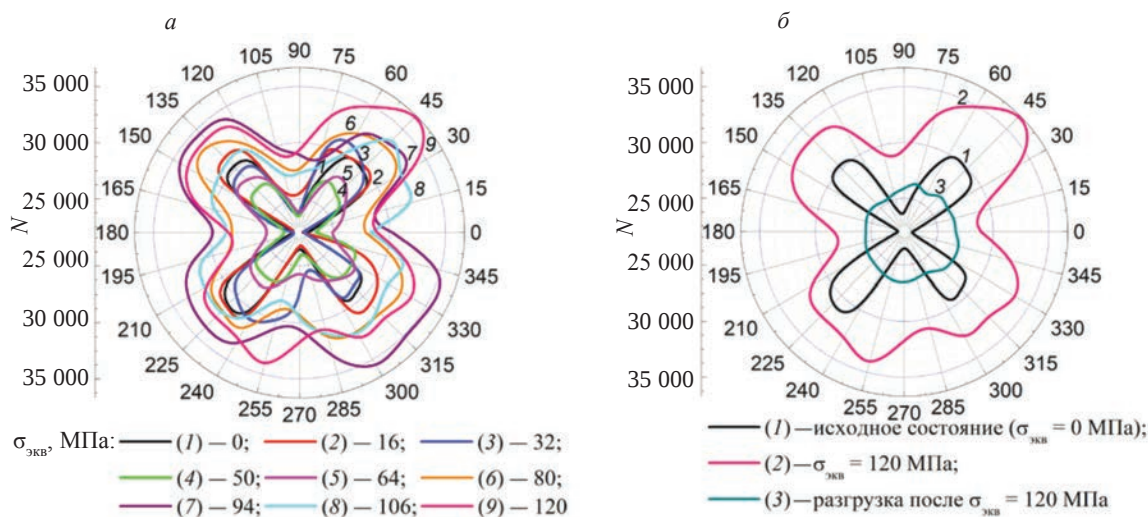


Рис. 13. Полярные диаграммы числа скачков Баркгаузена образца при упругопластическом двухосном симметричном растяжении: при различных величинах эквивалентных напряжений (а); в исходном состоянии, при максимальной растягивающей нагрузке и после снятия нагрузки (б).

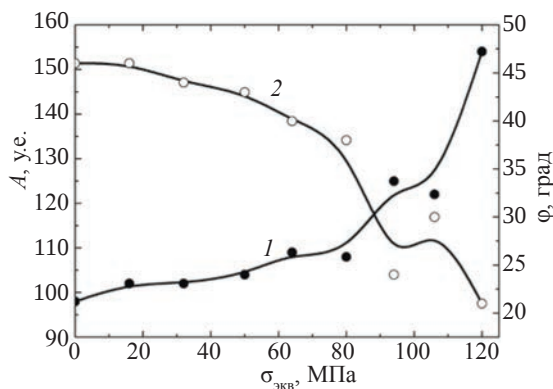


Рис. 14. Зависимости амплитуды (кривая 1) и фазового угла (кривая 2) вихретокового сигнала никелевого образца от приложенных напряжений на частоте возбуждения электромагнитного поля 10 кГц.

Анализ закономерностей изменения показаний вихретокового прибора в условиях симметричного двухосного растяжения никелевого образца показал следующее. Значимые изменения амплитуды вихретокового сигнала A и величины фазового угла ϕ с увеличением нагрузки происходили при измерениях на частоте 10 кГц, при более высокой частоте перемагничивания 50 кГц амплитуда вихретокового сигнала и фазовый угол с ростом нагрузки практически не реагировали на ее изменение при деформировании. Результаты измерений на частоте 10 кГц приведены на рис. 14. Как видно из рисунка, амплитуда вихретокового сигнала A во всем интервале исследованных деформаций монотонно возрастает почти в 1,6 раза, а фазовый угол ϕ монотонно уменьшается более чем в 2 раза. При этом как для фазового угла ϕ , так и для амплитуды вихретокового сигнала A наибольшая интенсивность изменения с ростом эквивалентных напряжений начинается от 80 МПа. Наблюдаемые однозначные изменения амплитуды и фазового угла вихретокового сигнала от степени деформации на частоте 10 кГц обуславливают применимость вихретоковой диагностики деформированного состояния никеля в условиях симметричного двухосного растяжения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено конечноэлементное моделирование напряженно-деформированного состояния никеля при двухосном симметричном растяжении. Установлено, что для плоского крестообразного образца, в центральной части которого толщина уменьшена и на которой предполагается монтаж устройств для измерения физических свойств, при симметричном двухосном растяжении эквивалентные напряжения по Мизесу распределены равномерно.

Микроструктурные исследования показали, что в результате пластического двухосного растяжения внутризеренная структура никеля становится более совершенной, размер зерен увеличивается, что можно объяснить протеканием в материале динамической рекристаллизации. В исходном отожженном состоянии для исследованного материала характерна текстура типа $\{112\}\langle 111 \rangle$, что соответствует одному из типов текстуры прокатки ГЦК-металлов, а после пластического деформирования двухосным растяжением — комбинированная текстура $\{110\}\langle 112 \rangle + \{110\}\langle 335 \rangle + \{110\}\langle 216 \rangle$. Такая смена типа текстуры также может являться признаком прошедшей при деформировании динамической рекристаллизации.

Установлена однозначная корреляционная связь коэрцитивной силы с эквивалентными напряжениями в области пластической деформации. В то же время для таких измеренных параметров, как максимальная магнитная проницаемость, максимум дифференциальной магнитной проницаемости, а также амплитуда и фазовый угол вихретокового сигнала, определенного на частоте 10 кГц, монотонные зависимости от эквивалентных напряжений наблюдаются как при упругой, так и при пластической деформации, но только при любом фиксированном азимутальном угле полярной диаграммы.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России по темам № АААА-А18-118020790148-1 и «Диагностика» № 122021000030-1. При выполнении работы было использовано оборудование ЦКП «Пластометрия» при ИМАШ УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chen H.-E., Xie S., Chen Z., Takagi T., Uchimoto T., Yoshihara K.* Quantitative nondestructive evaluation of plastic deformation in carbon steel based on electromagnetic methods // *Materials Transactions*. 2014. V. 55. Is. 12. P. 1806—1815.
2. *Roskosz M., Fryczowski K.* Magnetic methods of characterization of active stresses in steel elements // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2020. V. 499. Art. no. 166272.
3. *Perevertov O.* Influence of the applied elastic tensile and compressive stress on the hysteresis curves of Fe-3%Si non-oriented steel // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2017. V. 428. P. 223—228. DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.12.040
4. *Костин В.Н., Василенко О.Н., Филатенков Д.Ю., Чекасова Ю.А., Сербин Е.Д.* Магнитные и магнитоакустические параметры контроля напряженно-деформированного состояния углеродистых сталей, подвергнутых холодной пластической деформации и отжигу // *Дефектоскопия*. 2015. № 10. С. 33—41.
5. *Leuning N., Steentjes S., Schulte M., Bleck W., Hameyer K.* Effect of elastic and plastic tensile mechanical loading on the magnetic properties of NGO electrical steel // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2016. V. 417. P. 42—48. DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.05.049
6. *Муравьев В.В., Волкова Л.В., Платунов А.В., Куликов В.А.* Электромагнитно-акустический метод исследования напряженно-деформированного состояния рельсов // *Дефектоскопия*. 2016. № 7. С. 12—20.
7. *Gur C.H.* Review of residual stress measurement by magnetic Barkhausen noise technique // *Materials Performance and Characterization*. 2018. V. 7. No. 4. P. 504—525.
8. *Горкунов Э.С., Поволоцкая А.М., Задворкин С.М., Путилова Е.А., Мушников А.Н., Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х.* Особенности поведения магнитных и акустических характеристик горячекатаной стали 08Г2Б при циклическом нагружении // *Дефектоскопия*. 2019. Т. 55. № 11. С. 21—31.
9. *Gorkunov E.S., Povolotskaya A.M., Zadvorkin S.M., Putilova E.A., Mushnikov A.N.* The Effect of Cyclic Preloading on the Magnetic Behavior of the Hot-Rolled 08G2B Steel Under Elastic Uniaxial Tension // *Research in Nondestructive Evaluation*. 2021. V. 32. No. 6. P. 276—294. DOI: 10.1080/09349847.2021.2002487
10. *Povolotskaya A.M., Mushnikov A.N.* Features of Behavior of Magnetic Properties during Elastic Deformation of 20GN Hull Steel in Various Initial Stress—Strain States // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2022. V. 58. No. 11. P. 1000—1010. [*Поволоцкая А.М., Мушников А.Н.* Особенности поведения магнитных характеристик при упругом деформировании корпусной стали 20ГН с различным исходным напряженно-деформированным состоянием // *Дефектоскопия*. 2022. № 11. С. 32—42. DOI: 10.31857/S0130308222110045]
11. *Горкунов Э.С., Мушников А.Н.* Магнитные методы оценки упругих напряжений в ферромагнитных сталях (обзор) // *Контроль. Диагностика*. 2020. № 12. С. 4—23.
12. *Агинеи Р.В., Исламов Р.Р., Мамедова Э.А.* Определение напряженно-деформированного состояния участка трубопровода под давлением по результатам измерения коэрцитивной силы // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. 2019. Т. 9. № 3. С. 284—294.
13. *Бердник М.М., Бердник А.Г.* Перспективы применения коэрцитиметрии для оценки параметров напряженно-деформированного состояния конструкций // *Технология машиностроения*. 2019. № 1. С. 37—43.
14. *Pearson J., Squire P.T., Maylin M.G., Gore J.G.* Biaxial stress effects on the magnetic properties of pure Iron // *IEEE Transactions on magnetics*. 2000. V. 36. Is. 5. P. 3251—3253.
15. *Новиков В.Ф., Захаров В.А., Ульянов А.И., Сорокина С.В., Кудряшов М.Е.* Влияние двухосной упругой деформации на коэрцитивную силу и локальную остаточную намагниченность конструкционных сталей // *Дефектоскопия*. 2010. № 7. С. 59—68.
16. *Захаров В.А., Ульянов А.И., Горкунов Э.С.* Коэрцитивная сила ферромагнитных сталей при двухосном симметричном растяжении материала // *Дефектоскопия*. 2011. № 6. С. 3—15.
17. *Langman R.A.* Magnetic properties of mild steel under conditions of biaxial stress // *IEEE Transactions on Magnetism*. 1990. V. 26. Is. 4. P. 1246—1251.
18. *Li Yongjian, Song Shiping, Dou Yu, Chen Tao.* Influence of tensile stress on the magnetic properties of ultra-thin grain-oriented electrical steel // *AIP Advances*. 2023. V. 13. Art. no. 025223. DOI: 10.1063/9.0000468
19. *Pearson J., Squire P.T., Maylin M.G., Gore J.G.* Biaxial stress effects on the magnetic properties of pure Iron // *IEEE Transactions on magnetics*. 2000. V. 36. Is. 5. P. 3251—3253.
20. *Vengrinovich Valeriy, Vintov Dmitriy, Prudnikov Andrew, Podugolnikov Pavel, Ryabtsev Vladimir.* Magnetic Barkhausen Effect in Steel under Biaxial Strain/Stress: Influence on Stress Measurement // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2019. V. 38. Art. no. 52. DOI: 10.1007/s10921-019-0576-7
21. *Hubert O., Maazaz Z., Taurines J., Crepinge R., van den Berg F., Celada-Casero C.* Influence of biaxial stress on magnetostriction — Experiments and modeling // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2023. V. 568. Art. no. 170389. DOI: 10.1016/j.jmmm.2023.170389
22. *Kai Y., Enokizono M.* Effect of arbitrary shear stress on vector magnetic properties of non-oriented electrical steel sheets // *IEEE Transactions on magnetics*. 2017. V. 53. Is. 11. P. 2002304.

23. *Feng Shulu, Ai Zhijiu, Liu Jian, He Jiayi, Li Yukun, Peng Qifeng, Li Chengkun*. Study on Coercivity-Stress Relationship of X80 Steel under Biaxial Stress // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2022. V. 2022. Art. no. 2510505. DOI: 10.1155/2022/2510505
24. *Aydin U., Rasilo P., Martin F., Belahcen A., Daniel L., Arkkio A.* Modeling of multi-axial stress dependent iron losses in electrical steel sheets // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2020. V. 504. Art. no. 166612.
25. *Mushnikov A.N., Zadvorkin S.M., Perunov E.N., Vyskrebencev S.V., Izmajlov R.F., Vichuzhanin D.I., Soboleva N.N., Igumnov A.S.* Experimental Facility for Studying the Physical Properties of Materials in a Plane Stress State [Electronic resource] // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2022. Is. 4. P. 50—60. DOI: 10.17804/2410-9908.2022.4.050-060
26. *Gorkunov E.S., Zadvorkin S.M., Mushnikov A.N., Povolotskaya A.M.* Studying magnetoelastic effects in ferromagnetic structural materials / In: *Proc. of X International conference «Navy and shipbuilding nowadays NSN'2019»*, July 11—12, 2019, St. Petersburg, Russia. St. Petersburg—Moscow: Publ. of Krylov State Research Centre, 2019. P. 26—35.
27. *Белов К.П.* Упругие, тепловые и электрические явления в ферромагнетиках / Изд. 2-е. М.: Гостехиздат, 1957. 279 с.
28. *Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Смирнов С.В., Митропольская С.Ю., Вичужанин Д.И.* Взаимосвязь между параметрами напряженно-деформированного состояния и магнитными характеристиками углеродистых сталей // *ФММ*. 2007. Т. 103. № 3. С. 322—327.
29. *Бозорт Р.* Ферромагнетизм. М.: ИИЛ, 1956. 784 с.
30. *Вонсовский С.В., Шур Я.С.* Ферромагнетизм. М.—Л.: ОГИЗ, 1948. 816 с.
31. *Горкунов Э.С., Субачев Ю.В., Поволоцкая А.М., Задворкин С.М.* Влияние упругой деформации на гистерезисные свойства двуслойного ферромагнетика, составленного из компонентов, обладающих магнитострикцией разных знаков // *Дефектоскопия*. 2014. № 8. С. 42—56.
32. ГОСТ Р 54093—2010. Колеса железнодорожного подвижного состава. Методы определения остаточных напряжений.
33. *Lukin N.A., Rubin L.S.* A Precision Low-Frequency Analog-to-Digital Converter for Advanced Systems of Technical Diagnostics and Nondestructive Testing // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2020. Is. 5. P. 6—16. DOI: 10.17804/2410-9908.2020.5.006-016
34. *Mises R.V.* *Mechanik der festen Körper im plastisch-deformablen Zustand* // *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse*. 1913. P. 582—592.
35. *Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Мушников А.Н., Смирнов С.В., Якушенко Е.И.* Влияние механических напряжений на магнитные характеристики трубной стали // *Прикладная механика и техническая физика*. 2014. Т. 55. № 3 (325). С. 181—191.
36. *Глезер А.М., Метлов Л.С.* Физика мегапластической (интенсивной) деформации твердых тел // *ФТТ*. 2010. Т. 52. № 6. С. 1090—1097.
37. *Козлов Э.В., Глезер А.М., Конева Н.А., Попова Н.А., Курзина И.А.* Основы пластической деформации наноструктурных материалов / Под ред. А.М. Глезера. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2016. 304 с.
38. *Бородкина М.М., Спектор Э.Н.* Рентгенографический анализ текстуры металлов и сплавов. Москва: Металлургия, 1981. 271 с.

НОВЫЙ ВЗГЛЯД НА КОНТРОЛЕПРИГОДНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ КАПИЛЛЯРНОГО КОНТРОЛЯ

© 2023 г. И.И. Кудинов^{1,*}, А.Н. Головков^{1,*}, В.В. Вахов², Д.С. Скоробогатко^{1,*},
А.С. Генералов^{1,*}

¹ Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» — ВИАМ), Россия 105005 Москва, ул. Радио, 17

² Акционерное общество «ОДК-Авиадвигатель» (АО «ОДК-Авиадвигатель»),
Россия 614990 Пермь, Комсомольский пр-кт, 93, кор. 61
E-mail: *viamlab622@gmail.com

Поступила в редакцию 11.08.2023; после доработки 04.09.2023

Принята к публикации 04.09.2023

Предложена методика определения неконтролируемых зон деталей авиационных двигателей при проведении капиллярного контроля с учетом особенностей нанесения проявителей различного типа. Представлены основные технологические факторы, влияющие на полноту контроля поверхностей деталей. Экспериментально опробована методика, позволяющая определить неконтролируемые зоны деталей двигателя при проведении капиллярного контроля с учетом особенностей нанесения проявителей различного типа. Установлено, что при проведении капиллярного контроля деталей, особенно сложной конфигурации, существующие технологии нанесения проявителей могут не обеспечить его качественное нанесение на все контролируемые поверхности, как это предполагалось ранее по результатам экспертной оценки. Экспериментально доказано, что такие конструктивные элементы деталей, как отверстия, контролируются на глубину, намного меньше диаметра.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, люминесцентный капиллярный контроль, неконтролируемая зона, проявитель, образец.

A NEW LOOK AT THE CONTROLLABILITY OF PARTS WITH COMPLEX CONFIGURATION IN PENETRANT TESTING

I.I. Kudinov^{1,*}, A.N. Golovkov^{1,*}, Vakhov V.V.², D.S. Skorobogatko^{1,*}, A.S. Generalov^{1,*}

¹ Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute Of Aviation Materials Of The National Research Center «Kurchatov Institute» (Nrc «Kurchatov Institute» — VIAM), 105005, Radio str., 17, Moscow, Russia

² Joint Stock Company «United Engine Corporation-Aviadvigatel» (JSC «Uec-Aviadvigatel»), Komsomolsky prospekt, 93, building 61, Perm 614990 Russia
E-mail: *viamlab622@gmail.com

A method is proposed to determine uncontrolled areas of aircraft engine parts in penetrant testing, taking into account the specifics of applying developers of different types (all forms according to ISO 3452-3). The main technological factors affecting the testability of surfaces of parts of complex geometry are presented. A method has been experimentally tested, which makes it possible to determine the uncontrolled zones of engine parts in penetrant testing, due to the specifics of applying different forms of developers. It has been established that when carrying out penetrant testing of parts, especially with complex configurations/geometry, the existing technologies for applying developers may not ensure its high-quality application to all controlled surfaces of parts, as was previously assumed based on the results of an expert assessment. It has been experimentally proven that such structural elements of parts as holes are controlled to a depth much less than the diameter.

Keywords: non-destructive testing, fluorescent penetrant inspection, uncontrolled zone, developer, sample.

DOI: 10.31857/S0130308223110027, **EDN:** XAVHMC

ВВЕДЕНИЕ

На предприятиях авиационной отрасли для контроля поверхностей деталей на наличие поверхностных несплошностей применяются различные методы неразрушающего контроля, наиболее распространенным из которых является капиллярный. При проведении данного вида контроля для обнаружения дефектов с шириной раскрытия 1 мкм и менее в технологическом процессе используются многокомпонентные системы жидкостей, имеющих различные физико-

химические свойства. Как правило, это постэмულიруемые наборы дефектоскопических материалов, состоящие из люминесцентной проникающей жидкости (пенетранта), очищающей жидкости (очистителя) и проявляющей жидкости (проявителя). Данные дефектоскопические материалы, согласно технической и нормативной документации, как отечественной, так и зарубежной, должны наноситься равномерно и в достаточном количестве на все контролируемые участки поверхностей деталей, чтобы обеспечить 100 % контроль поверхности. Дефектоскопические материалы, такие как пенетрант и очиститель, при автоматизированном контроле, могут наноситься методом погружения деталей в данные жидкости или распылением при полу-автоматизированном контроле, особенно при контроле крупногабаритных деталей. Качество нанесения и удаления пенетранта и очистителя с поверхностей легко проконтролировать визуально с помощью специального оборудования в УФ-свете, что не вызывает затруднений, но не представляется возможным простым осмотром оценить качество нанесения проявляющих составов. В составе различных наборов дефектоскопических материалов проявители бывают в виде порошков, суспензий, красок и пленок. Для их нанесения используют различные способы, такие как распыление, электрораспыление, воздушная взвесь, кистевое нанесение, погружение, обливание, электроосаждение, посыпание и наклеивание. На авиационных предприятиях для обеспечения особо высокой чувствительности на линиях капиллярного контроля используют первые три вида проявителей. Для жидкой фазы (проявители типа красок и суспензий) в существующих линиях используют способ их нанесения распылением, с применением краскораспылителя. Для проявителя типа порошка используют способ электрораспыления или воздушной взвеси с использованием электростатической системы или воздушной камеры соответственно. При нанесении данного компонента любым из рассматриваемых выше способов специалистам интуитивно ясно, что обеспечить равномерное и в достаточном количестве нанесение их в труднодоступные места, не имеющие прямого доступа, затруднительно или невозможно. Качество нанесения проявителя типа красок, согласно нормативно-технической документации возможно оценить только в доступных для визуального осмотра зонах с использованием образцов белизны или количественно, измерив толщину получившейся твердой нестираемой пленки на поверхности контролируемой детали. Например, проявитель типа краски, входящий в состав отечественного набора ЛЮМ1-ОВ (ПР-1), согласно требованиям технического документа ОСТ 1 90282 [1] наносится на поверхности контролируемых деталей тонким равномерным сплошным слоем толщиной от 5 до 15 мкм с помощью краскораспылителя. Сложнее дело обстоит с порошковым и суспензионным типами проявителей. Оценить толщину таких проявителей способами, как для проявителей типа красок, невозможно. Данные типы проявителей наносятся минимально тонким сплошным слоем, не образуют на поверхности устойчивой к стиранию пленки и при любом, даже самом незначительном, механическом воздействии удаляются. Методик проверки равномерности и достаточности их нанесения не встречается как в технической документации, так и в литературных источниках [2—13]. Стоит отметить, что в мировой практике именно данные типы проявителей входят в состав широко используемых современных нетоксичных и непожароопасных наборов дефектоскопических материалов различных производителей.

В зарубежных и отечественных литературных источниках рассмотрены условия, при которых ухудшаются результаты капиллярного контроля [14], приведены сведения о возможности контроля внутренних поверхностей таких конструктивных особенностей, как отверстия и пазы замков на глубину, равную диаметру отверстий и ширине паза [15]. В статье [16] рассмотрен подход оценки неконтролируемых зон только для проявителей типа красок с использованием образцов яркости люминесценции, который не подходит для оценки толщины слоя широко используемых в мировой практике суспензионных и порошковых типов проявителей.

В технической и технологической документации на капиллярный контроль деталей, если есть неконтролируемые зоны, они всегда схематично показаны. Данные зоны, как правило, устанавливаются разработчиком изделия, совместно со специалистами по неразрушающему контролю методом экспертной оценки с учетом опыта эксплуатации, без экспериментального подтверждения, и поэтому требуют проверки.

Необходимость более детального относительно экспертной оценки анализа контролепригодности является следствием требований пункта 33.70(а) АП-33 [17, 18] о необходимости соответствующей оценки допустимости повреждения, направленной на возможность разрушения в пределах одобренного ресурса детали от дефектов в материале, внесенных при изготовлении и в эксплуатации. Вероятность разрушения рассчитывается в специальных программах, например, DARWIN (Design Assessment of Reliability With Inspection — Оценка надежности конструкции с

применением контроля), в виде функции от количества полетных циклов, случайного возникновения и расположения дефекта, случайной программы выполнения контроля и других случайных переменных. Одним из элементов вероятностной оценки риска допустимости повреждений, основанной на механике разрушения, является вероятностная оценка обнаружения дефекта применяемым методом контроля [19—22]. Учитывая, что для расчета дефект может быть помещен в любую область детали, достоверность применения вероятностной оценки обнаружения дефекта напрямую зависит от анализа контролепригодности детали применяемым методом контроля.

По итогам проведенного литературного анализа установлено, что комплексных универсальных подходов и методов по оценке возможности контроля деталей капиллярным методом с учетом обеспечения нанесения проявителей различных типов не представлено.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

С целью определения неконтролируемых зон деталей авторами статьи разработана методика определения неконтролируемых зон деталей при проведении капиллярного контроля с учетом особенностей нанесения проявителей различного типа. Данная методика предусматривает возможность использования двух подходов, позволяющих экспериментально оценить толщину слоя проявителей на поверхности контролируемых деталей, обеспечивающую выявление дефектов в соответствии с заявленным уровнем чувствительности используемого набора дефектоскопических материалов. Первый подход основан на оценке чувствительности, достигаемой для отдельных зон детали с использованием образцов с дефектами, имеющими ширину раскрытия, соответствующую заявленному уровню чувствительности исследуемого набора. Второй подход основан на использовании люминесцентных составов и образцов яркости люминесценции, позволяющих оценить равномерность и достаточность нанесенного проявляющего состава. Рассмотрим подробно данные подходы.

Подход, основанный на оценке чувствительности, достигаемой для отдельных зон детали с использованием образцов с дефектами

Данный подход определения неконтролируемых зон основан на оценке чувствительности контроля в различных исследуемых конструктивных зонах деталей при размещении в них изготовленных или подобранных образцов определенных размеров с аттестованными дефектами, имеющими ширину раскрытия, соответствующую заявленному уровню чувствительности набора. Подход состоит из следующих основных этапов:

- подбор или изготовление образцов с дефектами, имеющими ширину раскрытия, соответствующую заявленному уровню чувствительности набора, с учетом кривизны поверхности исследуемого участка детали и возможности их размещения;

- проведение экспертного капиллярного контроля поверхности подобранных или изготовленных образцов отдельно и на поверхностях исследуемых зон детали с целью оценки обеспечения заявленной чувствительности с учетом особенностей нанесения проявителей;

- проведение анализа полученных результатов контроля на подобранных или изготовленных образцах.

Рассмотрим подробно данные этапы.

В качестве заготовки для изготовления образцов с поверхностными дефектами может быть использован любой образец с дефектами, имеющими определенную ширину раскрытия, соответствующую заявленному уровню чувствительности [23]. При разработке данного подхода было установлено, что в качестве заготовки для изготовления образцов заданных размеров удобнее использовать испытательный образец типа 1 по ГОСТ Р ИСО 3452—3 [24] и ISO 3452-3 [25] из-за геометрических особенностей параметров образца (небольшой его толщины), а также из-за большого количества аттестованных дефектов, расположенных на единицу его площади. Данный образец определенным образом разрезается на фрагменты с дефектами, имеющими размеры, обеспечивающие их размещение в исследуемых зонах деталей. Геометрические параметры фрагментов образцов определяются с учетом кривизны поверхности исследуемого участка детали и возможности разрезки заготовки образца на фрагменты с учетом обеспечения наличия дефекта на его поверхности.

После подбора или изготовления образцы должны пройти экспертный капиллярный контроль с использованием исследуемого набора по технологическим режимам, которые обеспечат максимальную выявляемость дефектов на его поверхности. Результаты должны быть зафиксированы

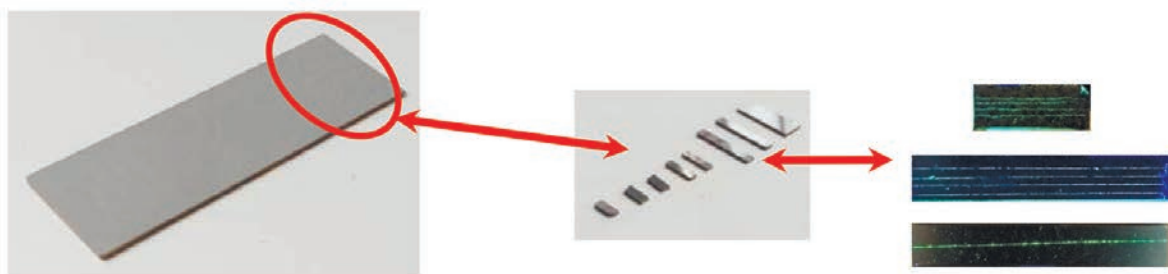


Рис. 1. Вид изготовленных образцов для оценки качества нанесения и результаты их капиллярного экспертного контроля.

для дальнейшего их использования. Вид фрагментов изготовленных образцов для оценки качества нанесения проявителя в различные зоны детали и результаты их экспертного капиллярного контроля показаны на рис. 1.

Затем образцы после эффективной очистки [26] должны пройти повторный капиллярный контроль, но до этапа нанесения проявителя, с последующим размещением данных образцов на чистые обезжиренные исследуемые зоны детали. Обязательным условием является то, что при размещении образцы должны закрепляться на исследуемые поверхности с помощью различных составов, обеспечивающих токопроводящий контакт (для электростатического распыления) или контакт части образца с поверхностью детали. Нанесение проявителя на исследуемые поверхности должно проводиться после размещения образцов так же, как и при контроле всей поверхности детали, а не направлено в исследуемые зоны, где размещены образцы с дефектами. Время размещения образцов на поверхности деталей с учетом нанесения проявителя должно быть минимальным. Пример размещения фрагментов образцов на поверхности различных конструктивных особенностей объекта контроля и результаты капиллярного люминесцентного контроля с учетом особенностей нанесения проявителя типа красок показаны на рис. 2.

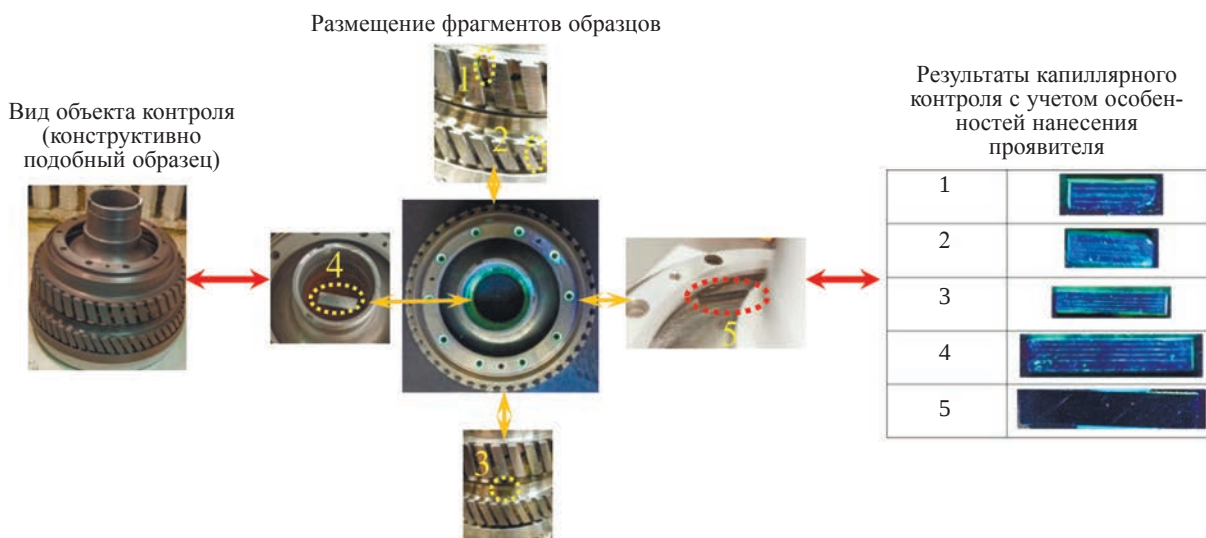


Рис. 2. Результаты контроля фрагментов образцов, размещенных в различных зонах детали, в зависимости от условий нанесения проявителя типа красок.

Из полученных результатов видно, что нанесение проявителя типа красок на участок № 5 детали, показанной на рис. 2, не обеспечивается при использовании выбранной технологии, что подтверждается невыявленными дефектами, и свидетельствует о неконтролепригодности данного участка.

Стоит учесть, что рассмотренный выше подход позволяет качественно оценить достаточность нанесения слоя проявителя, обеспечивающего извлечение пенетранта из дефектов с шириной раскрытия, соответствующих уровню чувствительности исследуемого набора, только для участков детали, где возможно размещение данных образцов. Например, для таких конструктивных особенностей как отверстия, пазы елочного типа и другие зоны, имеющие значительную кривизну поверхности и малые размеры, затруднительно использовать данный подход. Поэтому был разработан еще один подход, основанный на изготовлении люминесцентных составов и образцов яркости люминесценции, позволяющих визуальнo оценить слой проявителя, обеспечивающий выявление дефектов с шириной раскрытия, соответствующей уровню чувствительности исследуемого набора.

Подход, основанный на изготовлении образцов яркости люминесценции

Процедура определения неконтролируемых зон в данном подходе основана на изготовлении образцов яркости люминесценции, позволяющих оценить равномерность и достаточность нанесенного проявляющего состава, и состоит из следующих основных этапов:

приготовление люминесцентных составов на основе существующих типов проявителей: красок, суспензий или порошков, входящих в состав исследуемых наборов;

изготовление образцов яркости люминесценции для оценки толщины слоя проявителя;

подбор или изготовление образцов или деталей, имитирующих исследуемые конструктивные элементы, для более детального изучения распределения по поверхности люминесцентных составов (при необходимости);

нанесение приготовленного люминесцентного состава на исследуемые поверхности детали;

проведение оценки результатов нанесения люминесцентного состава на исследуемые поверхности детали с использованием образцов яркости люминесценции.

Рассмотрим ниже подробно данные этапы.

Приготовление люминесцентных составов необходимо для оценки качества нанесения различных типов проявителей. Изготавливают их на основе тех же самых проявителей типа красок, суспензий или порошков, входящих в состав набора, с добавлением в них аликвотными долями минимального количества пенетранта или соответствующего люминесцентного красителя. При этом физико-химические параметры, оказывающие влияние на процесс нанесения (вязкость, удельный вес и т.д.), для приготовленного и исходного (чистого проявителя) составов должны отличаться не более чем на 5 %. Добавление минимального количества пенетранта или красителя обеспечивает аналогичное нанесение полученных составов на поверхности исследуемых объектов, также как и проявителей, входящих в состав набора. Отличием данных составов является то, что при освещении в ультрафиолетовой области спектра возникает их люминесценция на поверхностях исследуемых объектов даже для незначительного количества. Вид приготовленных люминесцентных составов в дневном и УФ-свете на основе зарубежных и отечественных проявителей типа красок (ПР-1), суспензий (ПР-15А) и порошка (D90G), входящих в состав ЛЮМ1-ОВ, ЛЮМ33-ОВ и набора фирмы Sherwin соответственно, показан на рис. 3.

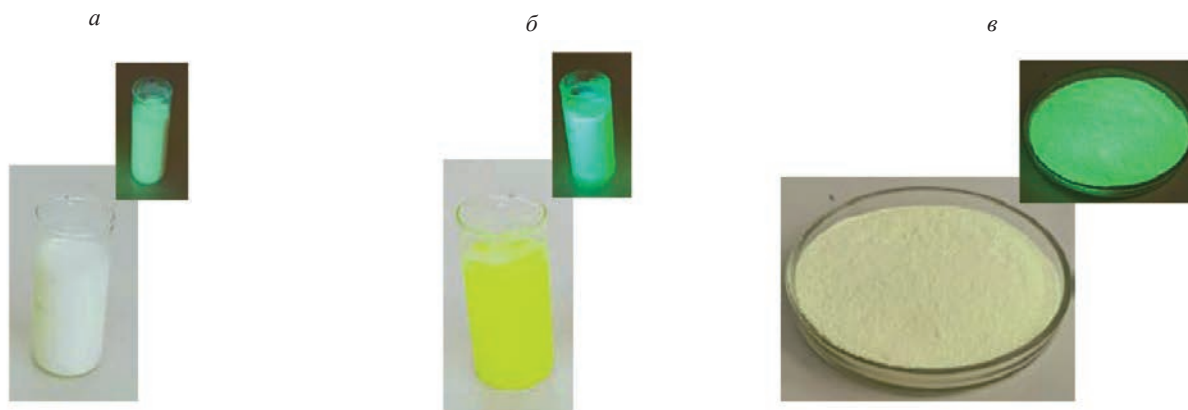


Рис. 3. Вид приготовленных люминесцентных составов в дневном и УФ-свете на основе отечественных и зарубежных проявителей типа красок (а), суспензий (б) и порошка (в).



Рис. 4. Вид разборного образца тоннельного типа.

После приготовления люминесцентных составов достаточность толщины слоя образованного покрытия определяется качественно. Достаточная толщина соответствует слою исследуемого проявителя, обеспечивающему выявление дефектов, имеющих ширину раскрытия, соответствующую уровню чувствительности исследуемого набора. Оценить достаточность толщины слоя проявителя на поверхностях конструктивных элементов, особенно минимально допустимой толщины, возможно только с использованием образцов яркости люминесценции. Для получения образца яркости люминесценции необходимо изготовить образец тоннельного типа, состоящего из плоского образца с дефектами, имеющими ширину раскрытия, соответствующую заявленному уровню чувствительности исследуемого набора, и любого протяженного фрагмента образца тоннельного типа. Изготовление разборного образца тоннельного типа, позволяет получить равномерно убывающий слой люминесцирующего состава различной толщины при его нанесении на внутреннюю плоскую поверхность. При разработке данного образца было установлено, что для изготовления разборного образца тоннельного типа удобно использовать плоский испытательный образец типа 1 по ГОСТ Р ИСО 3452—3 и ISO 3452-3 из-за большого количества близко расположенных дефектов на единицу его площади и фрагмента разрезанного цилиндрического образца диаметром, не превышающим ширину образца с дефектами.

После изготовления разборного образца тоннельного типа его часть (плоский образец с дефектами) контролируется отдельно и в составе фрагмента разрезанного цилиндрического образца с использованием исследуемого набора по технологическим режимам, обеспечивающим максимальную выявляющую способность. Во втором случае проявитель должен наноситься направленно на внутреннюю плоскую поверхность с дефектами разборного образца тоннельного типа таким образом, чтобы получить равномерно убывающий слой проявляющего состава различной толщины. Сравнивая полученные результаты контролей, зафиксированные при соответствующих одинаковых условиях, определяется глубина, где обеспечивается выявление дефектов на поверхности плоского испытательного образца (h). Пример результатов контроля с использованием проявителя суспензионного типа и размер установленной зоны (h), где обеспечивается выявление дефектов, показаны на рис. 5.



Рис. 5. Результаты капиллярного контроля образца типа 1 по ГОСТ Р ИСО 3452—3 или ISO 3452-3 с дефектами в составе разборного образца (б) и отдельно (а).



Рис. 6. Вид поверхности испытательного образца типа 1 по ГОСТ Р ИСО 3452—3 и ISO 3452-3 (образец яркости люминесценции) после нанесения на его поверхность люминесцентного состава на основе суспензионного типа проявителя при дневном (а) и УФ-свете (б).

Зафиксировав глубину (h), где обеспечивается выявление дефектов, приготовленный люминесцентный состав наносится направленно на внутреннюю поверхность того же подготовленного разборного образца тоннельного типа с дефектами аналогично проявителю, чтобы получить равномерный убывающий слой люминесцирующего состава различной толщины. После нанесения состава результаты должны быть зафиксированы при соответствующих условиях освещенности поверхностей деталей, прописанных в нормативной или технической документации, как показано на рис. 6.

Проведение оценки количества нанесенного люминесцентного состава осуществляется путем сравнения его с количеством проявителя, расположенного на глубине (h), обеспечивающего выявление дефектов. Визуально оценивается равномерность и яркость люминесценции нанесенного состава на той же глубине (h) и принимается как необходимая и достаточная для обеспечения выявления дефектов с шириной раскрытия, соответствующей исследуемому уровню чувствительности набора.

Примеры нанесения с использованием краскопульта и электростатического пистолета приготовленных люминесцентных составов на основе различных типов проявителей, а также анализ толщины нанесенного слоя каждого проявителя, обеспечивающего выявление дефектов шириной раскрытия, соответствующей исследуемому уровню чувствительности, показаны на рис. 7а—в соответственно.

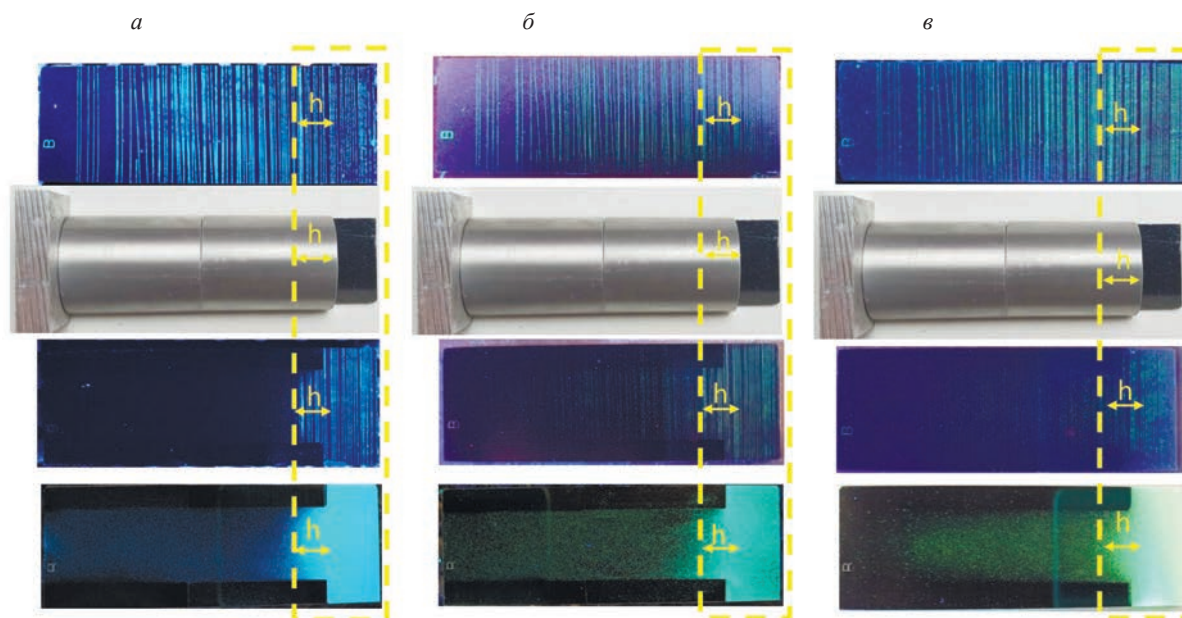


Рис. 7. Примеры оценки толщины слоя нанесенного люминесцентного состава на основе проявителей типа красок (а), суспензий (б) и порошков (в).

После изготовления образцов яркости люминесценции приготовленные люминесцентные составы наносятся на все обезжиренные поверхности детали в соответствии с технологией нанесения проявителя, установленной для контроля деталей, а не направленно на зоны, где необходимо проверить качество нанесения проявителя. Путем визуального сравнения образцов яркости люминесценции с результатами, полученными на детали, устанавливаются контролируемые и неконтролируемые зоны. Если на детали имеются зоны с неравномерно нанесенным люминесцентным покрытием или отличающимся по интенсивности излучения от результатов, полученных на образце яркости люминесценции, то данная зона считается неконтролируемой по оцениваемой технологии, и технология контроля требует корректировок или внедрения контроля другим методом НК.

Примеры реализации данного подхода для различных типов проявителя приведены на рис. 8. Установленные неконтролируемые зоны выделены красным цветом.

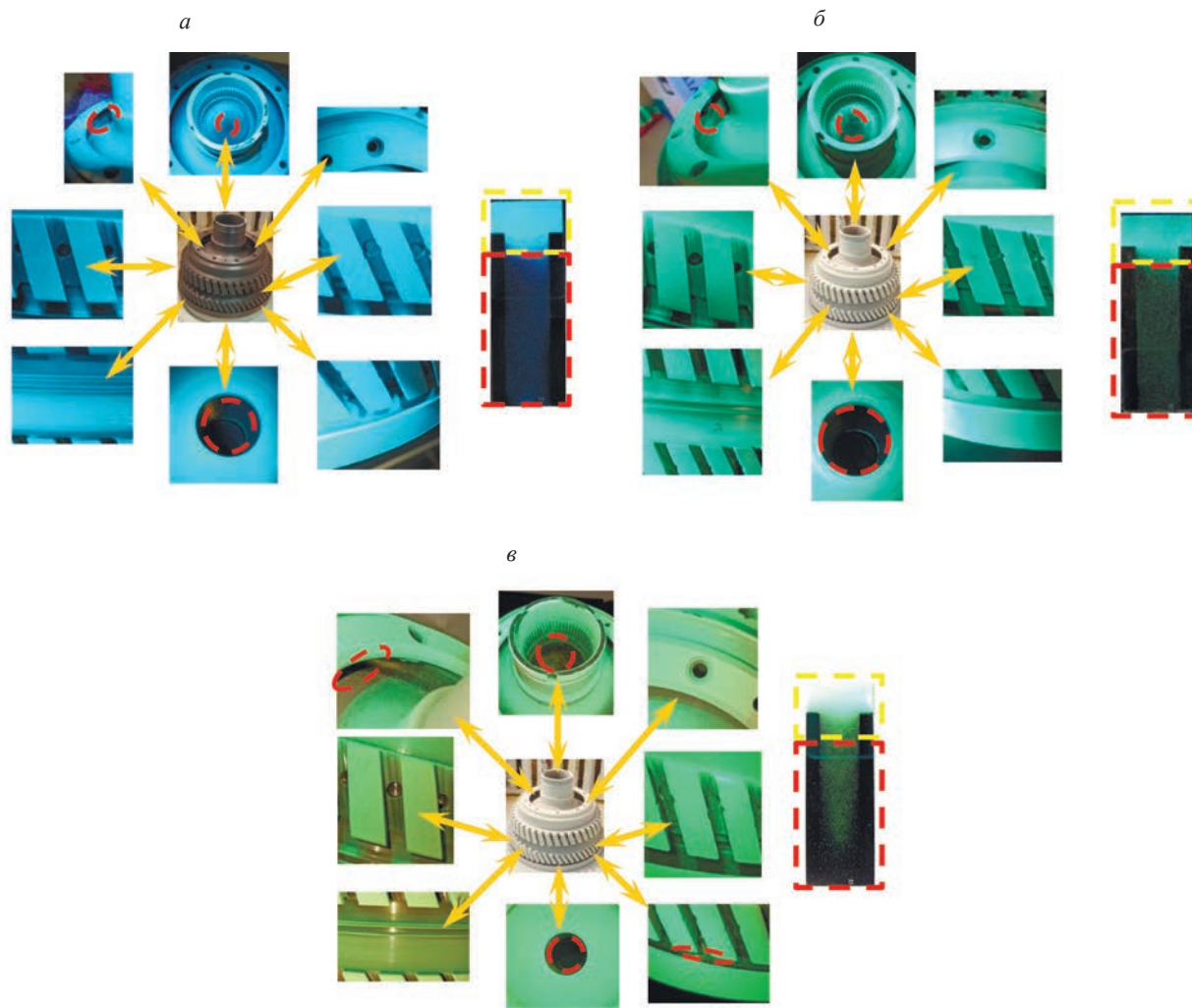


Рис. 8. Вид детали с нанесенными люминесцентными составами на основе проявителей типа красок (а), суспензий (б), порошка (в) и соответственно образца яркости люминесценции в УФ-свете.

Из полученных результатов оценки возможности нанесения проявителя по опробуемым экспериментальным режимам, приведенных на рис. 8, установлено, что наибольшее количество неконтролируемых зон наблюдается при контроле с применением проявителя порошкового типа при его нанесении с использованием электростатического пистолета.

Применение подхода для получения зависимостей глубины нанесения различных типов проявляющих составов на внутреннюю поверхность отверстий от его диаметра

Для опробования методики в качестве исследуемого объекта была выбрана одна из высоконагруженных в эксплуатации зон типовой роторной детали (вал, диск) — отверстие. При выполнении работ использовалось оборудование, в том числе ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» — ВИАМ. Были изготовлены разборные образцы различного диаметра и глубиной равной двум диаметрам для получения более детальной и доступной для прямого визуального анализа картины распределения нанесенных люминесцентных составов на внутренние поверхности отверстий (рис. 9).



Рис. 9. Вид изготовленных образцов отверстий различного диаметра.

Для оценки неконтролируемых зон разработанные люминесцентные составы на основе проявителей типа красок и суспензий наносились на поверхности образцов отверстий распылением с использованием краскопульта, а порошка — распылением в электрическом поле с использованием электростатического пистолета, содержащего отдельный блок управления. При нанесении составов на основе красок и суспензий образцы были ориентированы на поворотном сетчатом столе аналогично конструктивным элементам диска ГТД при его контроле капиллярным методом, имитируя возможность двустороннего доступа нанесения проявителя. Для определения контролепригодности в части выявления трещин, возникающих в отверстиях дисков в окружном направлении, разборные образцы отверстий резом были ориентированы на поворотном столе по радиусу диска, чтобы изучить наиболее полную картину распределения состава в окружном направлении, как показано на рис. 10. При определении контролепригодности в части выявления трещин, возникающих в отверстиях дисков в радиальном направлении, разборные образцы отверстий резом нужно ориентировать в окружном направлении.

Для получения более полной картины распределения люминесцентного покрытия на внутренней поверхности отверстий образцы разбирались и исследовались, как показано на рис. 11.

Результаты нанесения всех типов полученных люминесцентных составов на внутренние поверхности отверстий различных диаметров показаны в табл. 1.

По результатам исследований установлены зоны, выделенные красным цветом в табл. 1, для которых не обеспечивается нанесение в достаточном количестве или вообще отсутствуют люминесцентные составы. Из полученных данных установлены значения минимальных и максимальных глубин нанесения проявляющих составов на внутренние поверхности различных диаметров отверстий, приведенные в табл. 2.

На основании представленных выше экспериментальных минимальных и максимальных значений построены зависимости, показывающие диапазоны минимального и максимального возможного нанесения проявляющих составов (рис. 12).

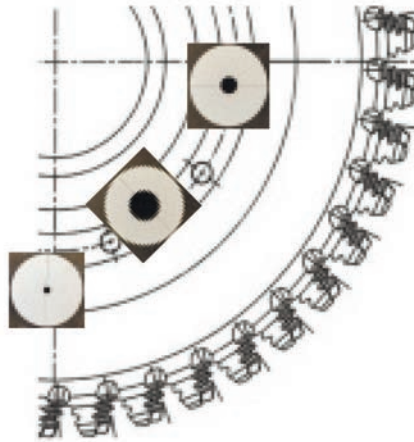


Рис. 10. Схематическое расположение разборных образцов отверстий на поворотном столе при нанесении люминесцентных составов.

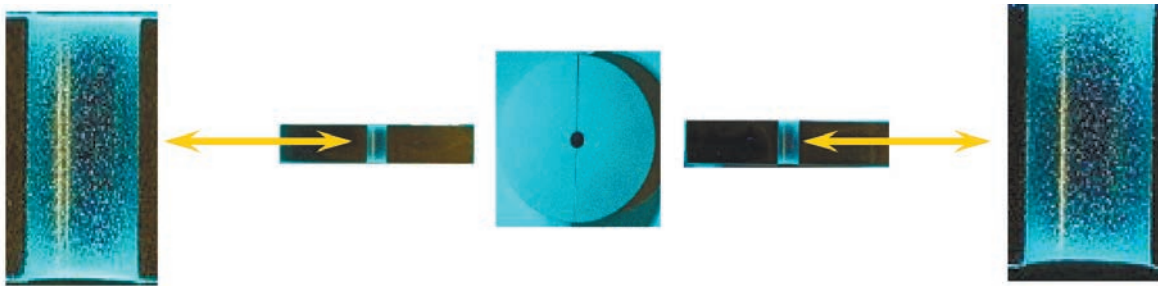


Рис. 11. Вид разборного образца отверстия в УФ-свете после нанесения на его поверхность люминесцентного состава.

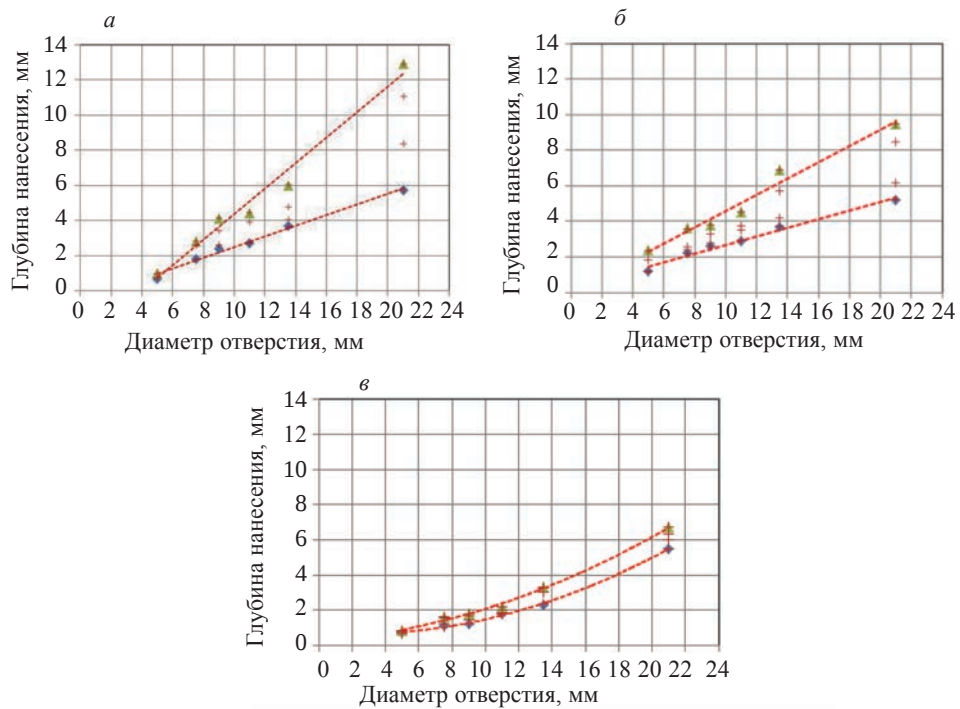


Рис. 12. Полученные зависимости возможного и гарантированного нанесения проявителей типа красок (а), суспензий (б) и порошков (в).

Таблица 1

**Результаты нанесения люминесцентных составов на внутреннюю поверхность разборных образцов
отверстий различного диаметра в УФ-свете**

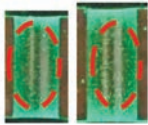
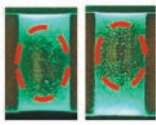
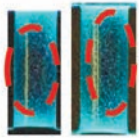
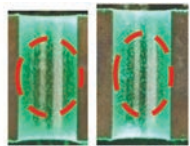
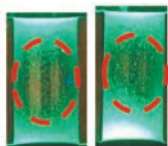
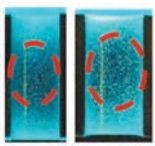
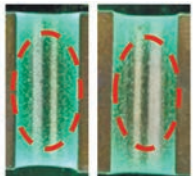
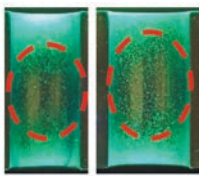
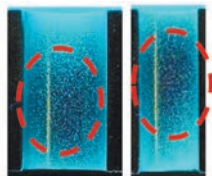
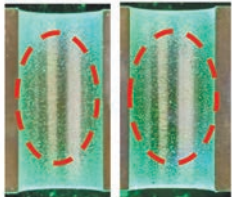
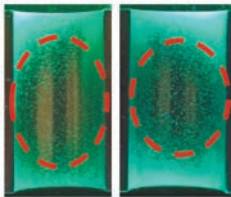
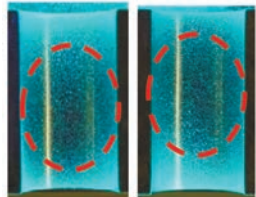
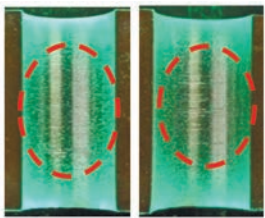
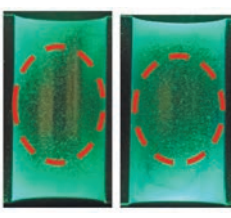
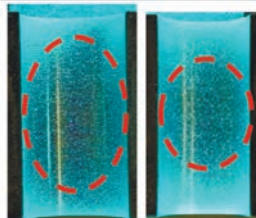
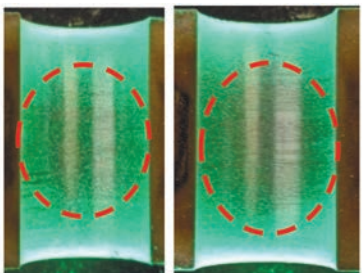
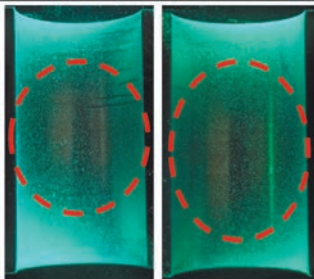
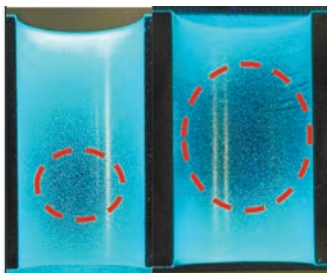
Диаметр, мм	Порошковый состав	Суспензионный состав	Состав на основе красок
5			
7,5			
9,0			
11,0			
13,5			
21,0			

Таблица 2

Полученные экспериментальные значения минимальных и максимальных глубин возможного нанесения проявляющих составов на внутренние поверхности отверстий различных диаметров

Диаметр отверстий	На основе красок		На основе суспензий		На основе порошка	
	мин	макс	мин	макс	мин	макс
5	0,7	1	1,2	2,4	0,7	0,8
7,5	1,8	2,8	2,2	3,6	1,1	1,6
9	2,4	4,1	2,6	3,8	1,2	1,8
11	2,7	4,4	2,9	4,5	1,8	2,2
13,5	3,7	6	3,7	6,9	2,3	3,3
21	5,7	12,9	5,2	9,5	5,5	6,7

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Разработанная методика, состоящая из нескольких подходов, описанных выше, позволяет наглядно оценить возможность и достаточность нанесения слоя различных типов проявляющих составов на все поверхности контролируемых деталей, обеспечивающего выявление дефектов в соответствии с требуемым уровнем чувствительности. Для более детального анализа качества нанесения люминесцентного состава в зоны деталей, особенно имеющих сложную геометрическую форму, необходимо применять специальное оборудование типа гибких эндоскопов с УФ-подсветкой. В случае отсутствия данного оборудования возможно использовать разборные образцы или фрагменты деталей, имитирующие исследуемые зоны, как показано на рис. 9.

Для поверхностей, имеющих значительную кривизну и малые размеры, использовать первый, самый простой, подход, основанный на оценке чувствительности, достигаемой для отдельных зон детали с использованием образцов с дефектами и учетом особенностей нанесения проявителя, невозможно. Стоит учитывать, что данный подход позволяет исследовать единовременно только небольшой локальный участок и не позволяет получить всю информацию о распределении проявителя на исследуемой поверхности.

Второй подход, основанный на изготовлении люминесцирующих составов и образцов яркости люминесценции, позволяет определить участки детали, где проявитель наносится или не наносится в количестве, необходимом для обеспечения выявления дефектов согласно установленному технической документацией уровню чувствительности контроля. Необходимо учитывать, что данный подход невозможно применять для определения неконтролируемых зон деталей при проведении капиллярного контроля, предусматривающего нанесение порошкового проявителя распылением с использованием воздушной камеры или пневмо-пистолета. Приготовленный люминесцентный состав, как и сам проявитель при его нанесении распылением, не имея жидкой фазы и какого-либо заряда, оседает после распыления только на плоских или незначительно искривленных поверхностях под воздействием сил гравитации. Для указанных вариантов нанесения порошкового проявителя возможно применить только первый оценочный подход.

Анализируя полученные с использованием данной методики экспериментальные зависимости глубины гарантированного нанесения проявителей на внутренние поверхности отверстий от их диаметров, можно сделать вывод, что проявители типа красок для рассматриваемых технологий капиллярного контроля наносятся на внутренние поверхности отверстий глубже, чем суспензионный или порошковый. Это связано с тем, что жидкий проявитель данного типа может наноситься неоднократно на один и тот же участок для обеспечения требований по толщине его нанесения, необходимой для выявления дефектов. Проявители типа суспензий наносятся на меньшую глубину, это связано с необходимым условием нанесения его тонким сплошным слоем. Нанесение данного типа проявителя неоднократным толстым слоем может привести к сильному размытию индикаторного рисунка и неправильной интерпретации полученных результатов. Проявитель типа порошка электростатическим способом наносится неглубоко, особенно в отверстия небольшого диаметра, по сравнению с жидкими типами проявителей, что, вероятно, связано с основным движением частиц порошка по электрическим полям, как описано в статье [27], и наглядно подтверж-

дается. Важно отметить, что только суспензионный проявитель возможно нанести с использованием краскораспылителя на небольшую глубину отверстий диаметром меньше 6 мм, что связано с меньшей вязкостью данной системы и, соответственно, меньшей величиной взаимодействия в его составе мелкодисперсных частиц различного размера, способных лучше диспергироваться при нанесении с использованием краскопульта в общем направленном потоке, быстрее сохнуть и совершать более сложные циркуляционные движения с отклонением от центрального потока.

Из полученных зависимостей также установлено, что жидкие проявители типа красок могут наноситься краскопультом на внутреннюю поверхность отверстий диаметром (d) от 5,5 до 21 мм в осевом направлении, имитируя их расположение в диске газотурбинного двигателя, на глубину отверстий, равную $\approx 1/5 - 1/3,5 \cdot d$, суспензий $\approx 1/4 - 1/3,5 \cdot d$, порошка $\approx 1/7 - 1/4 \cdot d$. Таким образом, отверстия возможно контролировать на данную глубину, а не на глубину, равную один диаметр, как принято в литературных и технических источниках. При этом зона достаточного и равномерного нанесения на внутреннюю поверхность отверстий для всех типов проявителя возрастает с увеличением диаметра отверстия.

ВЫВОДЫ

По заказу АО «ОДК-Авиадвигатель» в соответствии с техническим заданием разработана комплексная методика, состоящая из нескольких подходов, позволяющих количественно оценить неконтролируемые зоны различных деталей, имеющих сложную геометрическую форму, при проведении капиллярного контроля, основанная на оценке возможности нанесения проявителей различного типа.

Установлено, что существующие технологии капиллярного контроля с применением проявителей типа красок, суспензий и порошков с использованием краскопульта и электростатических систем наносятся по-разному и могут не обеспечивать 100 % объема контроля поверхности деталей сложной конфигурации, что необходимо учитывать при оценке качества выпускаемой продукции.

С помощью разработанной методики установлено, что ранее приведенные в литературных источниках, технической и технологической документации данные о контролепригодности, полученные методом экспертной оценки, не соответствуют действительности. На примере таких конструктивных элементов, как отверстия, показано, что глубина их контроля даже при двустороннем доступе с обеспечением нанесения максимально возможной толщины на внешние доступные поверхности намного меньше диаметра.

Разработанная методика предназначена для оценки неконтролируемых зон для предусмотренного документацией капиллярного контроля основных и других деталей ГТД, разработанных АО «ОДК-Авиадвигатель», а также другими предприятиями АО «ОДК», в том числе в рамках аттестации систем и технологий неразрушающего контроля [28].

Если в результате анализа контролепригодности выявлены места, капиллярный контроль которых не может быть обеспечен с установленным уровнем чувствительности, то это является основанием для использования специальных приспособлений и режимов для нанесения проявляющих составов в труднодоступные места или замены набора дефектоскопических материалов, или применения другого метода неразрушающего контроля.

Разработанная методика может быть использована для оценки качества нанесения проявителей, входящих в состав как люминесцентных, так и цветных наборов дефектоскопических материалов.

Полученные с использованием разработанной методики данные позволяют повысить достоверность результатов неразрушающего контроля и, как следствие, качество выпускаемой продукции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ОСТ 1 90282-79 Качество продукции. Неразрушающий контроль. Капиллярные методы. М.: ФГУП «ВИАМ», 1979. 50 с.
2. Moore Patrick O. (Ed.) Liquid Penetrant Testing // ASNT Nondestructive Testing Handbook. V. 2. 2008. 494 p.
3. SAE AMS2647E Aerospace Material Specification, Fluorescent Penetrant Inspection. Aircraft and Engine Component Maintenance. 2014. 42 p.
4. SAE AMS2644E Aerospace Material Specification, Inspection Material Penetrant. 2006. 27 p.
5. ASTM E1417/E1417M — 16 Standard Practice for Liquid Penetrant Testing. 2016. 11 p.
6. ASTM E165 — 09 Standard Practice for Liquid Penetrant Examination for General Industry. 2009. 17 p.

7. ASTM E1208 — 10 Standard Practice for Fluorescent Liquid Penetrant Testing Using the Lipophilic Post-Emulsification Process. 2010. 7 p.
8. ASTM E1209 — 10 Standard Practice for Fluorescent Liquid Penetrant Testing Using the Water-Washable Process. 2010. 7 p.
9. ASTM E1210 — 10 Standard Practice for Fluorescent Liquid Penetrant Testing Using the Hydrophilic Post-Emulsification Process. 2010. 7 p.
10. ASTM E1219 — 10 Standard Practice for Fluorescent Liquid Penetrant Testing Using the Solvent-Removable Process. 2010. 6 p.
11. ASTM E1220 — 10 Standard Practice for Visible Penetrant Testing Using Solvent-Removable Process. 2010. 6 p.
12. ASTM E1418 — 10 Standard Practice for Visible Penetrant Testing Using the Water-Washable Process. 2010. 6 p.
13. ISO 3452-1-2013 Non-destructive testing — Penetrant testing Part 1: General principles. 2013. 7 p.
14. DOT/FAA/AR-01/95 Study of the Factors Affecting the Sensitivity of Liquid Penetrant Inspections: Review of Literature Published from 1970 to 1998. January 2002. 51 p.
15. Глазков Ю.А. Капиллярный контроль. М.: Спектр, 2013. 144 с.
16. Ospennikova O.G., Kudinov I.I., Golovkov A.N., Generalov A.S., Skorobogatko D.S. An Assessment of the Controllability of the Main Parts of Aircraft Engines During Capillary Non-destructive Testing // Journal of Physics: Conference Series. 2020. V. 1891. DOI: 10.1088/1742-6596/1891/1/012035
17. АП-33 Авиационные правила. Часть 33. Нормы летной годности двигателей воздушных судов. 2012.
18. Code of Federal Regulations. Title 14/ Chapter I/ Subchapter C/ Part 33 – Airworthiness Standards: Aircraft Engines. URL: <https://www.ecfr.gov/>.
19. Department of defense handbook. Nondestructive evaluation system reliability assessment. 2009. 181 p. MIL-HDBK-1823A, 7 April 2009.
20. FAA US Department of Transportation Advisory Circular No: 33.14-1 2001 Damage Tolerance for High Energy Turbine Engine Rotors.
21. FAA US Department of Transportation Advisory Circular No: 33.70-2 2009 Damage tolerance of hole features in high-energy turbine engine rotors.
22. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Кудинов И.И., Головков А.Н., Генералов А.С., Князев А.В. Оценка вероятности выявления эксплуатационных дефектов в деталях авиационной техники из жаропрочных сплавов с использованием дефектоскопических жидкостей отечественного и зарубежного производства // Дефектоскопия. 2021. № 1. С. 64—71. DOI: 10.31857/S0130308221010073
23. Головков А.Н., Куличкова С.И., Кудинов И.И., Skorobogatko D.S. Анализ существующих контрольных образцов для проверки чувствительности дефектоскопических материалов при проведении капиллярного неразрушающего контроля (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2019. № 11. Ст. 95. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 10.12.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-95-103
24. ГОСТ Р ИСО 3452-3—2009 Контроль неразрушающий. Проникающий контроль. Часть 3. Испытательные образцы. 2009. 12 с.
25. ISO 3452-3-2013 Non-destructive testing — Penetrant testing. Part 3: Reference test block. 2013. 12 p.
26. Skorobogatko D.S., Golovkov A.N., Kudinov I.I., Kulichkova S.I. К вопросу об экотоксичности и эффективности различных классов промышленных неионогенных пав, используемых при очистке металлических поверхностей в процессе капиллярного контроля деталей авиационной техники (ОБЗОР) //Авиационные материалы и технологии: электрон. науч.-технич. журн. 2021. № 4. Ст. 11. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения 24.12.2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-98-106
27. Куличкова С.И., Головков А.Н., Кудинов И.И., Skorobogatko D.S. Оценка эффективности различных способов нанесения порошковых проявителей при проведении капиллярного контроля // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2022. № 10 (116). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru>. (дата обращения 22.11.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-116-127
28. ГОСТ Р 58989—2020 Двигатели газотурбинные авиационные. Неразрушающий контроль основных деталей. Общие требования. 2020. 10 с.

АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ДЕФЕКТОВ И ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ СРЕДСТВАМИ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

© 2023 г. Чандан Кумар^{1,*}, Аджай Кумар Синха^{1,**}

¹Национальный технологический институт, Патна 800005 Индия
E-mail: *chandank.ph21.ce@nitp.ac.in; **aksinha@nitp.ac.in

Поступила в редакцию 05.07.2023; после доработки 29.08.2023
Принята к публикации 04.09.2023

Трещины — это деформации в бетонных конструкциях в реальном времени. Они характеризуются как несплошности с точки зрения формы и размеров бетонных конструкций. Для обеспечения надежности и безопасности конструкций выявление трещин является важной задачей. К традиционным методам контроля трещин относятся визуальноизмерительный контроль, ультразвуковой контроль и ручной контроль трещин. Эти методы требуют большого вмешательства человека, а также опытного и квалифицированного специалиста. Кроме того, эти методы являются субъективными и трудоемкими, не позволяющими корректно обнаруживать трещины в сложных бетонных конструкциях. Для устранения этих проблем был предложен метод grab-cut с улучшенным оператором Собеля для автоматического обнаружения трещин в бетонных конструкциях. Предложенный метод представляет собой двухэтапную модель, в которой на первом этапе сегментируются области трещин, а на втором этапе выполняется точная оценка трещин. Кроме того, для повышения эффективности фильтра Собеля маска модифицируется с помощью локальной дисперсии изображения вместо использования обычной маски фильтра. Для экспериментального исследования были получены изображения самостоятельно подготовленного образца бетона. Эффективность предложенного метода сравнивалась с различными существующими методами, такими как оператор Собеля, Превитт, Робертса, LoG, Zero Cross и Кэнни. Сравнительный качественный результат показывает, что предложенный метод превышает результаты других существующих методов. Кроме того, для удобства реализации и применения было разработано приложение к предлагаемому методу. Веб-приложение может быть использовано службами эксплуатации гражданской инфраструктуры и инженерами-строителями при решении задач по обслуживанию сооружений.

Ключевые слова: бетон, трещины, grab-cut, обработка изображения, оператор Собеля, веб-приложение.

AUTOMATED CRACK DETECTION AND A WEB TOOL USING IMAGE PROCESSING TECHNIQUES IN CONCRETE STRUCTURES

Chandan Kumar^{1,*}, Ajay Kumar Sinha^{1,**}

¹National Institute of Technology, Patna, 800005 India.
E-mail: *chandank.ph21.ce@nitp.ac.in; **aksinha@nitp.ac.in

Cracks indicates the real time deformity in concrete structures. It is characterized as discontinuity in terms of shape and size of the concrete structures. To ensure the structural health and safety, crack detection is an important task. The traditional methods of crack detection include visual introspection, ultrasonic and hand-held testing of crack. These methods require a high human intervention along with an experienced and skilled inspector. Moreover, these methods are subjective and time-consuming process which fails to identify the crack of the complex concrete structures properly. To overcome these issues, a grab-cut with improved Sobel has been proposed for automatic crack detection from the concrete structures. The proposed method works as a two-step model where cracks regions are segmented in the first step and a precise crack assessment is performed in the second step. Furthermore, to improve the efficacy of Sobel, the mask is modified with the aid of local variance of the image instead of using conventional mask of the filter. For the experimentation study, the images of self-prepared concrete sample have been acquired. The effectiveness of the proposed method has been compared with respect to various pre-existing methods like Sobel, Prewitt, Robert, LoG, Zero Cross and Canny. The comparative qualitative result exhibits that the proposed method surpasses the outcomes of the other pre-existing methods. Additionally, for easy implementation and application point of view a web tool of the proposed method has been developed. The web tool can be utilised by the civil infrastructure maintenance agency and construction engineers in the task of structure maintenance.

Keywords: concrete, cracks, grab-cut, image processing, Sobel, web tool.

DOI: 10.31857/S0130308223110039, EDN: XAYBIG

1. ВВЕДЕНИЕ

Трещины в любых инженерных сооружениях, таких как мосты, дороги, тротуары, здания, балки, плотины и бетонные конструкции, свидетельствуют о деградации или разрушении конструкции [1]. Внешние нагрузки, усталостные напряжения, сжатие, а также химические процессы,

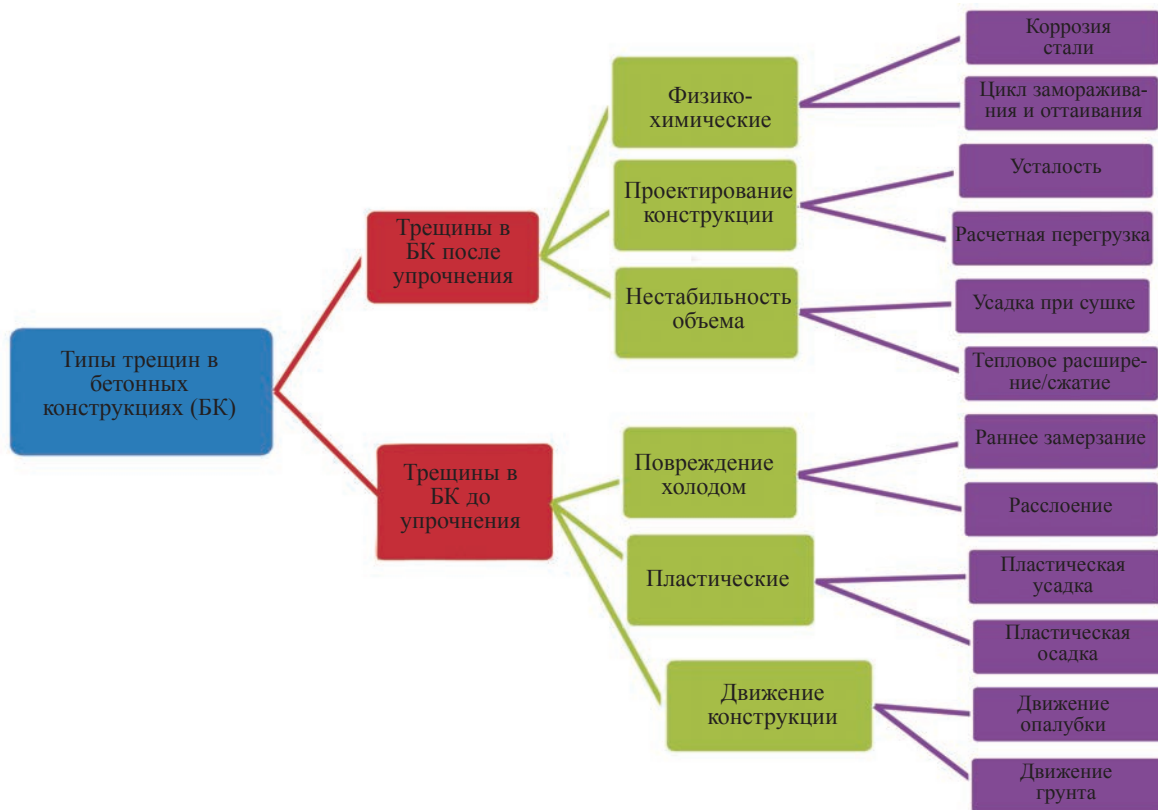


Рис. 1. Различные типы трещин в бетонных конструкциях.

такие как коррозия и реакции со щелочью, являются основными факторами, вызывающими появление трещин [2]. Кроме того, трещины в бетонных конструкциях могут образовываться в результате стихийных бедствий и техногенных причин. К стихийным бедствиям относятся наводнения, оползни и землетрясения, а к техногенным причинам образования трещин в бетонных конструкциях — низкое качество бетона, неправильное конструктивное исполнение и несоответствующее расстояние между стальными стержнями [3]. На рис. 1 показан обзор различных типов трещин в бетонных конструкциях [4]. В основном они делятся на те, которые возникают после и до упрочнения бетонных конструкций. Под твердением понимается процесс схватывания бетона. Одни трещины образуются до оседания конструкций, другие — после. Наличие трещин в бетонных конструкциях по естественным или техногенным причинам снижает их эксплуатационные свойства, срок службы и безопасность. Кроме того, снижается локальная компактность материалов, что приводит к образованию разрывов в конструкциях. Каковы бы ни были причины образования трещин, они всегда представляют собой серьезную проблему в развивающихся странах.

Первоначально трещины зарождаются в бетонных конструкциях на микроскопическом уровне. Постепенно их пропорции изменяются, что приводит к разрушению конструкции. Методы контроля трещин включают в себя ручной, визуально-измерительный и неразрушающий контроль [1]. При ручном методе трещины оцениваются по грубо составленной схеме трещин, включающей различные обстоятельства возникновения неровностей. Визуальноизмерительный метод использует для обнаружения трещин человеческое восприятие [3]. Это означает, что процесс идентификации трещин является составной функцией зрительных способностей и знаний человека. Кроме того, при неразрушающем контроле (НК) для обнаружения трещин используются технологии визуализации и сканирования [5]. Неразрушающий контроль позволяет обнаруживать трещины в бетонных конструкциях без какого-либо вмешательства в целостность материала. Он предлагает контроль трещин на основе изображений. В основном он включает ультразвуковую, радиографическую и инфракрасную визуализацию для контроля несплошностей в бетонных конструкциях [6]. В развивающихся странах для контроля трещин в основном используется ручной контроль.

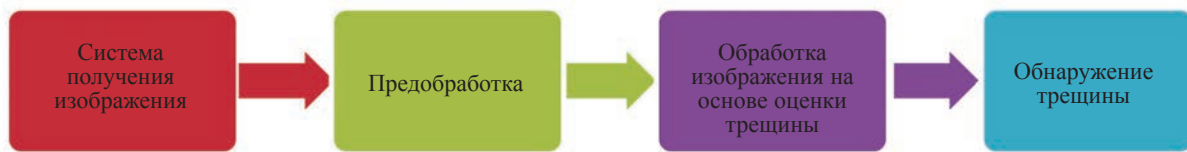


Рис. 2. Блок-схема стандартного метода контроля дефектов с использованием обработки изображений.

Однако все эти методы имеют ряд ограничений, таких как необходимость привлечения специалиста, уровень квалификации, знания дефектоскописта и качество изображения. Помимо этих ограничений, обнаружение трещин с помощью ручного и визуальноизмерительного контроля является дорогостоящим и трудоемким. Более того, эти методы в большей степени связаны с ошибками и вмешательством человека. Кроме того, эти методы должны выполняться через определенный промежуток времени. Таким образом, весь процесс контроля трещин становится более сложным и трудоемким. На изображения, получаемые в процессе неразрушающего контроля, часто влияют шумы, возникающие при получении изображения. Таким образом, существование трещин на любом уровне конструкций как микро, так и макро, не является благоприятным для жизни. Это создает небезопасную и опасную рабочую среду для человека. Поэтому корректный анализ трещин в бетонных конструкциях является чрезвычайно важной и актуальной задачей. В последнее время для обнаружения трещин очень популярны методы, основанные на обработке изображений (МОИ). Эти методы популярны благодаря точности результатов, низкой стоимости, меньшему времени вычислений и простоте использования [7]. Типичный метод, основанный на обработке изображений, включает в себя систему получения изображения, предварительную обработку изображения и алгоритм оценки трещин, как показано на рис. 2. МОИ может предложить второе мнение по отношению к результатам, полученным с помощью ручного, визуального и неразрушающего методов обнаружения трещин. Кроме того, он может помочь ведомствам контролировать и поддерживать структурное состояние бетонных конструкций в единой системе, оптимизируя при этом имеющиеся ресурсы.

В статье кратко описывается происхождение трещин в бетонных конструкциях. Цель получения этой информации — понять значение трещин и степень серьезности проблемы. Основной задачей данной работы является идентификация трещин по цифровым изображениям бетонных конструкций. Для этого предлагается метод, основанный на обработке изображений. Суть метода заключается в использовании преимуществ компьютерного зрения и современных методов обработки изображений, таких как сегментация, обнаружение краев или алгоритмы выделения признаков, для автоматического обнаружения трещин на цифровых изображениях. Алгоритмы, основанные на обработке изображений, повышают точность и эффективность обнаружения трещин. Кроме того, они обеспечивают простоту вычислений и меньшее вмешательство человека. В целом, распознавание трещин по изображениям играет важную роль в обслуживании, безопасности и долговечности инфраструктуры. Преимущества этого метода заключаются в его эффективности, точности и неразрушающем характере, что делает его незаменимым инструментом в различных отраслях, включая гражданское строительство, аэрокосмическую промышленность и производство. Таким образом, для обнаружения краев или границ трещин на основе визуальной информации был предложен улучшенный алгоритм Собеля для автоматического обнаружения трещин по полученным пользователем цифровым изображениям трещин. Он сочетает в себе основные признаки традиционного алгоритма Собеля и алгоритма *grab-cut*. Основной вклад в предлагаемый метод заключается в следующем. Во-первых, горизонтальная и вертикальная маски модифицируются с помощью локальных вариаций изображения для точного определения краев трещины. Во-вторых, передний и задний планы изображений разделяются с помощью алгоритма *grab-cut*. Он обеспечивает лучшую свертку модифицированных масок с пикселем трещины. В-третьих, для удобства использования и практического применения предложенного метода для обнаружения трещин в бетонных конструкциях было разработано веб-приложение. Веб-приложение разработано на платформе MATLAB.

Дальнейшая структура работы построена следующим образом: в разделе 2 представлен обзор существующих методов. В разделе 3 описаны методы и материалы, а также предлагаемый метод. В разделе 4 представлены результаты и их обсуждение с точки зрения качественного анализа. В этом разделе также представлено сравнительное исследование между предлагаемым и существующим методом. И, наконец, в разделе 5 сформулированы выводы.

2. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

С целью распознавания трещин проводились различные исследования, основанные на применении методов обработки изображений. В первую очередь это морфологические операции, вейвлет-преобразование, алгоритмы Кэнни, Собеля, метод выделения порога Оцу, метод максимума энтропии, градиентный метод и метод Прюитт. В данном разделе рассматриваются некоторые из существующих методов обнаружения трещин в зданиях, мостах, тротуарах и железнодорожных путях. Qader и др. [8] проанализировали различные МОИ, такие как метод Собеля, Кэнни, Фурье и быстрое преобразование Хаара (БПХ), применительно к контролю трещин в мостовых конструкциях. Анализ методов был проведен на пятидесяти образцах изображений бетонных мостов с трещинами и без трещин. Однако корректное обнаружение краев трещин ограничено интенсивностью изображения и формой пикселей трещин. Talab и др. [9] для контроля трещин в бетонных конструкциях объединили методы Собеля и порогового выделения Оцу. В этом способе после применения метода Собеля устранялся остаточный шум. Эффективность метода оценивалась по самостоятельно полученным изображениям бетона, однако он не обеспечивает обнаружения незашумленных трещин. Hutchinson и др. [10] использовали статистический метод для оценки таких повреждений бетона, как трещины и сколы. Статистический метод был реализован на основе результатов метода Кэнни и метода БПХ. Статистический метод представлял собой комбинацию операционных характеристик приемника и теории принятия решений Байеса. Метод не сработал в случае изменения ширины трещины. Yamaguchi и др. [11] предложили перколяционную модель для выявления больших трещин. Перколяция учитывает связность между соседними пикселями в бетоне и соответствующим образцом для выделения трещин. Кроме того, результат перколяционного метода бинаризуется и оптимизируется для получения лучшего результата. Однако оптимизация порогового значения не учитывается, и в случае мелких трещин получается зашумленное изображение. Wang и др. [12] провели сравнительный анализ обнаружения трещин в бетоне. Были проанализированы интегральный, перколяционный, морфологический и практический методы обнаружения трещин в бетоне. Rizvi и др. [13] представили метод обработки изображений для обнаружения трещин на железнодорожных путях. Метод использует пространственный, т.е. медианный фильтр для удаления шума. После удаления шума для идентификации трещин применяются морфологические операции, такие как бинаризация и гистограммное выравнивание изображения. Данный метод позволяет обнаруживать только крупные трещины. Lattanzi и др. [14] использовали метод сегментации и выделения признаков для обнаружения трещин в бетонных конструкциях при помощи обработки изображений. Для выявления трещин использовались сегментация по методу Кэнни и вейвлет-сегментация на основе анализа контуров. Метод был разработан для трех наборов собственных изображений. Однако признаки, используемые для обнаружения трещин, описаны недостаточно четко, а полученные изображения подвержены шуму. Kabir и др. [15] провели оценку эффективности различных методов обнаружения трещин на основе обработки изображений. Такие методы, как метод Собеля, перекрестный оператор Робертса, метод БПХ и метод Марра-Хилдрета, были опробованы на собственных акустических изображениях скважины. Однако в случае мелких трещин эффективность методов оказалась недостаточной. Однако в случае мелких трещин эффективность таких методов снижается. В работе Mohan и др. [1] представлен краткий анализ способов обнаружения трещин с помощью средств обработки изображений и методов неразрушающего контроля. Описаны требования к корректному распознаванию трещин: направление трещин; неправильная форма трещин; разрешение изображения; выбор параметров изображения. Lee и др. [16] предложили комбинированный подход для обнаружения трещин по снимкам мостов. Для сглаживания изображения используется медианный фильтр, после чего сглаженное изображение вычитается из исходного для получения более резкого изображения, причем резкость изображения регулируется параметром масштабирования. В дальнейшем для выделения сегмента трещины на изображении с контурами обрабатываются морфологическими операциями, такими как расширение и утоньшение. Однако точность метода зависела от ручного выбора параметра масштабирования. Kim и др. [17] использовали гибридный метод для обнаружения мелких трещин. Метод сочетает в себе свойства бинаризации изображений и технологии беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Для получения изображения с БПЛА используется ультразвуковая съемка. Однако существует неоднозначность в выборе порога для изображения. Dihao Ai и др. [7] сделали подробный обзор литературы по выявлению трещин. В литературе трещины в различных аспектах гражданских инфраструктур изучаются с помощью таких подходов к компьютерному зрению, как обработка изображений, машинное обучение (МО) и глубокое обучение (ГО). Ограничения для МОА заключаются в качестве изображения и шумах, в то время как методы,

основанные на МО и ГО, требуют большого набора данных и большого времени вычислений для контроля трещин. Takeda и др. [18] использовали традиционное вейвлет-преобразование для анализа трещин на цифровых изображениях бетонных конструкций. Однако в этом методе не учитываются локальные характеристики трещин, например, связность между соседними пикселями трещин. Кроме того, не было проведено устранение шумов на изображениях. Fujita и др. [19] рассмотрели два метода предварительной обработки изображений — вычитание и метод матрицы Гессе — для оценки трещин в бетонных конструкциях. В данном методе сначала проводится идентификация трещин обоими методами. После этого — сравнение между выявленными трещинами и трещинами, обнаруженными в результате ручного осмотра. Данный метод не работает в случае переменного размера трещин, поскольку локальное окно не фиксировано. Lee и др. [20] использовали морфологический метод и метод расширенной бинаризации для определения трещин по полученным самостоятельно цифровым изображениям. Морфологический метод был применен для преобразования неоднородной яркости изображения, а бинаризация использовалась для анализа формы. Однако в случае мелких трещин эффективность метода была ограничена. Giakoumis и др. [21] использовали для обнаружения трещин фильтр анизотропной диффузии (ФАД). ФАД [22] сочетает в себе свойства дифференциального уравнения теплопроводности в частных производных. Но результат применения метода подвержен эффекту «лестницы» и необходимости вручную подбирать параметры краевого порога ФАД.

Из литературы известно, что для оценки трещин широко используются методы обработки изображений (ОИ), МО и ГО. Все эти методы имеют ряд достоинств и недостатков, например, пороговые методы и методы, основанные на обнаружении краев, имеют меньшее время вычислений, но зависят от качества изображения и шумов. Аналогично, методы ОИ на основе морфологии хорошо подходят для анализа формы, но плохо работают в случае сложных текстур бетонных конструкций. Что касается методов, основанных на МО и ГО, то для их применения требуются большие наборы данных с маркировкой. Кроме того, их эффективность и устойчивость зависят от доступных ресурсов, а также от большого времени вычислений.

3. ОПИСАНИЕ МЕТОДОВ И МАТЕРИАЛОВ

Для устранения указанных в литературе недостатков был предложен метод grab-cut с улучшенным оператором Собеля (GCIS) для обнаружения трещин в бетонных конструкциях. На рис. 3 показана блок-схема предлагаемой системы GCIS, в которой процесс начинается с получения изображений и заканчивается оценкой трещин и созданием веб-приложения. В данном разделе подробно рассматривается изготовление бетонных образцов, процесс образования трещин с помощью универсальной испытательной машины, процесс получения изображений и полное математическое описание предлагаемого метода.

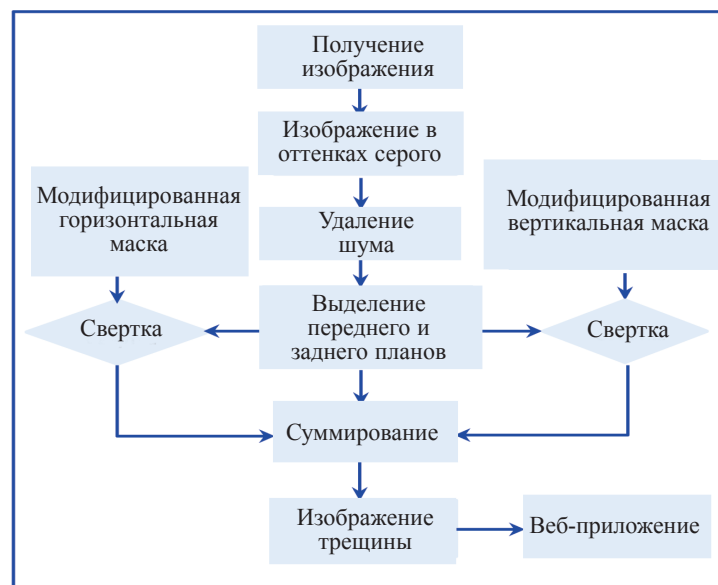


Рис. 3. Блок-схема предлагаемой методики.

3.1. Изготовление образцов из бетона и выборка образцов трещин

Для оценки эффективности предложенного метода использовали цифровые изображения самостоятельно изготовленных образцов бетона. Изготовление образцов бетона и образование трещин осуществляли в лабораторных условиях. Поскольку основной целью предлагаемого метода является оценка трещин по цифровым изображениям поврежденных бетонных конструкций, то в данной статье, чтобы избежать излишней детализации, представлен краткий обзор процесса изготовления образцов, образования трещин и получения изображений трещин. Результат изготовления образца бетона, процесс образования трещин и изображения трещин представлены на рис. 4а—в соответственно. Весь процесс создания образцов бетона состоит из трех этапов. На первом этапе формируются образцы бетона с использованием таких материалов, как цемент, мелкий и крупный заполнитель. Образцы бетона размером 100×100×500 мм были изготовлены в соответствии с Индийским Стандартом 456:2000. На втором этапе сначала образцы загружаются в универсальную испытательную машину (УИМ), затем к ним прикладывается автоматическая нагрузка для образования трещин, причем оба процесса выполняются одновременно. Контроль величины нагрузки проводили программирующим устройством до начала образования трещин в образцах. Использовалась УИМ модели BSUT-100-FAD мощностью 1000 кН с высокой точностью нагружения и коэффициентом скорости нагружения 0,5 мм/мин. Подготовка и испытание образцов бетона происходили в лаборатории бетона и испытания материалов Национального технологического института Патны соответственно. На третьем этапе с помощью цифровой фотокамеры NIKON D5100 получены изображения трещин в бетонных структурах.



Рис. 4. Образец из бетона размерами 100×100×500 мм (а); образец, загруженный в универсальную испытательную машину (б); изображения образцов с трещинами (в).

Трещины в сформированном образце бетона генерируются с помощью УИМ. Кроме того, цифровые изображения трещин были получены с помощью камеры высокого разрешения NIKON D5100 в яркий солнечный день. С целью экспериментального анализа было получено несколько образцов бетона с трещинами и их изображения. Для понимания эффективности предложенного метода приведен результат для шести образцов. Однако для остальных полученных образцов и их изображений анализ эксперимента остается неизменным. Форма и размер трещин меняются в зависимости от нагрузки на УИМ. Ниже показана оценка мелких трещин с помощью предлагаемого метода. Крупные трещины легко просматриваются. На рис. 5 показан образец формованного

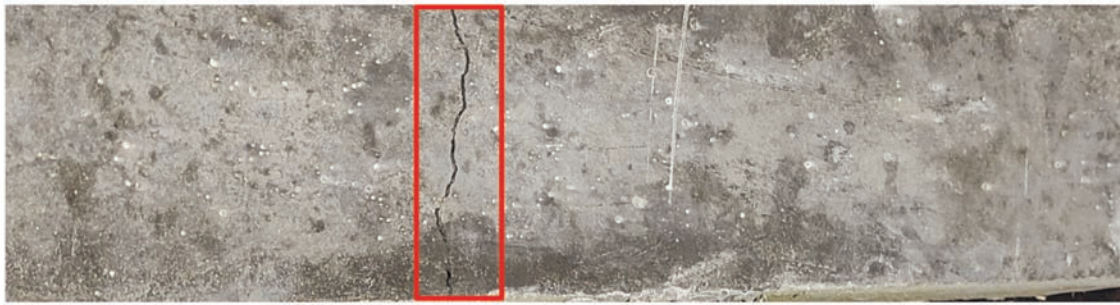


Рис. 5. Образец образца из бетона с выделенным участком, содержащим трещину.

бетона, на котором интересующая область, т.е. трещина, выделена прямоугольной красной рамкой. Экспериментальные результаты, полученные на рис. 5 с помощью предложенного метода, показаны на рис. 7.

3.2. Предложенный метод grab-cut с улучшенным оператором Собеля

Трещины несут высокочастотную информацию о структурах в терминах краев и границ. В аспекте обработки изображений трещины эквивалентны краевой информации изображения. Края в основном выражаются в изменении интенсивности пикселей, которое используется для разделения изображения на различные сегменты. В отличие от трещин в бетонных конструкциях, края могут быть визуализированы как резкая или размытая структура. Задачей предлагаемого метода является обнаружение краев пикселей трещин. Предлагаемый метод сочетает в себе признаки метода grab-cut и метода Собеля, что делает его гибридным методом обнаружения трещин в бетонных конструкциях. В предлагаемой работе трещина обозначает изучаемую область (ИО). Сегментация ИО была выполнена с помощью алгоритма grab-cut (GCA). Кроме того, для определения краев сегментированной ИО использовался улучшенный алгоритм Собеля. Grab-cut [23] — это метод сегментации изображений, при котором изображение разбивается на области переднего и заднего плана. Этот метод широко используется благодаря простоте реализации и высокой производительности. Он основан на правилах теории графов. В нем используется модель гауссовой смеси (МГС), которая отвечает за оценку распределения цветов для разделения изображения на передний и задний план. Далее на метки пикселей накладывается случайное поле Маркова (СПМ) с энергетической функцией, которая определяет схожие области краев для точного выделения переднего и заднего планов изображения. После этого для вывода меток пикселей используется оптимизация на основе разрезания графа. В общем случае энергетическая функция [24] определяется как

$$E = U_{\text{pixel}} + V_{\text{pair}} + G_{\text{global}}, \quad (1)$$

где U_{pixel} и V_{pair} — данные и сглаживание соответственно. U_{pixel} оценивает вероятность принадлежности пикселя к заднему или переднему плану. V_{pair} определяет сглаживание локальных пикселей. G_{global} являются стандартными членами и определяют сходство между передними планами.

Пусть входное изображение обозначается как $I(x, y)$ с n пикселями и α — метка пикселя изображения. Согласно GCA, это проблема маркировки, в которой выделяется метка $\alpha_i \in \{0, 1\}$, где $i = 1, \dots, n$ соответствует каждому пикселю p_i изображения. И где $i = 1, \dots, n$ с $\alpha_i = 1$ для переднего плана и 0 для заднего плана соответственно. Затем проблема маркировки рассматривается как задача оптимизации. Она решается минимизацией энергетической функции, которая определяется как

$$E(\alpha, k, \theta, p) = U(\alpha, k, \theta, p) + V(\alpha, p), \quad (2)$$

где $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$, $p = (p_1, p_2, \dots, p_n)$, а θ определяет модель внешнего вида переднего и заднего планов изображения, которая обозначается как

$$\theta = \{h(z; \alpha), \alpha = \{0, 1\}\}, \quad (3)$$

где h — модель внешнего вида. Она определяется как МГС, где для построения рассматривается полноковариационная гауссовская смесь с К-факторами.

По данным $U(\alpha, k, \theta, p)$ в уравнении (2) оценивают соответствие метки α метке p с θ и k . Оно читается как

$$U(\alpha, k, \theta, p) = \sum_n D(\alpha_n, k_n, \theta, p_n) \quad (4)$$

и

$$D(\alpha_n, k_n, \theta, p_n) = -\log P(p_n | \alpha_n, k_n, \theta) - \log \pi(\alpha_n, k_n), \quad (5)$$

где P — ковариация распределения. По сглаживанию $V(\alpha, p)$ в уравнении (2) повышают согласованность в локальных областях изображения. Оно может быть записано в виде:

$$V(\alpha, p) = \gamma \sum_{(m,n) \in C} [\alpha_m \neq \alpha_n] \exp(-\beta) \|p_m - p_n\|^2, \quad (6)$$

где $[\cdot]$ — индикаторная функция, принимающая значения 0,1 для исследуемого признака; β и γ являются константами; C — группа пар соседних пикселей.

Рабочее уравнение GCA определяется через минимизацию уравнения (2). Оно может быть записано в виде:

$$\hat{\alpha} = \arg \min_{\alpha} E(\alpha, k, \theta, p). \quad (7)$$

При использовании GCA минимизация энергии производится итеративно. При этом происходит обновление k и θ по текущей сегментации и использование новых k и θ для получения новой сегментации. Итерация прекращается при выполнении критерия сходимости.

Оператор Собеля [25] — это математический оператор, который используется для обнаружения краев на цифровых изображениях. Он оценивает градиент интенсивности изображения в каждом пикселе. По сути, он измеряет, насколько быстро изменяется интенсивность изображения от одного пикселя к другому. Для обнаружения краев используются две маски 3x3, одна из которых оценивает изменение интенсивности по горизонтали, а другая — по вертикали. Горизонтальная и вертикальная маски обозначаются как G_x и G_y соответственно. Маски свертываются с изображением для вычисления производных изображения, G_x и G_y имеют вид:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

и

$$G_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Величина градиента и фаза определяются следующим образом:

$$|G| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (10)$$

и

$$\theta_s = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right). \quad (11)$$

Для повышения эффективности фильтра Собеля обычная маска заменяется локальной дисперсией изображения. Локальная дисперсия [26] определяет изменчивость или разброс интенсивности пикселя и работает вокруг значений соседних пикселей. Если дисперсия велика, то значения интенсивности пикселей, скорее всего, быстро меняются, что указывает на наличие границы. Локальная дисперсия изображения оценивается как

$$I_{Lvar} = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (I(x, y) - \mu)^2, \quad (12)$$

где μ — среднее значение яркостей элементов изображения $I(x, y)$ в локальной окрестности. Таким образом, предлагаемый улучшенный фильтр Собеля может быть выражен:

$$G'_x = \begin{bmatrix} -I_{Lvar} & 0 & I_{Lvar} \\ -2 & 0 & 2 \\ -I_{Lvar} & 0 & I_{Lvar} \end{bmatrix}; \quad (13)$$

$$G'_y = \begin{bmatrix} I_{Lvar} & 2 & I_{Lvar} \\ 0 & 0 & 0 \\ -I_{Lvar} & -2 & -I_{Lvar} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Эффективность предложенного метода grab-cut, улучшенного с помощью оператора Собеля, была исследована на самостоятельно подготовленных образцах бетона с трещинами. В предлагаемых методах сначала используется алгоритм grab-cut для выделения части трещины, которая называется областью интереса бетонной конструкции. После этого для выделения краев или границ области трещин используется улучшенный фильтр Собеля. Целью предлагаемого метода является обнаружение трещин на цифровых изображениях. Этапы подготовки образцов бетона с трещинами были рассмотрены в данном разделе. Кроме того, была проведена оценка эффективности метода на основе сравнительной оценки трещин между другими существующими методами и предлагаемым методом. Для сравнительного анализа использовались такие существующие методы, как оператор Превитт [27], оператор Роберта [27], оператор LoG [27], оператор Zero-cross [27], оператор Кэнни [27], Sobel [25] и метод Оцу [9]. На рис. 6 и 7 показан результат выполнения всех шагов предложенного метода.

Целью предлагаемого метода является обнаружение трещин на цифровых изображениях бетонных конструкций. Эта задача решается с помощью предложенного метода — grab-cut improved Sobel. Здесь алгоритм grab-cut используется для выделения трещины, а улучшенный алгоритм Собеля выделяет края трещины. Поскольку здесь не проводится измерение размеров и глубины трещины, эффективность предлагаемого метода оценивается только качественно, т.е. визуально. Предлагаемый метод включает в себя этапы выделения области трещины и последующего обнаружения трещины в бетонных конструкциях, поэтому для иллюстрации результатов выполнения этапов предлагаемого метода использованы рис. 6 и 7. Предложенный метод позволяет обнаружить мелкие трещины на цифровых изображениях бетонных конструкций. Поскольку природа каждой трещины различна, на полученных изображениях можно увидеть различные типы трещин. Поэтому для лучшего анализа и оценки эффективности предложенного метода был проведен сравнительный анализ только шести образцов из множества сформированных образцов. Сравнительный анализ существующего и предлагаемого метода представлен на рис. 8—13. Эти результаты очень важны для лучшего анализа и проверки работы. В работе Lee и др. [20] для диагностики поверхностных трещин использовался метод морфологической обработки изображений. Однако эффективность метода была ограничена, поскольку область трещин выделялась вручную. Кроме того, процесс расширения с последующей эрозией сильно зависел от шума изображения, что влияло на оценку мелких трещин. В предлагаемом методе используются функции фильтра grab-cut и улучшенного фильтра Собеля, где grab-cut обеспечивает выделение области трещин, а улучшенный фильтр Собеля — их обнаружение. Кроме того, предложенный метод нечувствителен к шуму благодаря выделению области трещин, а также правильно выделяет читаемые особенно-сти, такие как края или границы. Таким образом, предложенный метод позволяет обнаруживать мелкие, умеренные и большие трещины в бетонных конструкциях.

Самое первое изображение (а) на рис. 6 и 7 представляет собой изображение самостоятельно подготовленных образцов с трещинами. Эти образцы с трещинами были разделены на передний и

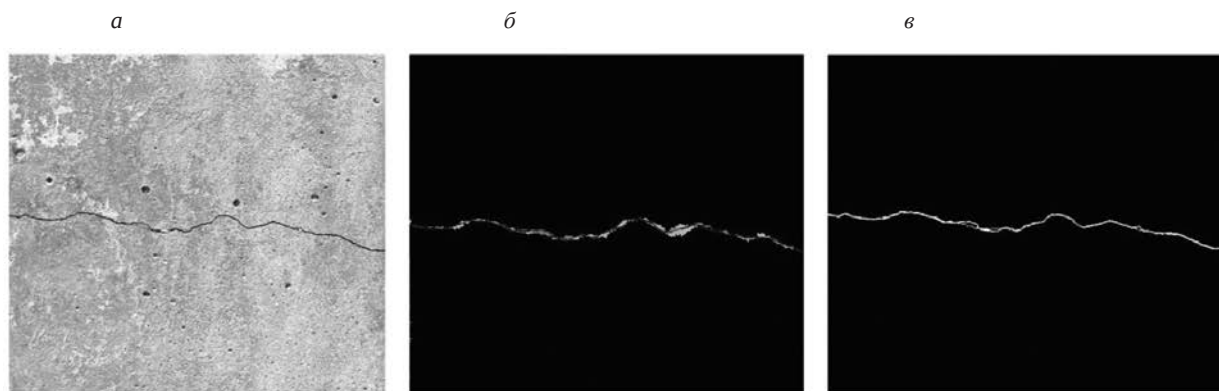


Рис. 6. Образец бетона 1 размерами 100×100×500 мм (а); отделение переднего и заднего плана методом grab-cut (б) и контроль трещин по предложенной методике (в).

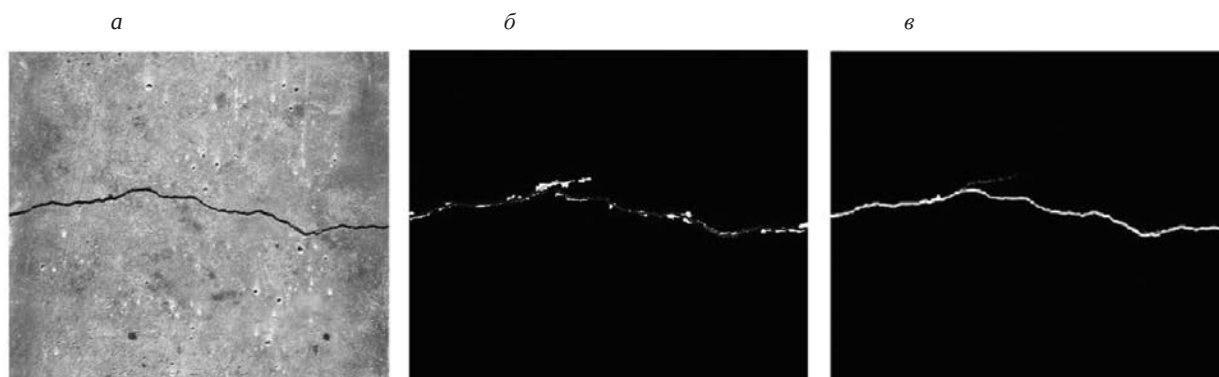


Рис. 7. Образец бетона 2 размерами 100×100×500 мм (а); отделение переднего и заднего плана методом grab-cut (б) и контроль трещин по предложенной методике (в).

задний планы с помощью метода grab-cut, как показано на изображениях (б) рис. 6 и 7 соответственно. Этот этап является чрезвычайно важным, поскольку он позволяет выделить область пикселей с трещинами для обнаружения трещин. Кроме того, он позволяет выделить нужную интересующую область из ряда других помех, таких как шум и размытие изображения. Затем сегментированные изображения обрабатываются предложенным методом для выявления трещин, как показано на изображениях (в) рис. 6 и 7 соответственно.

На рис. 8—13 показан сравнительный анализ трещин по сравнению с другими существующими и предлагаемым методом для образцов бетона 1—6 соответственно. Изображение (а) на рис. 8—13 иллюстрирует изображения самостоятельно подготовленных образцов с трещинами. Кроме того, изображения (б—з) на рис. 7—12 демонстрируют результаты анализа трещин по методам Превитт [27], Роберта [27], LoG [27], Zero-cross [27], Кэнни [27], Собеля [25] и Оцу [9] соответственно. На последнем изображении (и) рис. 8—13 показан результат распознавания трещин с помощью предложенного метода grab-cut, улучшенного Собелем. Сравнительная оценка других существующих и предлагаемого метода проводилась на одной и той же экспериментальной установке. Для сравнительного анализа были выбраны такие методы, которые дают только визуальный или качественный анализ, но не количественный. Для проведения эксперимента использовались одинаковые изображения трещин, язык программирования и среда, т.е. сначала выделяется область трещины с помощью алгоритма grab-cut. Затем к сегментированной области применяются различные существующие и предлагаемые методы для идентификации трещины. Кроме того, в состав схемы эксперимента также входит метод удаления шумов. Все это было сделано для того, чтобы сохранить единообразие при сравнительном анализе.

На основе сравнительного иллюстративного анализа было установлено, что предложенный метод является наиболее подходящим для распознавания трещин на изображениях бетонных объ-

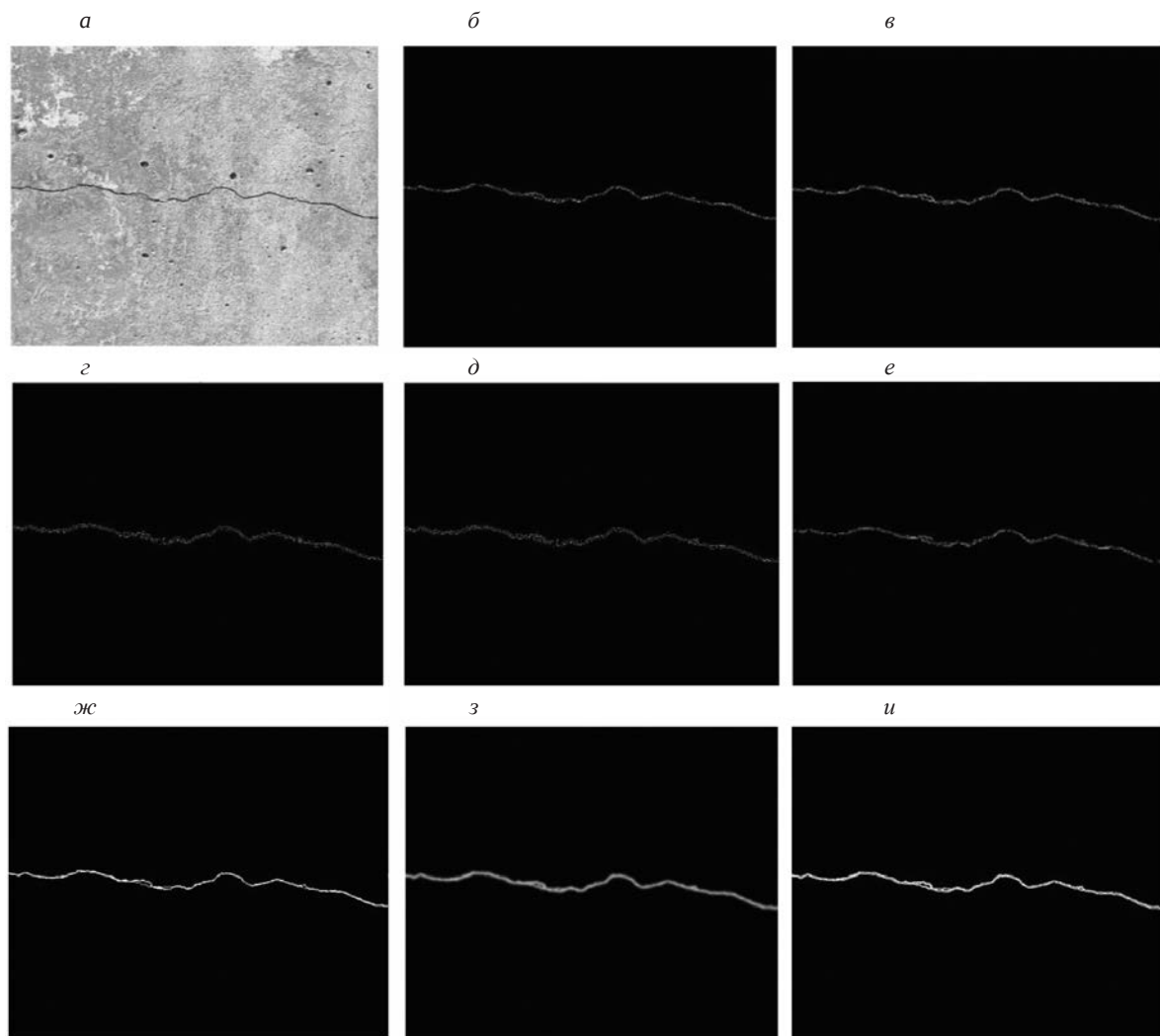


Рис. 8. Сравнительный анализ результатов выявления трещин, где образец бетона 1 (исходное изображение) (а); результат применения алгоритма Превитт (б); Роберта (в); LoG (г); Zero-cross (д); Кэнни (е); Собеля (ж); Оцу (з) и предлагаемой методики (и).

ектов. На изображениях, полученных с помощью предложенного метода, хорошо видны края, границы и резкие изменения интенсивности трещин. Результаты применения таких алгоритмов, как LoG [27], Zero-cross и Кэнни, демонстрируют нечеткость и размытость изображения. Кроме того, результаты выполнения алгоритмов Превитт и Роберта показывают наложение трещин друг на друга, что приводит к ложному детектированию трещин. Кроме этих методов, результаты методов Собеля и Оцу демонстрируют недостаточное и избыточное сглаживание изображения, что приводит к неправильному определению трещин. В методе Оцу всегда требуется ручная настройка порога. В некоторых случаях, как показано на рис. 9, результаты применения этих методов демонстрируют потерю информации.

Для облегчения реализации предложенного метода было разработано веб-приложение. Он обеспечивает визуальный анализ изображений, что позволяет в режиме реального времени обнаруживать трещины в бетонных конструкциях. Веб-приложение создано с помощью конструктора приложений MATLAB. После обработки программа генерирует файл `'mlapp'`. В данном веб-приложении описана интеграция предложенного метода с приложением в реальном времени. Разработанное веб-приложение иллюстрирует сравнительный качественный анализ существующего и предлагаемого методов. Однако веб-приложение для контроля состояния конструкций требует только входного изображения и результата работы предложенного метода, как показано на

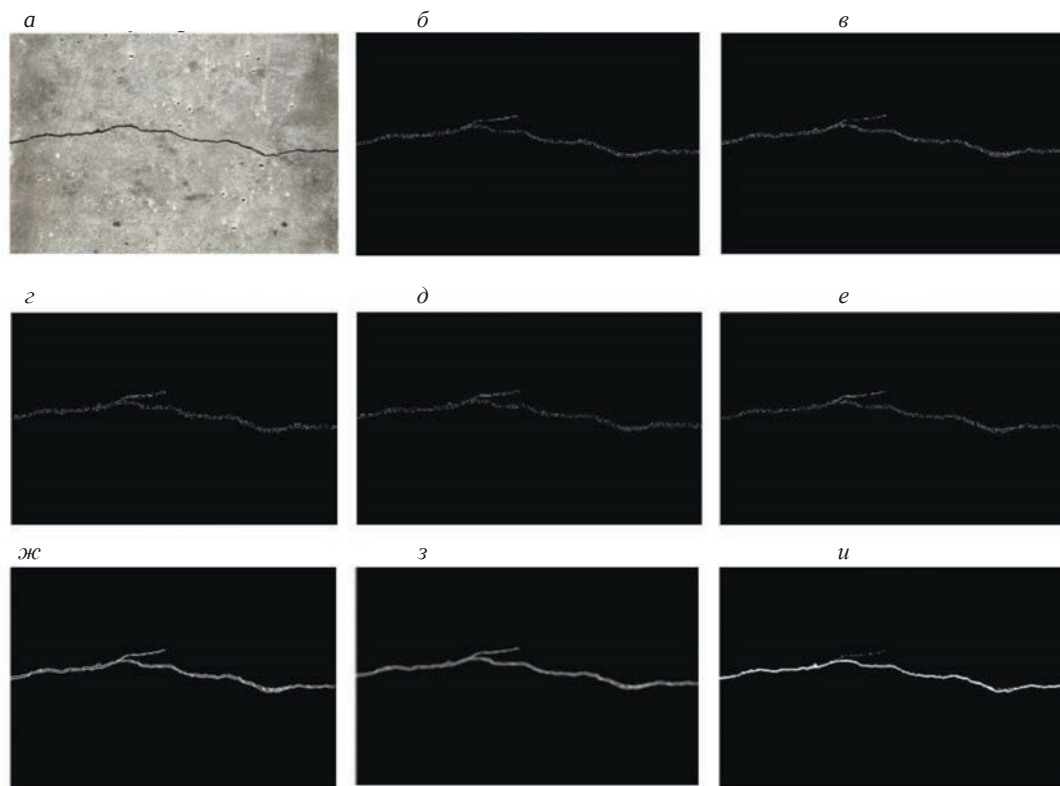


Рис. 9. Сравнительный анализ результатов выявления трещин, где образец бетона 2 (исходное изображение) (а); результат применения алгоритма Превитт (б); Роберта (в); LoG (г); Zero-cross (д); Кэнни (е); Собеля (ж); Оцу (з) и предлагаемой методики (и).

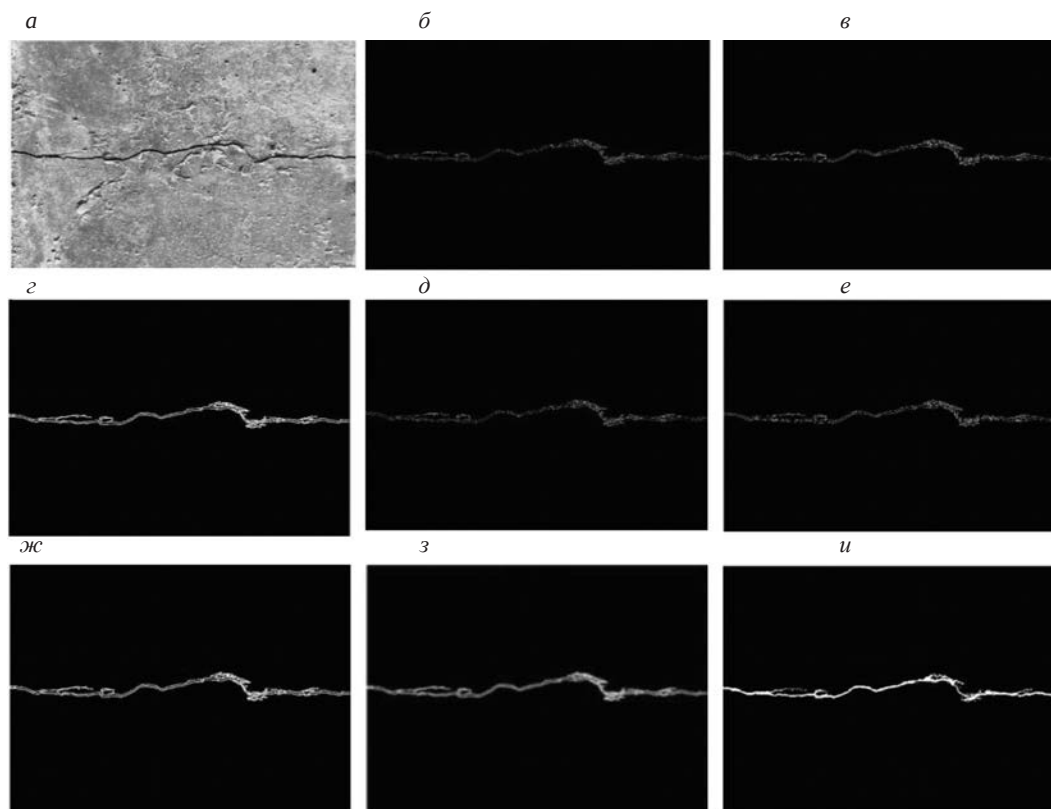


Рис. 10. Сравнительный анализ результатов выявления трещин, где образец бетона 3 (исходное изображение) (а); результат применения алгоритма Превитт (б); Роберта (в); LoG (г); Zero-cross (д); Кэнни (е); Собеля (ж); Оцу (з) и предлагаемой методики (и).

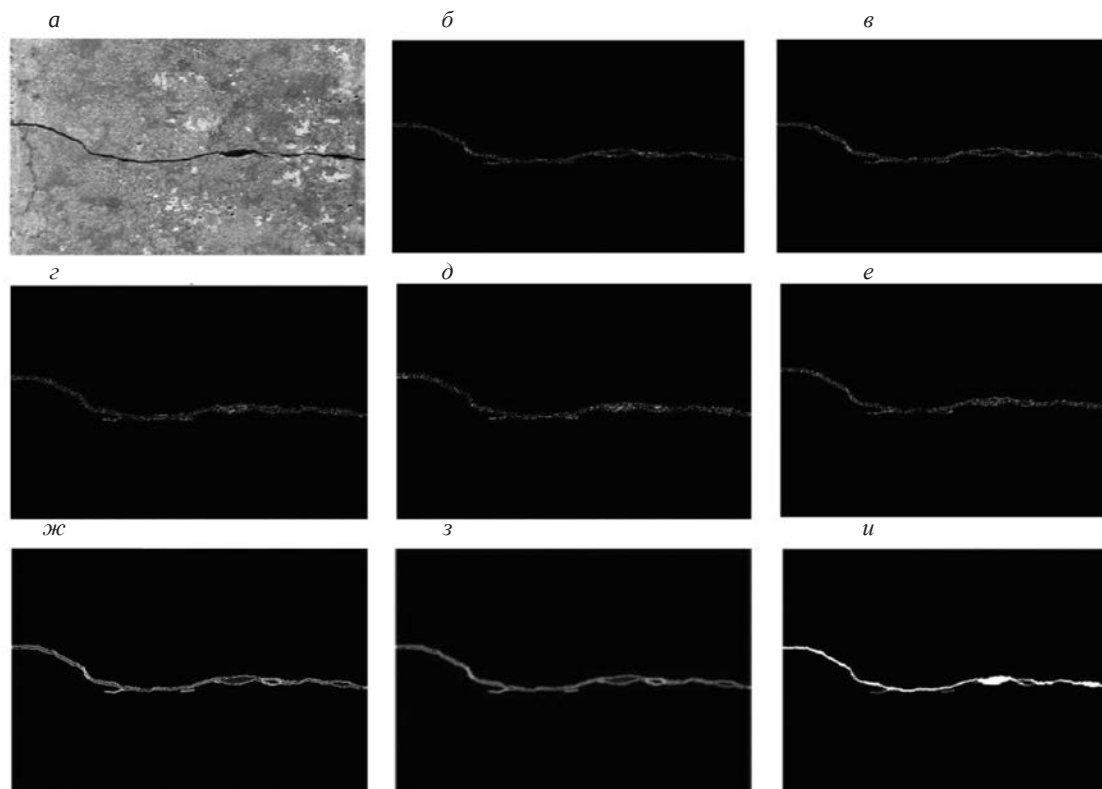


Рис. 11. Сравнительный анализ результатов выявления трещин, где образец бетона 4 (исходное изображение) (а); результат применения алгоритма Превитт (б); Роберта (в); LoG (г); Zero-cross (д); Кэнни (е); Собеля (ж); Оцу (з) и предлагаемой методики (и).

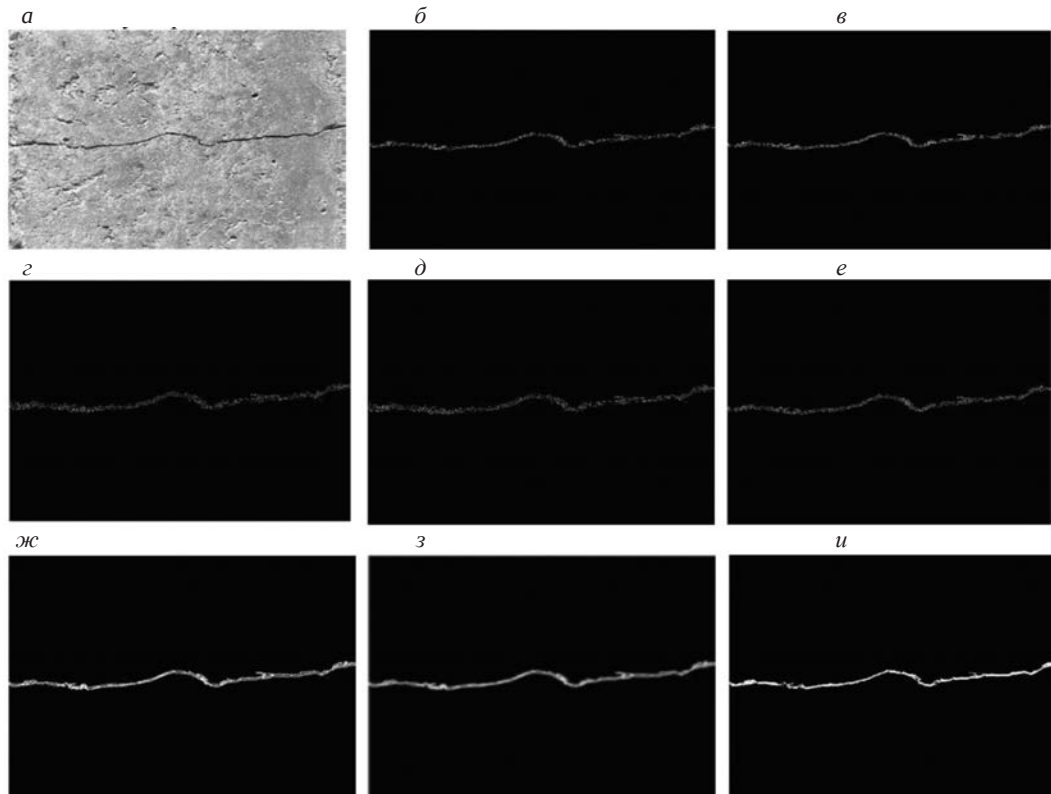


Рис. 12. Сравнительный анализ результатов выявления трещин, где образец бетона 5 (исходное изображение) (а); результат применения алгоритма Превитт (б); Роберта (в); LoG (г); Zero-cross (д); Кэнни (е); Собеля (ж); Оцу (з) и предлагаемой методики (и).

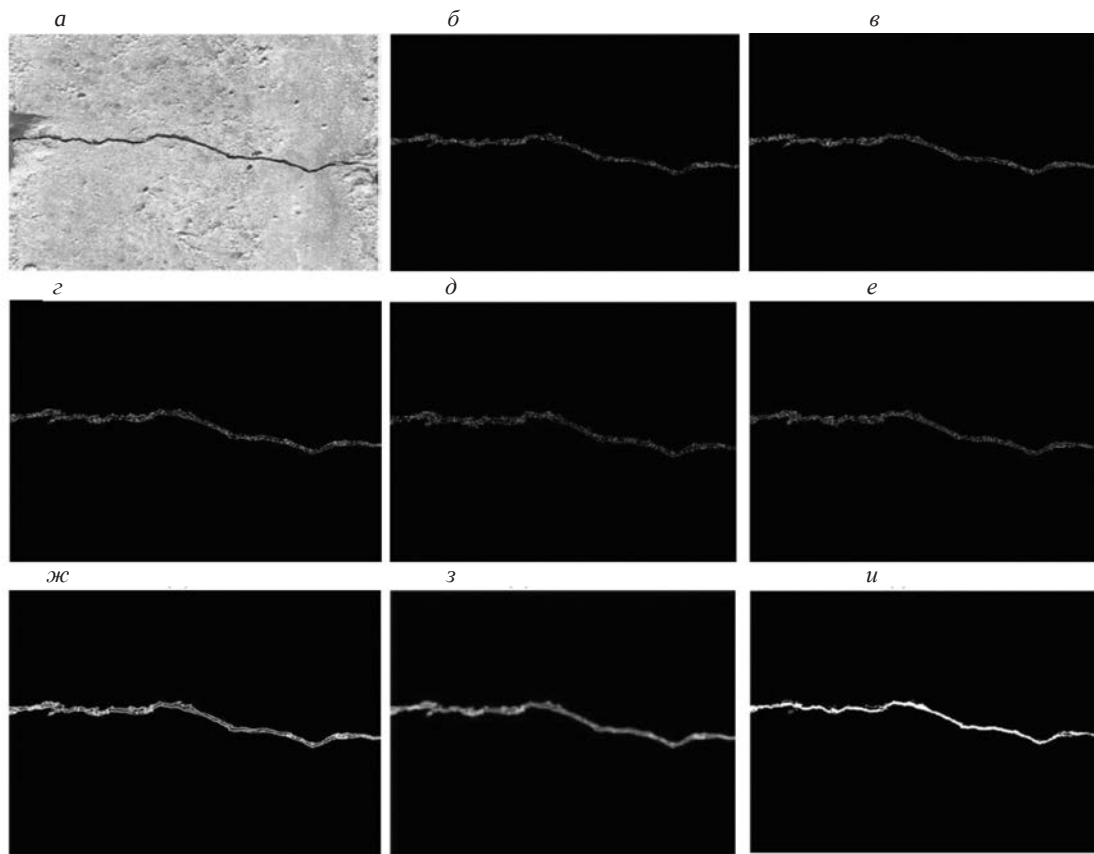


Рис. 13. Сравнительный анализ результатов выявления трещин, где образец бетона 6 (исходное изображение) (а); результат применения алгоритма Превитт (б); Роберта (в); LoG (г); Zero-cross (д); Кэнни (е); Собеля (ж); Оцу (з) и предлагаемой методики (и).

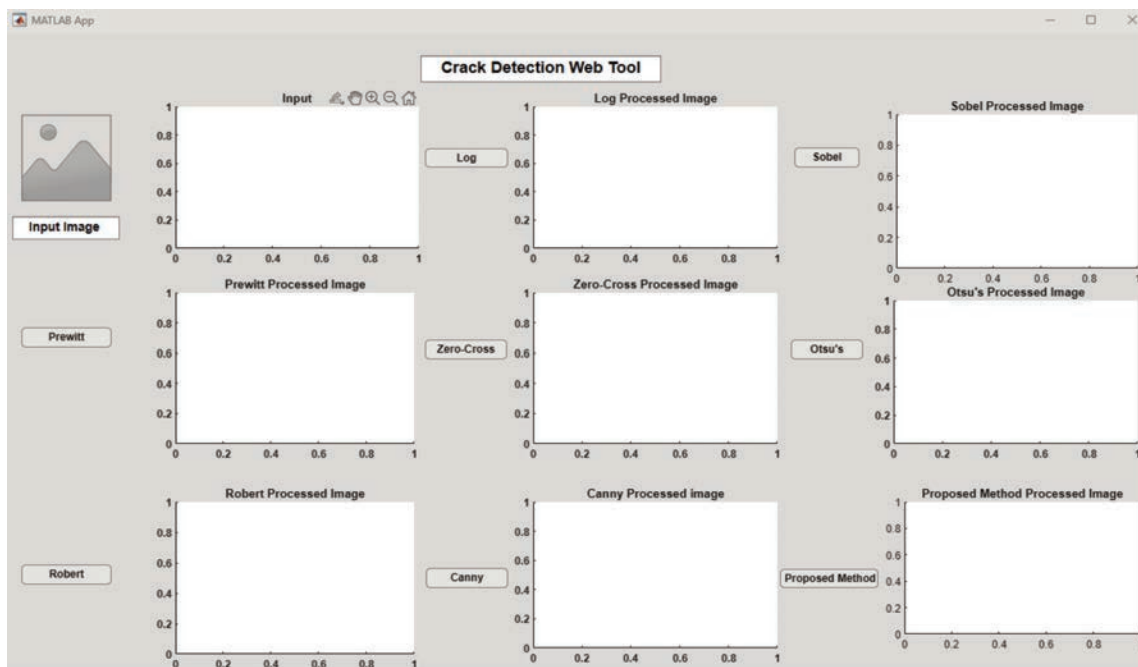


Рис. 14. Предлагаемая концепция веб-приложения для распознавания трещин при проведении сравнительного качественного анализа.

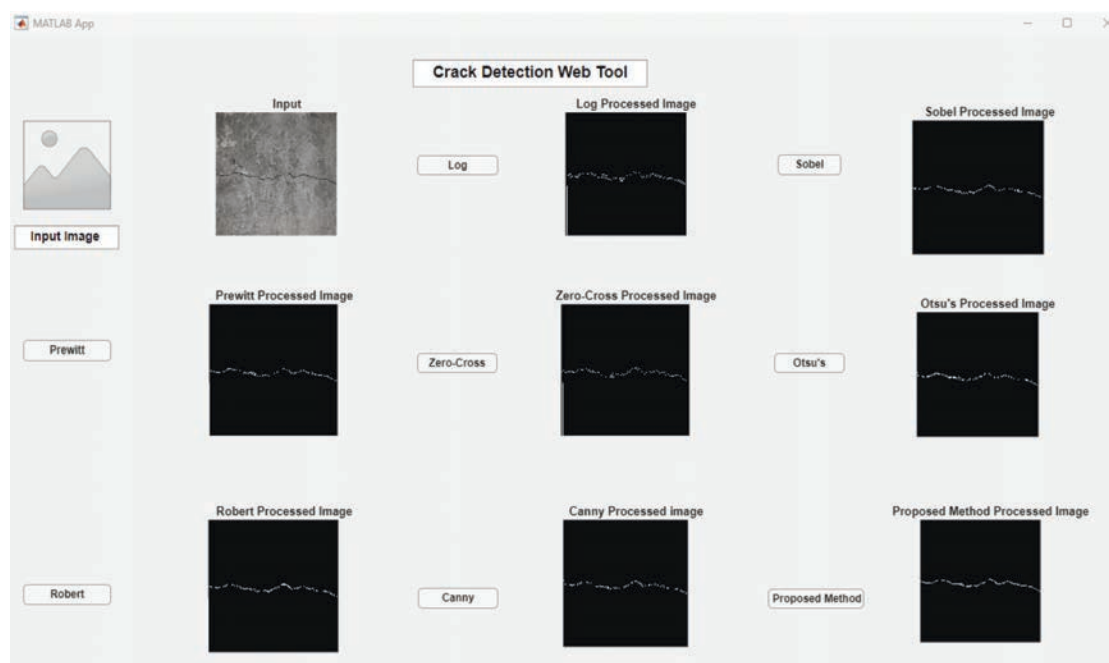


Рис. 15. Результат сравнительного качественного анализа предложенного веб-приложения для обнаружения трещин.

рис. 16. На рис. 14 показана демонстрационная версия веб-приложения, а на рис. 15 — результат сравнительного качественного анализа, полученный с помощью веб-приложения. Данное веб-приложение может быть использовано службой мониторинга состояния конструкций для удобства практического применения в режиме реального времени. Автоматизация, о которой идет речь в заголовке, в основном подразумевает разработку алгоритмов, позволяющих автоматически обна-

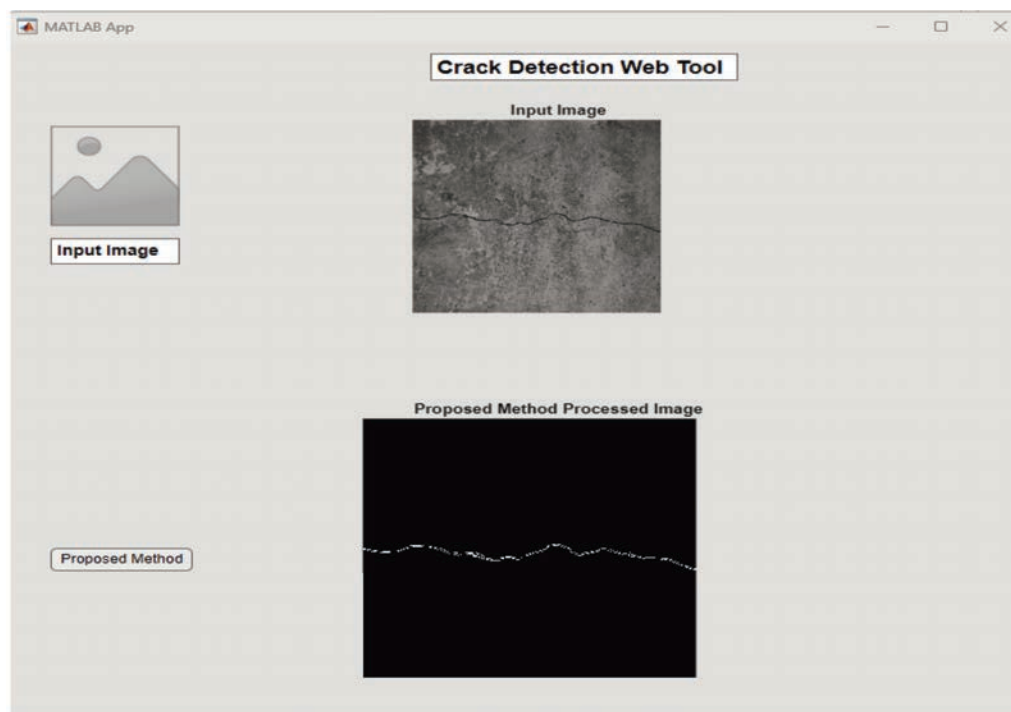


Рис. 16. Результат работы предлагаемого веб-приложения по выявлению трещин.

руживать трещины на изображениях при минимальном вмешательстве человека. Это позволяет получить второе заключение дефектоскописта, а также подтвердить результат ручной проверки. Разработанное веб-приложение описывает, каким образом предложенный метод может быть использован в приложениях реального времени и как мы можем извлечь из него пользу. Веб-приложение просто предлагает предварительный сравнительный анализ существующего и предлагаемого методов. Более того, он также обеспечивает прямую связь между входным изображением и результатом, полученным с помощью предлагаемого метода. Для агентства по мониторингу состояния конструкций разработанное веб-приложение необходимо, поскольку оно позволяет подтвердить обнаружение трещин на основе сравнительного анализа, а также путем отдельного анализа.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существующие методы обнаружения трещин, такие как ручной и визуальный осмотр, требуют большого вмешательства человека. Поэтому для автоматизации процесса выявления трещин в данной работе предлагается новый подход, основанный на методе обработки изображений, т.е. grab-cut, улучшенный Собелем, для обнаружения трещин в бетонных конструкциях. Поскольку полученные изображения для анализа трещин характеризуются низким контрастом, неравномерной освещенностью и шумами, для выделения области интереса был использован метод grab-cut. Он сегментирует область на основе особенностей переднего и заднего планов изображения. Кроме того, для корректной оценки трещин был разработан усовершенствованный метод Собеля. Усовершенствованный метод Собеля включает в себя модифицированную горизонтальную и вертикальную маску на основе локальной дисперсии.

На основании сравнительного анализа можно утверждать, что предложенный метод является наиболее подходящим для обнаружения трещин на изображениях бетонных конструкций. Он превосходит другие существующие методы, такие как метод Превитта, Роберта, LoG, Zero-cross, Кэнни, Собеля и Оцу соответственно. Предложенный метод обнаружения трещин может быть использован в системе мониторинга состояния конструкций. Для удобства и практического применения было разработано веб-приложение предлагаемого метода на базе MATLAB. Его можно использовать для оценки трещин в мостах, плотинах, железных дорогах, водопропускных трубах, каменной кладке зданий, поверхностях стен, дорогах и т.д. Преимуществом данного метода является четкое и точное выявление трещин на изображениях. Предложенный метод может быть легко интегрирован во многие модели обнаружения и категоризации трещин, разработанные в будущем, поскольку трещины успешно отделяются от фона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mohan A., Poobal S. Crack detection using image processing: A critical review and analysis // Alexandria Engineering Journal. Jun. 2018. V. 57. No. 2. P. 787—798. DOI: 10.1016/j.aej.2017.01.020
2. Yao Y., Tung S.-T. E., Glisic B. Crack detection and characterization techniques—An overview // Struct Control Health Monit. Dec. 2014. V. 21. No. 12. P. 1387—1413. DOI: 10.1002/stc.1655
3. Munawar H.S., Hammad A.W.A., Haddad A., Soares C.A.P., Waller S.T. Image-Based Crack Detection Methods: A Review // Infrastructures (Basel). Aug. 2021. V. 6. No. 8. P. 115. DOI: 10.3390/infrastructures6080115
4. Golewski G.L. The Phenomenon of Cracking in Cement Concretes and Reinforced Concrete Structures: The Mechanism of Cracks Formation, Causes of Their Initiation, Types and Places of Occurrence, and Methods of Detection—A Review // Buildings. Mar. 2023. V. 13. No. 3. P. 765. DOI: 10.3390/buildings13030765
5. Fujita Y., Hamamoto Y. A robust automatic crack detection method from noisy concrete surfaces // Mach. Vis. Appl. Mar. 2011. V. 22. No. 2. P. 245—254. DOI: 10.1007/s00138-009-0244-5
6. Dwivedi S.K., Vishwakarma M., Prof. Soni A. Advances and Researches on Non Destructive Testing: A Review // Mater. Today Proc. 2018. V. 5. No. 2. P. 3690—3698. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.11.620
7. Ai D., Jiang G., Lam S.-K., He P., Li C. Computer vision framework for crack detection of civil infrastructure—A review // Eng. Appl. Artif. Intell. Jan. 2023. V. 117. P. 105478. DOI: 10.1016/j.engappai.2022.105478
8. Abdel-Qader I., Abudayyeh O., Kelly M.E. Analysis of Edge-Detection Techniques for Crack Identification in Bridges // Journal of Computing in Civil Engineering. Oct. 2003. V. 17. No. 4. P. 255—263. DOI: 10.1061/(ASCE)0887-3801(2003)17:4(255)
9. Talab A.M.A., Huang Z., Xi F., HaiMing L. Detection crack in image using Otsu method and multiple filtering in image processing techniques // Optik (Stuttg). Feb. 2016. V. 127. No. 3. P. 1030—1033. DOI: 10.1016/j.ijleo.2015.09.147

10. *Hutchinson T.C., Chen Z.* Improved Image Analysis for Evaluating Concrete Damage // *Journal of Computing in Civil Engineering*. May 2006. V. 20. No. 3. P. 210—216. DOI: 10.1061/(ASCE)0887-3801(2006)20:3(210)
11. *Yamaguchi T., Hashimoto S.* Fast crack detection method for large-size concrete surface images using percolation-based image processing // *Mach. Vis. Appl.* Aug. 2010. V. 21. No. 5. P. 797—809. DOI: 10.1007/s00138-009-0189-8
12. IEEE Staff and IEEE Staff. 2010 3rd International Congress on Image and Signal Processing.
13. *Dube U., Subramaniam S., Subramaniam S.* Cost Effective Railway Track Fault Detection Using Image Processing // *SSRN Electronic Journal*. 2021. DOI: 10.2139/ssrn.3882749
14. *Lattanzi D., Miller G.R.* Robust Automated Concrete Damage Detection Algorithms for Field Applications // *Journal of Computing in Civil Engineering*. Mar. 2014. V. 28. No. 2. P. 253—262. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000257
15. *Kabir S., Rivard P., He D.-C., Thivierge P.* Damage assessment for concrete structure using image processing techniques on acoustic borehole imagery // *Constr. Build. Mater.* Oct. 2009. V. 23. No. 10. P. 3166—3174. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.06.013
16. *Lee J.H., Lee J.M., Kim H.J., Moon Y.S.* Machine Vision System for Automatic Inspection of Bridges // In 2008 Congress on Image and Signal Processing. IEEE. 2008. P. 363—366. DOI: 10.1109/CISP.2008.672
17. *Kim H., Lee J., Ahn E., Cho S., Shin M., Sim S.-H.* Concrete Crack Identification Using a UAV Incorporating Hybrid Image Processing // *Sensors*. Sep. 2017. V. 17. No. 9. P. 2052. DOI: 10.3390/s17092052
18. *Khan Md. A.-M., Kee S.-H., Pathan A.-S. K., Nahid A.-A.* Image Processing Techniques for Concrete Crack Detection: A Scientometrics Literature Review // *Remote Sens (Basel)*. May 2023. V. 15. No. 9. P. 2400. DOI: 10.3390/rs15092400
19. *Fujita Y., Mitani Y., Hamamoto Y.* A Method for Crack Detection on a Concrete Structure // In 18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'06). IEEE. 2006. P. 901—904. DOI: 10.1109/ICPR.2006.98
20. *Lee B.Y., Kim Y.Y., Yi S.-T., Kim J.-K.* Automated image processing technique for detecting and analysing concrete surface cracks // *Structure and Infrastructure Engineering*. Jun. 2013. V. 9. No. 6. P. 567—577. DOI: 10.1080/15732479.2011.593891
21. *Giakoumis I., Nikolaidis N., Pitas I.* Digital image processing techniques for the detection and removal of cracks in digitized paintings // *IEEE Transactions on Image Processing*. Jan. 2006. V. 15. No. 1. P. 178—188. DOI: 10.1109/TIP.2005.860311
22. *Kumar R.R., Kumar A., Srivastava S.* Anisotropic Diffusion Based Unsharp Masking and Crispening for Denoising and Enhancement of MRI Images // In 2020 International Conference on Emerging Frontiers in Electrical and Electronic Technologies (ICEFEET). IEEE. Jul. 2020. P. 1—6. DOI: 10.1109/ICEFEET49149.2020.9186966
23. *Wang Z., Lv Y., Wu R., Zhang Y.* Review of GrabCut in Image Processing // *Mathematics*. Apr. 2023. V. 11. No. 8. P. 1965. DOI: 10.3390/math11081965
24. *Gao Z., Shi P., Karimi H.R., Pei Z.* A mutual GrabCut method to solve co-segmentation // *EURASIP J Image Video Process.* Dec. 2013. V. 2013. No. 1. P. 20. DOI: 10.1186/1687-5281-2013-20
25. *Kanopoulos N., Vasanthavada N., Baker R.L.* Design of an image edge detection filter using the Sobel operator // *IEEE J Solid-State Circuits*. Apr. 1988. V. 23. No. 2. P. 358—367. DOI: 10.1109/4.996
26. *Kumar A., Srivastava S.* Restoration and enhancement of breast ultrasound images using extended complex diffusion based unsharp masking // *Proc. Inst. Mech. Eng. H.* Jan. 2022. V. 236. No. 1. P. 12—29. DOI: 10.1177/09544119211039317
27. *Öztürk Ş., Akdemir B.* Comparison of Edge Detection Algorithms for Texture Analysis on Glass Production // *Procedia Soc. Behav. Sci.* Jul. 2015. V. 195. P. 2675—2682. DOI: 10.1016/j.sbspro.2015.06.477

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СФЕРОПЛАСТИКОВ

© 2023 г. В.А. Быченко^{1,2,*}, П.В. Серый^{3,**}, Д.Р. Фирюлин^{2,***},
И.Ю. Кинжагулов^{2,****}, И.В. Беркутов^{2,*****}, И.Е. Алифанова^{2,*****}

¹ Учреждение науки ИКЦ СЭКТ, Россия 197343 Санкт-Петербург, ул. Матроса Железняка, 57

² Университет ИТМО, Россия 197101 Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

³ НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей», Россия 191015 Россия, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., 49

E-mail: *bychenok-vladimir@mail.ru; **seryipv@yandex.ru; ***danil.firyulin18@mail.ru;

****kinzhiki@mail.ru; *****chigivara56712@mail.ru; *****sherbairina@mail.ru

Поступила в редакцию 19.05.2023; после доработки 03.07.2023

Принята к публикации 04.07.2023

Разработка методик неразрушающего контроля водопоглощения изделий из сферопластиков без необходимости их демонтажа является актуальной задачей. Ультразвуковой метод акустического вида для решения данной задачи может стать альтернативой применяемым в настоящее время радиографическому методу, гидростатическому взвешиванию и механическим испытаниям. Целью настоящей работы является исследование связи акустических характеристик сферопластиков и их водопоглощением. Задачами настоящей работы является оценка скорости распространения ультразвуковой волны в сферопластике на разных этапах исследований: в исходном состоянии образцов, после механической обработки, после водопоглощения и после высыхания. Водопоглощение косвенно оценивалось в результате взвешивания образцов. Установлена взаимосвязь между акустическими характеристиками сферопластиков и их водопоглощением, что подчеркивает научную новизну проводимых исследований. Полученные результаты согласуются с теоретическими предпосылками и дают основания для проведения дальнейших экспериментальных исследований по разработке методики неразрушающего контроля изделий из сферопластиков.

Ключевые слова: сферопластик, акустические характеристики, внутренние напряжения, водопоглощение, ультразвуковой контроль.

EXPERIMENTAL STUDIES OF CHANGES IN THE ACOUSTIC PROPERTIES OF SPHEROPLASTICS

V.A. Bychenok^{1,2,*}, P.V. Seryi^{3,**}, D.R. Firyulin^{2,***}, I.Yu. Kinzhagulov^{2,****},
I.V. Berkutov^{2,*****}, I.E. Alifanova^{2,*****}

¹ Institution of Science ICC EKT, Russia 197343, St. Petersburg, st. Matrosa Zheleznyak, 57

² ITMO University, Russia 197101, St. Petersburg, Kronverksky pr., 49

³ National Research Center «Kurchatov Institute» — Central Research Institute of KM «Prometey», Russia 191015, Russia, St. Petersburg, Shpalernaya st., 49

E-mail: *bychenok-vladimir@mail.ru; **seryipv@yandex.ru; ***danil.firyulin18@mail.ru;

****kinzhiki@mail.ru; *****chigivara56712@mail.ru; *****sherbairina@mail.ru

The development of methods for non-destructive testing of water absorption of products from spheroplastics without the need to dismantle them is an urgent task. The ultrasonic method of the acoustic type for solving this problem can become an alternative to the currently used radiographic methods, hydrostatic weighing and mechanical testing. The purpose of this work is to study the relationship between the acoustic characteristics of spheroplasts and their water absorption. The objectives of this work are to estimate the propagation velocity of an ultrasonic wave in spheroplastics at different stages of research: in the initial state of the samples, after mechanical treatment, after water absorption, and after drying. Water absorption was indirectly estimated by weighing the samples. A relationship has been established between the acoustic characteristics of spheroplasts and their water absorption, which emphasizes the scientific novelty of the ongoing research. The results obtained are consistent with the theoretical prerequisites and provide grounds for further experimental studies to develop a technique for non-destructive testing of products made of spheroplasts.

Keywords: spheroplastic, acoustic characteristics, internal stresses, water absorption, ultrasonic testing.

DOI: 10.31857/S0130308223110040, EDN: XAYLBB

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в качестве материалов, предающих современным глубоководным аппаратам свойство дополнительной плавучести, широко применяются сферопластики — полимерные

композиционные материалы на основе полимерных связующих, основным наполнителем которых являются полые микросферы [1, 2]. Применение сферопластика в судостроении обусловлено такими характеристиками, как низкая плотность и практически нулевое водопоглощение [3, 4]. Сферопластик представляет собой материал, состоящий из полимерной матрицы, в которой с высокой степенью наполнения размещены, как правило, стеклянные микросферы диаметром в среднем 20—150 мкм [5]. В процессе эксплуатации на блоки сферопластика воздействуют циклические механические воздействия, в результате чего в материале происходят деформации и дефектообразование, что приводит к увеличению водопоглощения материала. В настоящий момент для контроля дефектов типа поры и непрочей в блоках плавучести из сферопластиков применяется ультразвуковой метод контроля [6, 7], контроль водопоглощения производится на демонтированных блоках плавучести путем гидростатического взвешивания или с помощью радиационных методов контроля [5]. Однако демонтаж и монтаж блоков плавучести является достаточно трудоемким и не всегда осуществимым. Таким образом, **актуальной** задачей является разработка методики оценки водопоглощения сферопластика с помощью неразрушающих методов контроля. С этой целью в работе предложено использовать ультразвуковой метод акустического вида контроля. **Целью работы** является исследование взаимосвязи между акустическими свойствами сферопластика и его водопоглощением.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены 5 образцов из сферопластика размерами 40×40×40 мм.

В образцах сферопластиков с помощью ультразвукового дефектоскопа УСД-60Н и прямого совмещенного пьезоэлектрического преобразователя с центральной частотой 1 МГц проводились двадцатикратные измерения скорости распространения продольной УЗВ эхо-импульсным методом. Измерения проводились в одном и том же направлении относительно образца в 4 этапа:

1. В исходном состоянии образцов.
2. После механического воздействия на образцы. Механическое воздействие осуществлялось с помощью испытательного пресса (рис. 1) путем одноосного сжатия до начала видимого трещинообразования. Измерение скорости распространения УЗВ проводилось в направлении, перпендикулярном направлению одноосного сжатия.
3. После водопоглощения. Образцы после механического воздействия были погружены на весь объем в воду на 24 ч при комнатной температуре.
4. После просушивания образцов. Просушивание образцов осуществлялось в комнатных условиях без специальных технических средств.

Для оценки водопоглощения на этапах 1, 3, 4 проводилось измерение массы образцов с помощью лабораторных весов OHAUS Explorer (точность — 0,0001 г).

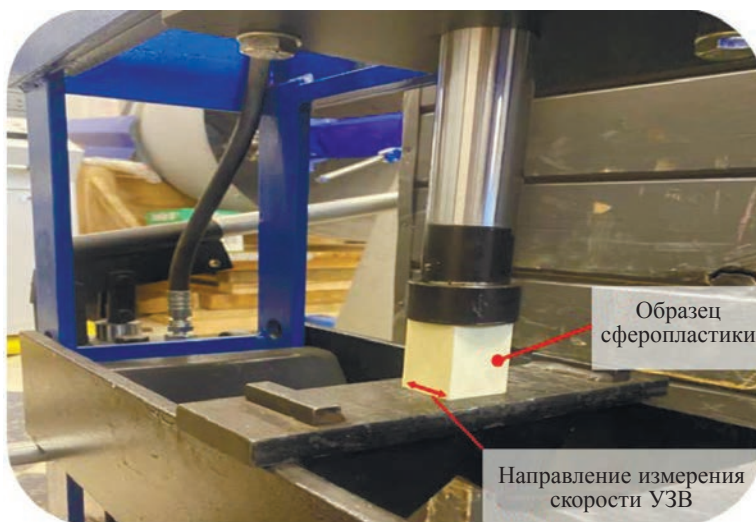


Рис. 1. Общий вид установки образца сферопластика на испытательном прессе.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В табл. 1 представлены средние значения двадцатикратных результатов измерений скорости распространения УЗВ на разных этапах экспериментальных исследований, в табл. 2 — результаты измерений массы образцов.

Таблица 1

Результаты изменений скорости распространения УЗВ

№ образца	Скорость распространения УЗВ, измеренная на разных этапах исследований, м/с			
	1. Исходное состояние	2. После механического воздействия	3. После водопоглощения	4. После просушивания
1	2620	2572	2599	2577
2	2627	2574	2600	2572
3	2622	2567	2601	2576
4	2627	2572	2602	2573
5	2628	2570	2600	2572
Среднее по 5 образцам	2625	2571	2600	2574

Таблица 2

Результаты измерений массы образцов

№ образца	Масса образцов, г			
	1. Исходное состояние	2. После механического воздействия	3. После водопоглощения	4. После просушивания
1	40,218	—	40,230	40,220
2	40,225	—	40,238	40,222
3	40,222	—	40,235	40,221
4	40,215	—	40,230	40,217
5	40,214	—	40,228	40,215
Среднее по 5 образцам	40,218	—	40,233	40,219

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Средняя скорость распространения продольных УЗВ в исходном состоянии образцов составляла 2625 м/с, а средняя масса образцов — 40,218 г.

При механическом воздействии путем одноосного сжатия видимое трещинообразование на всех образцах было зафиксировано при нагрузке 430 Бар (механические напряжения в материале образцов 68,5 МПа). Следует отметить, что видимых деформаций образцов при этом не произошло. Далее нагружение не проводилось. После механического воздействия средняя скорость распространения УЗВ уменьшилась на 54 м/с. Данное явление объясняется эффектом акустоупругости, основанным на нелинейно-упругой модели твердой среды, в соответствии с которым при действии сжимающих напряжений скорость волны, поляризованной вдоль действия напряжений растет, а поперек — уменьшается [9, 10]. Масса образцов на этом этапе не измерялась.

После погружения в воду средняя масса образцов увеличилась на 0,015 г, что свидетельствует о водопоглощении сферопластика, которое происходит в результате проникновения воды через наружную поверхность образца и образованные в результате механического воздействия микро-трещины на поверхности образца, а также в результате диффузии воды через полимерную матрицу капиллярным процессом [11]. Средняя скорость распространения УЗВ в материале образцов после водопоглощения выросла на 29 м/с.

Оценим изменение плотности и модуля Юнга образцов по результатам измерений, приведенным в табл. 1, 2, принимая допущение о том, что объем образцов не изменился.

Как известно, скорость распространения УЗВ связана с плотностью и модулем Юнга следующим уравнением:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (1)$$

где c — скорость распространения продольной УЗВ (см. табл. 1); E — модуль Юнга; ρ — плотность [12].

Из формулы (1) получим выражение для определения модуля Юнга:

$$E = c^2 \cdot \rho. \quad (2)$$

Плотность вычисляется по формуле:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (3)$$

где m — измеренная масса образцов (см. табл. 2); V — объем образца ($125 \cdot 10^{-3}$ м при размере кубического образца 0,05 м).

Как видно из табл. 3, в результате водопоглощения плотность увеличилась менее, чем на 1 %, а модуль Юнга увеличился на 2,3 %. То есть, изменение модуля Юнга (числитель в формуле (1)) в большей степени оказывает влияние на изменение скорости распространения УЗВ, чем изменение плотности (знаменатель в формуле (1)).

Увеличение модуля Юнга объясняется уменьшением пористости в результате водопоглощения. Величина модуля упругости пористого тела при коэффициенте Пуассона, равного 0,3, в случае наличия замкнутых пор в непрерывной среде может быть определена по следующему эмпирическому уравнению:

$$E = E_0(1 - 1,9\Pi + 0,9\Pi^2), \quad (4)$$

где E и E_0 — модули упругости пористого и абсолютно плотного тела; Π — относительная пористость [13].

Подставляя в уравнение (4) значения модуля упругости пористого тела E , рассчитанное для образца после механического воздействия, а плотного тела E_0 — для образца после водопоглощения (см. п. 2, 3 табл. 3), можем оценить, что изменение пористости в результате водопоглощения Π составило около 1 %.

Таблица 3

Результаты оценки плотности и модуля Юнга образцов

Свойство образца	Единица измерений	1. Исходное состояние	2. После механического воздействия	3. После водопоглощения	4. После просушивания	Относительное изменение в результате водопоглощения, %
Плотность	кг/м ³	321,74	321,74*	321,86	321,75	0,04
Модуль упругости	ГПа	2,22	2,13*	2,18	2,13	2,3

* для расчета использовались значения массы образцов, измеренные в исходном состоянии, считаем, что масса образца в результате механического воздействия не изменилась. Объем образцов после механического воздействия не изменился.

Таким образом, в результате ориентировочных расчетов показано, что увеличение скорости распространения УЗВ в сферопластике в результате водопоглощения является закономерным явлением, несмотря на одновременное увеличение плотности образцов.

После просушивания и масса образцов (уменьшилась на 0,014 г), и скорость распространения УЗВ (уменьшилась на 26 м/с) практически вернулись к значениям, измеренным до водопоглощения.



Рис. 2. Результаты изменений скорости распространения УЗВ.

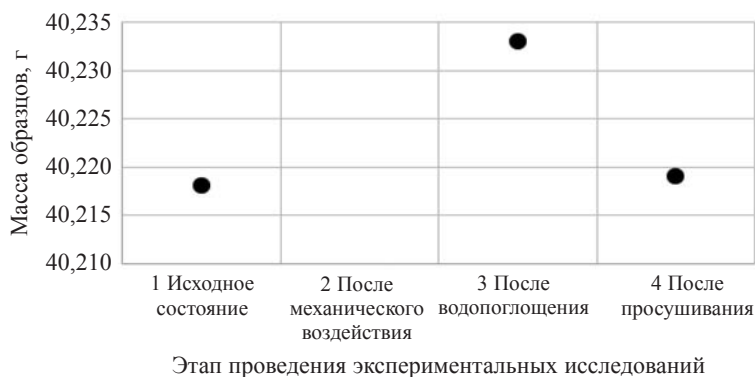


Рис. 3. Результаты измерений массы образцов.

Для иллюстрации результаты экспериментальных исследований также приведены на графиках (рис. 2, 3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для оценки водопоглощения сферопластиков предложено использовать ультразвуковой метод контроля. При проведении экспериментальных исследований установлено, что существует связь между акустическими свойствами и техническим состоянием материала: в материале образцов, имеющих микродефекты и избыточное водопоглощение, скорость распространения УЗВ составляет 2600 м/с и менее, что на 25 м/с меньше скорости распространения УЗВ в бездефектном образце. Таким образом, для контроля технического состояния блоков плавучести, находящихся в эксплуатации, может быть достаточно измерить скорость распространения УЗВ без их демонтажа с изделия и сравнить со скоростью УЗВ в образцах-свидетелях, хранящихся в лабораторных условиях. В дальнейшем при разработке методики контроля в качестве критерия браковки можно использовать уменьшение скорости распространения УЗВ в объекте контроля по сравнению со скоростью УЗВ в образцах-свидетелях меньше допустимого уровня (в настоящем примере — менее 2625 м/с). Установление браковочного порога — предмет для дальнейших исследований.

Полученные результаты дают основания для проведения более углубленных экспериментальных исследований в различных направлениях, таких как: исследование связи водопоглощения сферопластиков и других акустических свойств (затухание, спектр и т.д.); установление корреляционной зависимости между акустическими свойствами сферопластиков и их техническим состоянием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федонюк Н.Н., Додонов П.А. Структурная модель деформирования и разрушения гетерогенных материалов типа сферопластика при действии гидростатического давления // Труды Крыловского государственного научного центра. 2021. № 2. С. 37—51.

2. Лебедев В.Л., Косильников В.Ю., Серый П.В., Трошкин С.Н., Анисимов А.В. Прогнозирование гидростатической прочности сферопластиков. // Вопросы материаловедения. 2021. № 4 (108). С. 149—164.
3. Яковенко Т.В., Яруллина Г.К., Гарустович И.В., Шишилов О.Н., Мельников Н.О. Сферопластики как термоизолирующие защитные материалы промышленного назначения // Успехи в химии и химической технологии. 2016. Т. XXX. № 8.
4. Додонов П.А., Федонюк Н.Н. Исследование влияния свойств и состава микросфер на характеристики сферопластика при действии гидростатического давления (моделирование и эксперимент) // Труды Крыловского государственного научного центра. 2022. № 4 (402). С. 65—74.
5. Федонюк Н.Н. Прочность и долговечность элементов плавучести из сферопластика подводной техники // Крыловский государственный научный центр. 2022. С. 272—280. ISBN 978-5-604629-26-0.
6. Соколов И.И. Сферопластики на основе термореактивных связующих для изделий авиационной техники / Дис. ... канд. тех. наук. 05.16.09. М., 2013. 120 с.
7. Долматовский М.Г., Соколов И.И. Разрушение и контроль сотовых конструкций со сферопластиками // Конструкции из композиционных материалов. 2009. № 2. С. 97—103.
8. Гузь А. Н., Махорт Ф. Г., Гуца О. И. Основы ультразвукового неразрушающего метода определения напряжений в твердых телах. Киев: Наукова думка, 1974. 106 с.
9. Вода в полимерах / Сб. под редакцией С. Роуланда. Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 555 с.
10. Федонюк Н.Н., Федоров Ю.П. Водопоглощение и долговечность сферопластиков при длительном действии гидростатического давления // Вопросы материаловедения. 1995. Вып. 3. С. 74—82.
11. Кретов Е.Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении / 2-е изд., переработка и доп. СПб.: Издательство «СВЕН», 2007. 296 с.
12. Клюев В.В. Неразрушающий контроль. Т. 3. Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение, 2004. 864 с.
13. Инженерно-строительный институт СФУ. Пористость и модуль Юнга: [Электронный ресурс]. URL: <https://studfile.net/preview/7759388/> (дата обращения 02.06.2023).

ТАНГЕНЦИАЛЬНЫЙ ВИХРЕТОКОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ КОНТРОЛЯ НАХЛЕСТОЧНЫХ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТОКОВЕДУЩИХ ШИН ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

© 2023 г. А.Е. Горбунов^{1,2,*}, А.Е. Ивкин^{1,2,**}, П.В. Соломенчук^{2,***}

¹Санкт-Петербургский Горный университет,
Россия 199106 Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2
²ООО «Константа», Россия 198098 Санкт-Петербург, Огородный пер., 21
E-mail: *ae.gorbunov.w@gmail.com; **ivkin@constanta.ru; ***pavel257@mail.ru

Поступила в редакцию 31.05.2023; после доработки 19.06.2023

Принята к публикации 30.06.2023

Рассматривается неразрушающий контроль нахлесточных паяных соединений электрических машин с применением двухэлементного вихретокового преобразователя тангенциального типа, обмотки возбуждения и измерения которого расположены по обе стороны объекта контроля. Для экранирования преобразователя от близко расположенных токоведущих элементов используется активное экранирование с применением двух экранирующих обмоток. Применение тангенциального преобразователя с контрольными образцами, повторяющими форму и размеры контролируемого соединения и имитирующими монолитность 0 и 100 %, позволяет измерять степень пропайности нахлесточных паяных соединений токоведущих шин.

Ключевые слова: вихретоковый контроль, паяные соединения, тангенциальный преобразователь.

TANGENTIAL EDDY CURRENT PROBE FOR TESTING OF SOLDERED JOINTS OF BUSBARS IN ELECTRICAL MACHINES

© 2023 г. А.Е. Gorbunov^{1,2,*}, А.Е. Ivkin^{1,2,**}, P.V. Solomenchuk^{2,***}

¹Saint-Petersburg Mining university, Russia 199106, Saint-Petersburg, Vasilievskiy island, 21 line, 2
²«Constanta» Ltd., Russia 198098 Saint-Petersburg, Ogorodniy lane, 21
E-mail: *ae.gorbunov.w@gmail.com; **ivkin@constanta.ru; ***pavel257@mail.ru

The article considers nondestructive testing of soldered lap joints of electric machines by means of a two-element eddy current tangential probe, excitation and measuring windings of which are placed on both sides of the test object. To ensure shielding from closely located current-conducting elements two active shielding windings are used. Using the tangential probe and reference blocks, replicating the shape and dimensions of the tested joint and imitating 0% and 100% soldering, allows measurement of soldering of busbar lap joints.

Keywords: eddy current testing, soldered joints, tangential probe.

DOI: 10.31857/S0130308223110052, **EDN:** XBBNOM

Для соединения частей токоведущих медных обмоток статоров электрических машин применяется пайка. Наличие дефектов паяных соединений статорной обмотки приводят к потерям мощности до десятков кВт, вызывая локальные перегревы и выводя соединения из строя, приводя к остановкам или авариям на энергетических объектах. Около четверти всех аварий и отказов турбогенераторов связано именно с дефектами пайки соединительных шин [1], что обуславливает необходимость проведения своевременного контроля качества паяных соединений при изготовлении и обслуживании машин.

Для определения степени монолитности паяных соединений статорной обмотки электрических машин широко применяется вихретоковый контроль с различными по конструкции преобразователями. Экранные вихретоковые преобразователи (ВТП) с нормально расположенными катушками могут обеспечивать большую глубину контроля, но чувствительны только к дефектам, расположенным перпендикулярно плоскости установки катушек ВТП [2]. ВТП с П-образными сердечниками [3], предназначенные для обнаружения дефектов пайки стержней, плоскость которых параллельна плоскости объекта контроля (ОК), однако ввод поля возбуждения такого преобразователя направлен нормально плоскостям с припоем. В конструкции некоторых типов электрических машин применяется нахлесточное паяное соединение (рис.1). Дефекты таких соединений параллельны плоскости рабочего торца ВТП, чувствительность описанных ВТП к таким дефектам недостаточна, из-за чего качество паяного соединения не может быть определено.

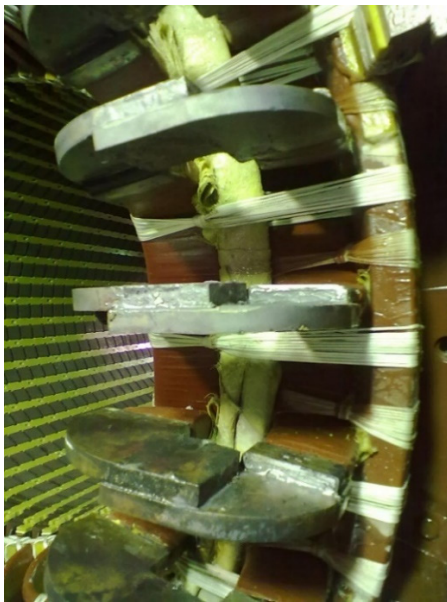


Рис. 1. Нахлесточное паяное соединение шин.

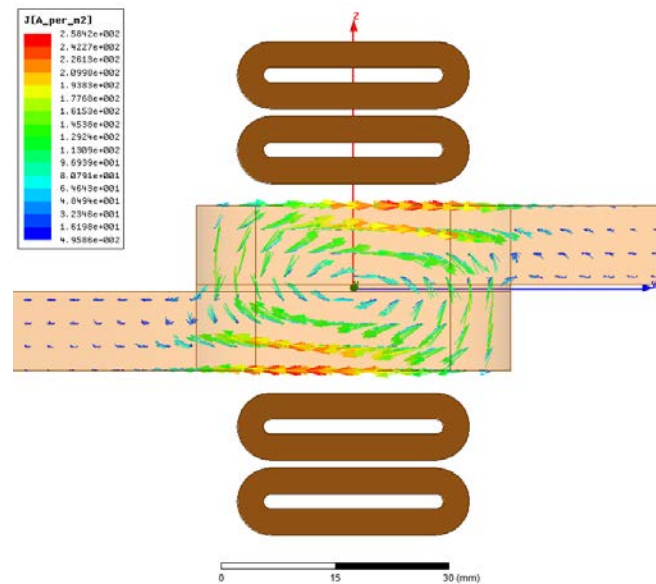


Рис. 2. Модель распространения вихревых токов тангенциальной катушки в ОК.

Определение степени пропаянности соединений нахлесточного типа предлагается производить с применением ВТП с тангенциально расположенными катушками. Использование тангенциально расположенной катушки возбуждения создает в ОК вихревые токи, содержащие нормальную составляющую [4]. Более того, при одновременном использовании двух тангенциальных катушек возбуждения, которые установлены с противоположных сторон ОК и включены последовательно синфазно, поле возбуждения взаимодействует с обеими сторонами ОК, пронизывая весь объем ОК (рис. 2). Вихревые токи тангенциального магнитного поля имеют ненулевую пространственную составляющую, перпендикулярную плоскости возникновения дефектов, обеспечивая чувствительность тангенциального ВТП к подобным дефектам.

В лобовой части статорной обмотки электрических машин контролируемые соединения расположены близко друг к другу, что является значимым мешающим параметром. Традиционный метод экранирования ВТП ферромагнитными экранами не подходит для тангенциального ВТП, поэтому экранирование достигается с применением экранирующих катушек, расположенных поверх катушек возбуждения и включенных с ними в противофазе. Экранирующие катушки искажают тыльное магнитное поле возбуждения так, чтобы расположенные близко токопроводящие элементы не искажали сигналы преобразователя и не влияли на результаты измерения на ОК.

Градуировочная характеристика ВТП, изученная в процессе моделирования, имеет практически линейный характер, что позволяет использовать для настройки набор из двух контрольных образцов (КО): монолитного медного образца, имитирующего пропай 100 %, и составного образца для имитации пропая 0 %, состоящего из двух медных деталей, соединенных между собой клеевым соединением через диэлектрическую прокладку. КО изготавливаются под каждый типоразмер контролируемого соединения с контролем удельной электропроводности материала КО, позволяя минимизировать влияние на результаты контроля формы, размеров и удельной электропроводности ОК.

Для возможности контроля объектов разной толщины перед калибровкой и контролем расстояние между катушками ВТП настраивается и жестко фиксируется в рамках одной сессии контроля, позволяя уменьшить влияние расстояния между катушками на результаты измерений. Положение катушек относительно ОК фиксируется при помощи упора, что уменьшает влияние взаимного расположения ВТП и ОК.

Вихрековый преобразователь, обмотки возбуждения и измерения которого расположены тангенциально относительно плоскости нахлесточного паяного соединения, в совокупности с использованием двух контрольных образцов с имитацией монолитности 0 и 100 % позволяет производить измерение степени пропаянности нахлесточных паяных соединений токоведущих шин статорных обмоток электрических машин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самородов Ю.Н. Причины и последствия аварий и отказов турбогенераторов // Энергия единой сети. 2014. № 2 (13). С. 70—80.
 2. Потапов А. И., Сясько В. А., Коротеев М. Ю., Соломенчук П. В. Конечно-элементное моделирование преобразователя вихретокового контроля качества паяных соединений обмоток турбогенераторов // Дефектоскопия. 2014. № 5. С. 21—30.
 3. Kogan L., Stashkov A., Nichipuruk A. Improving the Reliability of Eddy-Current Quality Control of Soldering in Current-Carrying Copper Joints and Expanding the Nomenclature of Inspected Joints in Energy Equipment // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. No. 11. P. 784—791.
 4. Сясько В.А., Чертов Д.Н. Выявление расслоений углепластиковых материалов с использованием тангенциальных вихретоковых преобразователей // В мире неразрушающего контроля. 2012. № 2. С. 19—21.
-

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ РОЛИКОВОГО МНОГОЭЛЕМЕНТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА ФАЗИРОВАННЫХ РЕШЕТКАХ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ ТРУБОПРОВОДА

© 2023 г. А.В. Катташева^{1,*}, Р.К. Вагапов^{2,**}, И.А. Ридель^{1,***}, Д.С. Кирпиченко^{1,****},
О.Ю. Манихин^{1,*****}

¹ООО «Газпром добыча Ноябрьск», Россия 629806 ЯНАО, Ноябрьск, ул. Республики, 20

²ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Россия 142717 Московская обл, г.о. Ленинский, пос. Развилка,
ул. Газовиков, 15, стр. 1

E-mail: *kattasheva.av@noyabrsk-dobycha.gazprom.ru; **r_vagapov@vniigaz.gazprom.ru;

ridel@noyabrsk-dobycha.gazprom.ru; *kirpichenko.ds@noyabrsk-dobycha.gazprom.ru; *****manihin.oyu@
noyabrsk-dobycha.gazprom.ru

Поступила в редакцию 11.05.2023; после доработки 28.06.2023

Принята к публикации 04.09.2023

Проведено сканирование роликовым многоэлементным преобразователем на фазированных решетках подземных газопроводов без снятия ленточного изоляционного покрытия с целью определения толщины стенки трубы.

Ключевые слова: газопровод, внутренняя коррозия, дефектоскопия, датчик, фазированные решетки, ультразвуковая толщинометрия.

EXPERIENCE IN THE USE OF A ROLLER MULTI-ELEMENT PHASED ARRAY TRANSDUCER FOR ESTIMATING THE THICKNESS OF THE PIPELINE WALL

A.V. Kattasheva^{1,*}, R.K. Vagapov^{2,**}, I.A. Ridel^{1,***}, D.S. Kirpichenko^{1,****}, O.Yu. Manihin^{1,*****}

¹Gazprom dobycha Noyabrsk LLC, Respublika st. 20, Noyabrsk, Yamal-Nenets Autonomous Okrug, 629806

²Gazprom VNIIGAZ LLC, 15 Gazovikov St., bld. 1, Razvilka, Leninsky municip., Moscow region, 142717

E-mail: *kattasheva.av@noyabrsk-dobycha.gazprom.ru; **r_vagapov@vniigaz.gazprom.ru;

ridel@noyabrsk-dobycha.gazprom.ru; *kirpichenko.ds@noyabrsk-dobycha.gazprom.ru; *****manihin.oyu@
noyabrsk-dobycha.gazprom.ru

Scanning with a roller multi-element transducer on phased arrays of underground gas pipelines without removing the tape insulating coating was carried out in order to determine the thickness of the pipe wall

Keywords: gas pipeline, internal corrosion, nondestructive testing, sensor, phased array, ultrasonic thickness measurement.

DOI: 10.31857/S0130308223110064, EDN: ХВЕКСВ

ВВЕДЕНИЕ

Для многих газовых месторождений в России характерно присутствие в добываемой среде коррозионно-агрессивного CO₂, что приводит к развитию локальных дефектов на внутренней стороне газопроводов [1]. Объектом, для которого проводятся данные исследования, является имеющее стратегическое значение в энергетической системе РФ Чаяндинское нефтегазоконденсатное месторождение (ЧНГКМ). Исследования, направленные на обеспечение безопасной эксплуатации, имеют важный характер для ЧНГКМ, т.к. оно в настоящий момент является основной ресурсной базой для газопровода «Сила Сибири». Полученные результаты смогут быть распространены и на другие объекты.

Для контроля технического состояния газопроводов в агрессивных условиях используются различные (интрузивные и неинтрузивные) методы коррозионного мониторинга, в том числе и диагностические обследования. Одним из наиболее применяемых и рациональных методов определения толщины стенки трубы является ультразвуковая толщинометрия (УЗТ) [2, 3]. Однако большинство исследований по диагностике нефтегазовых объектов преимущественно посвящено протеканию коррозионных процессов в нефтепроводах [4], которые отличаются от газопроводов как эксплуатационной средой, так и особенностями протекания внутренней коррозии [1].

В связи с этим представляется актуальным и важным для условий ЧНГКМ апробация способа проведения сплошного сканирования ультразвуковым методом основного металла подземных

газопроводов (без необходимости снятия ленточного изоляционного покрытия) с целью определения толщины стенки трубы и наличия коррозионных повреждений.

УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для реализации поставленной задачи нами использовалась система ультразвукового контроля одного из производителей таких приборов в комплектации с ультразвуковым роликовым датчиком, матрица которого состоит из 64 элементов (рис. 1).



Рис. 1. Роликовый фазированный датчик с матрицей на 64 элемента.

Ультразвуковой роликовый датчик на фазированных решетках является наиболее эффективным решением для сканирования основного металла газопроводов. Ролик обеспечивает разрешение вблизи поверхности контроля в 1 мм при использовании фазированной решетки 5 МГц. Акустический импеданс роликовых пьезоэлектрических преобразователей, как правило, слабо отличается от акустического сопротивления воды и формирует ультразвуковые сигналы высокого качества. Конструктивно роликовый датчик представляет собой фазированную многоэлементную матрицу, расположенную внутри вращающегося вокруг пьезоэлектрического элемента резинового барабана. Для обеспечения прохождения ультразвуковых лучей барабан заполняется водой или, в случае проведения работ в отрицательные температуры, пропиленгликолем. Материал резины барабана акустически выбран таким образом, чтобы обеспечивать необходимое соотношение «сигнал/шум». Регулировочная ось наклона датчика позволяет контролировать как выпуклую, так и вогнутую поверхность.

Сплошное сканирование проводилось в следующей последовательности:

1. Роликовый датчик устанавливался на трубопровод, дефектоскоп приводился в начальное состояние (обнуление координат и памяти данных прибора).
2. Затем сканирование путем прокатки датчика по всей окружности трубопровода (с подачей контактной жидкости).

ПРИМЕР СКАНИРОВАНИЯ ОКРУЖНОСТИ ТРУБОПРОВОДА

На А-скане мы получаем 4 сигнала: 1) сигнал от границы раздела между шиной ролика и поверхностью изоляции; 2) сигнал от границы раздела изоляции и основного металла; 3) сигнал от донной поверхности; 4) второй сигнал от донной поверхности (рис. 2). На L-скане наглядно просматриваются вышеперечисленные сигналы. Поскольку скорость звука в покрытии неизвестна, то остаточная толщина определяется между двумя донными сигналами. Измерение толщины основного металла на А-скане проводится по разнице между показаниями стробов № 1 и № 2 на сигналах от первой и второй донных поверхностей.

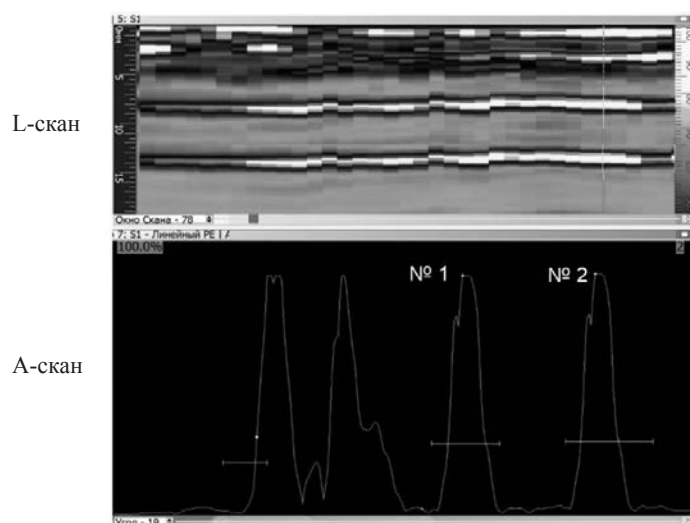


Рис. 2. Визуализация ультразвуковых данных контроля.

При применении данной методики были выявлены определенные ограничения. Например, при контроле через ленточное покрытие газопроводов необходимо, чтобы через материал проходила ультразвуковая волна. Адгезия покрытия должна обеспечивать хороший акустический контакт, места с недостаточной адгезией требуют снятия покрытия.

ВЫВОДЫ

Первые результаты показали, что с помощью данной методики можно достаточно эффективно выполнять задачи оценки толщины стенки трубы при коррозионном мониторинге, контролируя объекты большой площади и анализируя данные с высокой производительностью. Работы по адаптации предложенного метода УЗТ для коррозионного мониторинга при оценке состояния газопроводов на ЧНГКМ будут продолжены.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ваганов Р.К., Ибатуллин К.А. Оценка локальных дефектов на внутренней поверхности газопроводов, транспортирующих CO_2 -содержащую продукцию // Дефектоскопия. 2022. № 10. С. 49—56. DOI: 10.31857/S0130308222100050
2. Суфиев А.М., Мавлютов Р.Ф., Шиманаев М.А. Практика обследования переходов трубопроводов через естественные и искусственные преграды с применением технологии направленных ультразвуковых волн // Деловой журнал Neftegaz.RU. 2023. № 2. С. 22—25.
3. Муравьева О.В., Муравьев В.В., Синцов М.А., Волкова Л.В. Выявляемость дефектов муфт насосно-компрессорных труб магнитным, вихретоковым и ультразвуковым многократно-теневым методами контроля // Дефектоскопия. 2022. № 4. С. 14—25. DOI: 10.31857/S0130308222040029
4. Киченко А.Б. Мониторинг внутренней коррозии в нефтесборных трубопроводах компании «Салым Петролеум Девелопмент» // Практика противокоррозионной защиты. 2015. № 4. С. 8—30.

МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТА КАНАТА НА СПЕКТР ЕГО СВОБОДНЫХ ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ

© 2023 г. К.Р. Муратов^{1,*}, И.А. Шаропина^{1,**}, И.С. Бевзюк^{1,***},
Р.А. Соколов^{1,****}, В.В. Проботюк^{1,*****}

¹Тюменский индустриальный университет, Россия 625000 Тюмень, ул. Володарского, 38
E-mail: *muratows@mail.ru; **sharopinaia@gmail.com; ***ira29019@gmail.com;
****falcon.rs@mail.ru; *****probotjukvv@tyuiu.ru

Поступила в редакцию 11.05.2023; после доработки 29.08.2023
Принята к публикации 04.09.2023

В ранее выполненной работе была обоснована возможность диагностирования дефекта стального каната по спектральному составу его свободных поперечных колебаний. В настоящей работе предложена аналитическая модель поперечных колебаний стального каната, имеющего локальное повреждение. Наличие дефекта в модели учитывается только в виде убыли изгибной жесткости соответствующего участка без изменения удельной по длине массы. Модель представляет собой три «сшитых» друг с другом однородных участка каната, где средний представляет собой дефектный участок с меньшим значением изгибной жесткости. Согласно модельным расчетам показано, что характер зависимости собственных частот колебаний от их номера практически не изменяется при наличии дефекта. Однако его наличие и расположение влияет на соотношение амплитуд колебаний неповрежденных участков, что можно использовать для мониторинга состояния каната.

Ключевые слова: стальной канат, стоячие волны, сила натяжения каната, изгибная жесткость, мониторинг состояния.

MODEL OF INFLUENCE OF A ROPE DEFECT ON THE SPECTRUM OF ITS FREE TRANSVERSE VIBRATIONS

© 2023 г. K.R. Muratov^{1,*}, I.A. Sharopina^{1,**}, I.S. Bevzyuk^{1,***},
R.A. Sokolov^{1,****}, V.V. Probotyuk^{1,*****}

¹Industrial University of Tyumen, 625000, Volodarsky Street, 38, 625000, Tyumen, Russia
E-mail: *muratows@mail.ru; **sharopinaia@gmail.com; ***ira29019@gmail.com;
****falcon.rs@mail.ru; *****probotjukvv@tyuiu.ru

In earlier work the possibility of diagnosing a defect of a steel wire rope by spectral composition of its free transverse vibrations was substantiated. In the present work, an analytical model of transverse vibrations of a steel wire rope with local damage is proposed. The presence of the defect in the model is taken into account only in the form of a loss of bending stiffness of the corresponding section without changing the specific mass along the length. The model represents three homogeneous rope sections “stitched” together, where the middle one represents a defective section with a lower value of bending stiffness. According to the model calculations, it is shown that the character of the dependence of the natural frequencies of oscillations on their number practically does not change in the presence of a defect. However, its presence and location affects the ratio of vibration amplitudes of undamaged sections, which can be used to monitor the condition of the rope.

Keywords: steel wire rope, standing waves, rope tension force, bending stiffness, condition monitoring.

DOI: 10.31857/S0130308223110076, EDN: XFEZZI

ВВЕДЕНИЕ

Стальные канаты являясь несущим элементом конструкций требуют повышенного внимания и поэтому проходят периодические обследования разными методами и средствами [1—3], что бывает затруднительно. Поэтому в определенных условиях рационально внедрение мониторинговых систем [4]. В работе [5] нами была показана принципиальная возможность обнаружения дефектов каната по результатам регистрации спектра его собственных поперечных колебаний (стоячих волн). Актуальной является количественная оценка такой возможности, поэтому с целью ее проверки были выполнены модельные расчеты влияния дефекта каната на спектр его колебаний.

МОДЕЛЬ ВЫЧИСЛЕНИЯ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ КАНАТА С ДЕФЕКТОМ

Дифференциальное уравнение, описывающее поперечные колебания каната с учетом его реакции на изгиб и без учета затухания, имеет вид:

$$f \frac{d^2 u}{dx^2} - g \frac{d^4 u}{dx^4} = \frac{d^2 u}{dt^2}, \quad (1)$$

где u — поперечное смещение; x — координата вдоль оси каната; t — время; $f = F/\tau$ — отношение силы натяжения F и массы τ одного метра каната; $g = EI/\tau$ — отношение изгибной жесткости каната EI и τ . Стоячие волны, являющиеся одним из решений уравнения (1), зададим выражением:

$$u = A \cos(2\pi \nu t) \sin(kx + \varphi), \quad (2)$$

где A — амплитуда колебаний; ν — частота колебаний; k — волновое число; φ — фаза колебаний при $x = 0$.

Ограничение пространства существования стоячей волны, как известно, приводит к дискретному набору возможных частот колебаний. В случае однородного каната по всей его длине L совместное решение уравнений (1) и (2) даст набор возможных частот:

$$\nu^2 = \frac{f}{4L^2} n^2 + \frac{\pi^2 g}{4L^4} n^4. \quad (3)$$

Здесь n — номер тона (гармоники).

Чтобы не прибегать к сложному численному моделированию колебаний каната с локализованным дефектом, нами предложена модель, изображенная на рис. 1. Канат слева и справа закреплен в точках с координатами $-L/2$ и $+L/2$, центр дефектного участка протяженностью Δ имеет координату l .

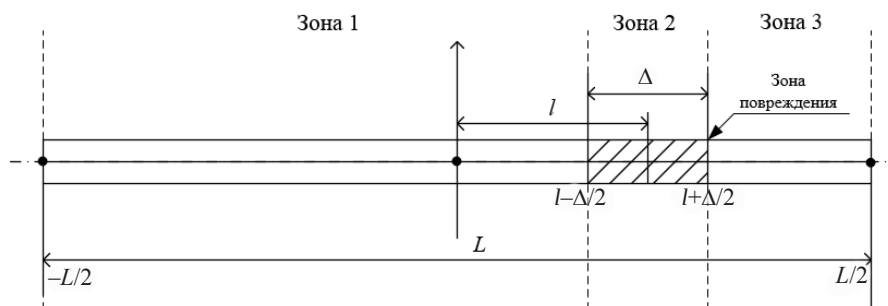


Рис. 1. Модельная схема расположения дефекта на канате.

Колебания в каждой из характерных зон каната описываются уравнением (2) со своими значениями амплитуды A_i , волнового числа k_i и фазой φ_i . Так как зоны 1 и 3 не имеют повреждения, то их волновые числа одинаковы $k_1 = k_3 = k_0$, в зоне 2 — $k_2 = k$. Частоты колебаний одинаковы. Краевыми условиями являются условия неподвижности на концах каната ($u_1 = u_2 = 0$), неразрывность в точках «сшивки» ($u_1 = u_2$, $u_2 = u_3$) и отсутствие изломов в них ($du_1/dx = du_2/dx$, $du_2/dx = du_3/dx$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Чтобы оценить возможность определения повреждения каната были использованы данные реальных измерений канатов вантового перехода (L , F , EI , τ) из работы [5]. Уменьшение изгибной жесткости взято не более 10 %. Ожидались искажения характера зависимости $\nu(n)$ от закономерности для однородного каната (уравнение (3)). Самый неблагоприятный вариант локации дефекта дал отклонения, которые практически невозможно зарегистрировать инструментально (рис. 2). На рис. 3 представлен результат моделирования с менее реальным сочетанием параметров L , F , EI , τ и дефектом протяженностью 5 % длины всего каната. Здесь мы видим, что наличие дефекта и его локация все-таки оказывает влияние на частоту колебаний двадцать пятой гармоники (черные маркеры), однако характер $\nu(n)$ качественно не меняется.

Отношение амплитуд неповрежденных участков A_3/A_1 при наличии дефекта отличается от единицы (красные маркеры на рис. 3). На рис. 4 представлен модельный характер распределения поперечных смещений каната в трех характерных зонах. На рис. 5 показаны вычисленные отношения

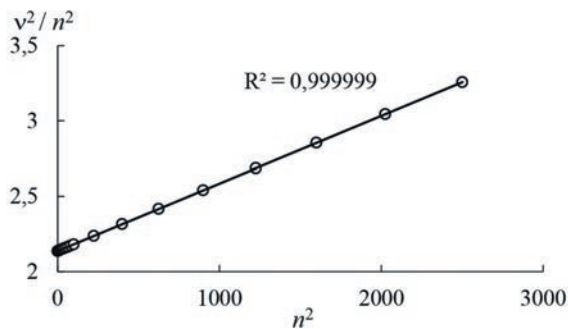
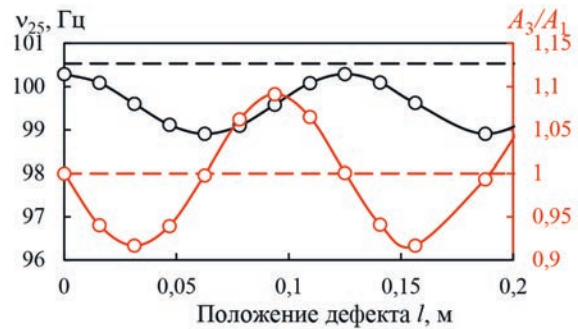
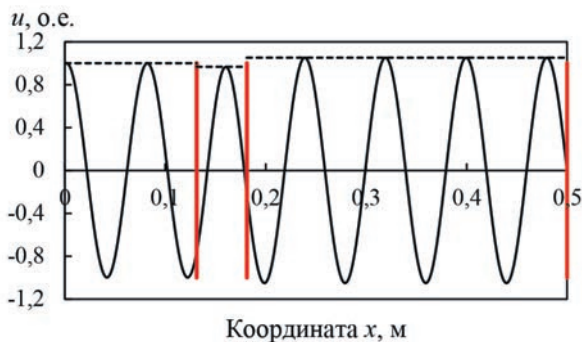
Рис. 2. Модельная зависимость отношения v^2/n^2 от n^2 .Рис. 3. Влияние положения дефекта на частоту колебаний 25-й гармоники и соотношение A_3/A_1 .

Рис. 4. Характер влияния дефекта каната на распределение амплитуды его колебаний.

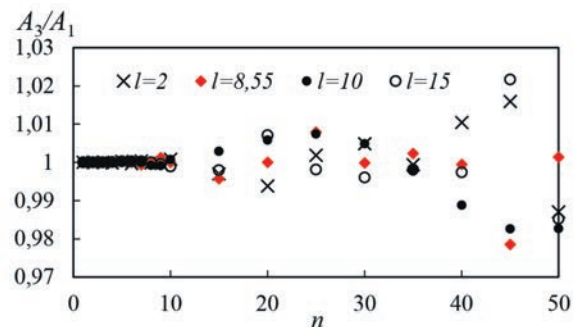


Рис. 5. Зависимость отношения амплитуд 1 и 3 зон от номера частоты и положения дефекта.

амплитуд A_3/A_1 для большого набора частот и четырех локаций дефекта. Для низких частот ($n < 10$) отношение $A_3/A_1 \cong 1$. С ростом номера гармоники отношение A_3/A_1 отклоняется от единицы и в окрестности $n = 35$ приближается к единице, а затем снова отклоняется и в большей степени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученный результат в перспективе можно использовать для создания мониторинговой системы состояния стальных канатов. Диагностирование повреждения каната возможно с помощью определения соотношения амплитуд колебаний на разных частотах и вблизи зажимов. Авторы благодарят за поддержку данного исследования национальный проект «Наука и университеты» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FEWN-2021-0012).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Осипов С.П., Батрагин А.В., Воронова В.С., Шиндина А.В. Идентификация дефектов стальных канатов по цифровым радиографическим изображениям // Технологии техносферной безопасности. 2013. № 5(51). С. 6.
2. Lei H. M., Mao Yi.M. Fatigue Testing and evaluation for coated steel belts based on electrical method // Дефектоскопия. 2013. № 10. С. 53—60.
3. Соболев А.С., Пудов В.И. Физическое моделирование условий и параметров надежности магнитного контроля стальных канатов // Дефектоскопия. 2014. № 11. С. 22—30.
4. Сухоруков В.В. Техническая диагностика стальных канатов добывающей промышленности: от дефектоскопии к автоматизированному мониторингу // В мире неразрушающего контроля. 2019. Т. 22. № 3. С. 4—8.
5. Муратов К.Р., Новиков В.Ф., Кулак С.М., Соколов Р.А., Сафаргалиев Р.Ф., Мусихин С.А., Пробыток В.В. Учет жесткости стальных канатов при оценке силы их натяжения по результатам измерения частоты собственных колебаний // Дефектоскопия. 2023. № 2. С. 16—23.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МЕШАЮЩИХ ФАКТОРОВ НА ИЗМЕРЕНИЕ ГЛУБИНЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТРЕЩИН РЕЛЬСОВ ПРИ РУЧНОМ ВИХРЕТОКОВОМ КОНТРОЛЕ

© 2023 г. С.П. Шляхтенков^{1,*}, С.А. Бехер¹

¹Сибирский государственный университет путей сообщения, Россия 630049 Новосибирск,
ул. Дуси Ковальчук, 191
E-mail: *shlyakhtenkow@gmail.com

Поступила в редакцию 16.06.2023; после доработки 28.06.2023
Принята к публикации 30.06.2023

Проведены экспериментальные исследования влияния на амплитуду и фазу сигнала вихретокового преобразователя угла наклона, кривизны поверхности, зазора между преобразователем и контролируемой поверхностью катания рельса.
Ключевые слова: контроль вихретоковый, поверхность катания рельса, контактно-усталостные трещины, глубина трещины, способ отстройки от мешающего фактора.

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF INTERFERING FACTORS ON THE MEASUREMENT OF THE DEPTH OF SURFACE CRACKS OF RAILS DURING MANUAL EDDY CURRENT CONTROL

© 2023 г. S.P. Shlyakhtenkov^{1,*}, S.A. Becher¹

¹Siberian transport university, Russia 630049 Novosibirsk, str. Dusi Kovalchuk, 191
E-mail: *shlyakhtenkow@gmail.com

Experimental studies have been carried out on the effect on the amplitude and phase of the signal of the eddy current converter of the angle of inclination, the curvature of the surface, the gap between the converter and the controlled surface of the rolling rail.

Keywords: eddy current control, rail rolling surface, cracks.

DOI: 10.31857/S0130308223110088, EDN: XAAEYQ

ВВЕДЕНИЕ

Одними из наиболее распространенных дефектов железнодорожных рельсов являются контактно-усталостные поверхностные трещины [1—3]. Бесконтрольное развитие этих повреждений может привести к появлению критических дефектов, а в последствии к излому рельсов [4]. Для устранения поверхностных трещин применяется технология шлифования, эффективность которой зависит от достоверности информации о глубине повреждений [5]. Для решения задачи количественной оценки глубин трещин перспективным методом неразрушающего контроля признан вихретоковый метод (ВТК) [6, 7]. Сложность реализации ВТК заключается в том, что выходной сигнал вихретокового преобразователя (ВТП) зависит сразу от нескольких параметров объекта контроля.

Целью работы является повышение достоверности оценки глубины трещин поверхности катания рельсов вихретоковым методом за счет создания и обоснования эффективных способов выделения информации об измеряемом параметре и отстройки от мешающих факторов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И АППАРАТУРА

В исследованиях использовался вихретоковый дефектоскоп ВЕКТОР-60Д в комплекте с преобразователем ПВР-1. Анализ изменения амплитуды и фазы сигналов ВТП проводился с использованием реализованной в дефектоскопе развертки на амплитудно-фазовой плоскости. Для уменьшения влияния наклона ВТП использовался амплитудно-фазовый способ. Предварительно определялось направление изменения амплитуды сигнала от наклона датчика относительно нормали поверхности сканирования, а амплитуда сигнала от трещины измерялась в проекции на перпендикулярное направление (рис. 1а).

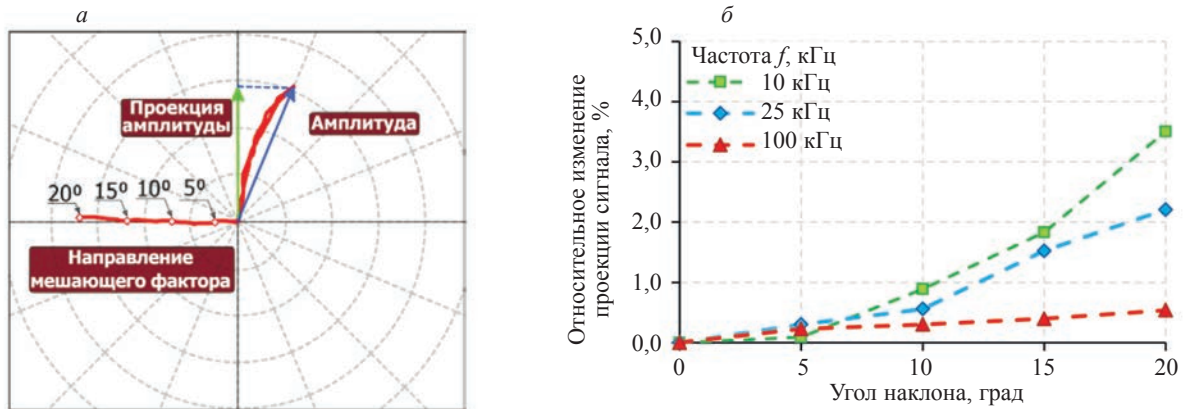


Рис. 1. Изменение сигнала от наклона ВТП при частоте 100 кГц (а), зависимость относительного изменения проекции выходного сигнала ВТП от угла наклона при разных частотах (б).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На частотах возбуждения вихревых токов 10, 25 и 100 кГц проведено сканирование образца головки рельса типа Р65 стали марки Э76ХФ с естественной трещиной глубиной 0,5 мм при углах наклона ВТП от 0 до 20°. Сдвиг фазы выходного сигнала ВТП составил для частоты 10 кГц — 290°, для 25 кГц — 306° и для 100 кГц — 334°. Далее определялось относительное изменение проекции выходного сигнала ВТП (отношение «сигнал/помеха»). Погрешность компенсации достигает 3,5 % на частоте 10 кГц, в 1,5 раза меньше (2,2 %) на частоте 25 кГц и 0,6 % на частоте 100 кГц (рис. 1б).

Влияние кривизны поверхности на сигнал ВТП исследовалось на бездефектном участке головки рельса. Предварительно поверхность катания разбивалась на 4 зоны длиной 5 мм, имеющих различный радиус кривизны. Изменение кривизны вызывает уменьшение магнитного поля вихревых токов и появление нескомпенсированного сигнала, уровень которого будет определяться степенью кривизны поверхности. При этом в характерной зоне развития усталостных трещин — на выкружке рельса, погрешность измерения глубины до 0,5 мм составляет более 20 %. На рис. 2а показана разная реакция выходного сигнала ВТП на изменение угла наклона, зазора и радиуса кривизны. Зазор между поверхностью и датчиком выставлялся с помощью держателя ВТП, обеспечивающего его неподвижность и перпендикулярность относительно контролируемой поверхности, и набора щупов толщиной от 0,05 до 1 мм. Уровень сигнала от кривизны поверхности отображается на амплитудно-фазовой плоскости в направлении действия дефекта. При этом сигнал от увеличения наклона ВТП на угол до 30° и зазора до 0,1 мм имеет направление, выбранное в качестве направления отстройки от мешающих параметров.

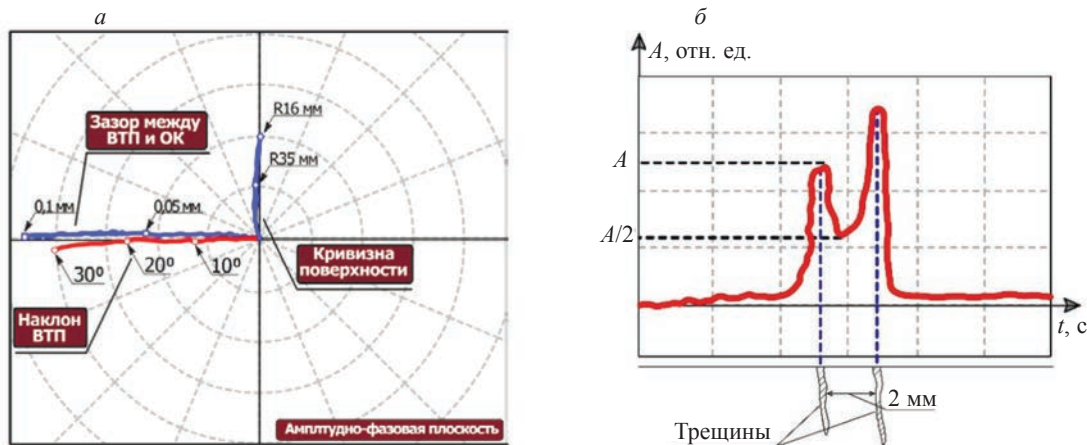


Рис. 2. Изменение сигнала при наклоне ВТП, зазоре и влиянии кривизны поверхности (а); временная развертка сигналов ВТП при сканировании близкорасположенных трещин (б).

Определение зоны чувствительности ВТП проводилось на образце головки рельса с реальными контактно-усталостными трещинами. Для выявления трещин и оценки их протяженности и топологии использовался магнитопорошковый метод. Обнаруженные дефекты имеют вид тонких параллельных трещин (сетка трещин), расстояние между которыми варьируется в пределах от 0,5 до 2 мм. На частоте возбуждения вихревых токов 100 кГц проведено сканирование сетки трещин. При отдалении ВТП от трещин на расстояние 0,5 мм происходит спад амплитуды сигнала на 40—60 % (рис. 2б). Это позволяет уверенно регистрировать сигналы от нескольких трещин на выкружке рельса, расстояние между которыми превышает 1 мм.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Амплитудно-фазовый способ отстройки позволил достаточно эффективно уменьшить влияние угла наклона и зазора на изменение параметров выходного сигнала ВТП, при этом максимальная погрешность компенсации на частоте 100 кГц не превышает 0,6 %. Зона чувствительности ВТП, создаваемая ферромагнитным сердечником Ø 1 мм, вблизи трещины имеет характерный размер 0,5 мм в обе стороны, что позволяет регистрировать раздельно сигналы при контроле сетки трещин. Уменьшение влияния кривизны поверхности может быть достигнуто только при сканировании вдоль линии постоянной кривизны или введением поправок.

Исследования выполнены по теме «Высокопроизводительная технология скоростного шлифования рельсов и оборудование для ее реализации на основе интеллектуальных цифровых модулей», соглашение № 075-11-2022-014 от 08.04.2022 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Муравьев В.В., Тапков К.А. Оценка остаточных напряжений в дифференцированно термоупрочненных рельсах акустическим методом. Ижевск: УИР ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2023. 156 с.
2. Степанова Л.Н., Курбатов А.Н., Бехер С.А., Кабанов С.И., Тенилов Е.С., Чернова В.В. Исследование продольных напряжений в железнодорожных рельсах методом акустоупругости // Деформация и разрушение материалов. 2023. № 2. С. 33—40.
3. Абдурашитов А.Ю., Сычев П.В., Юркова Ю.Н. Модели образования контактно-усталостных повреждений на поверхности катания рельсов // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2019. Т. 15. № 15. С. 14—21.
4. Кулманова Н.К., Каскин Б.К. Определение скорости роста усталостных трещин в стальных рельсах и плетях, сваренных электроконтактным способом // Вестник АО «КазНИИСА». 2020. № 4. С. 52—58.
5. Кузнецова Н.В. Статистический анализ изъятий рельсов с контактно усталостными видами дефектов // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2021. Т. 17. № 17. С. 41—47.
6. Nafiah F., Sophian A., Khan R. Quantitative evaluation of crack depths and angles for pulsed eddy current non-destructive testing // NDT & E International. 2019. No. 102. P. 180—188.
7. Mate Tamas, Zwierczyk Peter. Comparison of rail head checks using destructive and non-destructive examination methods // Journal of Failure Analysis and Prevention. 2022. No. 22. P. 1—7.



Большой медалью Международной Ассоциации академий наук «За сотрудничество и развитие науки» награжден Президент РОНКТД, доктор технических наук, профессор Владимир Александрович Сясько.

Поздравляем Владимира Александровича с этой почетной и заслуженной наградой! Желаем дальнейших достижений на ниве отечественной науки!

Редколлегия