



ISSN 0130-3082

Российская Академия наук

Дефектоскопия



Неразрушающий контроль

Техническая диагностика

Анализ материалов

№ 7

2023



ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Журнал ежемесячный
 Основан в феврале 1965 года
 Екатеринбург

№ 7
 2023

СОДЕРЖАНИЕ**Акустические методы**

Л.Н. Степанова, В.В. Чернова, С.И. Кабанов. Анализ процессов разрушения образцов из углепластиков с использованием акустической эмиссии и тензометрии..... 3

Электромагнитные методы

Л. Эрнандес, Х. Карреон, А. Бедолла. Оценка сегрегации в высокоуглеродистой литой стали по термоэлектродвижущей силе..... 14

Тепловые методы

Д.Ю. Кладов, А.О. Чулков, В.П. Вавилов, В.И. Стасевский, В.А. Юркина. Эффективность применения тепловизоров различного типа при активном тепловом контроле расслоений в неметаллах..... 25

Оптические методы

Е.В. Власов, А.В. Белобородов, П.С. Завьялов, Д.Г. Сырецкий. Контроль внешнего вида торцов топливных таблеток в условиях конвейерного производства..... 33

Бехнам Ахунди, Вахид Моданлу. Неразрушающий контроль внутренних трещин в композитах, армированных стекловолокном, с использованием метода лазерной интерферометрии сдвига..... 44

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

М.В. Сясько, И.П. Соловьев, П.В. Соломенчук. Методика измерения толщины неэлектропроводящего покрытия на немагнитном электропроводящем основании с автоматическим учетом влияния удельной электропроводности основания..... 58

А.Л. Бобров, К.И. Гончаров. Методические вопросы повышения надежности ультразвукового контроля рельсов железнодорожного пути..... 61

М.Ю. Федотов. Некоторые аспекты оптического мониторинга свайных фундаментов в условиях Крайнего Севера..... 65

И.С. Гнивуш, В.А. Сясько, А.С. Мусихин. Влияние мешающих параметров на результаты контроля сплошности покрытий электроискровым методом..... 68

Информация..... 71

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И ТЕНЗОМЕТРИИ

© 2023 г. Л.Н. Степанова^{1,*}, В.В. Чернова², С.И. Кабанов¹

¹ ФАУ «Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С.А. Чаплыгина», Россия 630051
Новосибирск, ул. Ползунова, 21

² «Сибирский государственный университет путей сообщения»,
Россия 630049 Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191
E-mail: *aergroup@ngs.ru

Поступила в редакцию 07.03.2023; после доработки 26.05.2023
Принята к публикации 02.06.2023

С образцами, изготовленными из углепластиков, были проведены статические испытания до разрушения. Контроль дефектов выполнялся с использованием методов акустической эмиссии и тензометрии. На каждый образец в области отверстия наклеивались по четыре проволочных тензодатчика, а по его краям устанавливались по четыре пьезоэлектрических датчика, образующие рабочую зону контроля. Регистрация сигналов, связанных с разрушением композиционного материала образцов, и их локация осуществлялись акустико-эмиссионной системой. В процессе испытаний тензометрической системой регистрировались нагрузки и деформации, при которых начинался процесс разрушения углепластиков. По анализу микрошлифов, выполненных из зоны локации сигналов в образце, определялся тип разрушения. Основные информативные параметры сигналов акустической эмиссии связывались с типом разрушения углепластиков.

Ключевые слова: образцы, углепластики, статическое нагружение, деформация, дефекты, акустическая эмиссия, локация, тензометрия.

DOI: 10.31857/S0130308223070011, EDN: DVNDPD

ВВЕДЕНИЕ

Основные задачи, возникающие при проектировании авиационных конструкций из композиционных материалов (КМ), связаны с повышением их устойчивости к различным повреждениям, в том числе вызванным влиянием внешних факторов (град, удары от птиц, попадание самолета в «спутный след» и т.д.). Данные повреждения могут приводить к развитию дефектов (усталостное растрескивание, вдавливание, расслоение, разрушение матрицы и т.д.) в композитах [1—3]. Самолеты и беспилотные объекты, используемые в малой авиации, состоят практически на 65 % из композитов [4—6]. Углепластики, применяемые при производстве летательных аппаратов, должны обеспечивать надежную работу конструкции в эксплуатации.

Возникающие при эксплуатации конструкций дефекты могут приводить к их внезапному разрушению, что существенно ограничивает применение углепластиков в ответственных изделиях. Отечественные разработки в области создания композиционных объектов авиационной техники еще недавно выполнялись, в основном, из зарубежных материалов, таких как Torayca T700, T800 и т.д. В настоящее время российская промышленность переходит на разработку и производство новых отечественных композитов, в связи с чем становятся актуальными работы, связанные с анализом их основных технических характеристик.

Имеющиеся экспериментальные результаты показывают, что (в отличие от металлов) при развитии дефектов в КМ не наблюдаются зоны стабильного медленного контролируемого роста [5, 6]. Для оценки состояния таких конструкций необходимо разработать методики контроля, позволяющие определять координаты дефектов на ранней стадии развития, их тип, степень опасности и т.д. При прочностных испытаниях различных композиционных конструкций часто используется метод акустической эмиссии (АЭ), отвечающий таким требованиям [7—10].

Повреждения в композиционной конструкции, вызванные различными внешними воздействиями, приводят к изменению основных информативных параметров сигналов АЭ (амплитуды, доминантной частоты, структурного и двухинтервального коэффициентов, энергетического параметра MARSE) [11, 12].

В процессе статического нагружения образцов, выполненных из различных углепластиков, использовалась тензометрия, позволяющая измерять нагрузки и деформации в режиме реального времени [13, 14]. Методом АЭ осуществляли регистрацию сигналов АЭ и локацию дефектов [16]. Для определения типа дефектов и проведения анализа внутренней структуры КМ использовали микроанализ шлифов, изготовленных из материала углепластика, расположенного в зоне локации сигналов АЭ.

Цель работы — определение координат и типа дефектов при статическом нагружении образцов, выполненных из различных углепластиков, с использованием акустической эмиссии и ее основных информативных параметров (амплитуды, доминантной частоты, энергетического параметра MARSE, структурного коэффициента $P_{D42}(f)$), а также тензометрии, регистрирующей деформацию.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Статические испытания образцов из углепластиков T700, T800, АСМ проводили при температуре $T = + 20$ °С. Стандартные образцы, предназначенные для исследования авиационных материалов и конструкций, выполняли с отверстием в центральной части, которое является штатным концентратором напряжения, имитирующим место установки крепежных элементов (болтов, заклепок и т.д.). В табл. 1 приведены паспортные данные по основным прочностным характеристикам углепластиков T700, T800, АСМ, полученные из нормативно-технических условий.

Таблица 1

Паспортные данные монослоев исследованных углепластиков T700, T800, АСМ

Наименование углепластика	Производитель	Толщина монослоя t , мм	Предел прочности на растяжение, МПа	Модуль упругости на растяжение, ГПа	Предел прочности на сдвиг, МПа
Tорайса T700	Composite Italia Toray (Италия)	0,192	2293	123	118
Tорайса T800		0,113	2950	176	105
АСМ102С–130UD	АО «Препрег-СКМ» (Россия)	0,13	1800	135	85

Для исключения влияния захватов нагружающей машины MTS–50 на образцы были наклеены дюралюминиевые пластины размером $100 \times 140 \times 1$ мм, что позволило предотвращать их смятие.

При исследовании деформаций в образцах, выполненных из различных композитов, на каждый из них наклеивали по четыре проволочных тензодатчика типа ПКС–12 (свидетельство RU.C.28.007.A, регистрационный номер № 30935) сопротивлением $R = 200$ Ом, базой $L = 12$ мм, коэффициентом тензочувствительности $K = 2,12$.

Тензодатчики располагали справа и слева от отверстия (концентратора напряжений) диаметром 14 мм, а также в верхней и нижней частях образца (рис. 1а, б). Выбранная схема установки позволяла контролировать деформации как в области концентратора напряжений (где начиналось разрушение и локация сигналов АЭ), так и по линии приложения нагрузки (где также формировались активные источники сигналов АЭ). Тензодатчики подключали к микропроцессорной быстродействующей тензометрической системе «Динамика-3» (сертификат № 66973—17), которая определяла деформации материала образцов с погрешностью 0,2 %.

Каждый образец устанавливали в нагружающую электрогидравлическую машину MTS-50 (рис. 1а), после чего на нем размещали четыре преобразователя акустической эмиссии (ПАЭ) типа ПК02–05 с полосой пропускания (200—500) кГц, образующие зону контроля (рис. 1б). Образцы нагружали ступенчато через $\Delta P = 5$ кН до нагрузки, при которой начиналась устойчивая локация сигналов АЭ.

Для исследования типа дефектов в образцах, выполненных из различных композитов, осуществляли их нагружение до момента появления устойчивой локации сигналов АЭ. Для анализа типа дефектов в углепластиках изготавливали шлифы из области локации сигналов АЭ. С использованием растрового электронного микроскопа CarlZeissevo 50XVP выполняли анализ шлифов и определяли дефекты структуры композитов (растрескивание и выкрашивание матрицы, излом волокон) [12, 13]. Это позволяло оценить дефекты в углепластиках на ранней стадии их развития, когда визуально они не определялись.

На рис. 2 показана локация сигналов АЭ в образцах из углепластика Торайса T700 (а) с укладкой из двенадцати монослоев $[\pm 45/90/0_0/90/\pm 45]$ с геометрическими размерами $500 \times 100 \times 2,3$ мм, в образцах из углепластика Торайса T800 (б) с геометрическими размерами $600 \times 100 \times 0,9$ мм и укладкой, состоящей из девяти монослоев $[\pm 45/90/0_3/90/\pm 45]$, в образцах из угле-

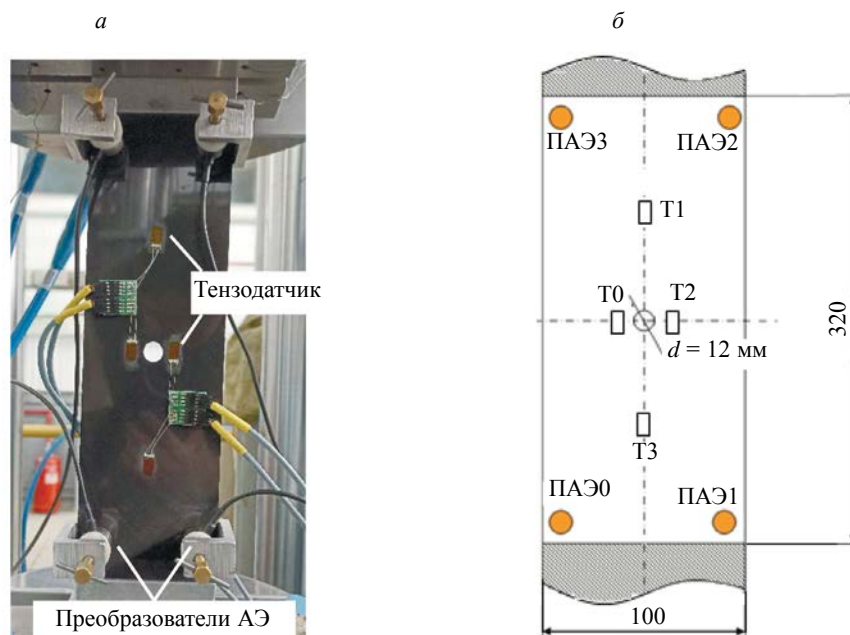


Рис. 1. Фотография образца, установленного в нагружающую машину MTS-50 (а); схема расположения пьезо- (ПАЭ) и тензодатчиков (Т) в рабочей области образца (б).

пластика АСМ102С-130UD (в) с геометрическими размерами $600 \times 100 \times 2,3$ мм и укладкой $[\pm 45/0/90/0/+45/0/-45/0/+45_2/0/-45/0/+45/0/90/0/\pm 45]$.

На рис. 2б выделено три области, соответствующие активным источникам сигналов АЭ. Если при очередном повышении нагрузки на величину $\Delta P = 5$ кН число локализованных сигналов АЭ практически не изменялось, то считалось, что локация устойчива. В области 1 локация начиналась при нагрузке $P = 10$ кН и характеризовала начало разрушения образца в зоне концентратора напряжения, была активна в процессе всего нагружения. При нагрузке $P = 55$ кН регистрация сигналов проходила в верхней (область 2) части образца. Активная регистрация сигналов АЭ в нижней (область 3) части образца проходила при нагрузке $P = 70$ кН.

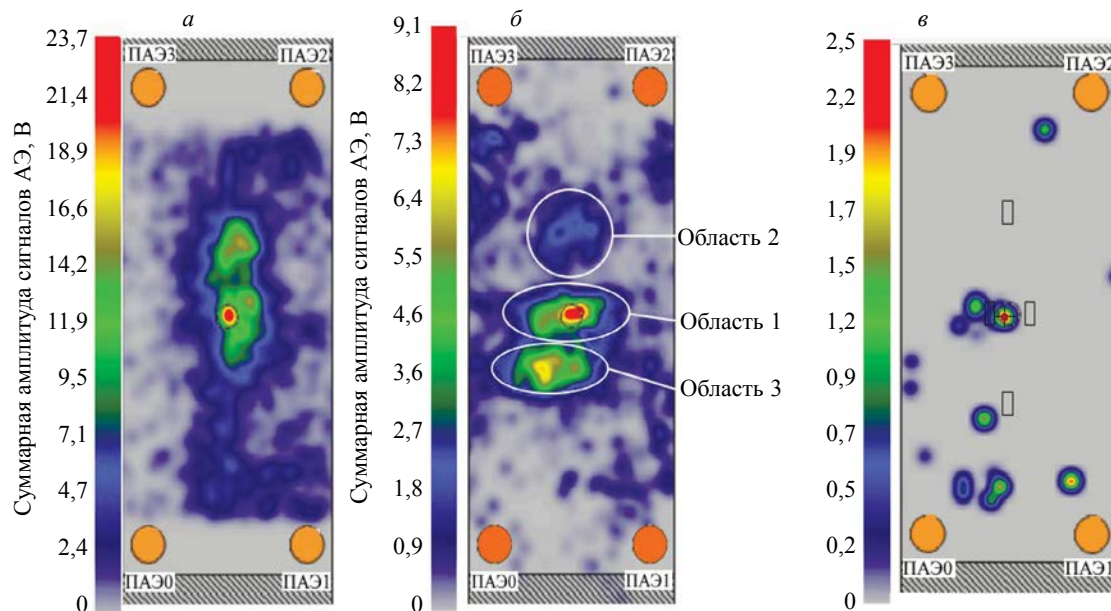


Рис. 2. Локация сигналов АЭ при нагружении образцов, выполненных из углепластиков: Т700 (а); Т800 (б); АСМ (в).

Нагружение образцов выполнялось до их разрушения. Регистрация сигналов АЭ и обработка информации выполнялась сертифицированной системой СЦАД-16.10 (свидетельство RU.C.27.007.A № 40707, зарегистрирована в Государственном реестре средств измерений под номером 45154-10) с «плавающими» порогами селекции.

Суммарная амплитуда (см. рис. 2б) сигналов АЭ, зарегистрированных в области 1, была максимальной. Анализ изменения активности сигналов АЭ, зарегистрированных в областях 2 и 3 (см. рис. 2б), позволил установить, что они были окончательно сформированы на последней ступени нагружения при нагрузке, равной 70 кН.

Для данных областей (см. рис. 2б) были определены координаты X_c , Y_c центров масс по формулам [13]:

$$X_c = \frac{\sum_{i=0}^N x_i \cdot \text{MARSE}_i}{\sum_{i=0}^N \text{MARSE}_i}; \quad Y_c = \frac{\sum_{i=0}^N y_i \cdot \text{MARSE}_i}{\sum_{i=0}^N \text{MARSE}_i},$$

где x_i , y_i — координаты i -го сигнала АЭ, мм; i — номер сигнала, локализованного при определенной нагрузке; MARSE — энергетический параметр, мВ · мкс.

Среднеквадратическое отклонение координат характеризовало их разброс относительно центра масс (табл. 2). Получено, что наиболее растянутой как по оси X , так и по оси Y была область 1, соответствующая разрушениям образца по линии, перпендикулярной к оси растяжения и проходящей через центр и поверхность отверстия.

Таблица 2

Значения координат центров масс для областей локации, выделенных в образце из углепластика Т800

Номер области	Координаты центров масс, мм		Среднеквадратическое отклонение, мм	
	X_c	Y_c	X_c	Y_c
1	45	125	16	16
2	64	174	16	9
3	33	93	16	7

При обработке информации рассчитывали основные информативные параметры сигналов АЭ, зарегистрированные при испытаниях. Расчет энергетического параметра MARSE выполняли по формуле [12]:

$$\text{MARSE} = \int \bar{U}(t) \cdot dt,$$

где $\bar{U}(t)$ — огибающая сигнала АЭ, которая определялась его амплитудой и длительностью.

Структурный коэффициент сигналов АЭ находился как [12]

$$P_{D_{42}}(f) = \frac{\max D_4}{\max D_2}, \quad (1)$$

где D_4 , D_2 — наборы коэффициентов вейвлет-разложения 4 и 2 уровней детализации, полученные при частоте дискретизации исходного сигнала, равной $f = 2$ МГц.

Уровень детализации 2 соответствовал полосе частот от 250 до 500 кГц, уровень детализации 4 — полосе частот от 63 до 125 кГц.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для изготовления шлифов сначала рассматривались участки образцов, принятые за условно бездефектные. Для этого из нерабочей области, расположенной под дюралюминиевыми пластинами, вырезался материал, из которого изготавливались шлифы. На рис. 3 приведены фотографии поверхности шлифов для всех исследованных условно бездефектных участков углепластиков.

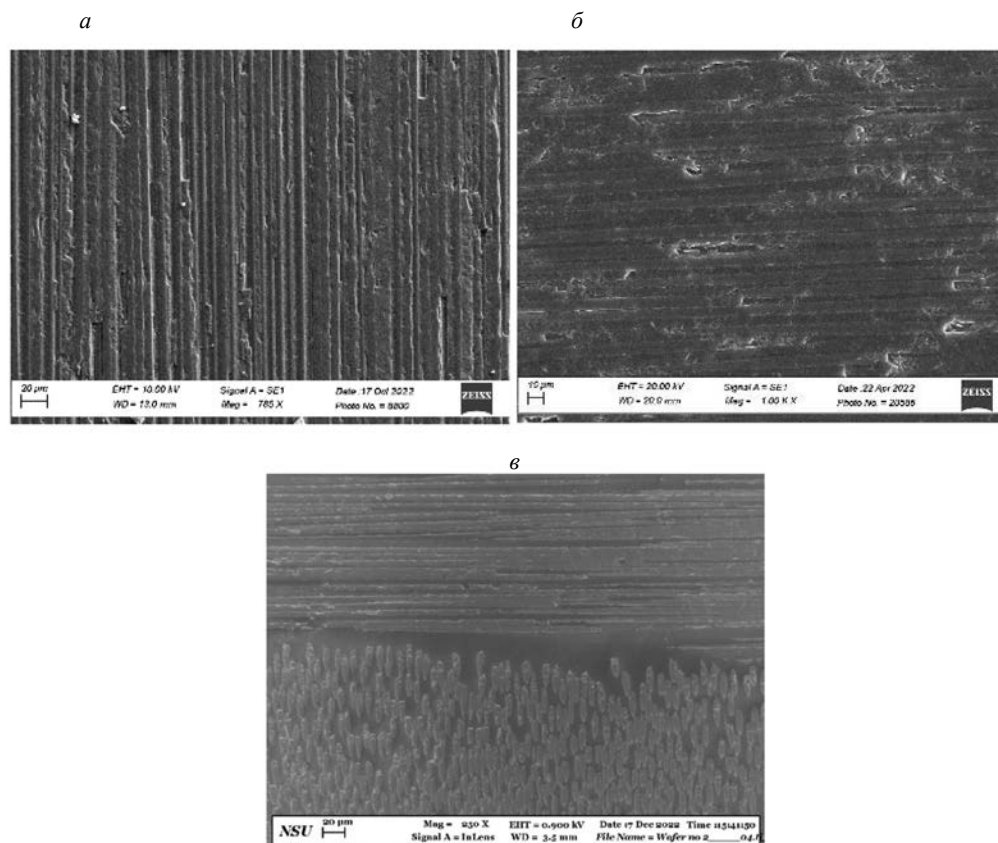


Рис. 3. Фотографии поверхности микрошлифов, изготовленных из условно бездефектных участков образцов углепластиков: T700 (а); T800 (б); АСМ (в).

При нагружении образцов сигналы АЭ сначала локализовались рядом с отверстием, поэтому материал для изготовления микрошлифов был вырезан из данной зоны. На рис. 4 показаны фотографии поверхностей микрошлифов, изготовленных из зон локации сигналов АЭ в образцах из углепластиков: T700 (а, б), T800 (в, г) и АСМ (д, е). На рис. 4а, в, д приведено выкрашивание матриц в микрошлифах. Однако волокна монослоев на данных участках шлифов оставались целыми. На рис. 4б, г, е приведены разрушенные волокна в каждом микрошлифе, выполненном из рассматриваемых углепластиков.

Сравнительный анализ результатов испытаний образцов, изготовленных из углепластиков T700, T800 и АСМ, и построенные гистограммы (рис. 5) позволили определить соотношения максимальной нагрузки, которую выдерживали образцы до разрушения, и нагрузки, при которой начиналась активная локация сигналов АЭ.

В образцах из углепластиков T700, T800 начало устойчивой локации сигналов АЭ наблюдалось при нагрузках, составляющих от 18 до 20 % от их максимального значения (см. рис. 5), а в образцах из углепластика АСМ — при нагрузках, составляющих (40 — 57) % от максимального значения. Геометрические размеры образцов и концентраторов напряжения для углепластиков АСМ и T700 практически совпадали. Однако в образцах из углепластика T700 процесс разрушения и устойчивая локация сигналов АЭ появлялись при нагрузках, составляющих 18 % от максимальной, т.е. практически в три раза меньших по сравнению с нагрузками, составляющими 57 % для образцов из углепластика АСМ. Максимальная рабочая нагрузка для отечественного углепластика АСМ равна 120 кН, а для углепластика T700 она составила 220 кН.

Анализ полученных гистограмм показал, что процесс разрушения образцов, выполненных из углепластика АСМ, сложно определять на его ранней стадии развития. При увеличении нагрузки в пределах (10—20) кН сигналы АЭ в образцах из этого углепластика не регистрировались, так как были низкого уровня и с использованием разработанных методик контроля не локализовались.

В начале нагружения образцов из углепластика T700 регистрировались сигналы, характеризующиеся максимальной энергией и структурными коэффициентами (табл. 3). В соответствии с фор-

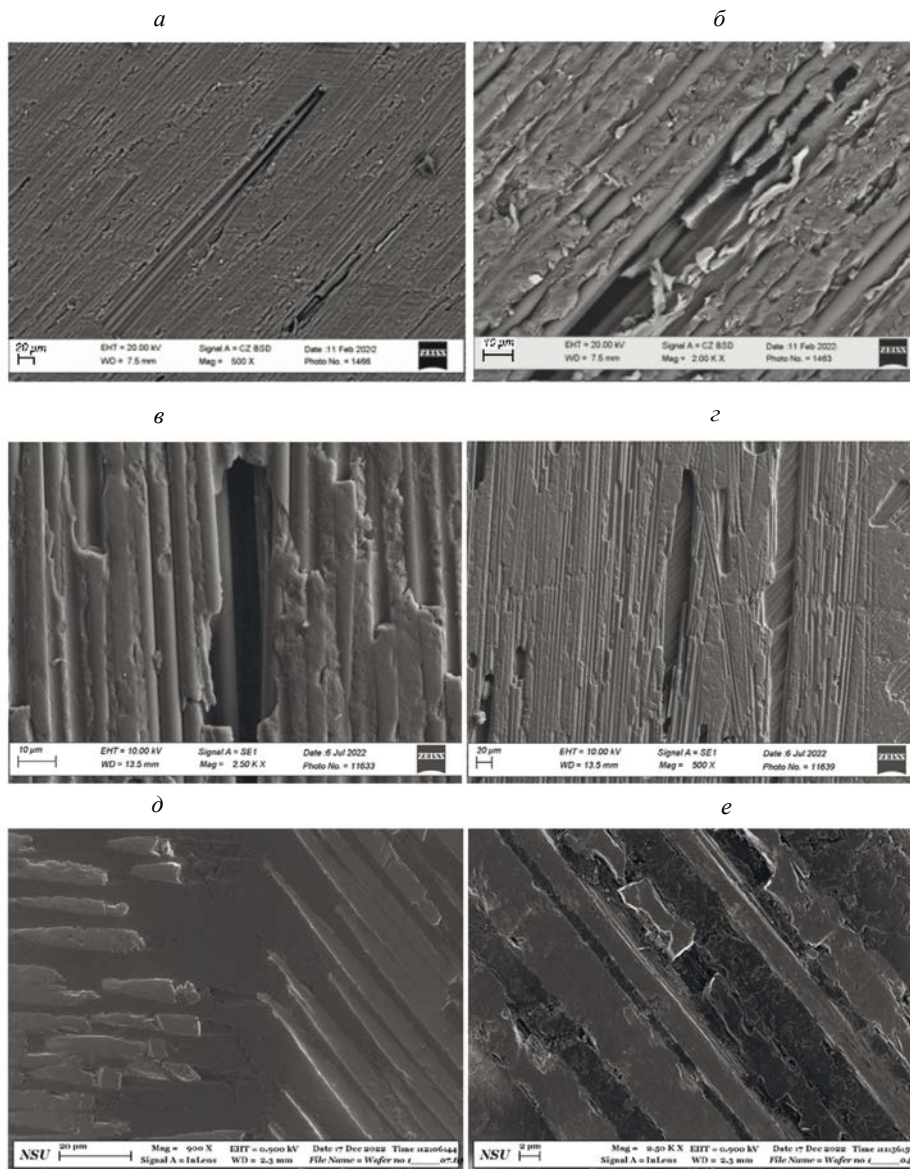


Рис. 4. Фотографии поверхности микрошлифов, изготовленных из зон углепластиков: T700 (а, б); T800 (в, г); ACM (д, е) после их статического нагружения.

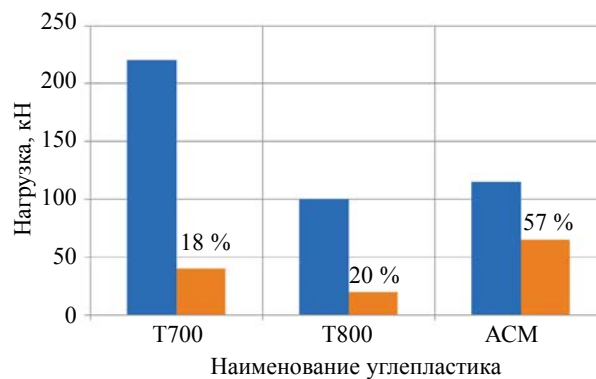


Рис. 5. Гистограммы, показывающие соотношения максимальной нагрузки, которую выдержали образцы из углепластиков: T700, T800, АСМ, и нагрузки, при которой началась локация сигналов АЭ в области концентратора напряжений (■ — максимальная рабочая нагрузка, кН; ■ — нагрузка начала локации в области отверстия, кН; □ — процент от максимальной рабочей нагрузки).

Таблица 3

Значения энергетического параметра MARSE и структурного коэффициента $P_{D42}(f)$ при нагружении образца из углепластика T700

Нагрузка, кН	MARSE, мВ·мкс				Структурный коэффициент $P_{D42}(f)$			
	ПАЭ0	ПАЭ1	ПАЭ2	ПАЭ3	ПАЭ0	ПАЭ1	ПАЭ2	ПАЭ3
10	44,45	71,05	23,75	17,2	1,89	2,29	3,69	3,05
20	50,6	22,3	15,3	10,8	1,05	2,45	3,26	1,21
30	32,1	9,7	4,05	4,35	1,13	2,19	2,64	1,48
40	6,7	6	14,1	21,5	1,40	1,45	1,68	0,95
50	10,2	13	21,95	18,8	1,55	1,25	1,31	0,95
60	13,6	12,8	21,1	19,3	1,16	1,41	1,39	0,82
70	18,7	19,75	27,35	27,65	1,03	1,14	1,51	0,70
80	18,25	19,5	23,1	27,75	1,02	1,12	1,62	0,84
90	23,2	25,65	27,3	27,25	1,26	1,18	1,76	0,87
100	19,6	21,2	22,5	22,4	1,33	1,12	1,61	0,96
110	15	21,3	21,2	18,2	1,42	1,04	1,62	1,11
120	14,2	18,2	21,3	16	1,41	1,14	1,50	1,19
130	22,45	22,35	29	27,95	1,66	1,47	1,75	1,28
140	25,4	21,4	21,6	19	1,56	1,67	2,03	1,57
150	30,85	22,1	25,4	21,3	1,53	1,90	2,36	1,65
160	21	19	17	13	1,50	1,69	2,47	1,66
170	20,6	16,1	15,5	11,9	1,44	1,43	2,51	1,59
180	25	15,1	23,1	19	1,52	1,80	2,48	1,52

мулой (1) это означало, что коэффициенты вейвлет-разложения 4-го уровня детализации больше, чем 2-го уровня, т.е. смещение энергии сигналов АЭ осуществлялось в область низких частот [12]. При нагрузках (40 — 50) кН параметры MARSE и структурного коэффициента $P_{D42}(f)$ принимали наименьшие значения, что, как показано в работе [12], соответствует разрушению матрицы. При дальнейшем повышении нагрузки наблюдалось увеличение энергетических параметров MARSE и структурного коэффициента $P_{D42}(f)$, что свидетельствовало об активном процессе разрушения волокон материала углепластика T700 [12—13].

Начало процесса разрушения образцов из углепластика T800 определялось по локациям сигналов АЭ в его рабочей области в районе концентратора напряжений, которое осуществлялось при нагрузках, не превышающих $P = 30$ кН (см. рис. 2б, рис. 4). В табл. 4 приведены значения энергетического параметра MARSE и структурного коэффициента $P_{D42}(f)$ сигналов АЭ, зарегистрированных при нагружении образца из углепластика T800. Для этих образцов увеличение энергии сигналов АЭ происходило более монотонно по сравнению с образцами, выполненными из углепластика T700.

Образец 1 из углепластика АСМ, из которого были изготовлены шлифы, нагружался до появления устойчивой локации сигналов АЭ в области концентратора напряжения. При этом максимальная нагрузка для данного образца составила $P_{\max} = 90$ кН. При нагружении образца 2 нагрузка была увеличена на 30 % и составила $P_{\max} = 120$ кН. Однако при переходе нагрузки от 115 до 120 кН произошло его разрушение. Разрушение образца 3 произошло при изменении нагрузки от 110 до 115 кН.

В процессе испытаний было определено, что регистрация сигналов АЭ системой СЦАД-16.10 начиналась при нагрузках, равных (20 — 25) кН. Однако сигналы были низкого уровня, что не

Таблица 4

Значения энергетического параметра MARSE и структурного коэффициента $P_{D42}(f)$ при нагружении образца из углепластика Т800

Нагрузка кН	MARSE, мВ·мкс				Структурный коэффициент $P_{D42}(f)$			
	ПАЭ0	ПАЭ1	ПАЭ2	ПАЭ3	ПАЭ0	ПАЭ1	ПАЭ2	ПАЭ3
10	16,3	16,05	7,4	13,4	0,21	0,59	0,31	1,30
15	23,5	17,3	9,5	21,4	0,21	0,91	0,52	1,83
20	20,05	15,4	13,3	22,95	0,23	0,99	0,50	1,21
25	21,6	23,9	12,6	19,6	0,28	1,02	0,51	1,31
30	22,8	27,1	14,3	19,7	0,26	1,12	0,43	1,23
35	23,75	25	16,65	24,6	0,29	1,11	0,57	1,20
40	23	29,85	12,5	20,85	0,31	1,05	0,53	1,38
45	31,3	40,3	19,2	38,9	0,28	1,20	0,68	1,53
50	30,55	29,7	15,25	26,15	0,29	1,20	0,54	1,49
55	35,25	27,6	16,9	26,2	0,24	1,18	0,61	1,38
60	29,9	28,1	17,9	24,6	0,24	1,10	0,62	1,55
65	35,9	32,1	20	30,5	0,26	1,45	0,74	1,83
70	45,9	40,6	17,5	34,2	0,23	1,77	0,69	1,96

позволило проводить их локацию. Устойчивая локация сигналов АЭ наблюдалась при нагрузках, равных (45 — 65) кН. Поэтому значения основных информативных параметров сигналов АЭ начали определять при нагрузке $P = 40$ кН. В табл. 5 приведены значения энергетического параметра MARSE и структурного коэффициента $P_{D42}(f)$ для образца из углепластика АСМ, испытанного до разрушения.

Таблица 5

Значения энергетического параметра MARSE и структурного коэффициента $P_{D42}(f)$ при нагружении образца из углепластика АСМ

Нагрузка, кН	MARSE, мВ·мкс				Структурный коэффициент $P_{D42}(f)$			
	ПАЭ0	ПАЭ1	ПАЭ2	ПАЭ3	ПАЭ0	ПАЭ1	ПАЭ2	ПАЭ3
40	109	120,3	46,1	26	0,74	0,46	0,40	1,40
50	149,7	143	77	37,9	0,66	0,43	0,39	1,13
60	126,6	145,95	115,3	64,85	0,63	0,45	0,41	0,89
70	101,9	104,2	118,15	100,55	0,70	0,44	0,41	0,92
80	140,85	143	142,15	72,6	0,61	0,45	0,39	1,02
90	146,7	240,3	67,7	42,65	0,99	0,55	0,53	1,57
100	89,3	57,7	165,4	140,3	1,10	1,23	0,33	0,72
110	104,7	68,1	155,1	131,3	1,10	1,25	0,28	0,69
120	76,9	49,35	175,15	171,8	1,10	1,01	0,46	0,78

Для определения нагрузок и деформаций при испытании образцов использовалась тензометрия. На рис. 6а показано размещение проволочных тензодатчиков на образце из углепластика Т700. На графике рис. 6б приведена зависимость изменения нагрузки от времени, что позволило определять изменение деформации материала образца при выдержке нагрузки на каждой ступени

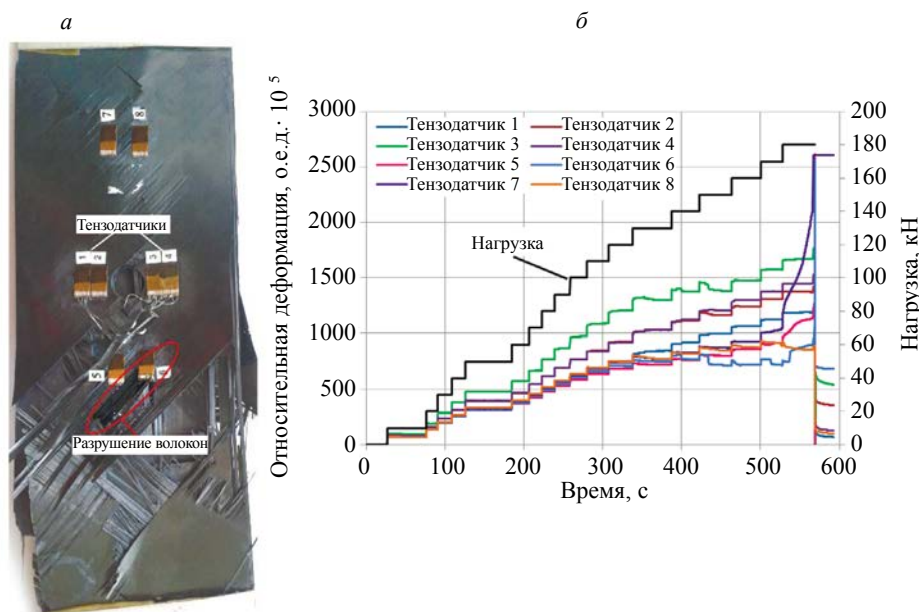


Рис. 6. Внешний вид образца из углепластика T700 (а) после испытаний; зависимости деформаций и нагрузки от времени, полученные при нагружении образца (б).

нагружения. С нагрузки $P = 130$ кН отмечалось уменьшение регистрируемой деформации (рис. 6б), что характеризовало начало процесса разрушения материала углепластика.

Как показали результаты испытаний, наибольшие деформации были зарегистрированы тензодатчиками 1—4, расположенными в области концентратора напряжений. При этом максимальные значения деформаций наблюдались у тензодатчика 3 (см. рис. 6б), а после испытаний под ним визуально были выявлены разрушения как верхних, так и нижних монослоев углепластика (см. рис. 6а).

Начиная с нагрузки $P = 50$ кН, значения деформаций, зарегистрированных тензодатчиками 5—8, расположенными в верхней и нижней частях образца, были более чем в два раза меньше по сравнению с показаниями тензодатчиков 2—4, так как располагались дальше от концентратора напряжений. После превышения нагрузки $P = 140$ кН деформации в области наклейки тензодатчика 6 снижались до 0,0072 относительных единиц деформации (о.е.д) (см. рис. 6б). Визуальный осмотр образца после испытаний показал, что волокна, на которых был наклеен тензодатчик 6, разрушились (см. рис. 6а, б). Тензодатчик 5 был расположен на неразрушенных волокнах, поэтому при нагружении образца деформации увеличивались при повышении нагрузки.

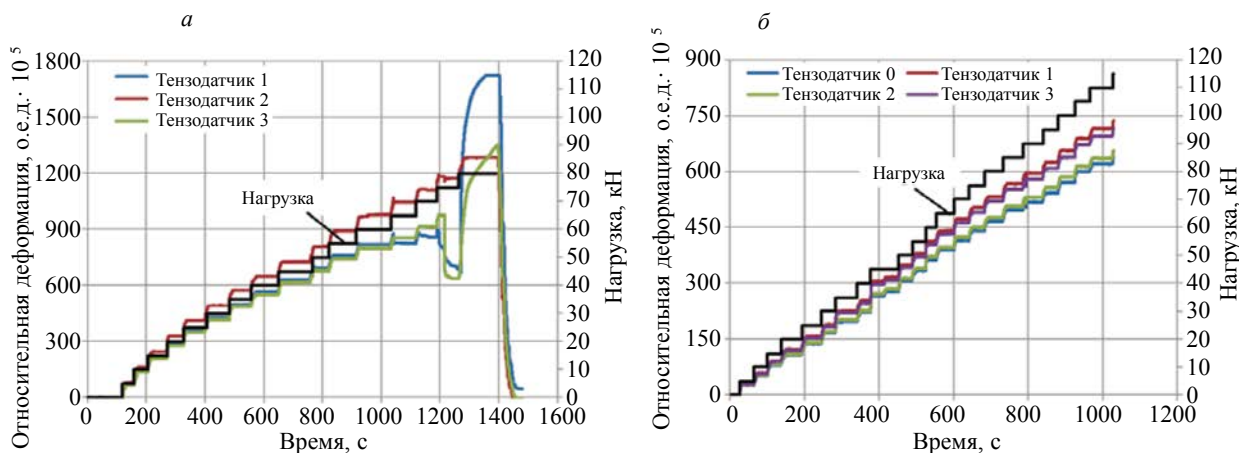


Рис. 7. Экспериментальные зависимости деформаций от времени, зарегистрированные в образцах из углепластиков: T800 (а) и ACM (б).

Однако деформации в области наклейки тензодатчиков 7 и 8 перестали изменяться при достижении нагрузки $P = 170$ кН, что соответствовало разрушению монослоя и данных тензодатчиков (см. рис. 6б). Таким образом, при нагружении образца из углепластика Т700 происходило его разрушение не только в области концентратора напряжений, но и на отдельных участках верхних монослоев рабочей зоны.

По результатам измерения деформаций от времени в образце из углепластика Т800 установлено, что после нагрузки $P = 60$ кН в этой зависимости возникали нелинейности (рис. 7а). В зоне наклейки тензодатчиков Т1 и Т3 (см. рис. 1б) эти нелинейности наблюдались раньше, чем в зоне наклейки тензодатчика Т2, расположенного вблизи концентратора напряжений. При выдержке нагрузки происходили резкие изменения деформаций как в сторону их увеличения, так и уменьшения.

В случае появления расслоения в углепластике Т800 непосредственно под тензодатчиком, он выходил из работоспособного состояния, что характеризовалось резким изменением деформаций (см. рис. 7а). При статическом нагружении образцов из углепластика АСМ наблюдалось отсутствие нелинейного изменения деформаций от времени в области наклейки тензодатчиков (рис. 7б).

ВЫВОДЫ

1. Показано, что при использовании основных информативных параметров (энергетического параметра MARSE и структурного коэффициента $P_{D42}(f)$) определялись типы дефектов [12]. В образцах из углепластиков Т700, Т800 после приложения нагрузки, составляющей (18—20) % от максимальной, наблюдалось разрушение волокон и растрескивание матриц. Для получения таких же разрушений в образцах из углепластика АСМ была необходима нагрузка, составляющая более 50 % от максимальной.

2. Анализ шлифов, изготовленных из зон локации сигналов АЭ образцов, выполненных из углепластиков Т700, Т800, АСМ, позволил определять начало зарождения дефектов типа растрескивания матрицы и разрушения волокон на основании анализа основных информативных параметров сигналов АЭ [12]. Данный подход к определению типа разрушения углепластиков позволит по информативным параметрам сигналов АЭ осуществлять контроль дефектов композиционных конструкций ответственного назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барсук В.Е., Степанова Л.Н., Кабанов С.И. Акустико-эмиссионный контроль дефектов при статических испытаниях конструкций композиционного самолета // Контроль. Диагностика. 2018. № 4. С. 14—19.
2. Савин С.П. Применение современных полимерных композиционных материалов в конструкции планера самолета семейства МС-21 // Изв. Самарского научного центра РАН. 2012. Т.14. № 4(2). С. 686—693.
3. Масхидов В.В., Кашарина Л.А., Смирнов О.И., Яковлев Н.О. Построение оптоэлектронной системы встроенного контроля авиационных конструкций, изготовленных с применением полимерных композиционных материалов // Конструкции из композиционных материалов. 2019. № 1. С. 65—73.
4. Смотров С.А. Отработка технологии обнаружения и регистрации малозаметных ударных повреждений на конструкции летательного аппарата из полимерных композиционных материалов с помощью ударочувствительного индикаторного покрытия // Конструкции из композиционных материалов. 2021. № 2. С. 14—19.
5. Фейгенбаум Ю.М., Миколайчук Ю.А., Метелкин Е.С., Батов Г.П. Место и роль неразрушающего контроля в системе поддержания летной годности композиционных конструкций // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2015. № 9. С. 71—82.
6. Фейгенбаум Ю.М., Дубинский С.В. Влияние случайных эксплуатационных повреждений на прочность и ресурс конструкции воздушных судов // Научный вестник МГТУ ГА. 2013. № 187. С. 83—91.
7. Builo S.I. Statistical Models for Qualitative Evaluation of the Distortion of the Amplitude Distributions of Acoustic Emission Pulses and for Increasing the Reliability of Acoustic Emission Method // Russian Journal of Nondestructive Testing. 1996. V. 5. P. 353—360.
8. Lehmann M., Bueter A., Schwarzsaupt O. Structural health monitoring of composite aerospace structures with acoustic emission // Journal of Acoustic Emission. 2018. V. 35. P. 172—193.
9. Madaras E. Underscore the NASA role in the development of the nondestructive testing of the composite // NASA Langley research center, scientific department of non-destructive testing of structures and materials. Gempton /VA2368 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.cs.edu/~mln/ltrs/NASA-2001-ahsiss-eim.pdf>

10. *Sikdar S., Mirgl P., Bantrjee S., Ostachowicz W.* Damage-induced acoustic emission source monitoring in a honeycomb sandwich composite structure // *Composites Part B*. V. 158. 2019. P. 179—188.
11. *Серъезнов А.Н., Степанова Л.Н., Кабанов С.И., Лебедев Е.Ю.* Использование метода акустической эмиссии при неразрушающем контроле объектов транспортного машиностроения // *Общероссийский научно-технический журнал «Полет»*. 2022. № 2. С. 22—34.
12. *Степанова Л.Н., Батаев В.А., Лапердина Н.А., Чернова В.В.* Акустико-эмиссионный способ определения типа дефекта структуры образца из углепластика / Патент 2676209 РФ, МПК С. 9 G 01 N 29/14. Заявитель и патентообладатель Сибирский государственный университет путей сообщения. № 2017145888. Заявл. 25.12.2017. Оpubл. 26.12.18. Бюл. № 10.
13. *Степанова Л.Н., Батаев В.А., Чернова В.В.* Определение связи структуры образцов из углепластика с параметрами сигналов акустической эмиссии при одновременном статическом и тепловом нагружении // *Контроль. Диагностика*. 2019. № 11. С. 4—13.
14. *Башков О.В., Проценко А.Е., Брянский А.А., Ромашко Р.В.* Диагностика полимерных композиционных материалов и анализ технологий их изготовления с использованием метода акустической эмиссии // *Механика композиционных материалов*. 2017. Т. 53. № 4. С. 765—774.
15. *Степанова Л.Н., Рамазанов И.С., Батаев В.А., Чернова В.В.* Анализ зависимости параметров сигналов акустической эмиссии от изменения структуры углепластика при прочностных испытаниях образцов // *Конструкции из композиционных материалов*. 2019. № 2. С. 58—65.
16. *Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В., Иванов В.И., Елизаров С.В.* Проблемы локации источников акустической эмиссии // *Дефектоскопия*. 2021. № 9. С. 35—44.

ОЦЕНКА СЕГРЕГАЦИИ В ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ ЛИТОЙ СТАЛИ ПО ТЕРМОЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЕ

© 2023 г. Л. Эрнандес¹, Х. Карреон^{1*}, А. Бедолла¹

¹ *Металлургический научно-исследовательский институт,
Университетский городок, Морелия, 58190 Мексика
E-mail: *hcarreon@umich.mx*

Поступила в редакцию 03.05.2023; после доработки 27.05.2023

Принята к публикации 29.05.2023

Предлагается использовать метод термоэлектродвижущей силы с применением горячего и холодного электродов (термоЭДС) для оценки сегрегации легирующих элементов и изменения микроструктуры высокоуглеродистой стали, отлитой в форму. Оптикоэмиссионная спектроскопия (ОЭС) показала более высокую концентрацию углерода, никеля, хрома и алюминия в центре слитка. Такое насыщение элементами привело к повышению содержания перлита, а также твердости изделия. Неразрушающий метод термоЭДС применялся при изменении температуры горячего наконечника (40, 50, 60, 70 °С), при этом более высокие значения температуры оказались более чувствительными к сегрегации и микроструктурным изменениям. Статистический анализ показал, что метод термоЭДС является более чувствительным к изменениям концентрации никеля и хрома.

Ключевые слова: НК, термоЭДС, сегрегация, литье стали, статистический анализ.

DOI: 10.31857/S0130308223070023, **EDN:** DVPKFW

1. ВВЕДЕНИЕ

Согласно равновесной диаграмме железо—углерод, высокоуглеродистая сталь — сплав железа с содержанием углерода 0,6—2,11 %. Их механические свойства, такие как твердость, модуль Юнга E , предел прочности и предел текучести σ_y повышаются с увеличением содержания углерода. С металлургической точки зрения, увеличение прочности высокоуглеродистых сталей связано с наличием таких твердых фаз, как цементит и перлит, в то время как феррит уменьшает его свойства [1—4].

Данная группа сталей обладает высокими механическими свойствами при низкой стоимости, поскольку нет необходимости добавлять легирующие элементы. Поэтому они широко используются в тех областях, где требуется высокая прочность, например, в кузнечных работах, инструментальных сталях, сталях для железнодорожных рельсов, автомобильных пружинах, высокопрочной проволоке и износостойких элементах.

Стали с высоким содержанием углерода обычно отливают в формах или на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Во время процесса затвердевания в обоих промышленных процессах возникает явление сегрегации, заключающееся в насыщении химическими элементами центра отливки, который является последней областью затвердевания. Сегрегация сама по себе является диффузионным явлением, в результате чего возникает химическая и металлургическая неоднородность в стали [5—9]. В предыдущих исследованиях было установлено, что элементами, которые в большей степени сегрегируют в продуктах производства стали, являются углерод, никель, хром, марганец и алюминий [10—12]. Механическая неоднородность вызывает разрушение стали на последующих этапах обработки, таких как холодная вытяжка, холодная прокатка и ковка [13—18]. Таким образом, наличие сегрегации приводит к значительным экономическим потерям из-за некачественных затрат.

Традиционно сегрегация в литой стали определяется с помощью химического макротравления в соответствии со стандартом ASTM E-381, при котором выявляется макроструктура затвердевания сплава с помощью смеси соляной кислоты (HCl) и воды в соотношении 1:1 [19]. В результате этой процедуры затемняются сегрегированные участки, где уровень сегрегации определяется по цветовому контрасту. Однако данная методика не является количественной, поэтому ее результаты не поддаются сравнению или проверке. Кроме того, она требует высокой квалификации контролера по качеству, а также может быть опасна при использовании химических реактивов.

В качестве альтернативного метода оценки сегрегации хорошим вариантом являются данные неразрушающих методов (НК), поскольку с их помощью можно получить информацию о состоянии материала без необходимости металлографической подготовки или использования токсичных химических реагентов; кроме того, полученные результаты могут быть прослеживаемыми и воспроизводимыми. Помимо этого, такие результаты неразрушающего контроля более надежны, чем результаты, полученные традиционными методологиями.

Метод термоЭДС — это метод неразрушающего контроля, основанный на эффекте Зеебека, когда тепловой градиент индуцируется от холодных и горячих электродов в непосредственном контакте со стальным образцом для создания разности потенциалов или напряжения [20]. Некоторые исследования показали, что метод термоЭДС чувствителен к определенным изменениям химического состава и микроструктуры, вызванным различными видами промышленной обработки, например: термообработкой, холодной деформацией, естественным старением и химической сегрегацией [21—26].

Термоэлектрический потенциал или коэффициент Зеебека, согласно закону Гортера—Нордгейма, напрямую зависит от электропроводности сплава и индивидуального коэффициента Зеебека каждого легирующего элемента [27, 28]. Поэтому изменение химического состава стали в связи с сегрегацией приводит к изменению электропроводности и термоэлектрического потенциала. Наконец, цель данного исследования — продемонстрировать, что метод термоЭДС является отличным методом неразрушающего контроля в качестве альтернативы для оценки химической сегрегации в высокоуглеродистой стали.

2. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛОВ И ПРОЦЕДУРЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Высокоуглеродистая сталь изготавливалась в электромагнитной индукционной печи, где жидкий металл разливался и затвердевал в изолированной форме, чтобы способствовать явлениям химической сегрегации. Химический состав стали представлен в табл. 1. Полученный слиток был разделен на три части, названные А, В и С, как показано на рис. 1. Из каждой части образца был вырезан участок, который был разделен на девять областей для проведения различных анализов: термоЭДС, химический анализ, микроструктура и твердость.

Таблица 1

Химический состав высокоуглеродистой стали

	% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Cu	% Ni	% Cr	% Al
Мин	0,7	0,6	0,15	—	—	—	—	—	—
Макс	0,75	0,9	0,35	0,02	0,015	0,12	0,1	0,1	0,1

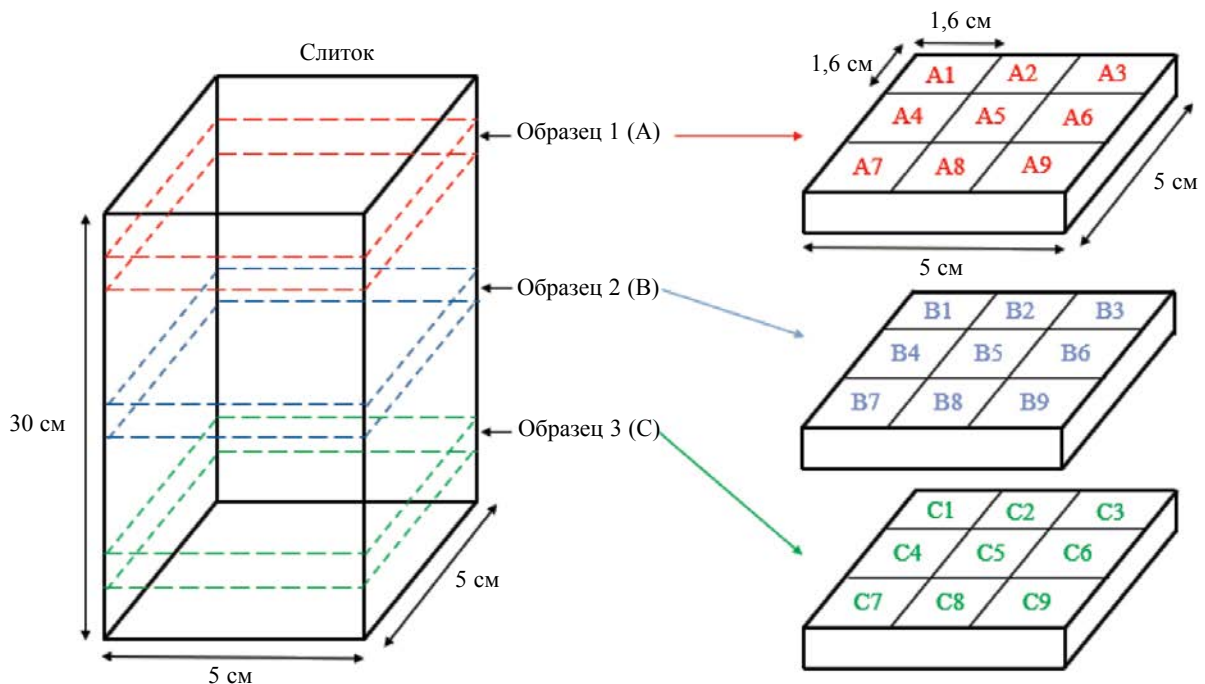


Рис. 1. Распределение областей для анализа на одном участке.

2.1. Выборка образцов

Все данные, полученные по термоЭДС, химическому анализу, микроструктуре и твердости, были усреднены сначала по каждой области на участке среза (А, В и С), затем было получено общее среднее значение (Z) с учетом трех срезов сплава, как показано на рис. 2.

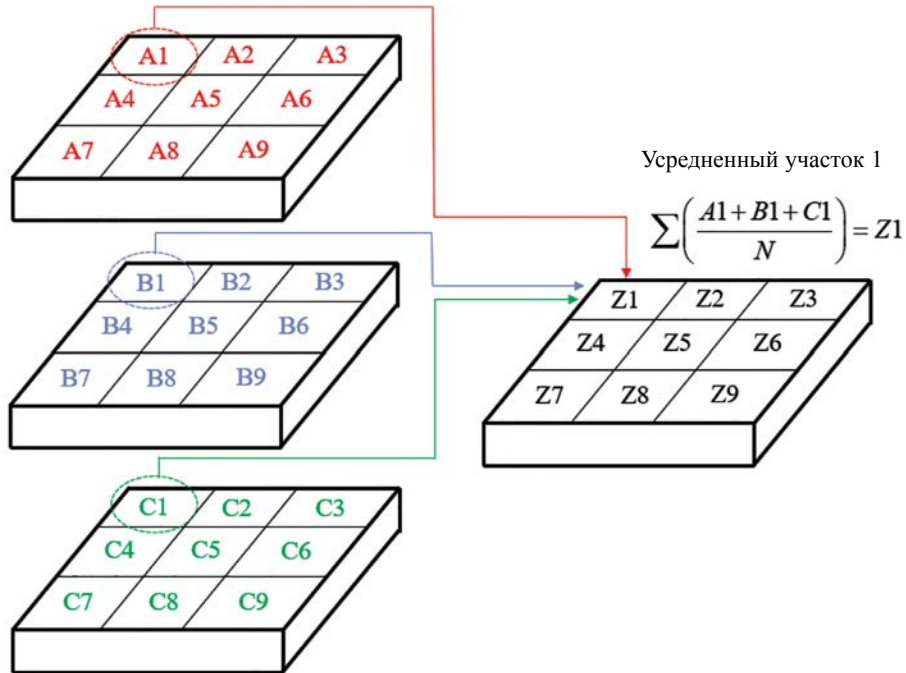


Рис. 2. Распределение областей образца для статистического анализа.

2.2. Химический анализ

Для определения влияния сегрегации легирующих элементов на сталь был проведен химический анализ различных зон в трех образцах слитков с помощью метода оптического спектрометра в соответствии со стандартом ASTM415-14. На каждую из областей анализа (A1—A9, B1—B9, C1—C9) было проведено десять усредненных измерений, которые впоследствии были снова усреднены (Z1—Z9) в соответствии с вышеуказанной методикой.

2.3. Анализ микроструктуры

При помощи оптической микроскопии было получено десять цифровых изображений после количественного определения процентного содержания феррита и перлита с помощью программного обеспечения SigmaScan Pro 5® для каждой анализируемой области в образцах (Z1—Z9). Наконец, чтобы получить больше информации о влиянии сегрегации на микроструктуру, была проведена сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) через электронный микроскоп JEOL® JSM-6400.

2.4. Твердость

Измерения твердости по Виккерсу проводили с помощью тестера NANOVEA-Series® с нагрузкой 1 кг. Для каждой области анализа в образцах А, В и С было произведено десять измерений с максимальной стандартной ошибкой измерения $\pm 0,8$ HV.

2.5. Средства измерения термоэлектродвижущей силы

С целью определения влияния химической сегрегации в стальном слитке были проведены измерения термоЭДС в каждой области трех участков разреза, а затем усреднены для получения областей Z1—Z9. Метод термоЭДС — это неразрушающий подповерхностный метод, чувствительный к химическим и микроструктурным изменениям. Эффективная толщина обнаружения напрямую зависит от тепловых и электрических свойств образца, а также от теплового градиента между рабочими электродами и их геометрических характеристик. Неразрушающий метод термоЭДС основан на эффекте Зеебека, который заключается в том, что при контакте двух металлов разной природы при разных температурах возникает ЭДС, создаваемая градиентом температуры. Золотой электрод, называемый горячим наконечником, устанавливается в контакт со стальным образцом в качестве промежуточного с медным электродом при комнатной температуре, создавая таким образом градиент температуры между наконечниками (ΔT), что в свою очередь создает напряжение (ΔV) в соответствии со следующим выражением:

$$S_{\text{Steel}} - S_{\text{Electrodes}} = \frac{\Delta V}{\Delta T}, \quad (1)$$

где $S_{\text{Electrodes}}$ — термоЭДС эталонов, которые были из золота в случае горячего наконечника и из меди в случае холодного наконечника. В то же время S_{Steel} обозначает термоЭДС образца из стали, которое может изменяться благодаря наличию дислокаций (ΔS_d), выпадению вторичных фаз (ΔS_p), растворенным элементам или сегрегации (ΔS_s), как показано в следующем выражении:

$$\Delta S_{\text{Steel}} = \Delta S_d + \Delta S_p + \Delta S_s. \quad (2)$$

Измерения термоЭДС проводились на оборудовании компании Walker Scientific с использованием горячего наконечника из золота и холодного (при комнатной температуре) наконечника из меди. Было проведено 10 измерений в каждой области, после чего результаты усреднялись. Измерения проходили при различных температурах горячего наконечника при 40, 50, 60 и 70 °С; температура определялась и контролировалась датчиком температуры LM35 с точностью $\pm 0,5$ °С и ПО LabView 2018 (рис. 3).

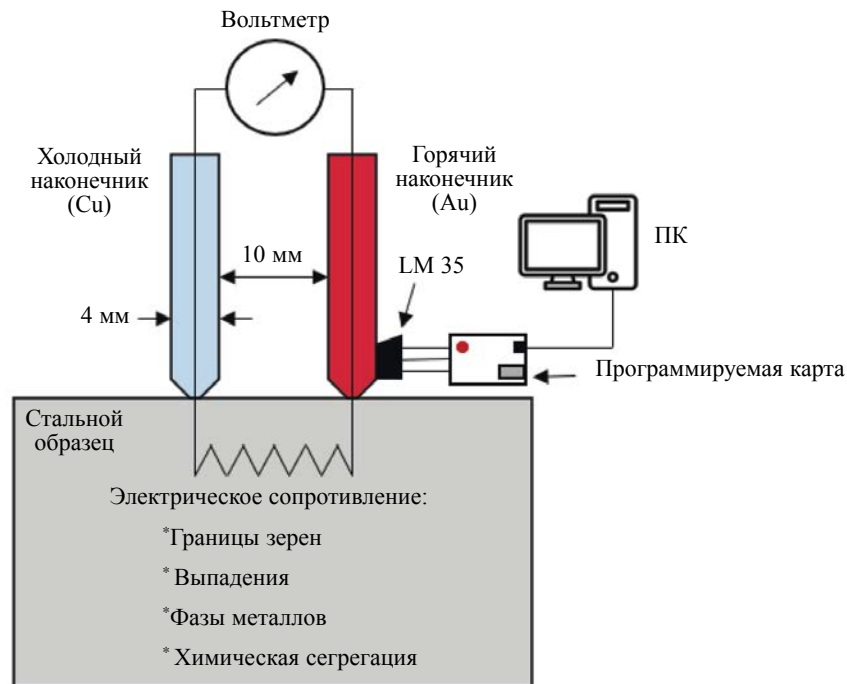


Рис. 3. Схема измерений термоЭДС с помощью горячего и холодного наконечника.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Результаты химического анализа

С помощью метода оптической спектроскопии была определена концентрация химических элементов в различных анализируемых областях на трех участках разреза для последующего усреднения (Z1—Z9). Результаты химического анализа показали, что сталь состоит из девяти элементов (C, Ni, Cr, Al, Mn, Si, P, S, Cu); однако химические элементы, такие как C, Ni, Cr и Al, распределились неоднородно, что указывает на тенденцию этих элементов к сегрегации в процессе затвердевания. Вследствие конституционного переохлаждения некоторые растворенные элементы в стали имеют тенденцию концентрироваться в последней области затвердевания.

На рис. 4 показаны контурные графики, соответствующие четырем основным сегрегационным элементам. Зона с наибольшей концентрацией растворителей находилась в центре (Z5), поскольку они концентрировались в конце затвердевания из-за диффузионных эффектов. При сравнении четырех сегрегационных элементов было установлено, что никель и хром имеют равномерное распределение по всему образцу; с другой стороны, углерод и алюминий были распределены асимметрично.

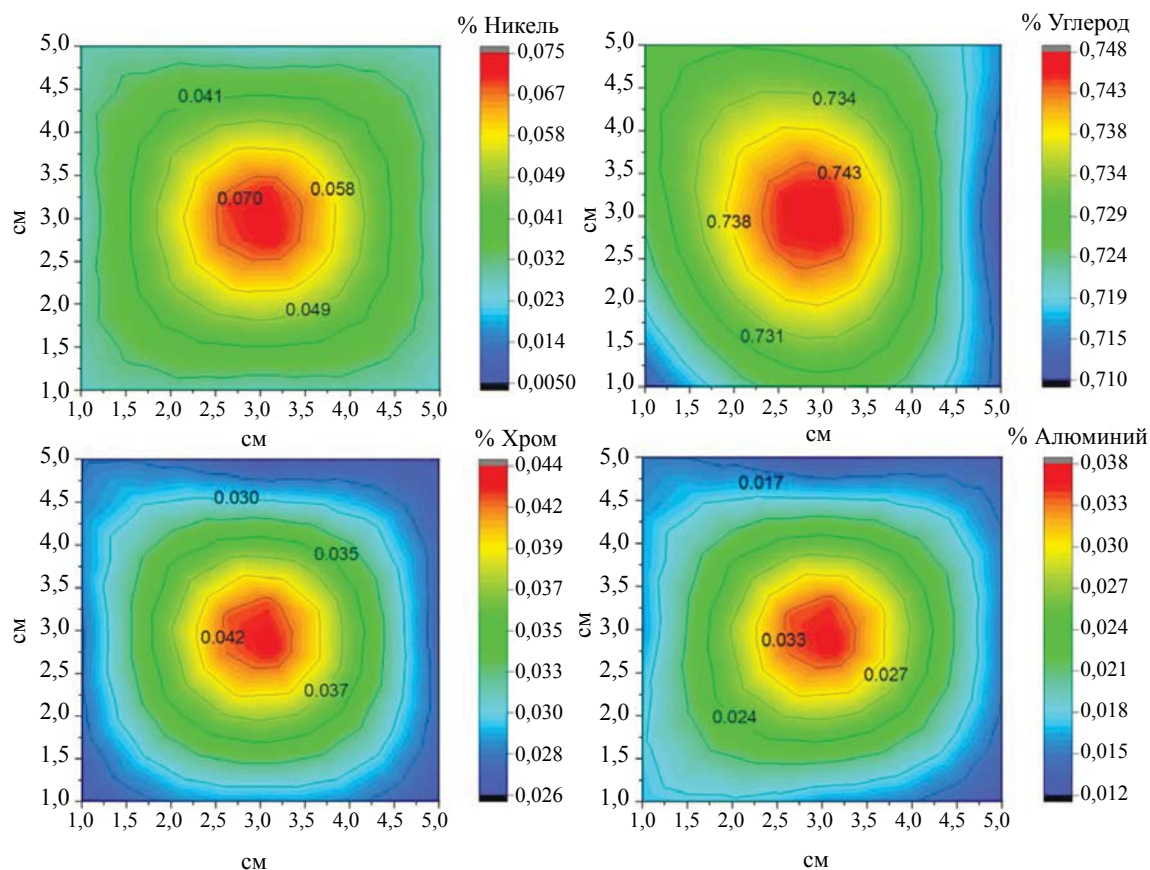


Рис. 4. Усредненное распределение сегрегационных элементов в высокоуглеродистой стали.

3.2. Металлургический анализ

Микроструктура различных анализируемых областей в трех участках среза слитка наблюдалась с помощью оптической микроскопии и традиционного метода металлографии. При сравнении микроструктур в трех участках среза не было обнаружено явных различий, поэтому они считаются одинаковыми. Однако при сравнении краевых участков микроструктуры (Z1—Z9) по

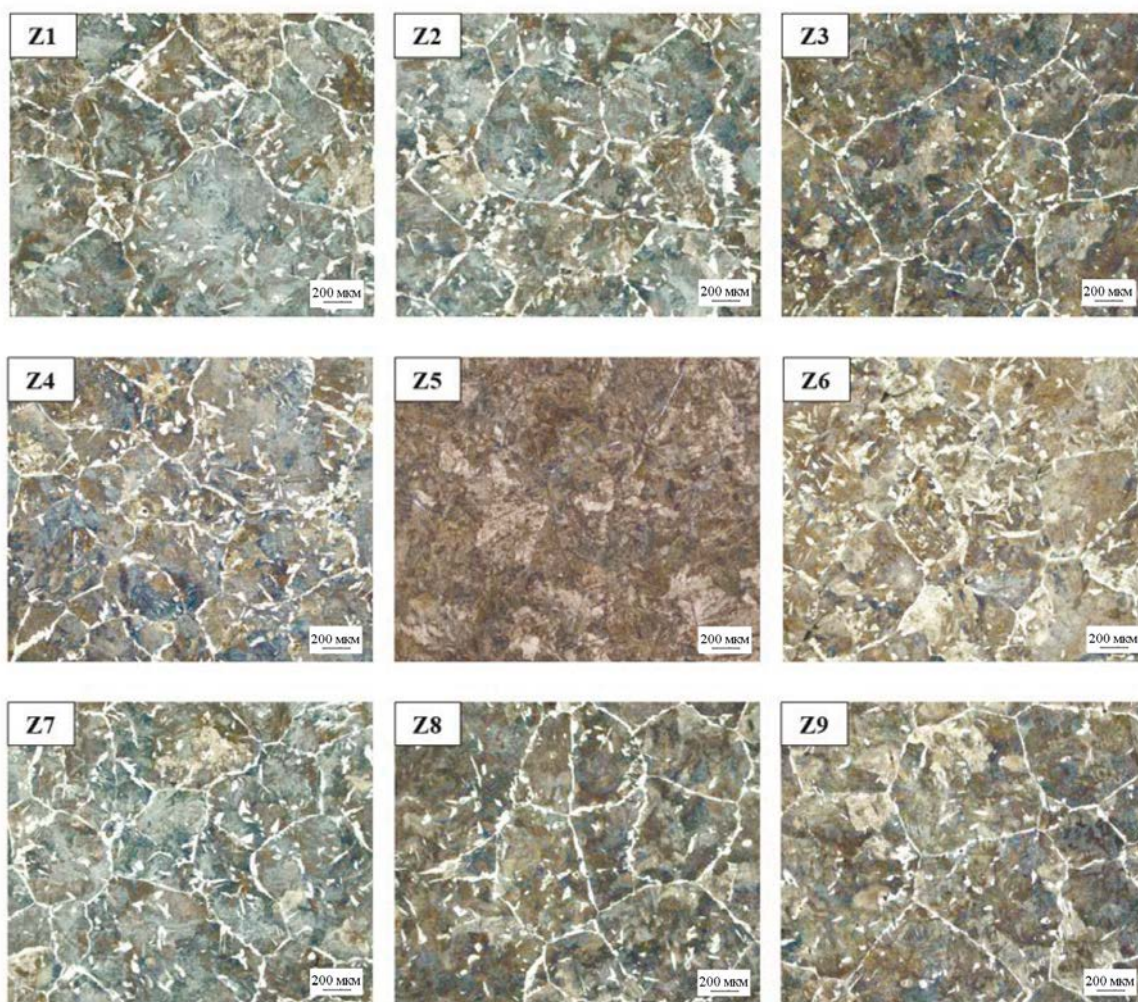


Рис. 5. Анализ оптической микроскопии различных зон в стальном образце. (Зеленая/коричневая фаза — перлит. Белая фаза по границам зерен — доэвтектоидный феррит.)

отношению к центру (Z5) были обнаружены заметные изменения. На рис. 5 видно, что на периферии образца микроструктура состоит из перлита и доэвтектоидного феррита, в то время как в центре микроструктура полностью перлитная. Эти микроструктурные изменения связаны с явлением сегрегации. Согласно равновесной фазовой диаграмме железо—углерод, при более низком содержании углерода увеличивается ферритная фаза и уменьшается содержание перлита. С другой стороны, при более высоком содержании углерода происходит обратный эффект.

Для более точного определения фаз и микроструктур стального образца в различных анализируемых областях была проведена сканирующая электронная микроскопия (СЭМ). Как показано на рис. 6, периферия в основном состоит из феррита и перлита. В области большей сегрегации (Z5) микроструктура полностью перлитная; следует отметить, что перлит является микрокомпонентом, состоящим из ферритной матрицы и вкрапленных карбида (цементита).

Используя изображения оптической микроскопии, для каждой анализируемой области в трех участках разреза была проведена количественная оценка фазового состава и затем усреднена. Численные данные показали, что в области наибольшей сегрегации (Z5) среднее содержание перлита составило 97,8 и 2,2 % феррита, в то время как на периферии среднее содержание перлита составило 88,4 и 11,6 % феррита. Такое различие в фазовом соотношении объясняется явлением сегрегации углерода и других элементов в процессе затвердевания (рис. 7).

Наконец, чтобы определить влияние сегрегации и микроструктуры на механические свойства стали, были проведены испытания по определению твердости по Виккерсу. Результаты показаны

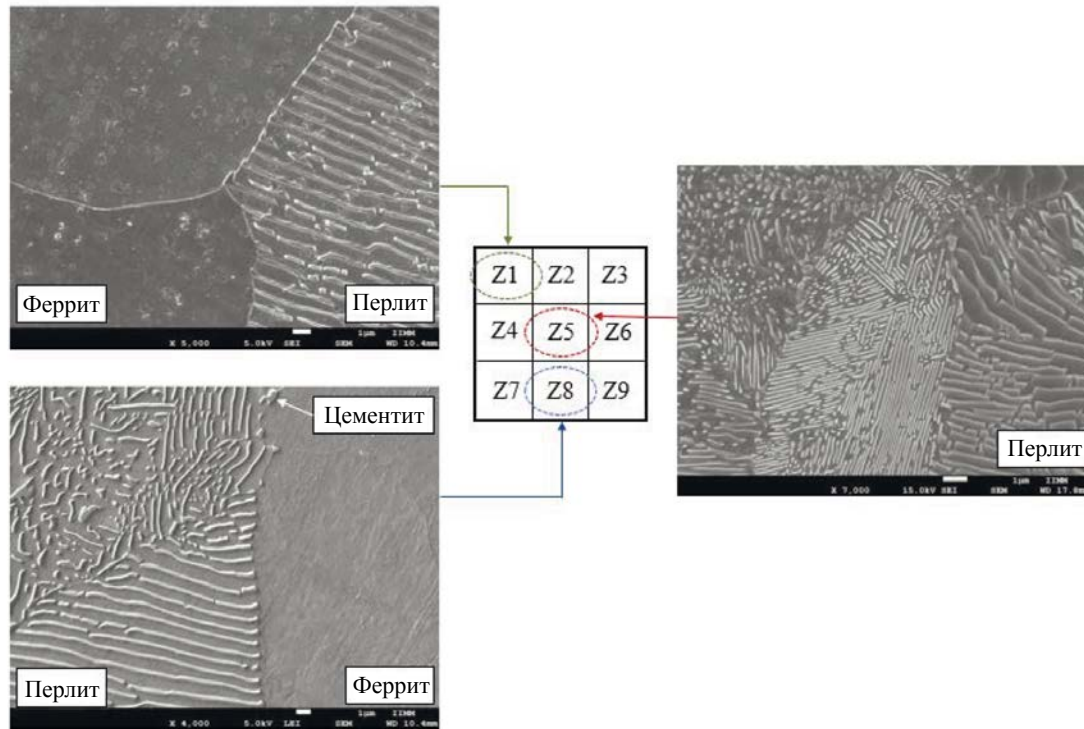


Рис. 6. СЭМ-анализ различных зон стального образца.

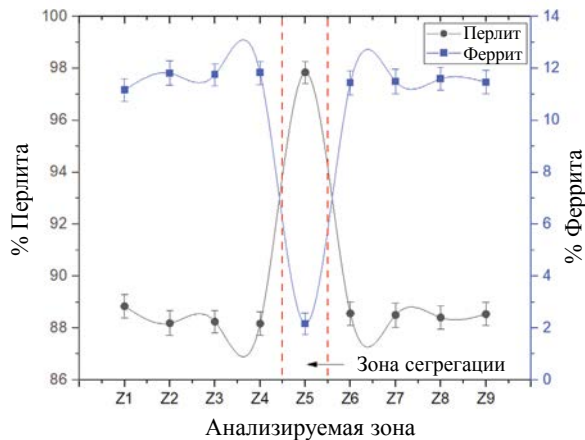


Рис. 7. Фазовое распределение в стальном образце.

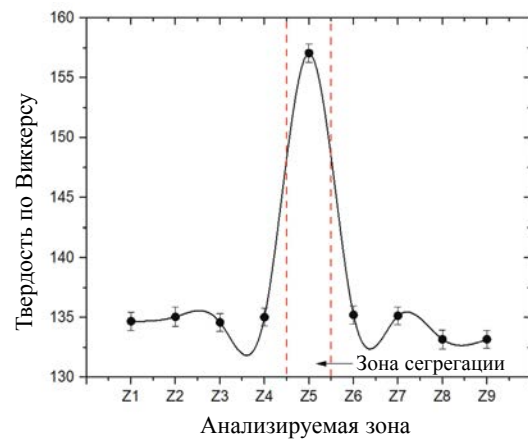


Рис. 8. Твердость в различных участках стального образца.

на рис. 8. Примечательно, что область наибольшей сегрегации (Z5) показала максимальную среднюю твердость 157HV, в то время как на периферии средняя твердость составила 135HV. Значения твердости имеют прямую корреляцию с микроструктурой и сегрегацией элементов, что объясняется тем, что при более высоком содержании перлита твердость имеет тенденцию к увеличению. Напротив, при более высоком содержании феррита и более низком содержании перлита твердость имеет тенденцию к снижению.

3.3. Результаты измерения термоЭДС

Исследования термоЭДС проводили на стальных образцах путем изменения теплового градиента между золотым горячим наконечником до 15, 25, 35 и 45 °С. Повышение температуры на нагреваемом электроде (или наконечнике) одновременно увеличивало тепловой градиент между

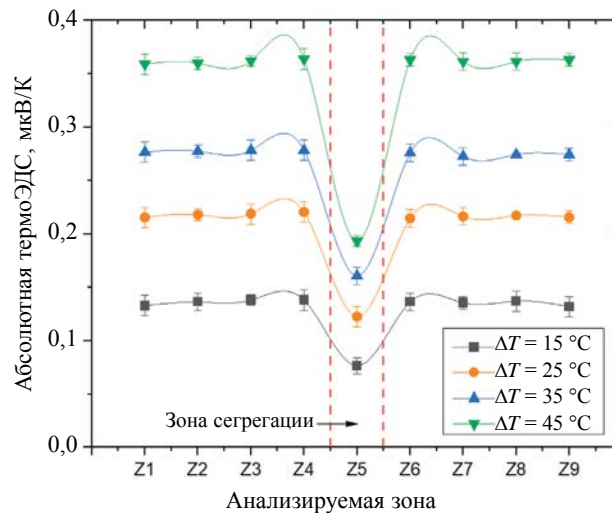


Рис. 9. ТермоЭДС сегрегированного стального образца в зависимости от изменения теплового градиента между горячим и холодным наконечниками.

горячим и холодным наконечниками. Значения термоЭДС не были постоянными; они увеличивались по мере увеличения теплового градиента. Однако, несмотря на изменения температурного градиента, область с наибольшей сегрегацией (Z5) показала значительно более низкие значения мощности Зеебека по сравнению с остальной анализируемой областью (рис. 9).

Разница в термоэлектрической мощности в критической зоне Z5 по отношению к периферии объясняется явлением сегрегации. Предыдущие исследования показали, что химические и микроструктурные изменения могут влиять на значения термоЭДС. В частности, сегрегации имеют тенденцию к снижению термоЭДС [29]. Теоретически, изменение абсолютного потенциала Зеебека тесно связано с изменением электро- и теплопроводности сплава из-за присутствия легирующих элементов, что продемонстрировали Гортер и Нордхейм.

Кроме того, на рис. 9 показано, что различие в термоЭДС образца на периферии по отношению к центру или зоне наибольшей сегрегации имеет тенденцию к увеличению по мере увеличения теплового градиента между горячим и холодным наконечниками. Таким образом, благодаря более выраженной разнице в термоЭДС, такой неразрушающий метод обладает большей чувствительностью для установления сегрегации в стали.

3.4. Статистический анализ

Для определения эффективности метода термоЭДС в определении механических свойств, микроструктуры и химической сегрегации, а также влияния теплового градиента между горячим золотым и холодным медным наконечниками, были установлены корреляции между указанными переменными с использованием коэффициента Пирсона (R), показанного в выражении (3), где x_i и y_i представляют независимую и зависимую случайные переменные соответственно, а \bar{x} и \bar{y} представляют их средние значения.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}. \quad (3)$$

Рис. 10 показывает зависимость между процентными содержаниями феррита, перлита, твердости по Виккерсу и значениями термоЭДС при изменении температурного градиента.

С помощью коэффициента Пирсона было установлено, что такой неразрушающий метод не показал значительную корреляцию (НЗ) с какими-либо свойствами стали, когда температурный градиент был низким, или, с точки зрения статистики, значение P меньше значимости α , равной 0,05. С другой стороны, по мере увеличения температурного градиента между наконечниками корреляция улучшалась, достигая оптимального значения, когда градиент составлял 45 °C. Таким

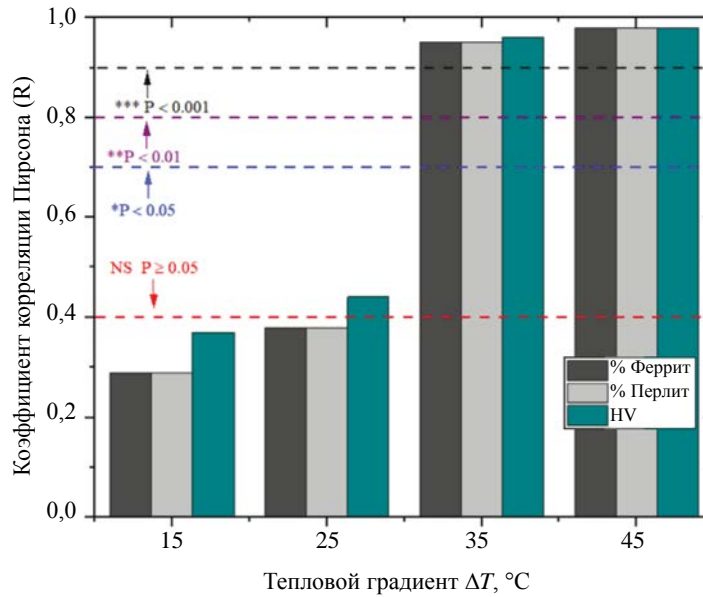


Рис. 10. Изменение коэффициента корреляции Пирсона (R) между твердостью по Виккерсу, % феррита, % перлита и термоЭДС в зависимости от теплового градиента.

образом, было показано, что методика более чувствительна к микроструктурным изменениям и твердости, когда коэффициент Пирсона больше 0,9.

Предыдущие исследовательские работы показали, что термоЭДС чувствительна к изменениям в химическом составе стали [30—35]. Теоретически, закон Гортера—Нордгейма показывает, как изменяется абсолютная термоЭДС Зеебека из-за присутствия различных легирующих элементов, входящих в их состав. Химические, тепловые и термоэлектрические свойства каждого химического элемента в твердом растворе с основным элементом стали (железом) имеют тенденцию к уменьшению общей мощности Зеебека сплава.

Коэффициент Пирсона был использован для демонстрации того, какой сегрегационный элемент можно обнаружить с помощью метода термоЭДС. Рис. 11 показывает, что никель является элемен-

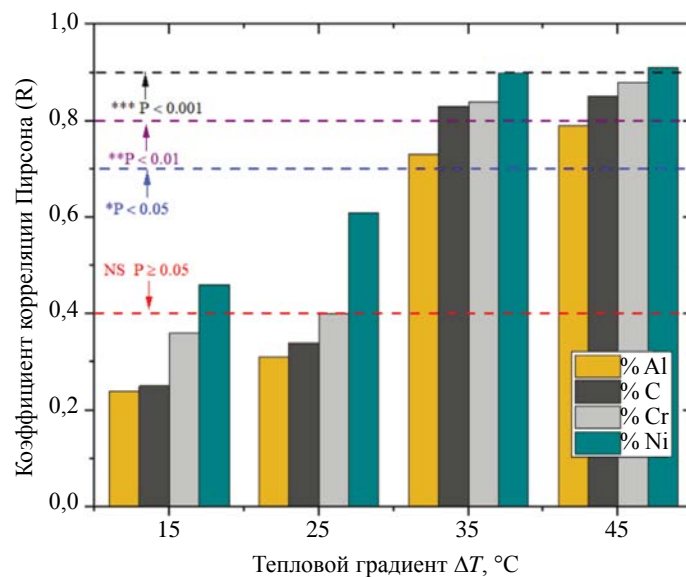


Рис. 11. Изменение коэффициента корреляции Пирсона (R) между % Ni, % Cr, % C, % Al и термоЭДС в зависимости от теплового градиента.

том, который имеет наилучшую корреляцию с коэффициентом Зеебека; с другой стороны, на втором месте хром, который также обнаруживается неразрушающим методом, а углерод и алюминий являются элементами, которые показали более слабую корреляцию. Кроме того, было установлено, что по мере увеличения теплового градиента между наконечниками статистическая корреляция улучшалась, а вместе с ней и чувствительность прибора к обнаружению сегрегации. Для теплового градиента 45 °С выражения статистической корреляции показаны в уравнениях (4) и (5) как инструменты прогнозирования никеля и хрома в зависимости от термоэлектрической мощности.

$$(\% \text{ Ni})_{\Delta T=45^{\circ}\text{C}} = -0,38556(\text{TEP}) + 0,15072, \quad (4)$$

$$(\% \text{ Cr})_{\Delta T=45^{\circ}\text{C}} = -0,0951(\text{TEP}) + 0,0624. \quad (5)$$

4. ЗАКЛЮЧЕНИЯ

1) В результате химического анализа трех участков разреза слитка было установлено, что углерод, никель, хром и алюминий являются элементами, которые имеют тенденцию к сегрегации в центре слитка в процессе затвердевания.

2) Микроструктурный анализ показал, что центральная область сплава Z5 полностью состоит из перлита с более высокой твердостью. В то же время в периферийных областях микроструктура представляет собой смесь перлита и феррита с более низкой твердостью. Таким образом, микроструктурная неоднородность и механические свойства объясняются сегрегацией элементов.

3) В результате измерений с помощью термоэДС было установлено, что коэффициент Зеебека ниже в области Z5 по отношению к периферии. С другой стороны, численная разница в коэффициенте Зеебека в области Z5 по отношению к периферии имеет тенденцию становиться больше по мере увеличения градиента температуры между горячим и холодным наконечниками.

4) Наконец, статистический корреляционный анализ с использованием коэффициента Пирсона показал, что данный неразрушающий метод более чувствителен с целью обнаружения микроструктурных изменений и изменений твердости по мере увеличения теплового градиента. Кроме того, численные результаты показали, что метод термоЭДС наиболее чувствителен к выявлению никеля и хрома.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *de la Concepción V.L., Lorusso H.N., Svoboda H.G.* Effect of Carbon Content on Microstructure and Mechanical Properties of Dual Phase Steels // *Procedia Mater. Sci.* 2015. V. 8. P. 1047—1056.
2. *Abbasi E., Luo Q., Owens D.* A comparison of microstructure and mechanical properties of low-alloy-medium-carbon steels after quench-hardening // *Mater. Sci. Eng. A.* 2018. V. 725. P. 65—75.
3. *Turkmen M.* Effect of Carbon Content on Microstructure and Mechanical Properties of Powder Metallurgy Steels // *Powder Metall. Met. Ceram.* 2016. V. 55. No. 3, 4. P. 164—171.
4. *Mohd Fauzi M.A., Saud S.N., Hamzah E., Mamat M.F., Ming L.J.* In Vitro Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Behaviour of Low, Medium and High Carbon Steel Under Different Heat Treatments // *J. Bio-Tribo-Corrosion.* 2019. V. 5. No. 2.
5. *Guo D., Hou Z., Peng Z., Liu Q., Chang Y., Cao J.* Influence of superheat on macrosegregation in continuously cast steel billet from statistical maximum viewpoint // *ISIJ Int.* 2021. V. 61. No. 3. P. 844—852.
6. *Choudhary S.K., Ganguly S.* Morphology and segregation in continuously cast high carbon steel billets // *ISIJ Int.* 2007. V. 47. No. 12. P. 1759—1766.
7. *Wang W., bing Hou Z., Chang Y., hai Cao J.* Effect of superheat on quality of central equiaxed grain zone of continuously cast bearing steel billet based on two-dimensional segregation ratio // *J. Iron Steel Res. Int.* 2018. V. 25. No. 1. P. 9—18.
8. *Krauss G.* Solidification, Segregation, and Banding in Carbon and Alloy Steels // *Metall. Mater. Trans. B Process Metall. Mater. Process. Sci.* 2003. V. 34. No. 6. P. 781—792.
9. *Flemings M.C.* Our understanding of macrosegregation: Past and present // *ISIJ Int.* 2000. V. 40. No. 9. P. 833—841.
10. *Khan F.A.* The effect of soaking on segregation and primary-carbide dissolution in ingot-cast bearing steel // *Metals (Basel).* 2018. V. 8. No. 10.

11. *Lan P., Tang H., Zhang J.* Solidification Microstructure, Segregation, and Shrinkage of Fe-Mn-C Twinning-Induced Plasticity Steel by Simulation and Experiment // *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.* 2016. V. 47. No. 6. P. 2964—2984.
12. *Ennis B.L., Jimenez-Melero E., Mostert R., Santillana B., Lee P.D.* The role of aluminium in chemical and phase segregation in a TRIP-assisted dual phase steel // *Acta Mater.* 2016. V. 115. P. 132—142.
13. *Ji Y., Li Y., Li S., Zhang X., Zhang J.* Central segregation of high-carbon steel billet and its heredity to the hot-rolled wire rods // *TMS Annu. Meet.* 2016. P. 625—633.
14. *Leuschke U., Puwada N.R., Senk D.* Influence of micro-segregation in Pb-S-alloyed free machining steels on the surface quality of the rolled wire-rod // *Metall. Ital.* 2008. V. 100. No. 5. P. 5—11.
15. *Das S., Mathura J., Bhattacharyya T., Bhattacharyya S.* Metallurgical investigation of different causes of center bursting led to wire breakage during production // *Case Stud. Eng. Fail. Anal.* 2013. V. 1. No. 1. P. 32—36.
16. *Liu L., Sun J., Wang H.* Failure analysis procedure of steel wire drawing fracture // *13th Int. Conf. Fract.* 2013. ICF 2013. V. 2. P. 1641—1647.
17. *Madhuri V., Gobinath R., Balachandran G.* Effect of Carbon on the Microstructure and Mechanical Properties in Wire Rods Used for the Manufacture of Cold Heading Quality Steels // *Trans. Indian Inst. Met.* 2019. V. 72. No. 1. P. 155—166.
18. *Palit P., Das S., Mathur J.* Metallurgical investigation of wire breakage of tyre bead grade // *Case Stud. Eng. Fail. Anal.* 2015. V. 4. P. 83—87.
19. ASTM E-381-01 Standard Method of Macroetch Testing Steel Bars, Billets, Bloom, and Forgings.
20. *Rowe D., Bhandari C.* CRC Handbook of THERMOELECTRICS. 1995.
21. *Lavaire N., Merlin J., Sardoy V.* Study of Ageing in Strained Ultra and Extra Low // *Scr. Mater.* 2001. V. 44. P. 553—559.
22. *Lavaire N., Massardier V., Merlin J.* Quantitative evaluation of the interstitial content (C and/or N) in solid solution in extra-mild steels by thermoelectric power measurements // *Scr. Mater.* 2004. V. 50. No. 1. P. 131—135.
23. *Soldatov A.I., Soldatov A.A., Kostina M.A., Kozhemyak O.A.* Experimental studies of thermoelectric characteristics of plastically deformed steels ST3, 08KP and 12H18N10T // *Key Eng. Mater.* 2016. V. 685. P. 310—314.
24. *Caballero F.G., Capdevila C., Alvarez L.F., Garcia de Andrés C.* Thermoelectric power studies on a martensitic stainless steel // *Scr. Mater.* 2004. V. 50. No. 7. P. 1061—1066.
25. *Benkirat D., Merle P., Borrelly R.* Effects of precipitation on the thermoelectric power of iron-carbon alloys // *Acta Metall.* 1988. V. 36. No. 3. P. 613—620.
26. *Brahmy R.B.A.* Manganese enrichment of cementite and solubility of carbon in low carbon steels investigated by thermoelectric power measurements. 1994.
27. *Perez M., Massardier V., Kleber X.* Thermoelectric power applied to metallurgy: Principle and recent applications // *Int. J. Mater. Res.* 2009. V. 100. No. 10. P. 1461—1465.
28. *MacDonald D.K.C.* Thermoelectricity: An Introduction to Principles. Jhon Wiley, 2006.
29. *Kleber X., De Lyon I.* Surface and Subsurface Metallic Inclusions Detected using Hot Tip Thermoelectric Power Measurements // *ECNDT.* 2006. P. 1—8.
30. *Simonet L., Kleber X., Fouquet F., SAILLET S.* Characterization of Segregated Areas in Ferritic Steels by Thermoelectric Power Measurement // *Eur. Conf. NDE.* 2006. P. 1—9.
31. *Xiao Y., Li W., Zhao H.S., Lu X.W., Jin X.J.* Investigation of carbon segregation during low temperature tempering in a medium carbon steel // *Mater. Charact.* 2016. V. 117. P. 84—90.
32. *Carreón H.* Thermoelectric detection of fretting damage in aerospace materials // *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2014. V. 50. P. 684—692.
33. *Lukhvich A.A., Sharando V.I., Novikov S.A.* Applications of thermoelectric method to studying initial stages of deposition of electrolytic coatings // *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2000. V. 36. P. 465—470.
34. *Abouellail A.A., Chang T., Soldatov A.I.* Laboratory Substantiation of Thermoelectric Method for Monitoring Contact Resistance // *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2022. V. 58. No. 12. P. 1153—1161.
35. *Abouellail A.A., Chang J., Soldatov A.I.* Influence of Destabilizing Factors on Results of Thermoelectric Testing // *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2022. V. 58. No. 7. P. 607—616.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОВИЗОРОВ РАЗЛИЧНОГО ТИПА ПРИ АКТИВНОМ ТЕПЛОВИЗОРНОМ КОНТРОЛЕ РАССЛОЕНИЙ В НЕМЕТАЛЛАХ

© 2023 г. Д.Ю. Кладов¹, А.О. Чулков^{1,*}, В.П. Вавилов¹, В.И. Стасевский¹, В.А. Юркина¹

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия 634050 Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: *chulkovao@tpu.ru

Поступила в редакцию 10.05.2023; после доработки 29.05.2023
Принята к публикации 02.06.2023

Описаны результаты применения тепловизоров шести типов, т.е. обладающих различными техническими характеристиками (с матрицей от 160×120 до 640×512 и чувствительностью от 25 до 110 мК) и различного ценового сегмента, для активного теплового контроля (ТК) расслоений размерами от 5×5 до 45×45 мм, расположенных на глубине 3,1 мм в контрольном образце из полиметилметакрилата. Эффективность ТК определена с участием девяти операторов-термографистов. Продемонстрировано, что приемлемые результаты ТК возможны при использовании тепловизоров и тепловизионных модулей бюджетного сегмента.

Ключевые слова: тепловой контроль, расслоение, тепловизор, дефект, контрольный образец.

DOI: 10.31857/S0130308223070035, **EDN:** DVSICD

ВВЕДЕНИЕ

Активный тепловой неразрушающий контроль (НК) находит все большее применение как за рубежом, так и в России, при испытаниях полимерных композиционных материалов, сотовых структур, теплозащитных покрытий, материалов и изделий, изготовленных методом аддитивных технологий и т.п. объектов современных высокотехнологических отраслей промышленности [1—4]. Преимуществами теплового контроля (ТК) являются его применимость к различным материалам и их комбинациям, бесконтактность, высокая производительность и наглядность представления результатов [5—8]. Односторонний ТК наиболее эффективен для выявления приповерхностных дефектов, в частности, на глубинах, попадающих в «мертвую зону» ультразвукового (у.з.) НК. Предельная глубина обнаружения дефектов зависит от многих факторов и, например, для авиационных композитов достигает 4 мм, хотя дефекты с поперечными размерами 10×10 мм и толщиной от 0,3 мм могут быть выявлены и на больших глубинах, в особенности при использовании современных алгоритмов обработки результатов испытаний. Отдельно следует отметить способ у.з. инфракрасной (ИК) термографии, предусматривающий стимуляцию дефектов мощным ультразвуком. Такой способ позволяет выявлять поверхностные и подповерхностные трещины с микрометровым раскрытием [9, 10].

В связи с появлением на рынке широкой номенклатуры измерительной тепловизионной техники разработчики и пользователи ТК сталкиваются с проблемой оптимального выбора ИК-тепловизоров (или тепловизионных модулей), обеспечивающих выявление требуемых дефектов с учетом технических характеристик и стоимости аппаратуры. В настоящей статье описаны результаты применения шести тепловизоров, обладающих различными техническими характеристиками и входящими в различные ценовые сегменты, для НК расслоений в многослойном образце из полиметилметакрилата (ПММА).

ТЕПЛОВИЗОРЫ

В исследовании использовали 6 тепловизоров, которые можно условно разделить на три уровня: инспекционные Testo 875 и Opgal ThermApp, лабораторные Optris PI450, Optris PI640 и FLIR A325 и исследовательский прибор FLIR SC7700 (см. рис. 1). Инспекционные тепловизоры представляют собой класс бюджетных измерительных приборов ценой 2—3 тысячи долларов США, цены на лабораторные тепловизоры варьируются от 4—20 тысяч долларов США, в то время как цена исследовательских тепловизионных систем может превышать 100 тысяч долларов.

В табл. 1 приведены технические характеристики использованных тепловизоров, которые существенны при их использовании в задачах активного ТК.



Рис. 1. Тепловизоры, использованные в сравнительных испытаниях.

Таблица 1

Технические характеристики тепловизоров

Параметры	Testo 875 [11]	Opgal ThermApp [12]	Optris PI450 [13]	Optris PI640 [14]	FLIR A325 [15]	FLIR SC7700 [16]
Размер матрицы, пикселей	160 × 120	384 × 288	382 × 288	640 × 480	320 × 240	640 × 512
Тип матрицы	Микро- болومتر	Микро- болومتر	Микро- болومتر	Микро- болومتر	Микро- болومتر	Охлаждаемая QWIP
Длина волны, мкм	8 — 14	7,5—14	8 — 14	8 — 14	7,5—13	7,7—9,1
Температурная чувстви- тельность, мК	110	70	40	40	50	25
Погрешность	±2 °С или ±2 %, что больше	±2 °С или ±2 %, что больше	±2 °С или ±2 %, что больше	±2 °С или ±2 %, что больше	±2 °С или ±2 %, что больше	± 1°С или ± 1 %, что больше
Частота кадров, Гц	9	8,7	80	32	60	115
Габаритные размеры, мм	152×108×262	55×65×40	45×45×60	46×56×90	170×70×70	253×130×168
Масса, кг	0,9	0,123	0,237	0,269	0,7	4,950
Ценовой сегмент, тыс. руб.*	140	230	700	950	800	7000

*Ориентировочная цена в апреле 2023 г.

Следует отметить, что тепловизор Testo 875 наименее пригоден для активного ТК, в том числе в качестве составной части тепловых дефектоскопов, что связано с отсутствием возможности пря-

мого сохранения записанных термограмм в память компьютера и, как следствие, невозможностью регистрации последовательностей термограмм с заданным интервалом записи. В настоящем исследовании этот тепловизор был использован в качестве прибора с наихудшим пространственным разрешением (матрицей наименьшего размера). Также следует отметить, что программное обеспечение тепловизора Opgal ThermApp было доработано для обеспечения записи термограмм в память смартфона с заданной частотой с помощью оригинального Android-приложения.

КОНТРОЛЬНЫЙ ОБРАЗЕЦ

Экспериментальные исследования были проведены на контрольном образце, который представлял собой пластину размерами 300×130×8,3 мм (рис. 2) и состоял из четырех слоев ПММА, соединенных двухсторонней клейкой лентой. Образец содержал девять искусственных дефектов в виде расслоений с поперечными размерами от 5×5 до 45×45 мм, толщиной 1 мм, расположенных на глубине 3,1 мм от контролируемой поверхности. Для исключения влияния частичной оптической прозрачности ПММА поверхность образца была окрашена черной матовой краской, что обеспечило коэффициент излучения на уровне около 0,96. При выборе типа материала и размеров дефектов контрольного образца руководствовались близостью теплофизических свойств ПММА к типичным композитам и требованиями к предельным размерам обнаруживаемых расслоений в авиационных материалах (10×10 мм). Глубину дефектов выбрали близкой к порогу обнаружения расслоений в углепластике в процедуре одностороннего ТК (около 4 мм).

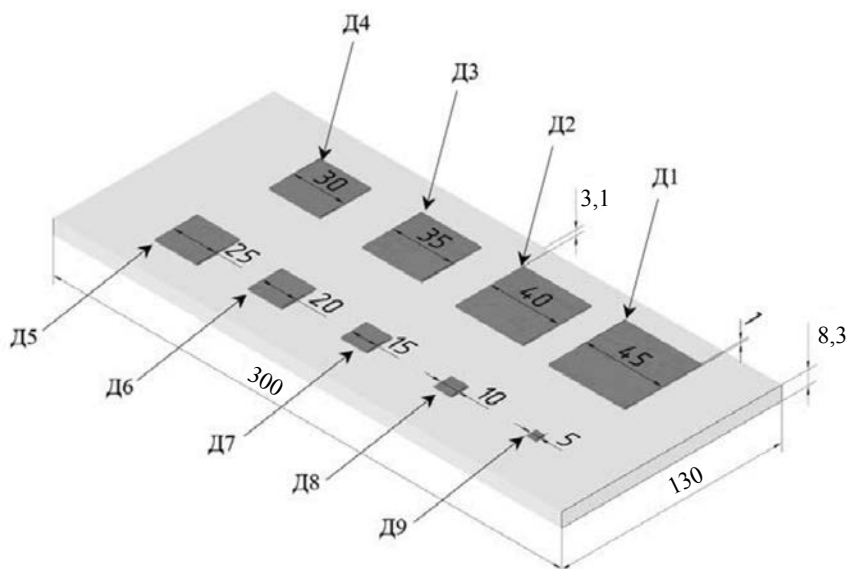


Рис. 2. Схема контрольного образца, состоящего из четырех слоев ПММА, соединенных двухсторонней клейкой лентой, с искусственными дефектами.

В экспериментальных исследованиях контрольный образец нагревали в течение 10 с с использованием двух галогенных ламп общей мощностью 2 кВт, расположенных на фиксированном расстоянии от образца для обеспечения постоянного уровня нагрева. Ввиду различий в объективах, каждый из использованных тепловизоров был установлен на определенном расстоянии от объекта контроля таким образом, чтобы образец полностью входил в поле зрения тепловизора. Резкость теплового изображения в каждом тепловизоре настраивали индивидуально по краю объекта контроля.

Запись и обработку последовательностей термограмм с частотой 1 Гц осуществляли с помощью программы ThermoFit Pro (НИ ТПУ). Для уменьшения количества термограмм, каждая последовательность была усреднена по трем кадрам. При работе с тепловизором ThermApp было использовано доработанное Android-приложение, сохраняющее термограммы в формате, совместимом с программой ThermoFit Pro. В случае тепловизора Testo, не позволяющего производить

потоковую запись термограмм, тепловые изображения записывали непосредственно с экрана тепловизора с помощью видеокамеры при предустановленном диапазоне температур от +25 до +27 °С, что представляло наиболее примитивную процедуру ТК. В обработке данных участвовали первые 100 термограмм каждой последовательности, соответствующих стадии охлаждения контрольного образца.

Выбранная схема одностороннего ТК является типовой с точки зрения расположения средств и объекта контроля, мощности нагрева, а также принятой процедуры обработки данных.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 3 приведены термограммы контрольного образца, полученные с помощью всех использованных тепловизоров на 80-й секунде испытаний, что приблизительно соответствовало опти-

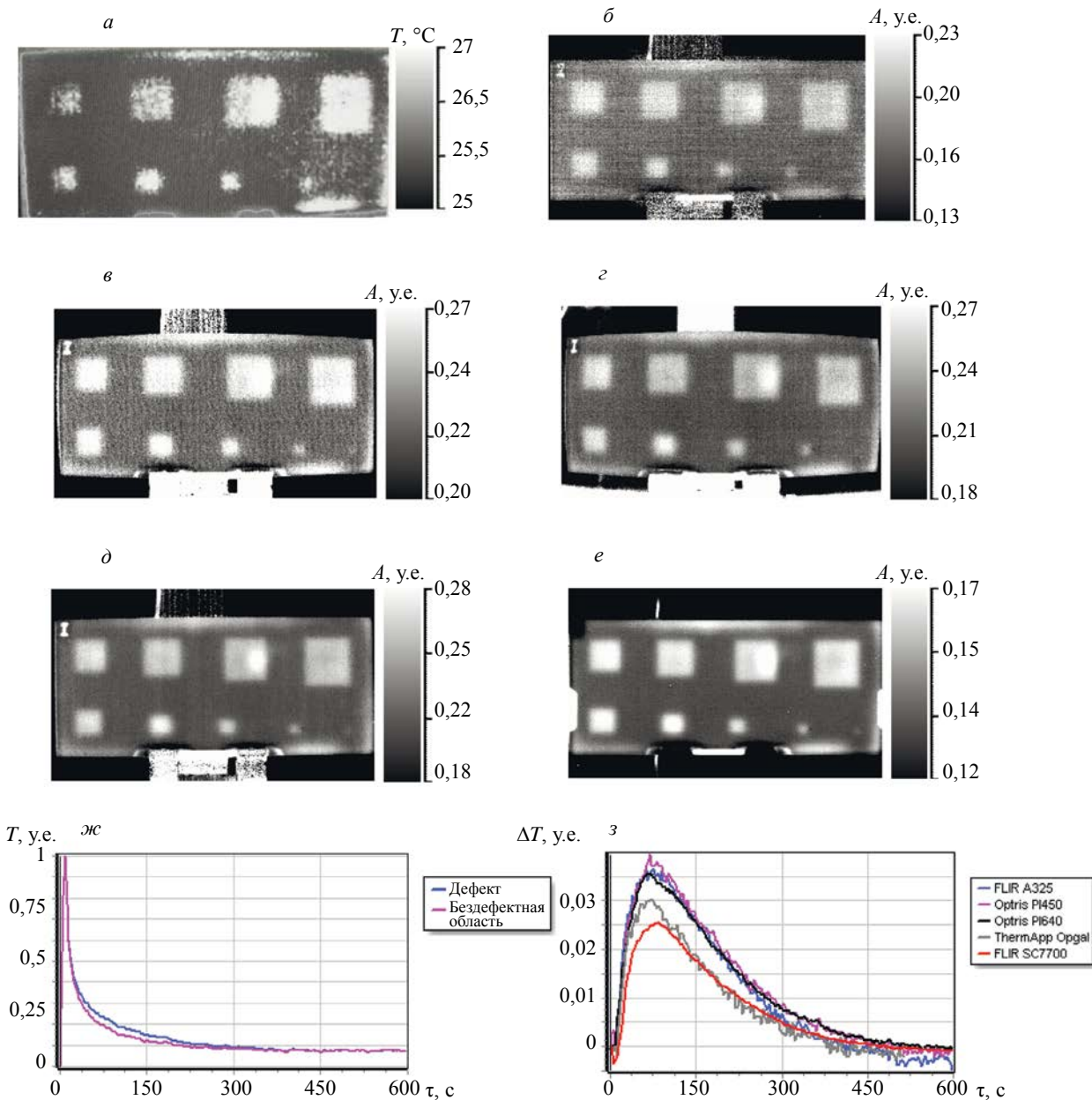


Рис. 3. Результаты ТК контрольного образца:

a — Testo 875; *б* — Opgal ThermApp; *в* — Optris PI450; *г* — Optris PI640; *д* — FLIR A325; *е* — FLIR SC7700; *ж* — профили температуры в дефектной и бездефектной областях (тепловизор FLIR A325); *з* — температурный сигнал от дефекта Д7.

мальному времени наблюдения большинства дефектов на глубине 3,1 мм (см. графики изменения температуры поверхности на рис. 3ж). Ввиду того, что результаты измерений тепловизором FLIR SC7700 были выражены в условных единицах (DL), а последовательности термограмм, полученные остальными тепловизорами, содержали температурные значения, все термограммы были нормированы по амплитуде в диапазоне от 0 до 1 (за исключением термограммы, полученной с помощью тепловизора Testo 875). Температурный диапазон приведенных ниже термограмм для 80-й секунды контроля был подобран индивидуально, чтобы обеспечить визуальное распознавание наибольшего количества дефектов.

Результаты на рис. 3а—е демонстрируют, что большинство дефектов образца уверенно идентифицируются, причем в случае тепловизоров Testo 875, Opgal ThermApp и Optris PI450 это происходит на фоне заметного одинопиксельного шума, а наименее зашумленной является термограмма, полученная с помощью прибора FLIR SC7700, который обладает наилучшей температурной чувствительностью. Фактически, все тепловизоры обеспечили выявление восьми дефектов. Дефект Д9 (нижний ряд справа) размером 5×5 мм лучше всего выявлялся с помощью тепловизора FLIR SC7700, а слабые отметки этого дефекта также наблюдались с помощью обоих приборов Optris и тепловизора FLIR A325. Рис. 3з показывает изменение дифференциальных температурных сигналов ΔT над дефектом Д7 для использованных тепловизоров (кроме тепловизора Testo 875). Максимумы сигналов, имеющие место приблизительно при 80 с, соответствуют оптимальному времени наблюдения. Подтверждено, что наименее зашумленный результат контроля был получен с помощью тепловизора FLIR SC7700 (кривая красного цвета).

На рис. 4 приведены результаты обработки исходных последовательностей термограмм с использованием метода анализа главных компонент (кроме тепловизора Testo 875). В обработке участвовали первые 100 термограмм каждой последовательности, причем наилучшие результаты

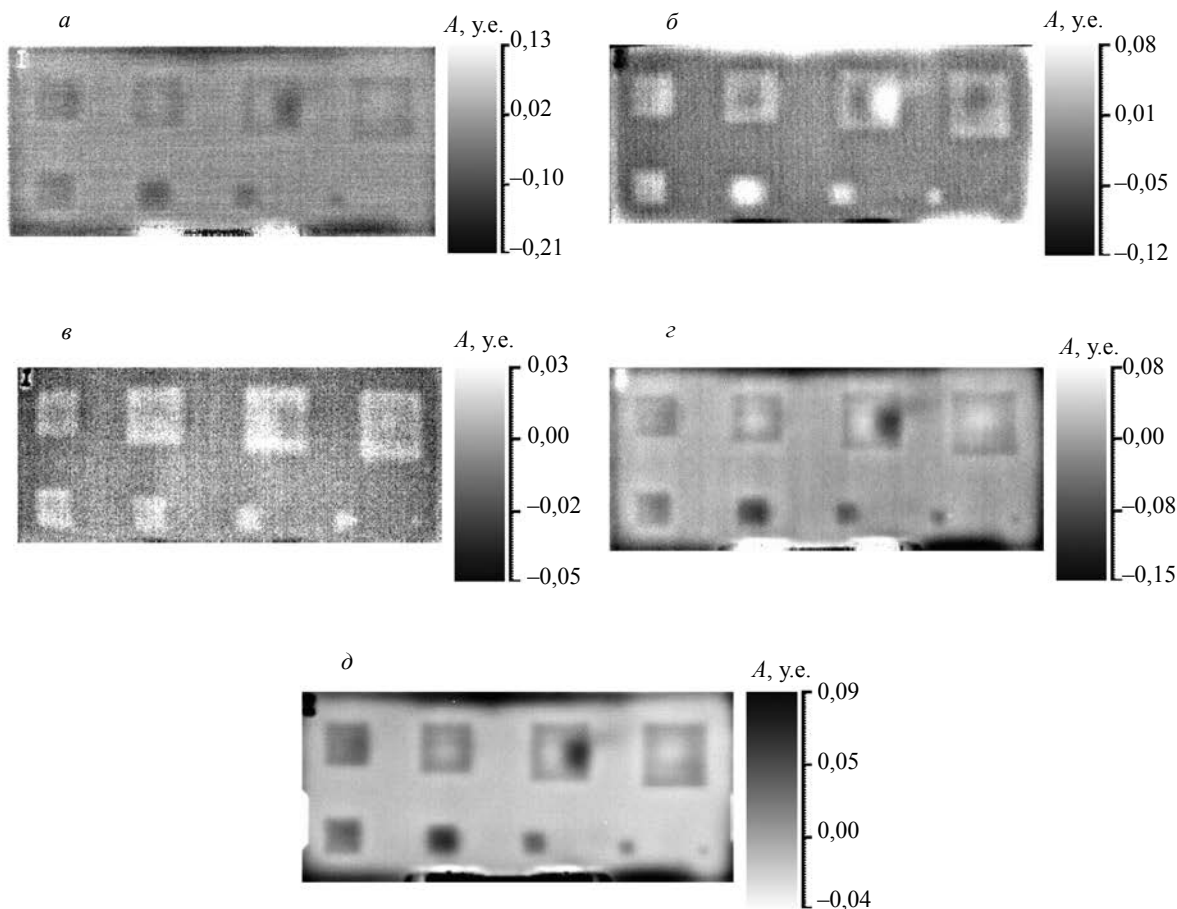


Рис. 4. Результаты обработки результатов ТК контрольного образца с помощью метода анализа главных компонент: а — Opgal ThermApp (2-я компонента); б — Optris PI450 (2-я компонента); в — Optris PI640 (3-я компонента); з — FLIR A325 (2-я компонента); д — FLIR SC7700 (3-я компонента).

были получены в изображениях 2-й и 3-й главных компонент. Статистический метод анализа главных компонент, введенный в ТК N. Rajic [17], реализован в виде опции вышеупомянутой программы ThermoFit Pro и предназначен для выделения наиболее существенных особенностей термограмм. Фактически, в результате применения данного метода последовательность любой длины заменяют набором из 3-5 изображений главных компонент, содержащих картину неравномерного нагрева, а также дефектные отметки.

Обработка данных методом анализа главных компонент улучшила визуальное распознавание дефектов (см. рис. 4). Например, дефект Д9 уверенно распознавался на термограммах, полученных с помощью тепловизоров FLIR A325 и FLIR SC7700. Данный вид обработки также улучшил результаты, полученные на обоих тепловизорах Optiris. В частности, дефект Д9 при определенном опыте оператора, а также благодаря регулярности расположения дефектов, визуально распознавался при использовании обеих ИК камер PI450 и PI640. Границы дефектов на изображении 3-й главной компоненты (тепловизор PI640) являются более резкими по сравнению с изображениями на тепловизоре PI450 благодаря ИК матрице большего размера.

Кроме визуальной оценки дефектов было проведено сравнение величин отношения сигнал/шум (*SNR*) для дефекта Д7 с поперечными размерами 15×15 мм (за исключением прибора Testo 875) (см. табл. 2).

Таблица 2

Величины отношения сигнал/шум для дефекта Д7

Отношение сигнал/шум (<i>SNR</i>)				
Opgal ThermApp	Optiris PI450	Optiris PI640	FLIR A325	FLIR SC7700
3,6	5,3	6,7	14,2	16,2

Из табл. 2 видно, что величины *SNR* возрастают в соответствии с улучшением технических характеристик (ростом цены) тепловизоров. Например, в случае тепловизора FLIR SC7700 величина *SNR* более чем в четыре раза превышает *SNR* для тепловизора Opgal ThermApp. В свою очередь, тепловизоры Optiris PI450 и PI640 обеспечивают *SNR* в 3 раза ниже, чем в случае тепловизоров FLIR A325 и FLIR SC7700. Данный факт связан с тем, что, по определению, величины *SNR* существенно определяются однопиксельным шумом, который, в свою очередь, связан с температурным разрешением тепловизора. В то же время этот фактор может быть несущественным при выявлении дефектных зон, включающих большое количество пикселей.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ

Количественная оценка качества визуального распознавания дефектов была выполнена девятью операторами-термографистами, которым были предъявлены термограммы рис. 3а—е и 4а—д. Операторы визуально оценивали количество обнаруживаемых дефектов на основе априорных сведений о структуре контрольного образца (см. табл. 3). Такой подход позволил исключить из анализа обнаруженные операторами естественные дефекты контрольного образца (расслоения по периметру изделия). Иными словами, оценивали эффективность обнаружения известных искусственных дефектов в контрольном образце.

Как следует из табл. 3, при анализе исходных ИК-термограмм (рис. 3) все лабораторные и исследовательский тепловизоры продемонстрировали среднее количество выявленных дефектов более 8, в то время как для инспекционных тепловизоров Testo 875 и ThermApp среднее число идентифицированных дефектов составило соответственно 7,8 и 7,9. После применения алгоритмов обработки данных среднее количество выявленных дефектов с использованием инспекционного тепловизора ThermApp достигло 8. В целом, среднее количество дефектов, выявленных с помощью лабораторных и исследовательских тепловизоров, распределилось в соответствии с их техническими характеристиками (стоимостью).

Таблица 3

Эффективность выявления искусственных дефектов в контрольном образце операторами-термографистами

Номер рисунка — модель тепловизора	Оператор									Среднее количество выявленных дефектов
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Термограммы рис. 3										
<i>a</i> — Testo 875	8	8	8	7	8	8	7	8	8	7,8
<i>б</i> — ThermApp	8	8	8	8	8	8	7	8	8	7,9
<i>в</i> — PI450	8	8	9	8	8	8	8	9	9	8,3
<i>г</i> — PI640	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
<i>д</i> — A325	8	8	9	8	8	8	8	9	9	8,3
<i>e</i> — SC7700	9	8	9	8	8	8	8	9	9	8,4
Термограммы рис. 4										
<i>a</i> — ThermApp	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
<i>б</i> — PI450	8	8	8	8	9	8	8	9	9	8,3
<i>в</i> — PI640	9	9	9	8	9	8	7	9	9	8,6
<i>г</i> — A325	8	9	9	9	9	9	7	9	9	8,7
<i>д</i> — SC7700	8	9	9	9	9	9	8	9	9	8,8

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В предположении, что задачи ТК дефектов в композиционных материалах с поперечными размерами 5—10 мм на глубинах до нескольких миллиметров существенно отличаются от задач научных исследований, где требуется максимально высокое температурное и пространственное разрешение, был выполнен анализ эффективности тепловизоров различного технического уровня и, соответственно, различного ценового сегмента. Девять операторов-термографистов анализировали результаты ТК контрольного образца из ПММА с девятью хорошо воспроизводимыми дефектами различного размера. Установлено, что технические характеристики тепловизора определяют визуальное восприятие термограмм, в частности, связанное с наличием однопиксельного шума, однако мало сказываются на эффективности обнаружения дефектов. Фактически, все тепловизоры обеспечили обнаружение восьми из девяти дефектов контрольного образца, причем не был выявлен дефект размером 5×5 мм (все дефекты были расположены на глубине 3,1 мм и имели толщину 1 мм). Обработка результатов контроля с помощью известных алгоритмов, например, метода анализа главных компонент и преобразования Фурье, улучшает визуальное восприятие термограмм и в ряде случаев улучшает выявляемость дефектов. В целом, приемлемые результаты ТК возможны при использовании тепловизоров и тепловизионных модулей бюджетного сегмента. Будущие исследования предполагают распространить анализ эффективности применения тепловизионных систем различного уровня для ТК дефектов, соответствующих пределу обнаружения по размерам, толщине и глубине залегания.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРА

1. Zhang Z., Richardson M., Nondestructive Testing of Composite Materials // Handbook of Multiphase Polymer Systems. 2011. V. 1. P. 777—796.
2. Chulkov A.O., Vavilov V.P., Kladov D.Yu., Yurkin V.A. Thermal nondestructive testing of composite and metal parts manufactured by additive technologies // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2022. V. 58. No. 11. P. 1035—1040.
3. Georges M., Srajbr C., Menner P., Koch J., Dillenz A. Thermography and Shearography Inspection of Composite Hybrid Sandwich Structure Made of CFRP and GFRP Core and Titanium Skins // Multidisciplinary Digital Publ. Instit. Proc. 2018. V. 2. No. 8. P. 484. <https://doi.org/10.3390/ICEM18-05384>

4. *Shrestha R., Choi M., Kim W.* Thermographic inspection of water ingress in composite honeycomb sandwich structure: a quantitative comparison among Lock-in thermography algorithms // *Quantitative InfraRed Thermography Journal*. 2019. V. 18. No. 2. P. 1—16.
5. *Chulkov A.O., Tuschl C., Nesteruk D.A., Oswald-Tranta B., Vavilov V.P., Kuimova M.V.* The Detection and Characterization of Defects in Metal / Non-metal Sandwich Structures by Thermal NDT, and a Comparison of Areal Heating and Scanned Linear Heating by Optical and Inductive Methods // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2021. V. 40. No. 2. P. 44. DOI: 10.1007/s10921-021-00772-y
6. *Yi Q., Tian G.Y., Malekmohammadi H., Zhu J., Laureti S., Ricci M.* New features for delamination depth evaluation in carbon fiber reinforced plastic materials using eddy current pulse-compression thermography // *NDT&E Int.* 2019. V. 102. P. 264—273.
7. *Zalameda J.N., Winfree W.* Passive thermography measurement of damage depth during composites load testing // *Frontiers in Mech. Eng. Apr.* 2021. V. 7. P. 651149. DOI:10.3389/fmech.2021.651149
8. *Vesala G.T., Гали В.С., Виджая Лакими А., Найк Р.Б.* Сочетание вручную постоенных признаков и признаков глубоких сетей для автоматического обнаружения дефектов в процессе визуализации квадратичной частотно-модулированной тепловой волны // *Дефектоскопия*. 2021. № 6. С. 46—56.
9. *Дубинский С.В., Казьмин Е.А., Ковалев И.Е., Корнилов А.Б., Корнилов Г.А., Костенко В.М., Чернявский А.А.* Развитие вибротермографии как метода неразрушающего контроля изделий из полимерных конструкционных материалов с использованием принудительных механических вибраций // *Дефектоскопия*. 2021. № 6. С. 35—45.
10. *Xiaoyan Han, Jianping Liu, Islam Md.S.* Sonic infrared imaging NDE. *Proceedings of SPIE // The International Society for Optical Engineering*. May 2005. V. 5765. P. 142—147. DOI:10.1117/12.600118
11. Представительство компании Testo в России, ООО ГК «ИМПЕРИЯ ИНСТРУМЕНТА»: официальный сайт. URL: <https://testoshop.ru/professionalnyj-teplovizor-s-superresolution-testo-875-1i> (дата обращения: 05.05.2023). Текст: электронный.
12. Thermal cameras for android & linux/Opgal Optronic Industries Ltd. Текст: электронный // Opgal Optronic Industries Ltd. официальный сайт URL: <https://www.opgal.com/wp-content/uploads/2016/04/Therm-App-Brochure-2021.pdf> (дата обращения: 05.05.2023).
13. Optris PI 450i — технические характеристики. Текст: электронный // Optris GmbH Официальный сайт. URL: https://www.optris.global/downloads-infrared-cameras?file=tl_files/pdf/Downloads/Infrared%20Cameras/Datasheet%20optris%20PI%20450i.pdf (дата обращения: 05.05.2023).
14. Optris PI 640i — технические характеристики. Текст: электронный // Optris GmbH Официальный сайт. URL: https://www.optris.global/thermal-imager-optris-pi-640?file=tl_files/pdf/Downloads/Infrared%20Cameras/Datasheet%20optris%20PI%20640i.pdf (дата обращения: 05.05.2023).
15. FLIR A325 — технические характеристики. Текст: электронный // Официальный сайт Flir systems. URL: http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/RND_010/RND_010_US.pdf (дата обращения: 05.05.2023).
16. FLIR SC7000 Series — технические характеристики/ Текст: электронный // Официальный сайт Flir systems. URL: http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/RND_017/RND_017_US.pdf (дата обращения: 05.05.2023).
17. *Rajic N.* Principal Component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterization in composite structures // *Composite Structures*. Dec. 2002. V. 58. No. 4. P. 521—528. DOI:10.1016/S0263-8223(02)00161-7

КОНТРОЛЬ ВНЕШНЕГО ВИДА ТОРЦОВ ТОПЛИВНЫХ ТАБЛЕТОК В УСЛОВИЯХ КОНВЕЙЕРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

© 2023 г. Е.В. Власов^{1,*}, А.В. Белобородов¹, П.С. Завьялов¹, Д.Г. Сырецкий²

¹Конструкторско-технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения РАН, Россия 630058 Новосибирск, ул. Русская, 41

²ПАО «Новосибирский завод химконцентратов», Россия 630110 Новосибирск, ул. Б. Хмельницкого, 94
E-mail: *vlasov@tdisie.nsc.ru

Поступила в редакцию 15.05.2023; после доработки 14.06.2023
Принята к публикации 16.06.2023

Рассматривается проблема контроля качества топливных таблеток для атомных реакторов. В процессе разработки системы контроля исследовались разные способы получения и обработки изображений поверхностей таблеток. Основной сложностью данной задачи является неидеальное качество получаемого изображения осматриваемого объекта, а также ограниченное время на его обработку. Для высокопроизводительного контроля геометрии топливных таблеток разработаны программно-аппаратные средства и алгоритмы, позволяющие существенно повысить достоверность результатов контроля. В результате работы получены стабильные, с высокой степенью повторяемости и с достаточным разрешением изображения, пригодные для последующей высокопроизводительной достоверной математической обработки. Достигнута высокая степень независимости изображения и результатов обработки от индивидуальных особенностей отдельных изделий и их партий.

Ключевые слова: система технического зрения, топливная таблетка, дефекты, обработка изображений.

DOI: 10.31857/S0130308223070047, **EDN:** DVZFNH

ВВЕДЕНИЕ

Топливные таблетки из UO_2 являются одной из основных частей тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) атомных реакторов. К качеству таблеток предъявляются жесткие требования. В число критериев качества входит внешний вид согласно атласу допустимых отклонений внешнего вида таблеток. На поверхности таблеток, имеющих цилиндрическую форму, в процессе изготовления могут возникать различные дефекты, такие как сколы, поры, трещины и др. [1]. В настоящее время на предприятиях атомной промышленности внедрены и модернизируются системы, решающие задачу автоматизации разбраковки таблеток по внешнему виду [2—4]. Авторами в ряде работ предложено использовать оптикоэлектронные методы систем технического зрения и математический аппарат обработки изображений [5, 6]. В процессе решения задачи автоматической разбраковки по внешнему виду исследованы методы получения изображений торцевых поверхностей таблеток, создана база данных с изображениями годных и дефектных таблеток, разработаны алгоритмы обработки оптической информации. Полученная вероятность обнаружения дефектных таблеток составляет 0,95 при скорости контроля 6 табл/с.

ПОЛУЧЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ТОРЦЕВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТАБЛЕТОК

Топливная таблетка представляет собой цилиндрическое изделие высотой 9—12 мм с центральным отверстием диаметром около 1,3 мм и наружным диаметром примерно 7,6 мм. Так как при производстве таблетки перемещаются в непрерывном потоке, необходимо использование дополнительных средств для получения доступа для осмотра поверхностей. На рис. 1 представлена схема, обеспечивающая возможность получения изображения обоих торцов таблетки.

Рабочая скорость конвейера выбирается такой, чтобы время прохождения таблетки между оптическими датчиками не превышало периода подачи таблеток. При этом необходимо формировать достаточный отрыв одной таблетки от другой, чтобы обеспечить видимость торцов при съемке, а также исключить возможность присутствия в зоне контроля между оптопарами (датчиками запуска видеокамер в оптико-электронных блоках) в каждый момент времени более одной таблетки. Максимальная скорость конвейера ограничена условием отсутствия отрыва таблетки от ленты на шкиве в точке перехода от горизонтального движения к движению по наклонной части конвейера, а также тем фактом, что при слишком высоких скоростях конвейера движение таблеток на нем может стать нестабильным: таблетки могут начать беспорядочно смещаться из стороны в сторону, подсакиваться, переворачиваться.

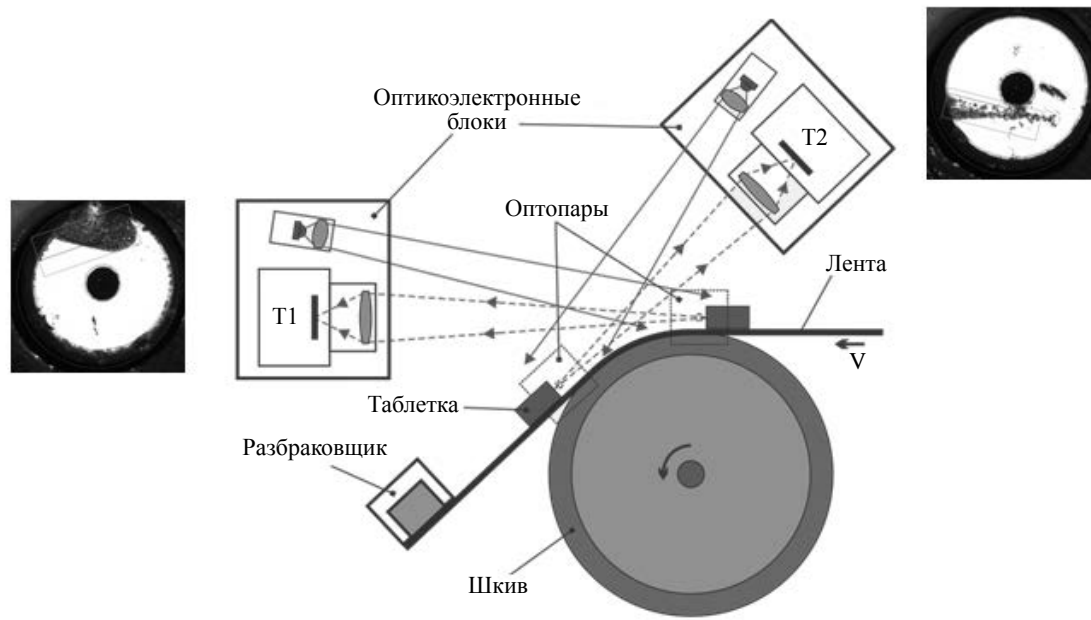


Рис. 1. Схема получения изображений обеих торцевых поверхностей таблеток, оптоэлектронные блоки состоят из пары камера—осветитель (производительность — 6 изд/с, разрешение изображения 18 мкм/пиксел).

При прохождении переднего торца таблетки через датчик первой оптопары автоматически запускается камера T1, затем происходит съемка переднего торца. В момент съемки осветитель освещает поверхность торца, камера фиксирует отраженный свет. Бездефектная поверхность таблетки при этом работает как зеркало, давая яркий отраженный свет, дефекты же рассеивают свет в стороны, давая на изображении темные области. Зеркальные свойства торцов таблеток обусловлены технологией производства (прессование мелкодисперсного порошка).

Принцип получения изображения, основанный на базовом законе геометрической оптики, дает однозначно интерпретируемое изображение плоской части торца. Однако фаска на получаемых изображениях оказывается плохо освещенной, и однозначно судить о наличии дефектов на ней не представляется возможным. Как следствие, изображение фаски не обрабатывается. Однако любые дефекты, помещающиеся на фаске и не выходящие на плоскую часть торца, автоматически оказываются в допуске, так как их размеры не превышают размеров дефектов по условиям отбраковки. Площадь же тех частей дефектов, которые выходят с плоской части торца на фаску, вычисляется косвенным путем с некоторым завышением, что может привести к небольшой перебраковке, но не к пропуску дефектного изделия в годные.

Снятый кадр (8-битное изображение в градациях серого) немедленно передается в компьютер для обработки (время обработки составляет приблизительно 10—40 мс), а камера T1 подготавливается к съемке переднего торца следующей таблетки. Изображение обрабатывается компьютером, видимые дефекты выделяются и классифицируются, после чего Система принимает решение «Годно/Брак» для переднего торца по заданным критериям бракования. В момент прохождения заднего торца таблетки через датчик второй оптопары автоматически запускается вторая камера T2 и происходит съемка заднего торца. Снятый кадр немедленно передается в компьютер для обработки, а камера подготавливается к съемке заднего торца следующей таблетки. Кадр T2 обрабатывается только в том случае, если на кадре T1 не был выявлен брак. После обработки кадра (если она требуется) с камеры T2 производится оценка качества обоих торцов таблетки и принимается решение о разбраковке. Если хотя бы на одном из торцов выявлен брак, включается разбраковщик. Разбраковщик работает либо в течение заданного интервала времени (примерно 100 мс), либо до появления следующего обработанного кадра T2; если по результату обработки очередной таблетки выявлен брак, работа разбраковщика продлевается на очередной интервал, иначе прекращается. Для исключения потери синхронизации между прохождением таблеток и обработкой изображений, управляющая программа учитывает возможность несрабатывания датчиков и/или камер и ошибок/

таймаутов обработки изображений. В случае одиночных сбоев производится очистка конвейера «длинным» (200 мс) включением разбраковщика, в случае нескольких сбоев подряд Система аварийно останавливается.

Успешная реализация любой системы технического зрения в определяющей степени зависит от качества получаемого изображения осматриваемого объекта. В процессе разработки системы контроля таблеток как на имитаторах, так и на реальных изделиях, исследовались разные способы получения изображений поверхностей таблеток. Конечной целью исследований являлось получение стабильных, с высокой степенью повторяемости и с достаточным разрешением изображений, пригодных для последующей высокопроизводительной достоверной математической обработки, достижение максимальной степени независимости изображения и результатов обработки от индивидуальных особенностей отдельных изделий и их партий. Как показывают данные, полученные в ходе опытной эксплуатации, отражающие свойства торца существенно зависят от таких факторов, как запыление, побежалость и т.п., что необходимо учитывать при обработке.

ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ

К обработке изображений с целью выделения дефектов внешнего вида торцов предъявляются определенные требования, а именно:

- время обработки достаточно мало. Расчетный период подачи изделий составляет примерно 160 мс (6 шт/с), однако реальное время обработки желательно иметь примерно в два раза короче (80 мс), чтобы избежать сложных схем синхронизации, а также иметь запас по производительности на случай флуктуаций периода подачи, пиков загрузки вычислительных ресурсов и т.п.;

- обработка должна использовать предсказуемый объем вычислительных ресурсов, чтобы не вступать в конфликт с другими процессами реального времени, такими как съемка и обработка изображений других поверхностей, управление Системой в целом и т.п. Самым простым способом выполнения этого требования является однопоточная обработка средствами CPU без задействования разделяемых внешних ресурсов вроде разного рода ускорителей. Единственным существенным разделяемым ресурсом при таком подходе остается лишь память (или даже кэш многоядерного процессора). Реализация программы только на CPU также упрощает как модификацию программного обеспечения, например, дополнительную обработку особенностей новых типов изделий, так и перенос программы на другое оборудование;

- разбраковка изделий производится по численным критериям, что означает выполнение определенных метрологических требований. По этой причине обработка в виде «черного ящика», выдающего только заключение «годно/брак» без численного обоснования, неприемлема.

Обработка — многостадийный процесс, этапы которого разрабатывались на изображениях, собранных первоначально в лабораторных условиях (в статике) на ограниченном количестве материала, а затем в процессе эксплуатации (в динамике) на гораздо больших объемах материала. Основное отличие «эксплуатационных» изображений от лабораторных заключается в том, что, несмотря на все усилия по стабилизации движения таблеток, не удается достигнуть идеального расчетного наклона плоскости торца (вернее, отсутствия такого наклона). В движении плоскость торца может несколько отклониться, в результате чего вместо зеркально отраженного света регистрируется рассеянный свет. Это приводит к тому, что штатный яркий блик от бездефектной плоской части торца превращается в серый круг, и контраст между бездефектной и дефектной поверхностью резко снижается, что затрудняет поиск дефектов.

Далее описываются стадии обработки.

Инициализация

В процессе инициализации обработчик получает:

- параметры входного изображения: размеры кадра, разрешение изображения (мм/пиксел), номинальное (ожидаемое) положение центра таблетки в кадре и радиус области интереса (Region Of Interest — ROI);

- параметры изделия: номинальный внешний радиус таблетки и радиус центрального отверстия (ЦО), минимально и максимально допустимые радиусы плоской части торца;

- пороги обнаружения дефектов: порог заметности дефекта в поперечнике или по площади, порог контакта дефекта с фаской (в процентах от длины окружности таблетки);

- пороги бракования: допустимая площадь отдельного дефекта (мм^2), допустимое общее число заметных дефектов.

На основании параметров выделяются буфера под исходное и финальное (опционально) изображения, а также формируются маски: круга поиска торца, маска секторов и т.п.

Обработка

Для иллюстрации приводятся стадии обработки двух изображений: «штатного» и характерного случая отклонения плоскости торца. На рис. 2 приведены примеры полученных изображений: рис. 2а — штатное изображение, бездефектная плоская часть торца отражает свет зеркально, а дефекты свет рассеивают и контрастно выражены; рис. 2б — плоскость торца имеет наклон, в результате чего вместо зеркально отраженного света зарегистрирован рассеянный свет, контраст между бездефектной и дефектной поверхностью резко снижен.

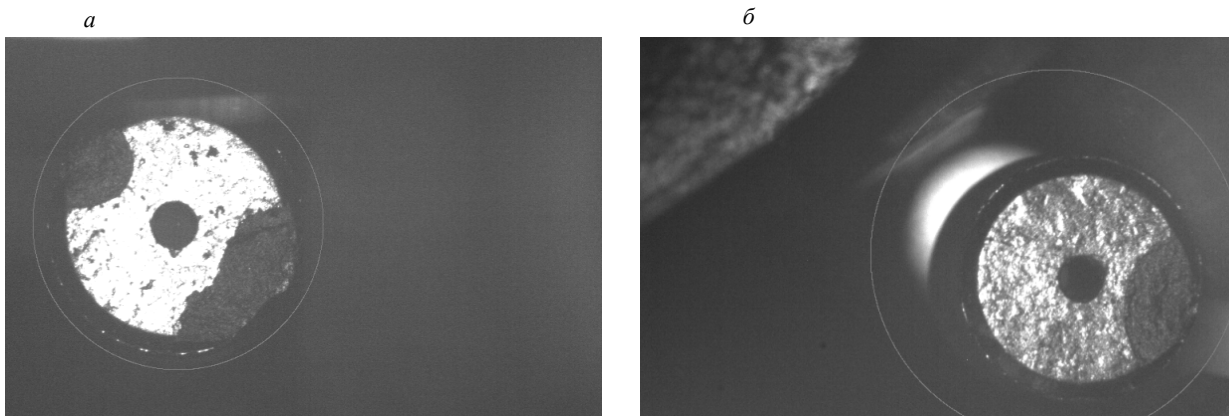


Рис. 2. Примеры полученных изображений торцов таблеток с дефектами: «штатное» (а); наклоненное (б).

Преобработка

На данном этапе происходит формирование редуцированного по размерам изображения по данным в пределах квадрата, обрамляющего круг ROI. Редуцирование проводится для снижения объема обрабатываемых данных в том случае, если разрешение исходного изображения является избыточным. В нашей системе используется изображение, сокращенное по линейным размерам в 3 раза (берутся центральные точки квадратов 3×3) и обработанное быстрым медианным фильтром, описанным в [7]. В дальнейшем в качестве исходной картины используется именно это отфильтрованное изображение (рис. 3); обозначим его как [I].

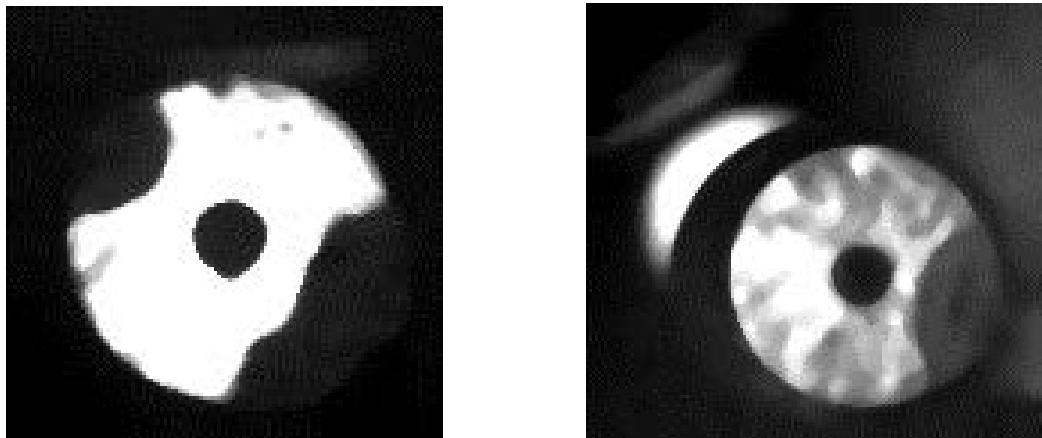


Рис. 3. Редуцированное изображение с примененной медианной фильтрацией.

Выделение темных участков

На этом этапе с помощью бинаризации исходного изображения [I] по Сауволе [8] и последующего морфологического размыкания выделяются темные места — потенциальные дефекты или их участки. Алгоритм бинаризации выделяет темные пятна на переменном светлом фоне (в оригинале он используется для выделения букв на сканированных изображениях печатных текстов). Результат — изображение [S] — приведен на рис. 4. На нем более темные места выделяются либо полностью, если размер области сравним с размерами окна анализа, либо частично, в основном на их границах. Для эффективного счета средних и среднеквадратичных отклонений в бегущем окне, необходимых в методе Сауволы, а также морфологических операций над бинаризованными изображениями используется техника интегральных изображений [9].

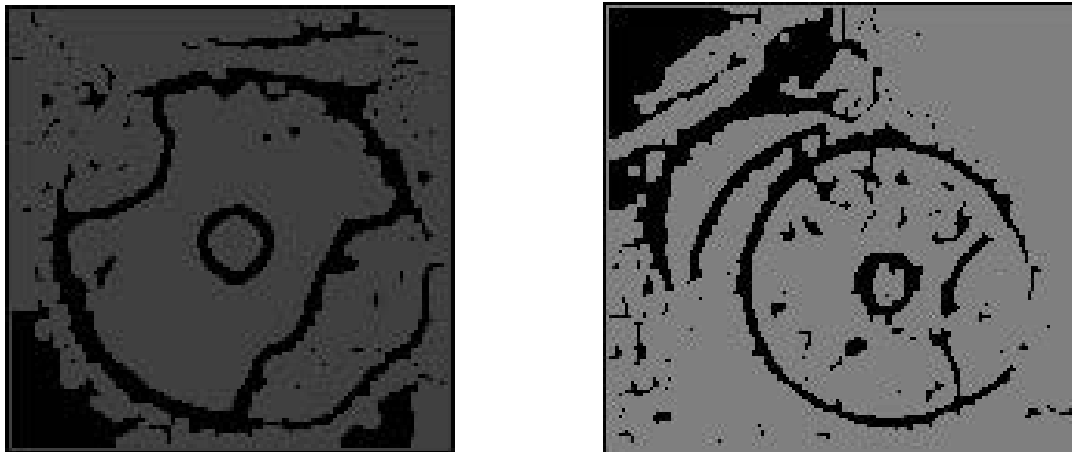


Рис. 4. Бинаризованные изображения.

Поиск границ плоской части торца и центрального отверстия

Для поиска границ плоской части торца и центрального отверстия проводятся расчеты средней яркости в пределах ROI по [I], а также максимума абсолютных значений градиентов во всех точках ROI $\max(|G_x|, |G_y|)$. Исключаются точки, где при счете градиентов попадают данные с пересветом (255), т.е. «истинный» градиент рассчитать невозможно. Результирующее изображение [G] представлено на рис. 5.

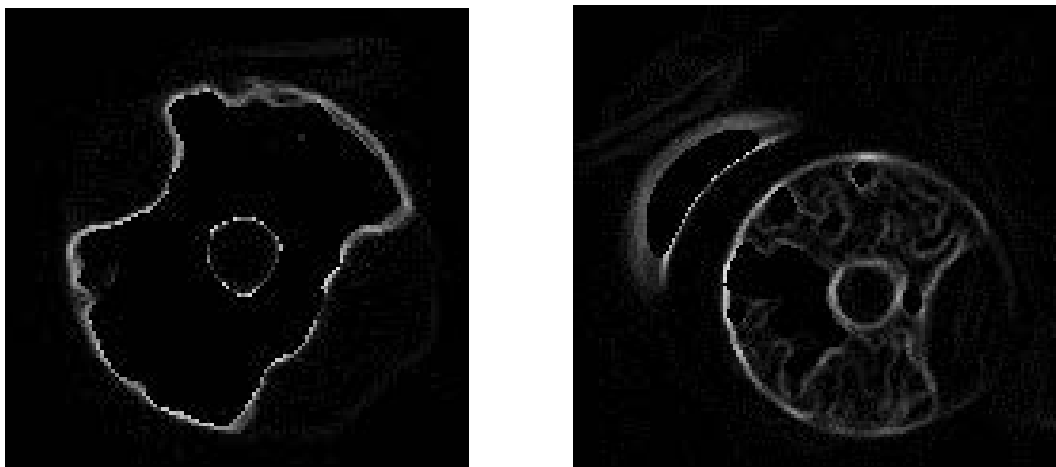


Рис. 5. Изображения найденных границ торца и центрального отверстия.



Рис. 6. Подчеркивание границ для тусклого изображения.

Для тусклых картинок (со средней яркостью ROI меньше 60 % шкалы, т.е. 150) предварительно делается подчеркивание границ: рассчитываются по методу Оцу пороги бинаризации градиентов отдельно по четырем квадрантам $[G]$ относительно номинального центра ROI. Разделение по квадрантам, хотя и грубое, но оказывающееся достаточным по результатам тестирования на большой выборке изображений разного качества, делается для учета возможных вариаций контраста в разных частях изображения. По вычисленным порогам проводится бинаризация изображения $[G]$. В ненулевые точки вносится значение, равное: средней яркости ROI для совсем тусклых картинок (со средней яркостью менее 50% шкалы, т.е. 128) и половине средней яркости для более ярких. Результат — изображение $[G4]$ — приведен на рис. 6.

Далее для тусклых изображений таблеток проводится суммирование (с насыщением) исходного изображения $[I]$ с выделенными границами $[G4]=[I]+[G4]$. Для ярких картинок подчеркивание границ, как указывалось выше, не делается ($[G4]=[I]$). Примеры для обоих случаев полученного результирующего изображения приведены на рис. 7.

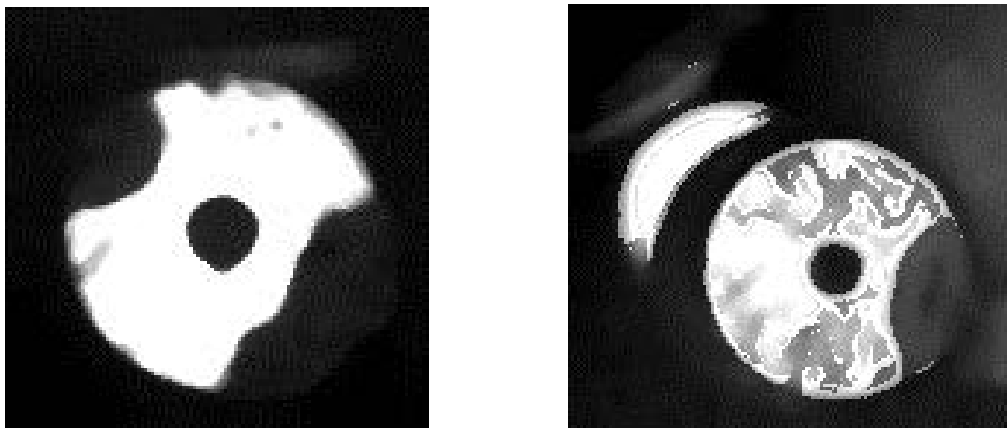


Рис. 7. Выполненное суммирование изображений $[I]$ и $[G4]$.

Выделение границ торца таблетки и центрального отверстия

Эта процедура осуществляется на подготовленном изображении $[G4]$. Сначала вычисляется градиент, затем производится бинаризация градиента по четвертям относительно номинального центра, как описано выше. Затем применяется размыкание, которое включает эрозию для удаления мелких деталей и дилатацию для восстановления размеров. В результате получается бинарная карта, содержащая темные и яркие области $[M]$. Для удобства использования одной подпрограммы

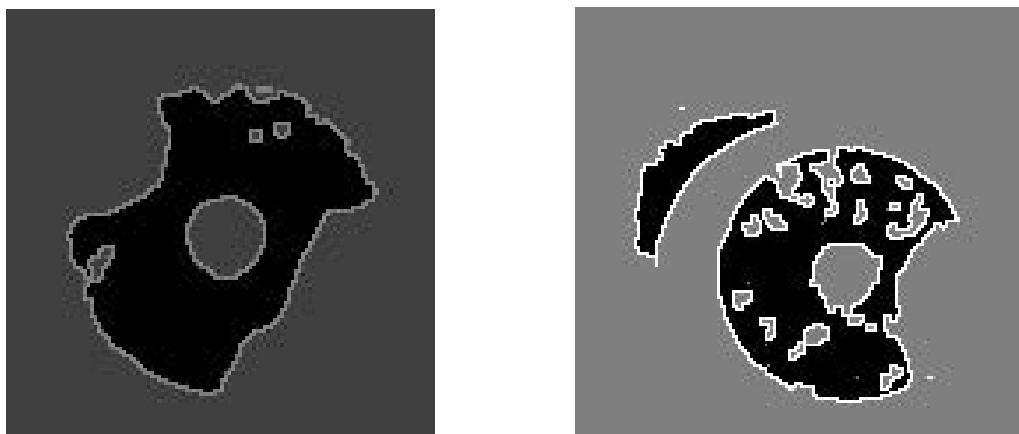


Рис. 8. Сумма изображений [M] и [S] с трассировкой границ.

для трассировки границ и торца, и дефектов, карта формируется в негативе. Следующим шагом производится суммирование бинарной карты [M] с негативом [S] с целью объединения всех темных участков (включая окружающий фон), найденных двумя разными методами, а также проводится трассировка границ торца по изображению. Результат показан на рис. 8.

Определение центра и радиуса торца по методу Хафа для окружностей

После оконтуривания границ торца и ЦО на подготовленном изображении удаляются короткие контуры и создается общий массив точек, находящихся в пределах маски поиска внешней границы. Затем находится примерный центр торца, за который принимается середина отрезка, соединяющего наиболее удаленные точки границ.

Точки границ сортируются по секторам (90 секторов с шагом 4 град) относительно примерного центра и составляются отдельные гистограммы центров и радиусов по случайным тройкам точек. (Ведение отдельных гистограмм положения центров и радиуса является некоторым упрощением классического преобразования Хафа, где используется трехмерная гистограмма.) Тройки точек выбираются из секторов, не слишком близких друг к другу (разница углового положения не менее 40 град). Рассчитывается статистика по большой выборке (от 5 до 30 тыс. комбинаций, в зависимости от объема входных точек). Находятся максимумы в гистограммах. Оценка результата осуществляется по получившемуся радиусу и отклонению от заданного центра ROI. Если радиус не соответствует заданным пределам или центр смещен от центра ROI дальше заданного расстояния, изделие считается неопознанным и выбраковывается. На рис. 9 представлена в виде карты гистограмма положений центров и отмечены найденный центр, внешний радиус и интенсивность использования точек границ при наборе статистики (обозначена их яркостью).

По найденному радиусу плоской части торца вычисляется размер (невидимой нам) фаски.

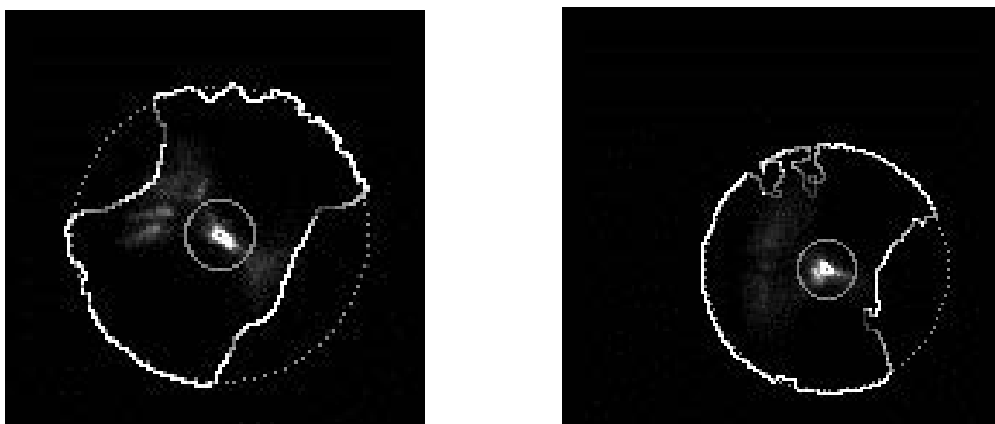


Рис. 9. Результат обработки методом Хафа.

Составление маски принадлежности

Под маской принадлежности понимается изображение, где в каждой точке содержится код, определяющий следующие объекты: внешнее пространство, наружная граница плоской части торца, сама плоская часть торца, граница ЦО и внутреннее пространство ЦО.

Для поиска дефектов недостаточно определить указанные объекты в виде кругов и окружностей. Поскольку и положение центра, и радиус определяются с некоторой погрешностью, то в соответствующие круги могут попадать участки фона в виде узких дуг, впоследствии идентифицируемые как дефекты. Поэтому радиусы границ определяются по среднему значению отдельно для каждого из 90 секторов, а там, где границы из-за дефектов слишком далеко уходят от найденного внешнего радиуса или от номинала (для ЦО), проставляются соответственно найденный внешний радиус и номинал. Получившиеся круглограммы сглаживаются, затем по ним формируется маска [A].

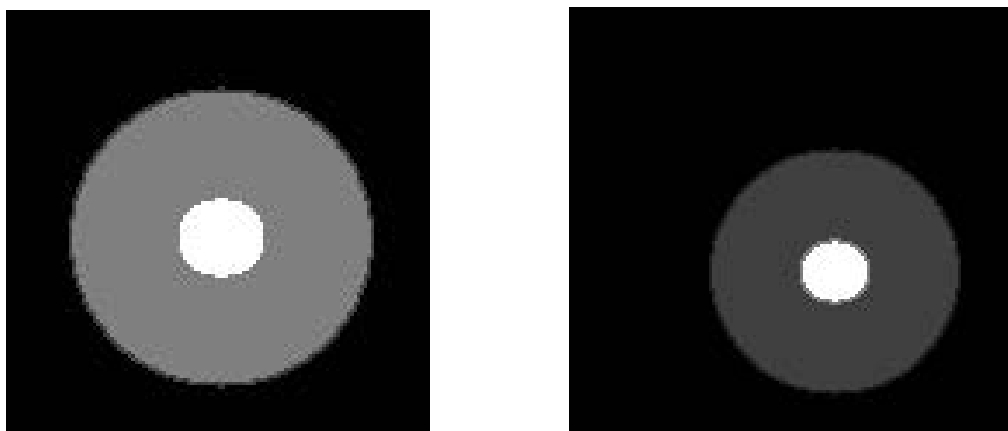


Рис. 10. Сформированные маски принадлежности.

ПОИСК ДЕФЕКТОВ

Перед началом поиска дефектов производится обрезка изображения [S] маской найденных границ торца [A]. Затем делается трассировка границ «черных» пятен, заливка «белым» внутри контуров малой длины (удаление малых островков черного). На получившейся бинарной картинке [S] (рис. 11) «черным» отмечены либо дефекты, либо участки их границ, а «белым» — поверхность неизвестного пока качества. При этом место, где должно быть центральное отверстие, маскируется, чтобы не быть в дальнейшем принятым за «большой дефект».



Рис. 11. Бинарная картина с границами дефектов.

Сегментация годное/брак

Сегментация проводится методом заливки темных областей: дефекты расширяются, стартуя с найденных (фрагментов) их границ. Для этого помещаем из [S] в стек координаты «черных» точек, контактирующих с «белыми», и присоединяем из [I] к «черным» точкам из стека соседние точки, которые близки по яркости или еще темнее (функция этой «относительной черноты» подобрана на большом экспериментальном материале). Затем производится оконтуривание получившихся областей. В результате заливки получается бинарная маска [R], показанная на рис. 12, где «белым» помечены «годные» точки, «черным» — потенциальный «брак».



Рис. 12. Бинарная маска с залитыми областями «годного» и «брака».

Одним из важных критериев отбраковки таблеток является отсутствие центрального отверстия (ЦО). Для **оценки наличия ЦО** производится расчет по [I] с учетом маски [A]:

- средней яркости V_f «годных» (согласно [R]) точек плоской части торца;
- средней яркости V_g «темных» точек (с яркостью меньшей, чем V_f) и занимаемой ими площади S_b в области ЦО.

ЦО считается опознанным, если отношение S_b к номинальной площади ЦО выше заданного порога и контраст $(V_f - V_g)/V_f$ выше заданного порога (пороги подобраны на большом экспериментальном материале). Сложный и вместе с тем довольно грубый алгоритм объясняется наличием паразитных сквозных бликов внутри ЦО.

Если ЦО не опознано, изделие бракуется.

Составление списка дефектов

Производится расчет локального контраста для заметных по площади или размерам дефектов. Яркостью фона V_f считается средняя яркость бездефектной поверхности в слегка «надутым» прямоугольнике, обрамляющем границы дефекта, яркостью дефекта V_g — средняя яркость 50 % самых темных точек внутри дефекта. Контраст = $(V_f - V_g)/V_f$. Если контраст дефекта ниже предопределенного порога, дефект игнорируется.

Затем оценивается наличие контакта дефекта с краем плоской части торца. Учитываются точки границы дефекта, проходящие по внешней границе торца в маске [A]. Если количество таких точек в процентном отношении к номинальной длине границы торца превышает заданный порог, дефект считается выходящим на фаску. Если дефект в целом имеет контакт с фаской, точки его границы, лежащие на краю плоской части торца, переносятся чуть дальше по радиусу — к номинальному внешнему радиусу таблетки.

Расчет параметров дефекта

Находится «ось» дефекта (отрезок, задаваемый парой самых удаленных друг от друга точек границы), строится обрамляющий дефект прямоугольник с длинными сторонами, параллельны-

ми оси и проходящими через наиболее удаленные точки границы слева и справа от оси, и короткими, проходящими через концы оси. Определяется продольный и поперечный размеры дефекта и его площадь. Проводится классификация дефекта: дефект с выходом или без выхода на фаску, пора.

Формирование заключения о годности изделия

Производится исключение дефектов с параметрами ниже порогов заметности, список дефектов сортируется по убыванию площади, проводится поиск и исключение вложенных дефектов. Дефект считается вложенным в другой дефект, если его ось лежит внутри обрамляющего прямоугольника этого другого дефекта. По результатам принимается решение по критериям бракования.

В результате на выходе имеется обработанное изображение (рис. 13) с выделенными дефектами и список дефектов с рассчитанными геометрическими параметрами и классификацией согласно атласу допустимых отклонений.

Время обработки одного кадра составляет порядка 10—50 мс. Затрачиваемое на обработку время зависит от качества исходного изображения и количества дефектных областей. Примененные алгоритмы обработки позволяют с хорошим запасом по времени проводить контроль таблеток при скорости подачи до 6 шт/с.

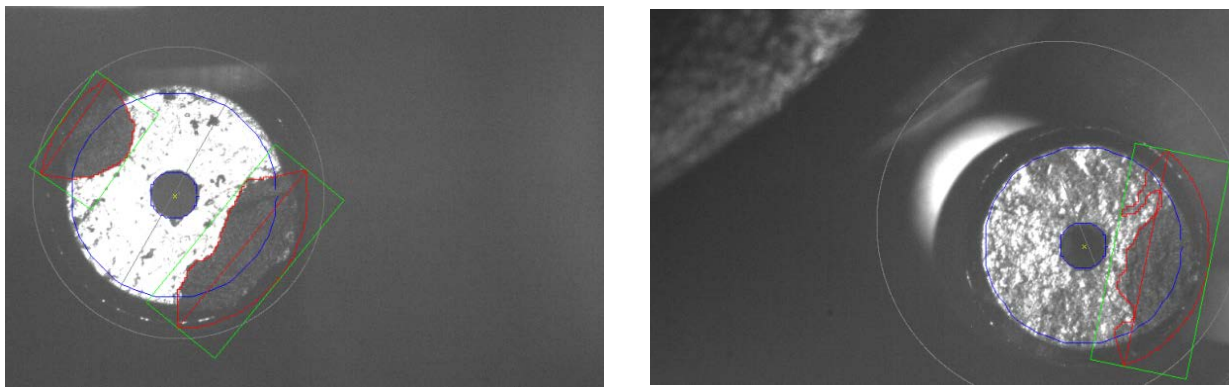


Рис. 13. Обработанное изображение с выделенными дефектами.

ВЫВОДЫ

В процессе разработки системы контроля топливных таблеток исследовались разные способы получения и обработки изображений поверхностей таблеток. Основной сложностью данной задачи является неидеальное качество получаемого изображения осматриваемого объекта, а также ограниченное время на его обработку (не более 80 мс). Для высокопроизводительного контроля геометрии топливных таблеток разработаны программно-аппаратные средства и алгоритмы, позволяющие существенно повысить достоверность результатов контроля. В результате работы получены стабильные, с высокой степенью повторяемости и с достаточным разрешением изображения, пригодные для последующей высокопроизводительной достоверной математической обработки. Достигнута высокая степень независимости изображения и результатов обработки от индивидуальных особенностей отдельных изделий и их партий. По результатам промышленных испытаний на ПАО «НЗХК» в результате контроля крупных партий изделий получены следующие значения вероятности разбраковки: перебраковка 2 %, недобраковка 3 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Решетников Ф.Г., Библиашвили Ю.К., Головнин И.С., Горский В.В. Казеннов Ю.И., Меньшикова Т.С., Никулина А.В., Романеев В.В. Разработка, производство и эксплуатация тепловыделяющих элементов энергетических реакторов. Кн. 1. М.: Энергоатомиздат, 1995. 320 с. [Reshetnikov G., Bibilashvili Yu.K., Golovnin I.S. et al. Development, Production, and Operation of Nuclear Reactor Fuel Elements. Energoatom-izdat, Moscow, 1995. Book 1.]

2. *Beloborodov A.V., Vlasov E.V., Finogenov L.V., Zav'yalov P.S.* High Productive Optoelectronic Pellets Surface Inspection for Nuclear Reactors // *Key Engineering Materials*. 2010. V. 437. P. 165—169. Trans Tech Publications, Switzerland.

3. *Финогенов Л.В., Белобородов А.В., Ладыгин В.И., Чугуй Ю.В., Загоруйко Н.Г., Гуляевский С.Е., Шульман Ю.С., Лавренюк П.И., Пименов Ю.В.* Оптико-электронная система автоматического контроля внешнего вида топливных таблеток // *Дефектоскопия*. 2007. № 10. С. 68—79. [*Finogenov L.V., Beloborodov A.V., Ladygin V.I., Chugui Yu.V., Zagoruiko N.G., Gulyaevskii S.E., Shul'man Yu.S., Lavrenyuk P.I., Pimenov Yu.V.* An optoelectronic system for automatic inspection of the external view of fuel pellets // *Russ. J. Nondestr. Test.* 2007. V. 43. No. 10. P. 692—699.]

4. *Завьялов П.С., Финогенов Л.В., Власов Е.В.* Специализированная оптическая система для контроля качества цилиндрических поверхностей // *Дефектоскопия*. 2016. № 7. С. 66—72. [*Zav'yalov P.S., Finogenov L.V., Vlasov E.V.* A dedicated optical system for the quality inspection of cylindrical surfaces // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2016. V. 52. No. 7. P. 415—420. DOI:10.1134/S1061830916070093]

5. *Zhang B., Liu M., Tian Y., Wu G., Yang X., Shi S., Li J.* Defect inspection system of nuclear fuel pellet end faces based on machine vision // *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2020. V. 57. No. 6. P. 617—623. DOI:10.1080/00223131.2019.1708827

6. *Zhang B., Miao Y., Tian Y., Zhang W., Wu G., Wang X., Zhang C.* Implementation of surface crack detection method for nuclear fuel pellets guided by convolution neural network // *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2021. V. 58. No. 7. P. 787—796. DOI:10.1080/00223131.2020.1869622

7. *Бардин Б.В.* Быстрый алгоритм медианной фильтрации. *Научное приборостроение*, 2011. Т. 21. № 3. С. 135—139. [*Bardin B.V.* Fast algorithm of median filtering // *Scientific Instrumentation*. 2011. V. 21. No. 3. P. 135—139.]

8. *Sauvola J., Pietikainen M.* Adaptive document image binarization. *Pattern Recognition*. 2000. V. 33. P. 225—236.

9. *Shafait F., Keysers D., Breuel T.M.* Efficient implementation of local adaptive thresholding techniques using integral images // *Document Recognition and Retrieval XV*. Jan 2008.

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ВНУТРЕННИХ ТРЕЩИН В КОМПОЗИТАХ, АРМИРОВАННЫХ СТЕКЛОВОЛОКНОМ, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ СДВИГА

© 2023 г. Бехнам Ахунди^{1*}, Вахид Моданлу¹

¹Технологический университет Сирдждана, Сирдждан, провинция Керман, 7813733385 Иран,
E-mail: *b.akhoundi@sirjantech.ac.ir

Поступила в редакцию 23.04.2023; после доработки 20.05.2023
Принята к публикации 26.05.2023

Лазерная интерферометрия сдвига является одним из новых методов неразрушающего контроля, который основан на интерференции монохроматических волн, которые отражаются от поверхности образца. С помощью данного метода можно с высокой скоростью и точностью производить контроль полной поверхности изделия при прямых измерениях изменения градиента. В данной статье исследована возможность контроля подповерхностных трещин различной длины и углов ориентации в композитных материалах при использовании метода сдвига и системы тепловой стимуляции. Для этой цели были сформированы искусственные трещины различной длины и углов ориентации в произведенных композитах. После подтверждения эффективности приложения воздействия к образцам использовались два радиационных источника теплового излучения. Было исследовано влияние переменных величин нагрузки, размера и направления сдвига, длины трещины и ее угла на качество результатов контроля. Результаты показывают, что изменение величины воздействия играет более важную роль в правильном обнаружении трещин, чем изменение величины сдвига. Для достижения наилучших результатов при контроле трещин на выбранных образцах было подобрано оптимальное тепловое воздействие, равное 12 и 15 с от передней части образца. Кроме того, оптимальная величина сдвига в исследованных композитных образцах оценивался примерно в 10 % от ширины изображения, регистрируемого камерой. Используя оптимизированные значения, были идентифицированы все подповерхностные трещины

Ключевые слова: интерферометрия сдвига, неразрушающий контроль, композитные материалы, обнаружение трещин, стекловолокно.

DOI: 10.31857/S0130308223070059, EDN: DWLBBU

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы композитные материалы широко используются в различных отраслях промышленности, таких как производство аэрокосмических систем, благодаря своим особым характеристикам, включающим высокое отношение прочности к весу и низкий коэффициент теплопроводности по сравнению с металлами. С другой стороны, технология производства этих материалов такова, что в результате они приобретают нежелательные свойства, такие как неоднородность и анизотропия. Поэтому потенциал для возникновения различных дефектов (трещины, отверстия и расслоение) в таких материалах выше, чем в однородных материалах (металлы и полимеры) [1]. Кроме того, другие характеристики, такие как отсутствие электрической и магнитной проводимости в этих материалах, делают очень трудным, а в некоторых случаях и невозможным использование традиционных методов неразрушающего контроля, например, ультразвуковой, магнитно-порошковый, вихретоковый контроль [2]. По этой причине для определения дефектов композитных деталей необходимо использовать подходящий и надежный метод.

Исследования показывают, что многие узлы, которые внезапно выходят из строя, изначально имеют небольшие дефекты (например, трещины и крошечные отверстия). Если такие же мелкие и, казалось бы, незначительные дефекты не обнаружить должным образом, они распространятся и станут причиной выхода из строя и разрушения деталей. Между тем, наличие подповерхностных трещин при циклических и динамических нагрузках является существенным, поэтому необходимо быстро обнаруживать и устранять их, чтобы предотвратить их распространение [3]. Владимиров и др. [4] исследовали особенности зарождения, начала и распространения трещины в прозрачном призматическом образце на основе фрагментов усредненных по времени спекл-изображений, полученных без прерывания циклической нагрузки. По их мнению, этот метод позволяет оценить время, предшествующее зарождению трещины, в зависимости от скорости изменения и предельных значений показателя преломления и плотности материала. Владимиров и др. [5] в другой работе использовали спекл-изображения для определения локальных пластических деформаций, возникающих во время многоциклового усталости в стали 09Г2С.

Цифровая широгрфия является одним из бесконтактных методов лазерного контроля при неразрушающем контроле деталей. В данном методе лазерный луч облучает поверхность образца,

а его отражение регистрируется в камере в виде интерференционной картины. Интерпретируя изменения в интерференционной картине, можно обнаружить некоторые особенности поверхности, такие как смещения и дефекты. В отличие от большинства традиционных методов, которые оценивают только небольшую часть образца за один раз, с помощью широкографии возможно за один шаг полностью исследовать большую область образца и отобразить результаты. Кроме того, поскольку отраженные лучи от поверхности образца, приводящие к интерференции, проходят почти одинаковый путь, чувствительность установки к вибрациям окружающей среды значительно снижается в отличие от других оптических и лазерных методов [6]. Ширография может непосредственно измерять градиент смещения поверхности образца как во внеплоскостном, так и в плоскостном режимах. Исследователи использовали измерение градиента смещения в плоскости с помощью широкографии для прямого измерения остаточной деформации и напряжения в деталях [7—9], а также для неразрушающего контроля во внеплоскостном режиме и поиска внутренних дефектов различных деталей [10, 11].

Этот метод использовался для исследования качества резиновых шин с целью выявления дефектов расслоения между резиной и металлом [12, 13] и для анализа цветного покрытия в произведениях искусства [14]. Кроме того, предыдущие исследования показывают, что метод широкографии использовался в различных случаях, таких как определение дефектов на криволинейных поверхностях [15] и измерение деформации поверхности образца [16]. Большинство предыдущих исследований было направлено на улучшение методики использования широкографии. К исследованиям, проведенным в области количественного анализа изображений, полученных с помощью широкографии, относятся извлечение фазы из полученных изображений и анализ комплексных фаз [17], измерение наклона и градиента поверхности объекта [18—20] и измерение деформации поверхностей, например, сварные точки [21]. Поскольку с помощью широкографии непосредственно измеряются нестандартные деформации на поверхности образца, вызванные подповерхностными дефектами, успешный и надежный контроль с помощью широкографии зависит от размеров дефекта и его глубины от поверхности, размера и типа нагрузки, а также величины и направления сдвига. С другой стороны, основным недостатком этого метода является изменение основных параметров для обнаружения дефектов различных типов, поэтому, изменяя материал образца, необходимые параметры, такие как размер нагрузки, величина и направление сдвига, должны быть оптимизированы в соответствии с требуемым материалом.

Впервые в 1980 году Nakadate et al. [22] использовали электронную камеру и цифровое изображение вместо фотопленок для записи изображений, и этот метод был использован в неразрушающем контроле. Далее обсуждаются наиболее важные исследования, проведенные в области, связанной с данной работой. В области обнаружения трещин в композитных материалах Liu et al. [23] применяли методы пьезографического и вибрационного нагружения для обнаружения трещин в металлических образцах. Они показали, что наилучшие результаты получаются, если частота вибрации близка к частоте пьезоэлектрического резонанса. Pezzoni и др. [24] проделали отверстия различных размеров и глубины на образцах композита, армированного стекловолокном, с сотовой структурой, который используется в строении концевых лопастей вертолетов, и исследовали их с помощью системы тепловой стимуляции с использованием широкографии. Они пришли к выводу, что с помощью широкографии можно одновременно исследовать всю поверхность образца и выявлять дефекты. Кроме того, часть лопасти вертолета была подвергнута усталостной нагрузке для выявления возможных дефектов методом широкографии. Авторы обнаружили, что благодаря тому, что широкография является бесконтактным методом по сравнению с традиционными методами, деталь может быть исследована во время усталостного нагружения без прекращения нагружения, что является важным моментом в неразрушающем исследовании промышленных деталей. Choi et al. [25] искусственно смоделировали дефект межслойного разделения, поместив тефлон различных размеров между слоями композитов, армированных углеродными волокнами, и композитов с сотовой структурой.

Затем они были исследованы методом широкографии. В дополнение к выявлению местоположения дефектов они могли оценить их количественный размер с помощью спекл-шаблонов и предложили широкографию в качестве подходящего метода для количественной и качественной оценки дефектов расслоения в композитных образцах. Huang et al. [26] изучали подповерхностные дефекты в образцах ПВХ, стали и армированного волокнами бетона, используемых при строительстве мостов. Рассматриваемыми дефектами были подповерхностные отверстия и трещины. Они использовали систему термической стимуляции с помощью мощной импульсной лампы для создания деформации на поверхности. Предложенный ими метод использует высокоэнергетический тепловой поток для возбуждения образца и обнаружения тепловой деформации с помощью

нестандартной установки для измерения сдвига. Они смогли выявить все дефекты, используя этот тип воздействия. Chehrghani et al. [27] создали подповерхностные искусственные дефекты в виде отверстий различных размеров и глубины на алюминиевых образцах и исследовали их с помощью метода широгрaфии и системы термической стимуляции. Они пришли к выводу, что отношение диаметра к глубине дефектов является наиболее важным фактором для определения подповерхностных дефектов и что минимальный диаметр обнаруживаемого дефекта должен быть примерно в 2,5 раза больше его глубины. Liu et al. [28] исследовали способность широгрaфии обнаруживать дефекты в металлических и полимерных образцах. В их работе воздействие было тепловым, а обнаруживаемые дефекты представляли собой отверстия и трещины, была построена диаграмма выявляемых областей для дефектов различной глубины.

Для более точной оценки методом широгрaфии необходимо изучить угловые трещины и сравнить термическое и растягивающее воздействие, а также изменить материал образца на композитные материалы, которые имеют гораздо более важное приложение, чем полимерные материалы.

В работах, посвященных изучению трещин в композитах, для обнаружения трещин использовали механическое нагружение. Однако, в связи с большими преимуществами термического воздействия, необходимо исследовать эффективность этого метода воздействия для обнаружения трещин. В данной работе для обнаружения подповерхностных трещин с различными размерами и углами в композитных материалах применяли метод цифровой широгрaфии с помощью теплового воздействия. Таким образом, с акцентом на исследуемый материал обнаружение трещин на композитных материалах осуществляется посредством термического воздействия керамическими нагревателями без создания дополнительного освещения. Учитывая преимущества термического воздействия, в частности простота приложения нагрузки и лучший контроль, развитие этого метода для обнаружения трещин в композитных материалах и извлечение его основных параметров является основной целью данной работы. Поэтому после внедрения макета и обеспечения точности его работы для создания деформации на поверхности образца использовали термическое воздействие двумя керамическими источниками излучения. Путем создания различных трещин в композитных образцах была исследована эффективность широгрaфии в их обнаружении. Кроме того, для этих образцов было определено оптимальное значение величины нагрузки и величины сдвига. Также было изучено влияние указанных параметров на качество результатов обнаружения трещин. В связи с этим, помимо решения многих ограничений механического нагружения, таких как необходимость сложной организации нагружения, а также создание шума и механической вибрации, путем уменьшения количества независимых параметров доступ к оптимальному диапазону для обнаружения трещин осуществляется более просто.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

2.1. Фундаментальные сведения о широгрaфии

Метод широгрaфии основан на интерференции двух световых волн, отраженных от поверхности образца. Для создания необходимой интерференции применяют монохроматический лазерный свет, который отвечает за освещение поверхности образца. Существуют различные методы создания интерференции лазерного света и разделения светового пучка; в данной работе используется интерферометр Майкельсона. Интерферометр Майкельсона состоит из разделительного стеклянного куба, который разделяет пучок света на две части, и двух плоских зеркал, одно из которых закреплено, а другое — меняет положение. На рис. 1 показана общая схема метода широгрaфии. Величина и направление сдвига могут быть отрегулированы желаемым образом с помощью зеркал, встроенных в схему. Таким образом, удерживая одно из них неподвижным и изменяя ориентацию другого зеркала, может быть осуществлен соответствующий сдвиг. Направление сдвига может быть горизонтальным, вертикальным или их комбинацией. Благодаря вращению одного из интерферирующих зеркал, полученное изображение будет содержать два одинаковых изображения, но с боковым смещением. Затем проводится воздействие на образец, и камера делает снимки образца, на которых видно изображение поверхности образца до и после воздействия на него. Эти фотографии представляют собой интерференционные картины, светлые и темные точки которых указывают на точечную интерференцию двух обрезанных изображений, но каждая из них сама по себе не дает никакой информации о том, как меняется форма образца. При вычитании изображений друг из друга с помощью соответствующего программного обеспечения получается темный и светлый рисунок, который называется узором гало. В узоре гало точки на каждом гало имеют одинаковую фазу и имеют разность фаз в 2π радиан с соседним гало [29]. В самом

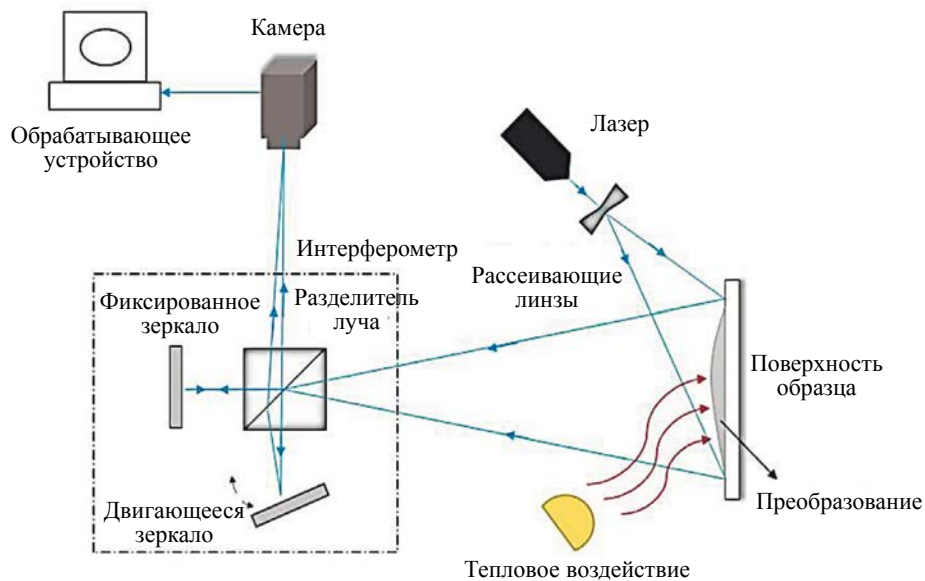


Рис. 1. Схема эксперимента для широкографии, основанного на интерферометре Майкельсона, при тепловом воздействии.

общем случае оптическая разность фаз при малом значении сдвига получается следующим образом [30]:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \left(k_x \frac{\partial u}{\partial x} k_y \frac{\partial v}{\partial x} k_z \frac{\partial w}{\partial x} \right) dx, \quad (1)$$

где $k = (k_x, k_y, k_z)$ — компоненты вектора чувствительности, которые зависят от направления освещения образца лазером и направления наблюдения за отраженными лучами с помощью камеры; φ — фаза изображения; (u, v, w) — смещения вдоль осей x, y и z . Если компоненты k_x и k_y — достаточно малы, чтобы ими пренебречь, система становится полностью чувствительной к производной смещения вне плоскости. В данном случае, если направление лучей, облучающих образец и лучи, зафиксированные камерой, находятся на прямой линии, для сдвига вдоль оси Ox по уравнению (2) получают зависимость непосредственно градиента смещения вне плоскости, а уравнение (3) используется для сдвига вдоль оси Oy . В уравнениях (2) и (3) λ — длина волны лазера, $\Delta\varphi$ — разность фаз изображения, а (d_x, d_y) — величина сдвига.

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\lambda \Delta\varphi}{4\pi dx}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\lambda \Delta\varphi}{4\pi dy}. \quad (3)$$

2.2. Оборудование и его устройство

Оборудование для широкографии, используемое в данной работе для выявления трещин, представлено на рис. 2. Согласно данной схеме, для освещения исследуемого образца использовался монохроматический диодный лазер мощностью 50 милливатт. Два плоских зеркала, одно из которых неподвижно, а другое может поворачиваться по горизонтали и вертикали, использовали для сдвига изображений. Величина сдвига измерялась с помощью градуированной пластины в направлениях x и y , которая располагалась перед поверхностью образца. ПЗС-камера, используемая для записи изображений с качеством 2,3 мегапикселя, записывала фотографию образца раз в секунду.

Важным моментом в компоновке макета является способ размещения частей и расстояние друг от друга. Чтобы убедиться в правильности макета и его калибровки, первоначальная оценка была проведена с использованием различных направлений сдвига на образце из оргстекла толщиной 2 мм и диаметром 100 мм, полученные узоры показаны на рис. 3.

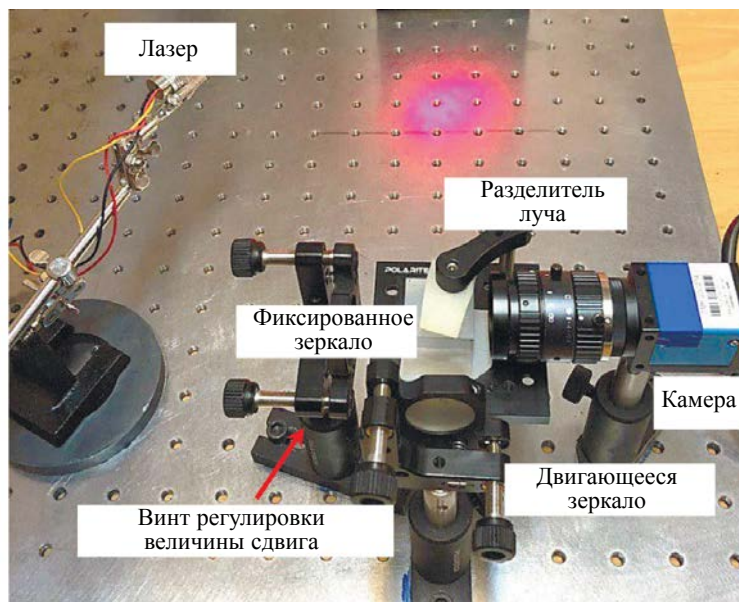
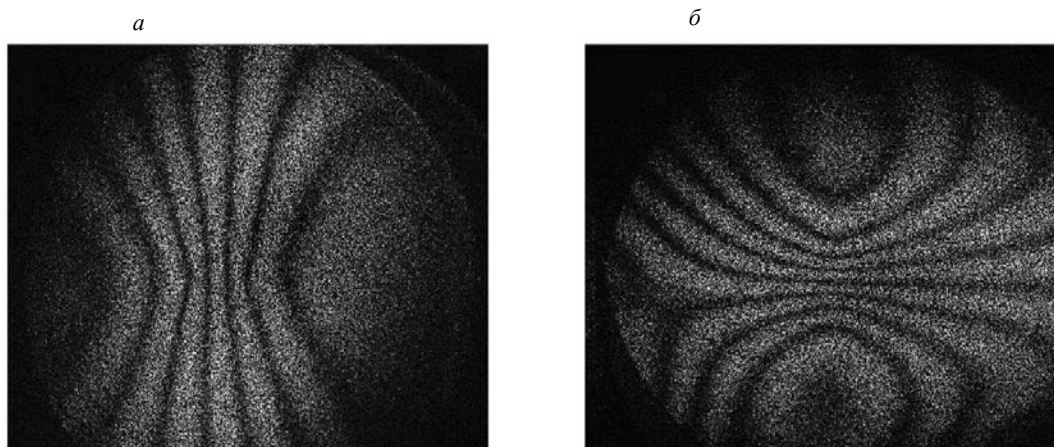


Рис. 2. Установка для широкографии.

Нагрузка на данный образец осуществлялась с помощью давления и микрометра, вмонтированного в заднюю часть образца. Отмечается, что ширина изображения, записанного камерой, составляла 90 мм, что эффективно для получения оптимальной величины сдвига. При проверке работоспособности компоновки использовалась величина различных сдвигов.

Как уже упоминалось, камера для съемки сдвигов делает фотографии до и после воздействия нагрузки, и после нескольких этапов обработки изображений получаются узоры гало. Существуют различные типы нагружения для создания деформации на поверхности образца, такие как растяжение, термическое воздействие, вибрация, относительный вакуум и нагружение давлением, каждый из которых выбирается в зависимости от типа материала и условий доступа к образцу. В данной работе для выявления трещин в композитных материалах использовалась тепловое воздействие с лицевой стороны образца.

При тепловых воздействиях для возбуждения образца обычно применяют мощный световой проектор. Результаты такого воздействия имеют относительно хорошее качество, но его основным недостатком является то, что камера не может делать снимки в процессе воздействия нагрузки, поскольку во время воздействия проектор включен, и только когда проектор выключен

Рис. 3. Узоры на внешней стороне плексигласа для калибровки установки: сдвиг по оси X (а); сдвиг по оси Y (б).

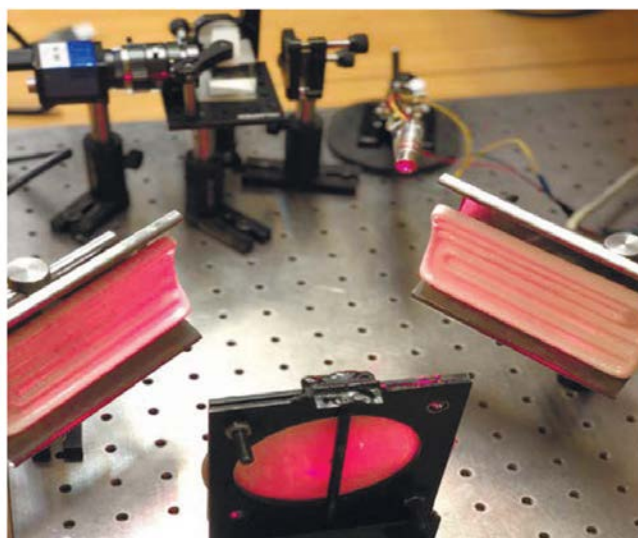


Рис. 4. Применение двух керамических нагревателей с регулируемыми основаниями для разных углов при тепловом воздействии.

и деталь остывает делается снимок. Для решения этой проблемы, согласно рис. 4, был проведен нагрев излучением. Для этого были использованы два керамических нагревателя мощностью 500 Вт с максимальной температурой 350—400 °С. Под ними была установлена подвижная двухпозиционная подставка, под которой располагались нагреватели под нужным углом относительно образца. Поскольку во время нагрева нагреватели не испускают дополнительного света, фотографирование проводилось как в процессе работы нагревателя, т.е. образец нагревался, так и тогда, когда нагреватель был отключен от сети, т.е. образец охлаждался, и наилучшие результаты были получены при охлаждении образца. Его фотографировали и наконец извлекали оптимальное значение для величины теплового воздействия. Возникающее тепловое расширение в образце под действием тепла вызывает небольшую деформацию на поверхности образца. В этом случае, если под поверхностью образца имеется участок нарушения сплошности, например, дефект или разрыв, то нарушение сплошности при расширении и, следовательно, нарушение сплошности при деформации приведет к образованию в дефектных участках узоров гало сдвига.



Рис. 5. Использование бесконтактного термометра для исследования температуры образца в любой момент времени.

Другим важным фактором при оценке методом термического воздействия является время охлаждения образца, которое имеет прямую связь с величиной деформации образца. Так, при увеличении времени охлаждения деформация и внеплоскостное смещение образца увеличиваются. Поэтому после приложения нагрузки для всех спроектированных испытаний было сделано 20 фотографий с интервалом в одну секунду с поверхности образца, так что после приложения воздействия нагревателями образец фотографировался в течение 20 с. В этом случае все 20 фотографий можно сравнить друг с другом, поскольку в каждом случае на образце создавалось небольшое изменение деформации.

Согласно рис. 5, бесконтактный термометр использовался все время при воздействии на образец для оценки количества теплоты, сообщаемой образцу, и анализа результатов в зависимости от интенсивности воздействия. Используя это устройство, температуру образца можно было измерить в любой момент. На образец подавалось тепло от комнатной температуры около 25 до 61 °С (18 с нагрева в самом высоком режиме). При нагружении образец был закреплен со всех сторон и не испытывал вибрации. Далее был исследован оптимальный режим нагружения для достижения наилучших результатов.

2.3. Типы образцов и параметры трещин

Для изготовления композитных образцов в качестве матрицы использовалась эпоксидная смола LV113, а также стекловолокно с ориентацией 0 и 90. Массовое соотношение смолы и отвердителя было 100:20, а время выдержки составило 48 ч. Две пластины с размерами 200×200 мм и толщиной 3 мм, состоящие из 24 слоев стекловолокна, были изготовлены вручную слой за слоем. Затем с помощью гидроабразивной резки пяти образцов размерами 3×40×100 мм³ были вырезаны из изготовленных пластин. Для увеличения точности изготовления композитных образцов и вероятности отсутствия брака каждый из них был протестирован отдельно с помощью камеры и теплового воздействия.

Таблица 1

Механические свойства композитных образцов

Параметр	Матрица (Полимер)	Волокно
Модуль упругости, ГПа	3,21	71,7
Модуль сдвига, ГПа	1,2	28,9
Коэффициент Пуассона	0,33	0,24
Плотность, кг/м ³	1200	2540
Объемная доля, %	65	35
Коэффициент теплопередачи	0,8	0,8

В данном случае наблюдались только параллельные друг другу гало образцов при воздействии, что свидетельствовало о полном отсутствии дефектов. В табл. 1 приведены механические характеристики исследуемых образцов. На двух образцах образовались четыре поперечные трещины длиной 2, 5, 10 и 15 мм, а на трех других — 3 угловые трещины под углом 0, 30 и 60°, созданные режущим лезвием толщиной 0,3 мм. Глубина каждой трещины составляет около 1 мм. В методе сдвига, если один из размеров дефекта намного меньше другого, меньший размер не окажет большого влияния на результаты. Поскольку ширина трещины мала по сравнению с ее длиной, она не считается значимым фактором для измерений и анализа. На рис. 6 показаны размеры трещин и угол их расположения.

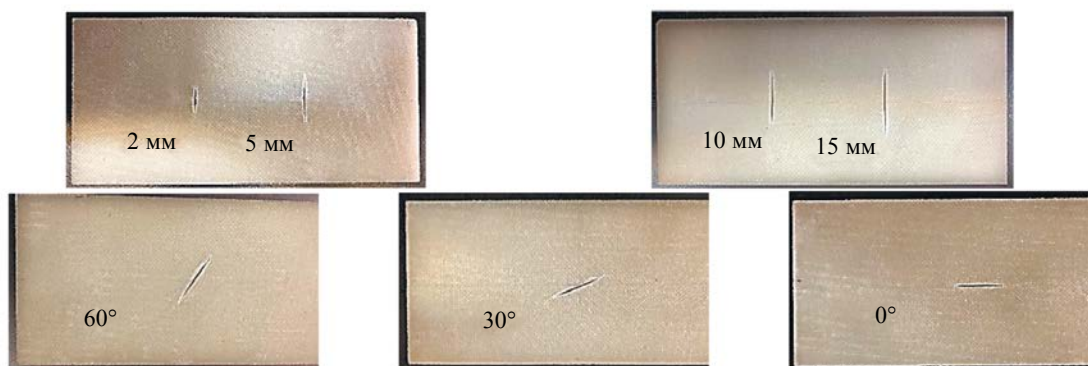


Рис. 6. Размер и расположение трещин на задней стороне образцов.

2.4. Планирование эксперимента

В данной работе помимо обнаружения трещин методом сдвига были также исследованы параметры, влияющие на полученные результаты. Керамические нагреватели обеспечивали повышение температуры образца от 25 до примерно 61 °С. Значения величины воздействия при планировании эксперимента были выбраны равными 9, 12, 15 и 18 с, что соответственно повышало температуру образца от температуры окружающей среды до 48, 52, 57 и 61 °С. Чем больше было время выдержки образца, тем выше становилась температура образца соответственно, это означает, что на него оказывалось большее воздействие.

Температура поверхности во всех экспериментах измерялась с помощью бесконтактного термометра с точностью $\pm 0,1$ % от температуры отсчета и постоянной времени 500 мс, а все изменения контролировались. Во всех повторяющихся экспериментах не наблюдалось большой разницы в результатах измерения температуры поверхности образцов. Поскольку нагреватели нагреваются до определенной степени, а другие параметры, такие как расстояние от нагревателей до поверхности и состояние поверхности образцов, не меняются, единственным влияющим параметром является продолжительность воздействия на образцы, определяющая температуру поверхности. Время воздействия строго контролировалось во всех экспериментах.

Используя метод Тагути в программе Minitab [31], три параметра (размер трещины, величина воздействия и величина сдвига) сравнивали в различных режимах. В этом методе для каждого параметра рассматривалось 4 уровня, а затем было проведено 16 экспериментов для проверки параметров. В табл. 2 показаны характеристики трещин, время нагружения и различные величины сдвига. Кроме того, направление сдвига также применялось в соответствии с направлением трещин, горизонтально и вертикально, а также их комбинацией.

Таблица 2

Уровни исследуемых параметров

Параметр	Уровень 1	Уровень 2	Уровень 3	Уровень 4
Длина трещины, мм	2	5	10	15
Время воздействия, с	9	12	15	18
Величина сдвига, мм	7	10	13	16

В табл. 3 показано планирование эксперимента. Результатом экспериментов является решение о пригодности метода для обнаружения различных трещин. Для проверки результатов использовалось отношение сигнал/шум (С/Ш). Это отношение представляет собой чувствительность результата к исследуемым параметрам [32]. Чем выше отношение С/Ш, тем эффективнее обнаружение трещины, т.е. чем выше значение С/Ш, тем меньше дисперсия результатов вокруг заданной вели-

Таблица 3

Планирование эксперимента

Номер эксперимента	Длина трещины, мм	Время воздействия, с	Величина сдвига, мм	Отношение сигнал/шум
1	2	9	4	0
2	2	12	7	15,56
3	2	15	10	19,08
4	2	18	13	12,04
5	5	9	7	6,02
6	5	12	4	9,54
7	5	15	13	18,06
8	5	18	10	19,08
9	10	9	10	6,02
10	10	12	13	18,06
11	10	15	4	12,04
12	10	18	7	15,56
13	15	9	4	6,02
14	15	12	7	20
15	15	15	13	16,90
16	15	18	10	9,54

чины. В данных экспериментах в качестве характеристики были выбраны значения «больше—лучше» на графике отношения С/Ш. Как известно, большее значение отношения сигнал/шум указывает на более эффективное обнаружение трещин. Анализируя результаты этих испытаний и проверяя качество создаваемых гало, можно достичь оптимального значения величины нагрузки и сдвига на образцы, что описано в последующих результатах.

2.5. Обработка изображений

Исходные изображения гало, полученные с поверхности изделия, характеризуются низким качеством, которое должно быть улучшено с помощью нескольких этапов обработки изображений и применения соответствующих фильтров. Программный код MATLAB был использован для вычитания изображений друг из друга. Затем были применены фильтры в соответствии с качеством каждого из них. Этапы обработки изображений включали в себя следующее:

использование сверточного фильтра 55. Такой фильтр, представляющий собой квадратную матрицу 5-го порядка, может увеличивать разрешение изображений и выявлять затемненные части благодаря своему среднему числу. В этом случае данные взвешенные значения соседних пикселей используются для расчета нового значения пикселя. Среднее число в матрице составляло;

медианный фильтр. Такой фильтр делает темные участки еще темнее, а светлые участки еще светлее. Используя данный фильтр, можно различить углы каждого участка с более высоким разрешением;

фильтр резких краев. Этот фильтр был использован для улучшения определения краев и способности определять начало и конец ореолов;

приведение гистограммы ближе к 255. Увеличивая контрастность изображений и осветляя темные участки, можно управлять гистограммой, которая представляет собой частоту светлых и темных участков. Поскольку исходные записанные изображения были немного темными и с низким разрешением, применение к ним фильтра было таким, что частота светлых участков на графике гистограммы была расширена.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Величина воздействия, величина сдвига и направление сдвига являются важными характеристиками при идентификации различных дефектов в деталях методом сдвига. После проведения

многочисленных экспериментов все трещины, образовавшиеся на композитном образце с различными размерами и углами, были выявлены с помощью теплового воздействия. В соответствии со способом размещения нагревателей относительно места расположения образца, наилучшие результаты были достигнуты при воздействии с передней стороны образца в режиме охлаждения. Поскольку чувствительность метода сдвига к незначительным изменениям на микронном уровне поверхностных деформаций очень высока, воздействие должно быть полностью контролируемым и аккуратно прикладываться к образцу. Учитывая тот факт, что при фиксированной величине воздействия количество и плотность гало увеличиваются с увеличением величины сдвига, а также при фиксированной величине сдвига — с увеличением величины воздействия [33], можно сделать вывод, что приложение незначительного воздействия на образец приводит к невозможности создания гало сдвига и, как следствие, к невозможности распознать дефект. С другой стороны, чрезмерная нагрузка также создает интенсивные гало, что затрудняет обнаружение местоположения дефекта.

Согласно результатам, полученным в ходе проведенных экспериментов, в качестве критерия выявляемости трещин был введен параметр отношение С/Ш. Все 16 экспериментов, спланированных по методу Тагути, были повторены 3 раза для максимально возможного измерения точности расположения и нагружения. Результат этих экспериментов рассматривался как степень обнаружения трещин. Таким образом, при тщательном качественном изучении спекл-узоров, полученных в результате экспериментов, изображения, на которых полностью и с отчетливыми гало распознано местоположение трещины, имеют более высокое отношение С/Ш и, как следствие, более высокое отношение С/Ш, которое может быть использовано для определения оптимального значения воздействия. Наилучшие результаты были получены при воздействии на образцы между 12 и 15 с (около 50 — 57 °С). Бесконтактный термометр определял температуру образца в каждый момент времени, поэтому в соответствии с уровнями, указанными для величины воздействия по методу Тагути, за 9 с нагрева температура образца увеличилась до 48 °С, за 12 с — до 52 °С, за 15 с — до 57 °С и за 18 с — до 61 °С.

На рис. 7 показаны результаты анализа С/Ш для проведенных экспериментов. Трещины 15 и 10 мм были обнаружены с большей достоверностью, чем две другие трещины. На этих диаграммах оптимальная величина сдвига составляет около 10 мм, а оптимальный размер нагрузки — от 12 до 15 с. Учитывая большое изменение отношения С/Ш от величины сдвига 4 мм до 10 мм, очевидно, что незначительное изменение величины сдвига может сильно изменить качество гало и чувствительность метода. Более того, из-за большей разницы в соотношении С/Ш на диаграмме величины воздействия по сравнению с диаграммой величины сдвига можно сделать вывод, что изменение параметра величины воздействия играет более важную роль в качестве результатов, чем величина сдвига.

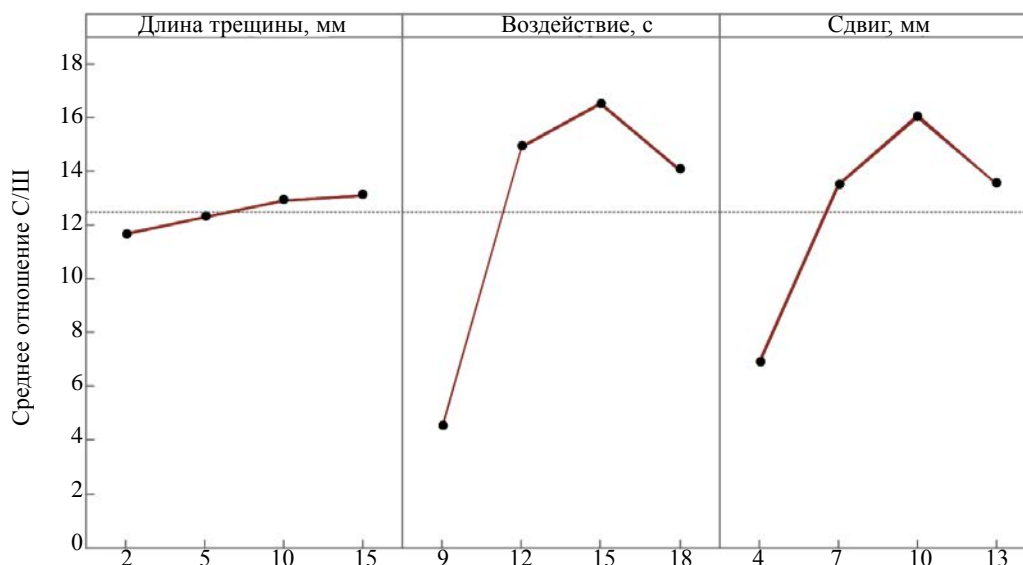


Рис. 7. График отношения С/Ш для анализа длины трещины, величины воздействия и параметров величины сдвига.

С увеличением степени воздействия гало становились плотнее, их количество увеличивалось, но расположение центра гало не менялось. Кроме того, при возрастании величины сдвига при фиксированной нагрузке гало становились более связанными, и наилучшая величина сдвига для обнаружения трещин на образцах составлял около 10 мм. При повышении величины сдвига плотность гало увеличивалась, так что образовывалось много гало на небольшом расстоянии друг от друга. Также при уменьшении величины сдвига от 10 мм количество гало становится меньшим и становится трудно обнаруживать местоположение трещины. Причина этого момента обосновывается согласно уравнениям (2) и (3). В этих уравнениях, при постоянных длине волны и разности фаз, увеличение размера сдвига (d_x или d_y) увеличивает градиент смещения вне плоскости. Аналогично, при уменьшении размера сдвига градиент смещения уменьшается. Поэтому необходимо выбирать оптимальный размер сдвига для достижения оптимального градиента смещения вне плоскости и, как результат, высококачественного узора гало.

Величина сдвига в этих образцах имела прямую зависимость от ширины изображения, зафиксированного камерой, и был сделан вывод, что наиболее оптимальный размер сдвига составляет 0,1 от ширины изображения. Как уже упоминалось, ширина изображения, записанного камерой, составляла 90 мм. На рис. 8 и рис. 9 показаны картины гало различных трещин при оптимальном размере сдвига и величине тепловой нагрузки 12 и 15 с соответственно, что является наиболее оптимальным режимом нагрева. Согласно этим рисункам, все трещины были идентифицированы с хорошей точностью.

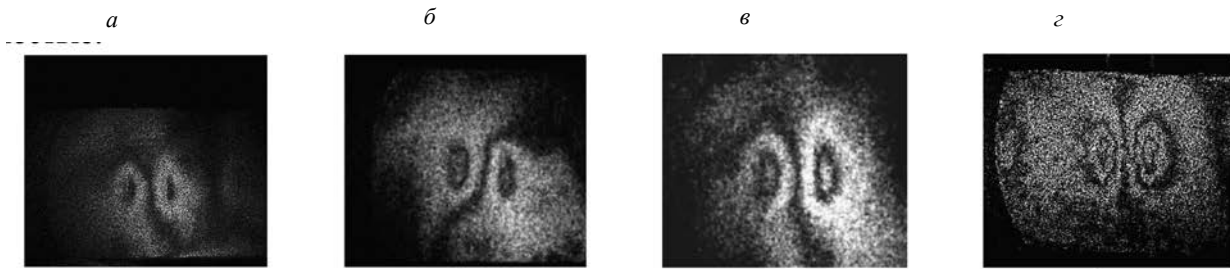


Рис. 8. Картины границ вертикально-треснувших образцов при 12-секундном тепловом нагружении: трещина 2 мм (а); трещина 5 мм (б); трещина 10 мм (в); трещина 15 мм (г).

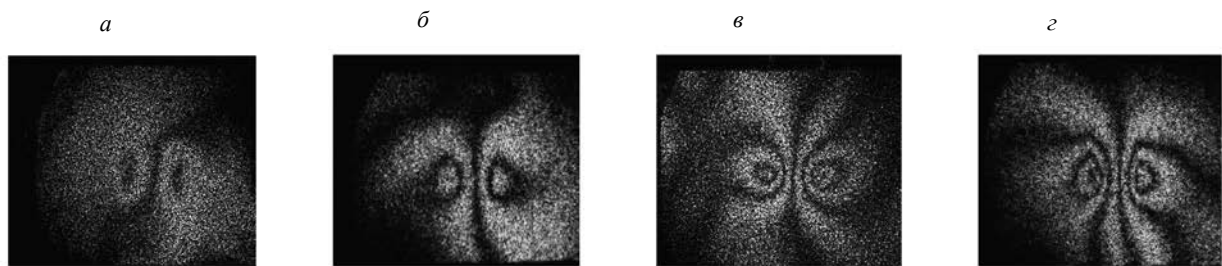


Рис. 9. Картины границ вертикально-треснувших образцов при 15-секундном тепловом нагружении: трещина 2 мм (а); трещина 5 мм (б); трещина 10 мм (в); трещина 15 мм (г).

Согласно результатам исследования Liu et al. [28], проведенного для выявления трещин на алюминиевых образцах, направление сдвига, параллельное направлению дефекта, может повысить эффективность обнаружения трещин. Между тем результаты, полученные при анализе направления сдвига изображения в данной работе, показывают, что при условии, когда направление сдвига находится в направлении, перпендикулярном направлению трещины, достигаются лучшие результаты по сравнению со случаем, когда оно направлено в сторону трещины. Для обнаружения угловых трещин использовалось комбинированное направление сдвига в горизонтальном и вертикальном направлениях. В этом случае направление сдвига измерялось как 30 и 60° относительно горизонтальной линии. На рис. 10 показаны полученные данные гало на образце композита с продольными и угловыми трещинами. Как видно из рисунка, с изменением угла трещины

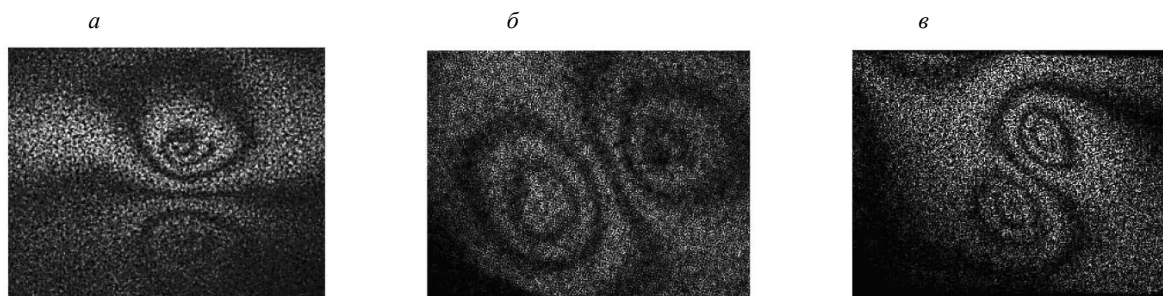


Рис. 10. Картины краев образцов с угловыми трещинами: 0° (а); 60° (б); 30° (в).

изменялся и угол ореолов. Направление приложения нагрузки значительно влияет на ориентацию ореолов, особенно в случае угловых трещин. При тепловом воздействии, используемом в данной работе, направление воздействия удаляется как параметр, поэтому, уменьшив количество параметров, можно было легче достичь оптимальных результатов.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе для локализации трещин на образцах композитных материалов, армированных стекловолокном, использовался метод цифрового сдвига с помощью теплового воздействия. Также были исследованы параметры воздействия, размеров и направления сдвига, которые являются основными параметрами при обнаружении трещин, и получены их оптимальные значения. Сначала на образцах композитных материалов были получены трещины с различными параметрами и углами, а затем, используя соответствующий метод планирования эксперимента, была оценена возможность обнаружения трещин и параметры величины воздействия, размера и направления сдвига. Наконец, путем сравнения результатов было установлено, что тепловое воздействие как подходящий метод является эффективным для обнаружения трещин в этих материалах. Общие полученные результаты выглядят следующим образом:

воздействие с передней стороны образца и запись изображения во время его охлаждения дают гораздо лучшие результаты, чем запись изображения во время нагрева образца;

параметр величины воздействия и ее изменения влияют на качество результатов в большей степени, чем величина сдвига;

благодаря тому, что направление сдвига под углом 90° ближе к направлению трещины, результаты получаются более четкими;

оптимальная величина сдвига была оценена как 0,1 ширины изображения, зафиксированного камерой;

для исследованных композитных образцов наилучшие результаты были получены при времени нагружения от 12 до 15 с (около 50—57 °С);

для определения оптимальных параметров и выявления дефектов тепловое воздействие подходит гораздо лучше, чем механическое, благодаря устранению влияния направления воздействия;

в связи с чувствительностью метода сдвига к градиенту вне плоскости, воздействие следует производить равномерно и медленно, чтобы избежать несогласованности изображения и чрезмерной деформации поверхности образца.

Авторы заявляют об отсутствии потенциального конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hung Y. Applications of digital shearography for testing of composite structures // *Composites Part B: Engineering*. 1999. 30 (7). P. 765—773. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(99\)00027-X](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(99)00027-X)
2. Růžek R., Lohonka R., Jironč J. Ultrasonic C-Scan and shearography NDI techniques evaluation of impact defects identification // *NDT & E International*. 2006. V. 39 (2). P.132—142. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2005.07.012>
3. Clyne T., Hull D. *An introduction to composite materials*. Cambridge university press, 2019.
4. Vladimirov A., Kamantsev I., Drukarenko N., Trishin V., Akashev L., Druzhinin A. Assessing fatigue damage in organic glass using optical methods // *Optics and Spectroscopy*. 2019. V. 127. P. 943—953.

5. *Vladimirov A.P., Drukarenko N.A., Myznov K.Ee.* Using speckle images for determining the local plastic strains arising at high-cycle fatigue of 09G2S steel // *Technical Physics Letters*. 2021. V. 47 (11). P. 777—780.
6. *Hung Y., Ho H.* Shearography: An optical measurement technique and applications // *Materials science and engineering: R: Reports*. 2005. V. 49 (3). P. 61—87. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mser.2005.04.001>
7. *Francis D., James S., Tatam R.* Surface strain measurement of rotating objects using pulsed laser shearography with coherent fibre-optic imaging bundles. *Measurement Science and Technology*. 2008. V. 19 (10). P. 105301. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/19/10/105301>
8. *Groves R.M., Chehura E., Li W., Staines S.E., James S.W., Tatam R.P.* Surface strain measurement: a comparison of speckle shearing interferometry and optical fibre Bragg gratings with resistance foil strain gauges // *Measurement Science and Technology*. 2007. V. 18 (5). P. 1175. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/18/5/003>
9. *Groves R.M., James S.W., Tatam R.P.* Full surface strain measurement using shearography // *Optical Diagnostics for Fluids, Solids, and Combustion*. 2001. International Society for Optics and Photonics. P. 142—152. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.449371>
10. *Asemani H., Soltani N.* The Effectiveness of Laser Shearography for the Inspection of Wall Thinning in a Large Aluminum Plate // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2019. V. 38 (2). P. 56. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10921-019-0594-5>
11. *Barmouz M., Behravesh A.H., Reshadi F., Soltani N.* Assessment of defect detection in wood-plastic composites via shearography method // *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2016. V. 29 (1). P. 28—36. DOI: <https://doi.org/10.1177%2F0892705713518810>
12. *Liu B., Guo X., Qi G., Zhang D.* Quality evaluation of rubber-to-metal bonded structures based on shearography // *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*. 2015. V. 58 (7). P. 1—8. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11433-015-5658-7>
13. *Zhang Y., Li T., Li Q.* Defect detection for tire laser shearography image using curvelet transform based edge detector // *Optics & Laser Technology*. 2013. V. 47. P. 64—71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2012.08.023>
14. *Groves R., Pradarutti B., Kouloumpi E., Osten W., Notni G.* 2D and 3D non-destructive evaluation of a wooden panel painting using shearography and terahertz imaging // *Ndt & E International*. 2009. V. 42 (6). P. 543—549. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2009.04.002>
15. *Sujatha N., Murukeshan V., Rajendran S., Ong L., Seah L.* Non-destructive inspection of inner surfaces of technical cavities using digital speckle shearography // *Nondestructive testing and evaluation*. 2005. V. 20 (1). P. 25—34. DOI: <https://doi.org/10.1080/10589750512331314183>
16. *Xie X., Xu N., Sun J., Wang Y., Yang L.* Simultaneous measurement of deformation and the first derivative with spatial phase-shift digital shearography // *Optics Communications*. 2013. V. 286. P. 277—281. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2012.08.072>
17. *Liu S., Yang L.X.* Regional phase unwrapping method based on fringe estimation and phase map segmentation // *Optical Engineering*. 2007. V. 46 (5). P. 1—9, 9. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.2741232>
18. *Groves R.M., James S.W., Tatam R.P.* Shape and slope measurement by source displacement in shearography // *Optics and lasers in Engineering*. 2004. V. 41 (4). P. 621—634. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0143-8166\(02\)00177-X](https://doi.org/10.1016/S0143-8166(02)00177-X)
19. *He Y.M., Tay C.J., Shang H.M.* Digital phase-shifting shearography for slope measurement // *Optical Engineering*. 1999. V. 38 (9). P. 1586—1590, 1585.
20. *Huang J.-R., Ford H., Tatam R.* Slope measurement by two-wavelength electronic shearography // *Optics and lasers in engineering*. 1997. V. 27 (3). P. 321—333. DOI: [https://doi.org/10.1016/0143-8166\(95\)00124-7](https://doi.org/10.1016/0143-8166(95)00124-7)
21. *Steinchen W., Kupfer G., Mäckel P.* Full field tensile strain shearography of welded specimens // *Strain*. 2002. V. 38 (1). P. 17—26.
22. *Nakadate S., Yatagai T., Saito H.* Digital speckle-pattern shearing interferometry // *Applied Optics*. 1980. V. 19 (24). P. 4241—4246.
23. *Liu H., Guo S., Chen Y.F., Tan C.Y., Zhang L.* Acoustic shearography for crack detection in metallic plates // *Smart Materials and Structures*. 2018. V. 27 (8). P. 085018/085011—085010. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aacfe9>
24. *Pezzoni R., Krupka R.* Laser-shearography for non-destructive testing of large-area composite helicopter structures // *INSIGHT-WIGSTON THEN NORTHAMPTON*. 2001. V. 43 (4). P. 244—248.
25. *Choi S.W., Lee J.H.* Nondestructive evaluation of internal defects for composite materials by using shearography // *Key engineering materials*. 2004. Trans Tech Publ. P. 781—786.
26. *Huang Y., Ng S., Liu L., Li C., Chen Y., Hung Y.* NDT&E using shearography with impulsive thermal stressing and clustering phase extraction // *Optics and Lasers in Engineering*. 2009. V. 47 (7—8). P. 774—781.
27. *Chehrghani A., Fotovat A., Halajian M., Torkamany M.J., Nabavi S.H.* Inspection of metallic samples defects in nondestructive testing by laser shearography with thermal loading // *Nondestructive testing technology*. 2018. V. 2 (2). P. 19—25.

28. *Liu Z., Gao J., Xie H., Wallace P.* NDT capability of digital shearography for different materials // *Optics and Lasers in Engineering*. 2011. V. 49 (12). P. 1462—1469. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2011.04.006>
29. *Yang L., Chen F., Steinchen W., Hung M.Y.* Digital shearography for nondestructive testing: potentials, limitations, and applications // *Journal of Holography and Speckle*. 2004. V. 1 (2). P. 69—79. DOI: <https://doi.org/10.1166/jhs.2004.010>
30. *Francis D., Tatam R., Groves R.* Shearography technology and applications: a review // *Measurement science and technology*. 2010. V. 21 (10). P. 102001. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/21/10/102001>
31. *Hung Y., Chen Y.S., Ng S., Liu L., Huang Y., Luk B., Ip R., Wu C., Chung P.* Review and comparison of shearography and active thermography for nondestructive evaluation // *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2009. V. 64 (5—6). P. 73—112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mser.2008.11.001>
32. *Moradian M., Doniavi A., Modanloo V., Alimirzaloo V.* Process parameters optimization in gas blow forming of pin-type metal bipolar plates using Taguchi and finite element methods. 2017.
33. *Modanloo V., Gorji A., Bakhshi-Jooybari M.* A comprehensive thinning analysis for hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure // *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*. 2019. V. 43. P. 487—494.
-

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ НЕЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩЕГО ПОКРЫТИЯ НА НЕМАГНИТНОМ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩЕМ ОСНОВАНИИ С АВТОМАТИЧЕСКИМ УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ОСНОВАНИЯ

© 2023 г. М.В. Сясько¹, И.П. Соловьев¹, П.В. Соломенчук^{2,*}

¹Санкт-Петербургский Государственный Университет,
Россия 199034 Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7–9
²ООО «Константа», Россия 198098 Санкт-Петербург, Огородный пер., 21
E-mail: *pavel257@mail.ru

Поступила в редакцию 22.05.2023; после доработки 26.05.2023

Принята к публикации 26.05.2023

На результаты измерений толщины неэлектропроводящего покрытия на электропроводящем немагнитном основании с применением существующего амплитудного метода вихретокового неразрушающего контроля оказывает сильное влияние удельная электропроводность основания. Для устранения этой проблемы предлагается использование вихретокового преобразователя с амплитудно-фазовой обработкой сигналов. Его градуировку проводить с использованием нескольких оснований с разной удельной электропроводностью с применением установки-имитатора толщины покрытия, количество градуировочных точек сопоставимо с разрешением толщиномера. Для вычисления толщины покрытия с учетом удельной электропроводности основания используется алгоритм определения причастности точки многоугольнику.

Ключевые слова: вихретоковый, толщиномер покрытий, амплитудно-фазовый алгоритм, двухмерная градуировка.

DOI: 10.31857/S0130308223070060, **EDN:** DWTPBN

Для измерения толщины T_p неэлектропроводящего покрытия на немагнитном электропроводящем металлическом основании регламентирован амплитудный вихретоковый метод неразрушающего контроля, описанный в [1] с указанием мешающих параметров, влияющих на погрешность измерения. Практика показывает, что электромагнитные мешающие параметры, в частности удельная электропроводность σ и ее девиация по поверхности основания и/или от изделия к изделию, вносят наибольший вклад в погрешность измерений [2]. При изменении σ возникает мультипликативное искажение результатов измерений, которое может быть компенсировано путем проведения калибровки. Компенсация искажения показаний будет наблюдаться в небольшом диапазоне T_p возле точки калибровки. Однако часто встречаются ситуации, в которых такой возможности нет, например:

- измерение толщины покрытия на полностью окрашенном изделии, на котором нет возможности снять покрытие с какого-нибудь участка поверхности для проведения калибровки;
- значение σ имеет существенную девиацию по поверхности основания изделия, обусловленную свойствами материала или температурными градиентами.

В этих случаях необходимо обеспечивать отстройку от влияния σ при проведении измерений.

Для автоматического учета σ при проведении измерений предлагается использовать амплитудно-фазовый вихретоковый преобразователь (АФВТП) [3] и алгоритм обработки двухмерной измерительной информации.

Для градуировки АФВТП используется набор из нескольких оснований с разным значением σ и производится построение двухмерной градуировочной характеристики, упрощенная графическая интерпретация которой приведена на рис. 1 в виде годографов на комплексной плоскости.

При проведении измерений с выхода АФВТП принимается сигнал (Re ; Im), пропорциональный вносимому напряжению. Для вычисления T_p и σ используется алгоритм определения причастности точки многоугольнику [4, с. 142—146], позволяющий определить ближайшие 4 точки, которыми образован четырехугольник, которому соответствует точка полученного с АФВТП сигнала. В случае, если градуировочная характеристика построена с шагом, соизмеримым с разрешающей способностью толщиномера, полученные результаты могут быть приняты как результат измерения T_p с учетом σ . Для обеспечения практической возможности такой градуировки предлагается использовать установку-имитатор толщины покрытия (рис. 2), которая в процессе градуировки с помощью линейной направляющей 1 и сервомотора 2, закрепленных на станине 3, перемещает градуировочное основание 4 относительно градуируемого АФВТП 5 с заданным шагом, имитируя тем самым необходимое количество мер T_p .

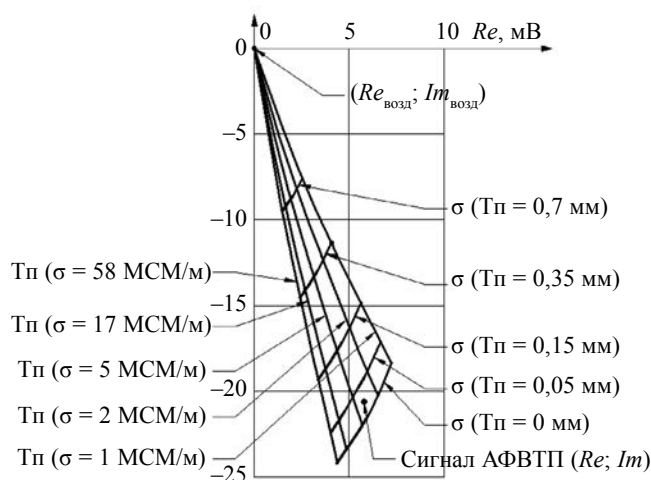


Рис. 1. Графическая интерпретация двухмерной градуировочной характеристики.

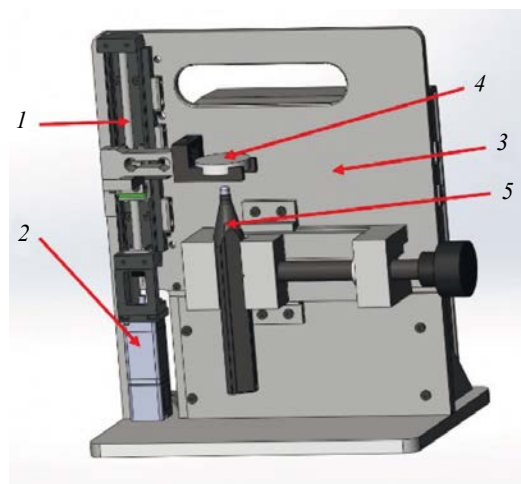


Рис. 2. Установка-имитатор толщины покрытия.

Линии градуировочной характеристики, полученные на разных образцовых основаниях, сходятся в одной точке — точке «воздуха» с координатами $(Re_{Air}; Im_{Air})$. При проведении измерений принимается сигнал, который имеет координаты $(Re; Im)$. Задачей алгоритма вычисления значения σ и T_p является определения причастности сигнала к соответствующему участку, ограниченному четырьмя линиями сетки. Подробное описание алгоритма приведено в [5].

Испытания описанного алгоритма проведены с использованием конечно-элементной модели. На первом этапе испытаний проведена градуировка модели АФВТП. Использовались значения σ , соответствующие реальным основаниям, применяемых для градуировки АФВТП: 0,6; 0,9; 2,1; 3,8; 5,3; 9,8; 14; 17; 26; 35; 41; 51 и 59 МСМ/м. T_p выбирались в окрестности испытательных значений. На втором этапе испытаний использовалась модель основания с равномерно изменяющимся в логарифмическом масштабе значением σ . Устанавливались следующие испытательные значения T_p : 0, 10, 100, 1000 мкм. Результаты испытаний в виде зависимости отклонения вычисленного значения T_p от значения σ в логарифмическом масштабе приведены на рис. 3.

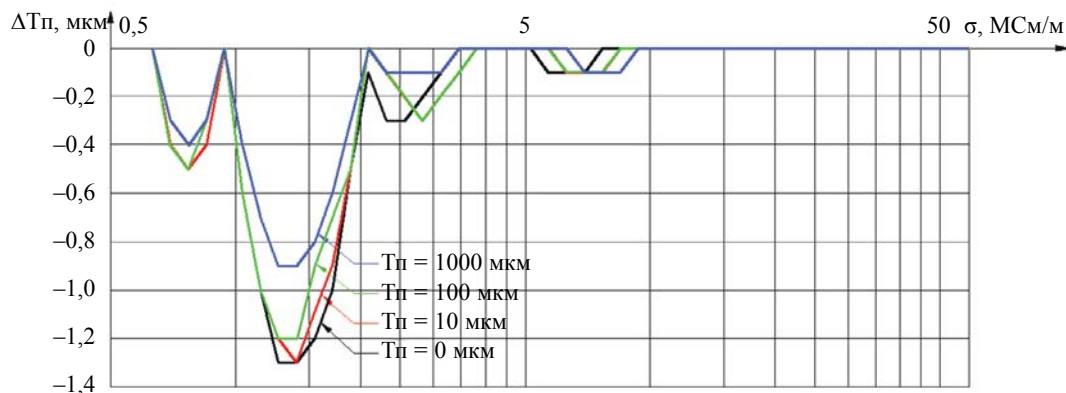


Рис. 3. Зависимость отклонения вычисленного значения T_p от значения σ .

Проведенные испытания алгоритма подтверждают ожидаемую составляющую часть погрешности измерений, обусловленную изменением σ при использовании описываемого алгоритма. Достигаемые значения погрешности соответствуют современным требованиям задач измерения толщины диэлектрических покрытий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р ИСО 2360—2021 Неэлектропроводящие покрытия на немагнитных электропроводящих металлических основаниях. Измерение толщины покрытия. Амплитудный вихретоковый метод.
 2. Сясько В.А. Измерение толщины неферромагнитных металлических покрытий на изделиях из цветных металлов с использованием вихретокового частотного метода // Дефектоскопия. 2010. № 12. С. 39—48. EDN NQVXWJ.
 3. Syasko V. Optimization of structure and operation algorithms for electromagnetic plated coatings thickness meters with the use of digital technologies / In proceedings of the BINDT/45th Annual British Conference on Non-Destructive Testing 2006, Shanghai, China, 25—28 October 2008.
 4. Ласло М. Вычислительная геометрия и компьютерная графика на C++. М.: БИНОМ, 1997. 304 с.
 5. Syasko M., Solomenchuk P., Soloviev I., Ampilova N.A. Technique for Multi-Parameter Signal Processing of an Eddy-Current Probe for Measuring the Thickness of Non-Conductive Coatings on Non-Magnetic Electrically Conductive Base Metals // Appl. Sci. 2023. V. 13. P. 5144. <https://doi.org/10.3390/app13085144>
-

МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ РЕЛЬСОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

© 2023 г. А.Л. Бобров¹, К.И. Гончаров²

¹ ФГБОУ ВО Сибирский государственный университет путей сообщения, Россия 630049 Новосибирск,
ул. Дуси Ковальчук, 191

²Новосибирский Региональный центр диагностики и мониторинга — Единый центр расшифровки,
Россия 630003 Новосибирск, ул. Владимировская, 2а
E-mail: *beaver@stu.ru; **fmklab@mail.ru

Поступила в редакцию 25.05.2023; после доработки 31.05.2023

Принята к публикации 02.06.2023

Рассмотрены фактор влияния температуры на чувствительность ультразвукового контроля и выявляемость эксплуатационных трещин в рельсах. Исследования показали, что чувствительность контроля и выявляемость дефектов существенно зависят от температуры объекта контроля и преобразователя, это обстоятельство необходимо учитывать для повышения надежности выявления реальных усталостных трещин.

Ключевые слова: рельсы, температура, угол ввода, ультразвуковой контроль, усталостная трещина, чувствительность.

DOI: 10.31857/S0130308223070072, **EDN:** DWWQWM

Наиболее развитыми и применяемыми для безопасной эксплуатации железнодорожного пути являются система, аппаратура и методики ультразвукового контроля [1, 2]. Эта система позволяет обеспечить круглогодичный периодический контроль рельсов и своевременное выявление развивающихся трещин и других дефектов эксплуатационного происхождения. На качество ультразвукового контроля влияет достаточно много факторов, связанных с чувствительностью применяемых способов к надежности акустического контакта, об этом влиянии регулярно проводятся исследования [3]. Однако известно [4, 5], что и условия контроля могут существенно влиять на получаемые результаты и приводить к снижению достоверности контроля в целом. Именно этой проблеме посвящены предлагаемые в данной работе результаты исследований, которые были начаты в работе [6]. Дополнительно известно, что трещины даже одного типа имеют разные размеры и ориентацию, что видно из статьи [7].

На основе представленных выше работ можно сделать вывод, что существует ненулевая вероятность ошибок первого и второго рода, возникающих из-за большого потока ультразвуковой информации. На возникновение таких ошибок оказывают влияние многие факторы. Большую часть из которых занимают первичные настраиваемые параметры, о влиянии которых отсутствуют устойчивые данные.

Целью работы является анализ колебаний чувствительности ультразвукового контроля рельсов в зависимости от ряда факторов, таких как колебания температуры, угол ввода и ориентация дефектов. Анализ проводился при контроле преобразователями с углами ввода от 50° и более в отношении дефектов в головке и шейке рельса.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- 1) определить сезонные колебания чувствительности каналов;
- 2) установить изменения значений основных параметров контроля при изменениях температуры;
- 3) оценить влияние колебаний основных параметров контроля на выявляемость реальных дефектов.

В данной работе использовали одноканальный ультразвуковой дефектоскоп УД2-102 и набор наклонных преобразователей с углами ввода 49—70°. Определение чувствительности проводилось на поверенных мерах типа СО-2 и СО-3Р. Настройка основных параметров каналов выполнялась стандартным способом на приведенных мерах. Углы ввода преобразователей были подобраны так, чтобы обеспечить данные для оценки чувствительности. Также измерения чувствительности проводили по уголкового отражателю «зарубку» с размерами 2,0×3,0 мм на образцах толщиной 20 и 24 мм.

Для исключения систематической погрешности в связи с технологией производства преобразователи были отобраны системы разных производителей и из разных партий. Определение условной чувствительности производилось в дБ по абсолютным значениям усиления дефектоскопа на цилиндрических отражателях диаметром 6 мм на глубине 44 мм. Угол ввода определен как

среднее значение с максимальным отклонением $\pm 1^\circ$, а время в призме преобразователя — среднее с максимальным отклонением $\pm 0,3$ мкс.

Измерения провели на 16 преобразователях, из полученных данных был выявлен существенный разброс в чувствительности на разных глубинах залегания отражателей. Это связано с различиями в их диаграммах направленности и в разнице конструкций.

Измерения параметров контроля при низких температурах проводили в зимний период вне помещений, а при повышенных температурах не более трех минут после нагрева преобразователей и мер в сушильном шкафу. Контроль температуры осуществлялся жидкостным термометром с ценой деления 1°C .

Реальные дефекты были определены в рельсах разными средствами дефектоскопии. Выбраны два типа трещин:

- в головке рельса, с кодом 21 (рис. 1а), в соответствии с действующим классификатором дефектов рельсов;
- в области перехода головки в шейку рельса, с кодом 33 (рис. 1б).

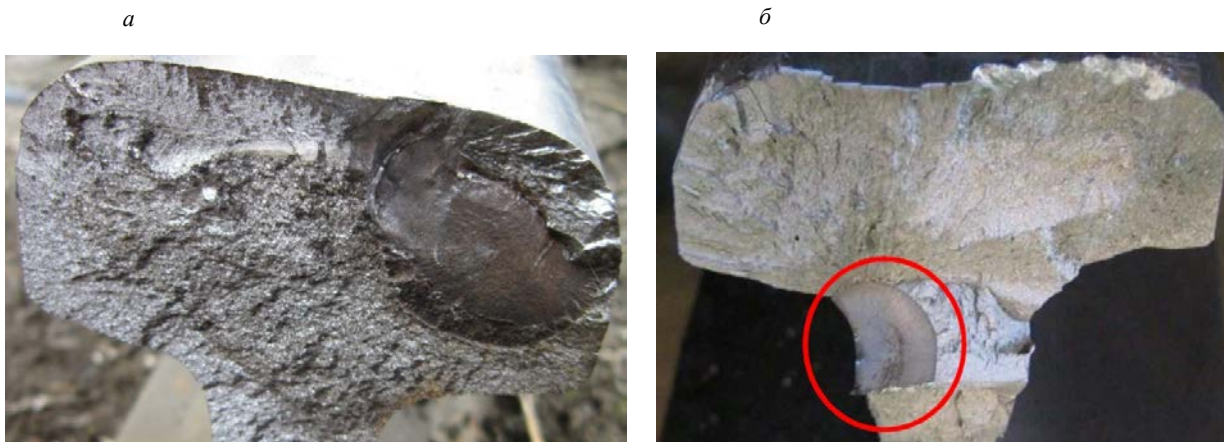


Рис. 1. Поперечные трещины в головке рельса (а) и трещины в переходе от головки к шейке (б).

Дефектам кода 33 присуще значительное колебание угла их пространственной ориентации. При измерении параметров сигналов, зарегистрированных от дефектов, фиксировался результат наибольшей чувствительности по ходу движения средств сплошной дефектоскопии или против.

При анализе результатов контроля разница коэффициентов выявляемости в режимах сплошного и ручного контроля колебалась от 1 до 18 дБ для разных дефектов. Это обуславливается различным пространственным положением развивающейся трещины, а также основных настраиваемых параметров контроля. На практике для повышения надежности контроля и выявления дефектов требуется:

- либо снижение порогового уровня фиксации дефектов до превышения уровня шумов на уровне 6 дБ;
- либо минимизировать потери чувствительности путем обеспечения максимального контакта преобразователей с поверхностью катания рельса.

На следующем этапе были проведены испытания при изменениях температуры, при этом проводился анализ изменения угла ввода преобразователя, абсолютное и относительное изменение чувствительности каналов контроля.

Из результатов, представленных на рис. 1, видно, что зависимость угла ввода от температуры практически линейная. При использовании преобразователей с большим углом ввода при изменении температуры угол меняется сильнее, для преобразователя с углом в 70° приращение угла превышает 1° на изменение температуры в 10°C .

Далее провели измерения чувствительности при изменениях температуры, для исключения влияния контактной среды использовался один и тот же раствор. Были использованы преобразователи с углом ввода 42, 45, 55, 58 и 70° . На рис. 2 представлены результаты влияния температуры на чувствительность. Из рис. 2а видно, что при колебаниях температуры значение условной чувствительности изменяется от нормированного значения при нормальных температурных условиях по

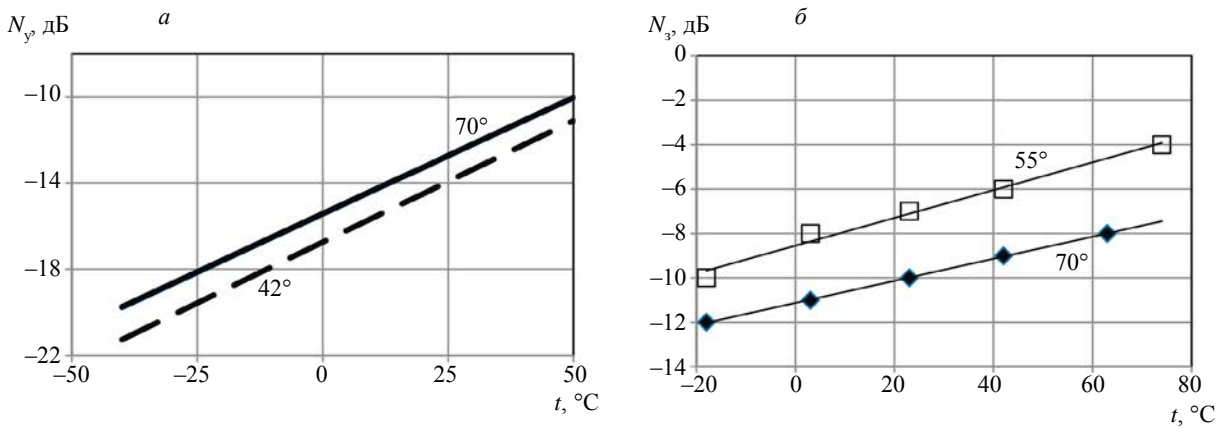


Рис. 2. Влияние температуры окружающей среды на чувствительность ультразвукового контроля: *a* — условной N_y для преобразователей с углом ввода 42 и 70°; *б* — предельной N_z по зарубеж размерами 2×2,5 мм для преобразователей с углом ввода 55 и 70°.

линейному закону. Для остальных углов ввода зависимости практически совпадают. При этом для всех углов ввода колебания абсолютного значения условной чувствительности имеет одинаковую зависимость.

Рис. 2б показывает, что и относительная чувствительность к вертикально расположенному уголкового отражателю для преобразователей с изменением температуры также изменяется. Хотя и разница в пределах температур окружающей среды невелика, но в совокупности с влиянием других факторов это может оказывать достаточное для ошибки второго рода на ранней стадии развития дефектов.

Проведен анализ чувствительности на реальных дефектах для преобразователей с различными углами ввода от 49 до 70° в ручном режиме контроля.

Результаты были разделены на две группы (рис. 3). Первая группа дефектов представлена на рис. 3а. Данные дефекты представлены дефектами группы кода 21 и 33, среди них отсутствует явная связь между углом ввода и коэффициентом выявляемости. Это связано с конструктивными особенностями и различием диаграмм направленности преобразователей.

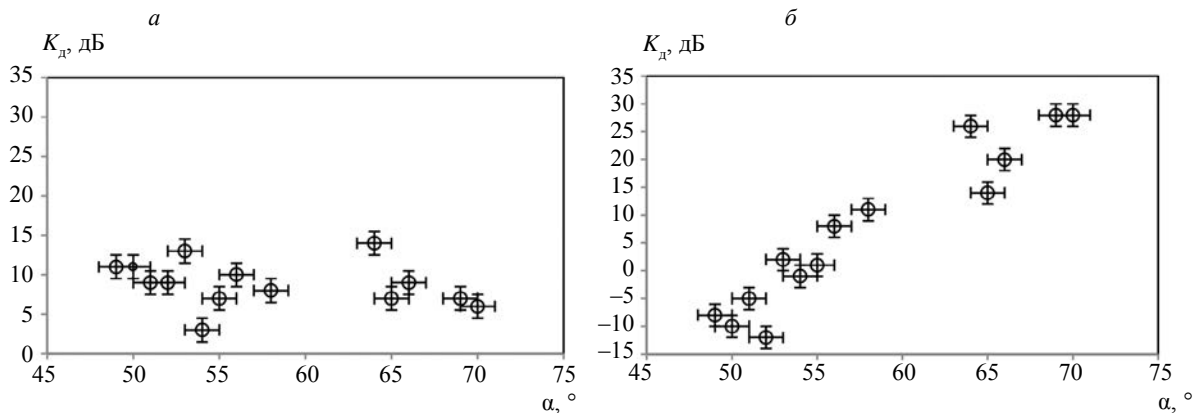


Рис. 3. Влияние угла ввода на коэффициент выявляемости для дефекта кода 21 № 2 (*a*) и дефектов кода 33 № 1 (*б*).

Меньшая часть дефектов, наоборот, характеризуется явной зависимостью коэффициента выявляемости от угла ввода (рис. 3б). Это, очевидно, дефекты, которые имеют явно выраженную направленность диаграммы отражения излучения. Для их надежного выявления необходимо использовать преобразователь с углом ввода, близким к углу нормали максимальной направленности отражения.

ВЫВОДЫ

Для повышения надежности выявления развивающихся усталостных трещин в рельсах ультразвуковыми методами целесообразны следующие мероприятия:

- проводить контроль на максимальном уровне чувствительности и ввести трехступенчатый уровень предварительной оценки при расшифровке в зависимости от максимальной амплитуды потенциально опасных отражателей;
- ввести функцию временной регулировки чувствительности;
- формировать сезонные комплекты блоков наклонных преобразователей, позволяющие максимально точно воспроизводить номинальные значения углов ввода каналов сплошного контроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марков А.А., Максимова Е.А. Проблемы высокоскоростной дефектоскопии рельсов // Контроль. Диагностика. 2021. Т. 24. № 9 (279). С. 16—25.
2. Марков А.А., Иванов Г.А. Исследование способа обнаружения продольных трещин в головке рельса // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2019. Т. 22. № 4. С. 46—56.
3. Гончар А.В., Мишакин В.В., Сергеева О.А. Влияние температуры на результаты ультразвукового контроля с использованием фазированной решетки // Вестник научно-технического развития. 2019. № 10 (146). С. 10—15.
4. Марков А.А., Максимова Е.А., Антипов А.Г. Динамическая коррекция чувствительности дефектоскопических каналов при высокоскоростном контроле рельсов // Дефектоскопия. 2021. № 12. С. 3—14.
5. Марков А.А., Максимова Е.А. Анализ эффективности ультразвуковых и магнитных каналов дефектоскопических комплексов при контроле рельсов // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2019. Т. 22. № 2. С. 22—32.
6. Кунина П.С. и др. Настройка чувствительности ультразвукового дефектоскопа для контроля оборудования, заполненного транспортируемой или хранимой средой // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2018. № 9. С. 49—54.
7. Шур Е.А., Борц А.Е., Сухов А.В. и др. Эволюция повреждаемости рельсов дефектами контактной усталости // Вестник ВНИИЖТ. 2015. № 3. С. 3—9.

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ОПТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

© 2023 г. М.Ю. Федотов^{1,2}

¹Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения РАН, Россия 630090 Новосибирск,
пр-т Академика Коптюга, 1

²Российская инженерная академия, Россия 125009 Москва, Газетный пер., 9, стр. 4
E-mail: *fedotovmyu@gmail.com

Поступила в редакцию 26.05.2023; после доработки 26.05.2023

Принята к публикации 09.06.2023

Рассмотрены практические аспекты создания эффективной волоконно-оптической системы мониторинга несущих конструкций инженерных сооружений, эксплуатирующихся в условиях Крайнего Севера. С учетом реальных условий эксплуатации на реальном объекте разработана конструкция измерительного устройства, в качестве чувствительных элементов волоконно-оптических датчиков деформации и термокомпенсатора использовались волоконные брэгговские решетки. С учетом конструктивных параметров исследуемого свайного фундамента разработана пространственная топология и схема коммутации измерительных устройств, запущен процесс мониторинга. Показано, что разработанная система является эффективным инструментом контроля напряженно-деформированного состояния объекта мониторинга в режиме онлайн.

Ключевые слова: свайный фундамент, волоконно-оптический датчик, волоконная брэгговская решетка, измерительное устройство, мониторинг, Крайний Север.

DOI: 10.31857/S0130308223070084, **EDN:** DXITTV

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуальным вопросом является обеспечение безопасности эксплуатации инженерных сооружений в районах Крайнего Севера. Дополнительный импульс к активизации работ в этом направлении придала экологическая катастрофа, связанная с разливом топлива в 2020 г. на одном из промышленных объектов в Норильском районе [1]. Одним из наиболее перспективных методов непрерывного неразрушающего контроля (НК) — мониторинга, является оптический метод, связанный с применением волоконно-оптических датчиков (ВОД), например, на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР), позволяющий с учетом характеристик конкретного опросного оборудования осуществлять контроль деформаций с учетом термокомпенсации несущих конструкций инженерных сооружений, таких как, например, свайные фундаменты (СФ). Необходимость разработки и внедрения подобных систем на реальных объектах обусловлена как высокой степенью их износа ввиду постоянного воздействия агрессивных внешних факторов, так и проблемой растепления грунтов [2—4]. Вместе с тем применение классических методов НК (акустические, тепловые и др.) [5, 6] эффективно на этапе проведения регламентных и периодических работ для оценки качества и выявления критичных дефектов [7, 8].

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проведения экспериментальных исследований по оценке фактического состояния СФ с помощью волоконно-оптической системы мониторинга (ВОСМ) с целью дальнейшего прогнозирования его состояния был выбран объект мониторинга (ОМ) — здание насосной станции, эксплуатируемой в Норильском районе.

Экспериментальные исследования проводились по следующей методике:

– в соответствии с действующей нормативной базой проводилось обследование СФ с целью выбора конфигурации и оценки возможности установки ВОСМ;

– исходя из геометрических параметров СФ, состоящего из 30 свай, разрабатывались конструкции измерительных устройств (ИУ) для установки на ОМ, выбиралось коммерчески доступное устройство опроса (УО) ВОД в составе ИУ;

– разрабатывалась пространственная топология и схема коммутации ИУ (разбивка по параллельным каналам УО) на ОМ, осуществлялся монтаж и коммутация ИУ на ОМ, запускался процесс мониторинга и проводилась оценка результатов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты обследования ОМ (рис. 1а) показали возможность установки ИУ на сваи, имеющие высоты надземной части более 700 мм, с помощью анкерного крепления. С учетом этого обстоятельства были разработаны 2 варианта конструкции ИУ (рис. 1б) разной длины (700 и 1000 мм) на основе металлической подложки (шестигранник из прутка калиброванного по ГОСТ 10702 из стали 30ХГСА) с установленными на них ВОД деформации ASTRO A521 (2 шт.) и термокомпенсатором (ТК) на основе ВОД температуры ASTRO A512, для опроса которых было выбрано восьмиканальное УО ASTRO A313 производства ООО «Инверсия-Сенсор», г. Пермь (рис. 1в).

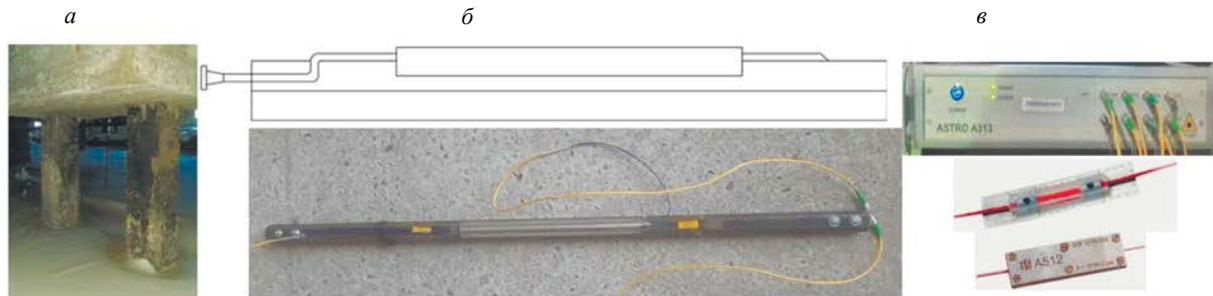


Рис. 1. Элементы ОМ и ВОСМ: ОМ (а); конструкция ИУ (б); УО, ВОД (в).

При проектировании ИУ также рассматривалась возможность изготовления подложек из углепластика и стеклопластика, однако ввиду сжатости сроков выполнения проекта и недостаточности информации о влиянии условий эксплуатации ОМ на свойства данных материалов было принято решение остановиться на серийно изготавливаемых металлических подложках [9]. С учетом фактической возможности установки ИУ была разработана пространственная топология, предполагающая установку 30 ИУ на 19 свай, а также схема коммутации из расчета 8 опросных каналов УО с учетом диапазона резонансных длин ВБР от 1510 до 1580 нм со спектральным шагом 8 нм [10].

Далее проводился мониторинг деформации СФ, экспериментальные данные по каждой свае обрабатывались по следующей методике: определялось минимальное (ϵ_{\min}), максимальное (ϵ_{\max}), среднее (ϵ_{cp}) и размах ($\Delta\epsilon = \epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}$) значений относительной деформации с учетом термокомпенсации за период (например, за месяц), среднеквадратическое отклонение (СКО) ($S_{n-1, \epsilon}$) и коэффициент вариации (CV_{ϵ}). В табл. 1 и на рис. 2 представлены результаты экспериментальных исследований изменения относительной деформации сваи № 20 ОМ за месяц (15.11.2022 г. — 14.12.2022 г.).

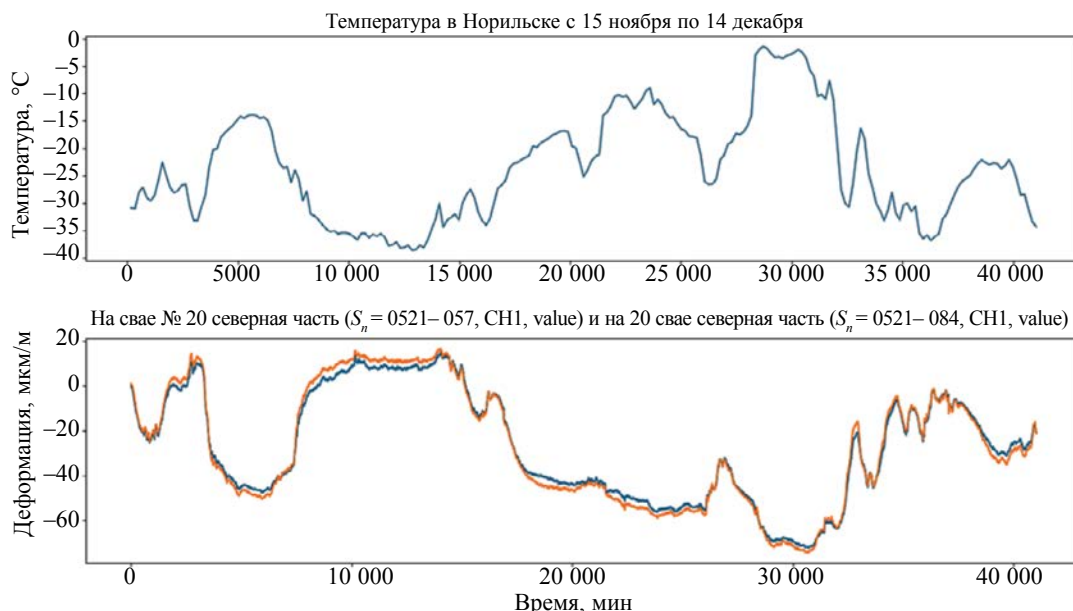


Рис. 2. Результаты мониторинга на свае № 20 ОМ (15.11.2022 — 14.12.2022).

Таблица 1

Статистика изменения деформации сваи № 20 за месяц

$\bar{\varepsilon}_{\text{мес}}$, МКМ/М	$\varepsilon_{\text{max мес}}$, МКМ/М	$\varepsilon_{\text{min мес}}$, МКМ/М	$\Delta\varepsilon_{\text{мес}}$, МКМ/М	$S_{n-1, \varepsilon \text{ мес}}$, МКМ/М	$CV_{\varepsilon \text{ мес}}$, %
476,235	520,942	428,38	92,5618	25,9829	5,45589

ВЫВОДЫ

Полученные экспериментальные результаты исследований свидетельствуют о том, что за указанный период времени наблюдается незначительное изменение деформаций сваи № 20 (не более 80 мкм/м) при колебаниях температуры от 0 до -38 °С. Похожая ситуация наблюдалась и на других сваях. Стоит отметить, что в целом ВОСМ работает в штатном режиме, данные поступают, обрабатываются и визуализируются в режиме реального времени. Стоит подчеркнуть, что процесс мониторинга с соответствующим анализом поступающих данных целесообразно проводить в течение более длительного временного интервала (полгода и больше) для определения граничных условий, характеризующихся пороговыми значениями измеряемых параметров, при которых будет наблюдаться существенно изменение несущей способности конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сазонов А.Д., Комаров Р.С., Передера О.С. Разлив нефтепродуктов в Норильске 29 мая 2020 года: предполагаемые причины и возможные экологические последствия // Экология. Экономика. Информатика. Сер.: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 2020. Т. 1. № 5. С. 173—177. DOI: 10.23885/2500-395x-2020-1-5-173-177
2. Порошина С.С. Растепление вечномёрзлых грунтов под зданиями в Норильске // Градостроительство и архитектура. 2018. Т. 8. № 2 (31). С. 65—70. DOI: 10.17673/Vestnik.2018.02.11
3. Пахомов П.С. Исторический опыт геологического исследования и строительства фундаментов на примере города Норильск // Архитектура и дизайн. 2021. № 2. С. 12—19. DOI: 10.7256/2585-7789.2021.2.38153
4. Томилов С.Н., Сим А.Д., Гринев П.Е. Проблема просадок мостовых опор в условиях деградации многолетнемерзлого основания и возможность ее решения // Транспортные сооружения. 2020. Т. 7. № 3. С. 2. DOI: 10.15862/02SATS320
5. Гриценко А.А., Федин К.В., Громыко П.В. Динамический мониторинг свайных сооружений на примере Дворца культуры г. Норильска // Процессы в геосредах. 2022. № 3 (33). С. 1734—1742.
6. Снежков Д.Ю., Леонович С.Н., Будревич Н.А. Методика испытаний буронабивных свай сейсмоакустическим и ультразвуковым методами // Бетон и железобетон. 2022. № 2 (610). С. 20—24. DOI: 10.31659/0005-9889-2022-610-2-20-24
7. Снежков Д.Ю., Леонович С.Н., Будревич Н.А., Мiao J. Оценка качества буронабивных свай сейсмоакустическим и межскважинным ультразвуковым методами // Бетон и железобетон. 2022. № 4—5 (612—613). С. 52—59. DOI: 10.31659/0005-9889-2022-612-613-4-5-52-59
8. Чуркин А.А., Лозовский И.Н., Фролов В.Э., Бровиков Ю.Н. Комплексное исследование качества буронабивных свай на опытной площадке с использованием методов неразрушающего контроля // Геотехника. 2018. Т. 10. № 5—6. С. 72—83.
9. Ларин А.А., Федотов М.Ю. Исследование конструктивных параметров измерительных устройств для волоконно-оптической системы мониторинга свайных фундаментов в условиях Крайнего Севера // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 1. С. 43—50. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.01.43-50
10. Федотов М.Ю., Ларин А.А. Особенности формирования пространственной топологии волоконно-оптической системы мониторинга свайных фундаментов в условиях Крайнего Севера // Контроль. Диагностика. 2023. Т. 26. № 2. С. 42—51. DOI: 10.14489/td.2023.02.pp.042-051

ВЛИЯНИЕ МЕШАЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ КОНТРОЛЯ СПЛОШНОСТИ ПОКРЫТИЙ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫМ МЕТОДОМ

© 2023 г. И.С. Гнивуш^{1,2,*}, В.А. Сясько^{1,2,**}, А.С. Мусихин^{2,***}

¹Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Россия 199106
Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2

²ООО “КОНСТАНТА”, Россия 198097 Санкт-Петербург, Огородный пер., 21
E-mail: *kin4_g@mail.ru; **9334343@gmail.com; ***musihinaleksei@mail.ru

Поступила в редакцию 26.05.2023; после доработки 26.05.2023
Принята к публикации 09.06.2023

Приводится анализ влияния шероховатости поверхности электропроводящего основания и частичных разрядов на процесс контроля диэлектрических покрытий электроискровым методом. Результаты моделирования и полученные зависимости позволили сформулировать предложения в части режимов работы оборудования и принципов фиксации тока разряда, уменьшающие их влияния на достоверность контроля.

Ключевые слова: контроль сплошности, лакокрасочные покрытия, шероховатость поверхности, частичные разряды, электроискровой контроль.

DOI: 10.31857/S0130308223070096, EDN: DXRNVL

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость защиты от атмосферного коррозионного воздействия изделий из черных металлов создает потребность в нанесении лакокрасочных покрытий на их поверхность [1]. Однако в случае нарушения технологии нанесения покрытий и правил эксплуатации изделий в покрытиях могут образовываться трещины, поры, царапины и т.д. Учитывая малую толщину лакокрасочных покрытий, на результаты электроискрового контроля могут влиять параметры песко- или дробеструйной обработки поверхности основания и возможное наличие воздушного зазора между электродом и покрытием при контроле.

ВЛИЯНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ОСНОВАНИЯ НА ПРОБИВНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ

Металлическое основание, прошедшее песко- или дробеструйную обработку, при электроискровом контроле следует рассматривать не как плоскость, а как последовательность выступов и впадин, приводящих к локальной неоднородности электрического поля и уменьшению величины пробивного напряжения покрытия в районе выступов.

Для детального рассмотрения влияния шероховатости на распределение электрического поля проведено моделирование в программе Ansys Electronics Desktop. В качестве примера приведены картины распределения напряженности электрического поля в системе двух электродов для разности потенциалов 10 кВ между скругленным электродом-стержнем и заземленной подложкой с регулятивной шероховатостью R_z (рис. 1). Моделирование проводилось для двух значений шероховатости: $R_z = 10$ мкм, $R_z = 100$ мкм.

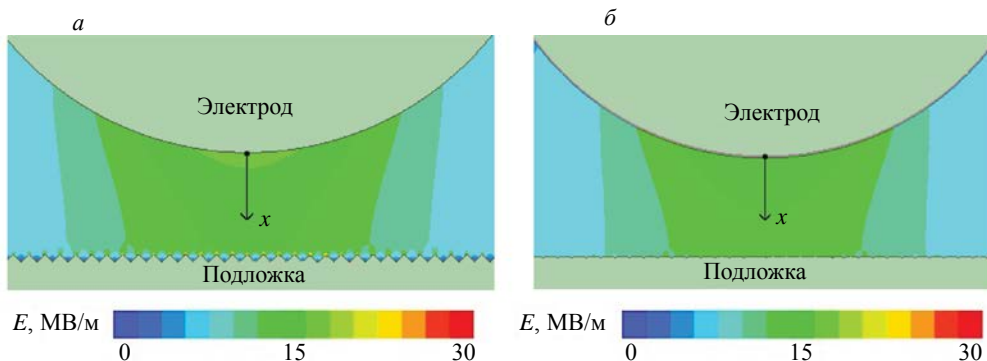


Рис. 1. Распределение напряженности электрического поля в случае:
а — $R_z = 100$ мкм; б — $R_z = 10$ мкм.

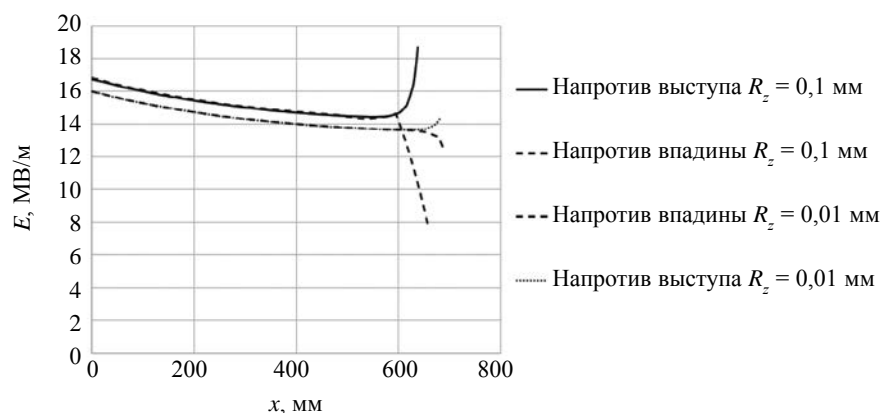


Рис. 2. Зависимость напряженности электрического поля от координаты на оси электрода-стержня для разных значений R_z и отличающихся положений электрода относительно подложки.

Исходя из картин напряженности, были построены зависимости напряженности электрического поля от координаты x на оси электрода-стержня (рис. 2).

Из рис. 1 и 2 видно, что около выступа шероховатой поверхности образуется область с высокой напряженностью электрического поля. Разряд возникнет в момент прохождения электрода над выступом за счет уменьшения межэлектродного расстояния и увеличения неоднородности поля. Электрический пробой начнется со стороны подложки, т.е. при изменении полярности испытательного напряжения разряд начнется при меньшей величине пробивного напряжения.

ВЛИЯНИЕ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ НА ПРОЦЕСС КОНТРОЛЯ СПЛОШНОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

В ситуации, когда между испытательным электродом и поверхностью покрытия образуется воздушный зазор (например, в случае волнистой поверхности контролируемого изделия), напряженность электрического поля в нем будет выше напряженности поля в диэлектрическом покрытии. Это может привести к образованию частичных разрядов, перекрывают только часть межэлектродного промежутка [2]. Эти разряды не свидетельствуют о дефекте, однако ток частичного разряда может быть ошибочно принят за ток полного разряда.

На рис. 3 представлена картина фронта импульса испытательного напряжения (измерительный канал CH1 — синим) и импульсов падения напряжения на измерительном резисторе, которые вызваны током частичного разряда (измерительный канал CH2 — красным).

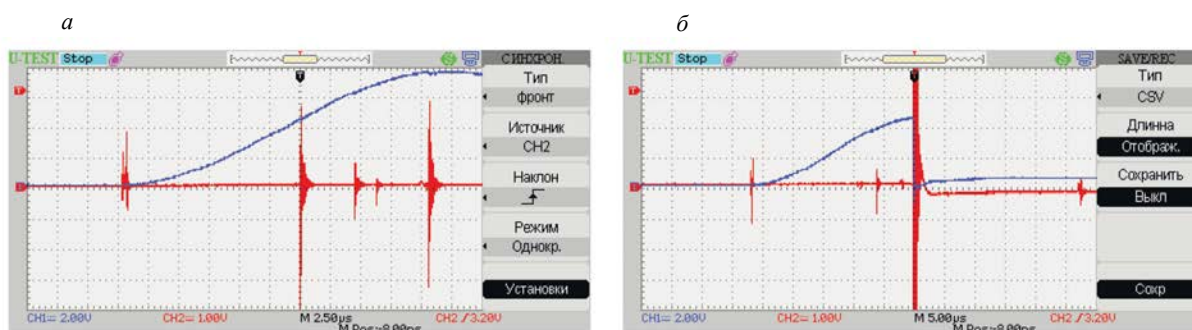


Рис. 3. Осциллограммы импульсов испытательного напряжения и частичных разрядов:
 а — без полного разряда; б — при полном разряде.

Как можно заметить, амплитуда импульса частичного разряда меньше амплитуды полного разряда. Отсюда можно сделать вывод, что необходимо выполнять фильтрацию полных разрядов посредством измерения параметров импульсов.

ВЫВОДЫ

Полученные в работе результаты компьютерного моделирования распределения напряженности электрического поля в сквозных дефектах покрытий с основаниями различной шероховатости позволяют сделать вывод о влиянии шероховатости основания на контрольное напряжение электроискрового метода и возможности его уменьшения при подаче переменного потенциала на контролирующий электрод, что в свою очередь способствует снижению требований к используемому оборудованию в части автономности и нагрузочной способности.

Кроме того, основываясь на результатах экспериментального анализа параметров частичных разрядов, представленного в работе, можно утверждать, что измерение амплитуды и длительности импульса испытательного напряжения в процессе проведения контроля позволит повысить достоверность электроискрового контроля за счет исключения ложноположительных результатов возникающих при образовании частичных разрядов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Киселев В.Г., Рузич Е.Н.* Диэлектрические покрытия и их влияние на защиту от коррозии наружной поверхности подземных трубопроводов // Проблемы энергетики. 2018. № 1. С. 80—89.
2. *Редько В.В., Старикова Н.С.* Выявляемость дефектов изоляции кабельных изделий при испытаниях высоким напряжением // Контроль. Диагностика. 2014. № 12. С. 69—73.

МОСКВА
ЦВК ЭКСПОЦЕНТР

23-25 ОКТЯБРЯ 2023

X МЕЖДУНАРОДНЫЙ
ПРОМЫШЛЕННЫЙ ФОРУМ

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ
ИСПЫТАНИЯ · ДИАГНОСТИКА



Уважаемые коллеги!

Российское общество по неразрушающему контролю и технической диагностике приглашает Вас принять участие в

X Международном промышленном форуме Территория NDT 2023. Неразрушающий контроль. Испытания. Диагностика

С 10% скидкой до 30 июня!

Партнеры РОНКТД освобождены от регистрационного взноса

В 2023 году X Международный промышленный Форум «Территория NDT. Неразрушающий контроль. Испытания. Диагностика» традиционно пройдет 23—25 октября 2023 г. в рамках Российской промышленной недели, которая объединит ключевые отраслевые выставки: **ФОРУМ ТЕРРИТОРИЯ NDT, ТЕХНОФОРУМ, RUSWELD.**

Российская Промышленная Неделя 2023 объединит более **500 компаний-участников** на выставочной площади **свыше 32 000 тыс. кв.м.**

ВСЕ ЛИДЕРЫ РЫНКА НА ОДНОЙ ПЛОЩАДКЕ.

Более 40 разработчиков технологий, производителей оборудования и сервисных компаний: Акустические Контрольные Системы, Ассоциация ВАСТ, ИСТС Инфотех АЦГП, ИжГТУ им. М.Т. Калашникова, ИНТЕРЮНИС-ИТ, ИНТРОН ПЛЮС, Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения РАН, КОНСТАНТА, Мелитэк, НИИИИ МНПО СПЕКТР, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, НИКИМТ-АТОМСТРОЙ, НУЦ Контроль и диагностика, НИТИЦ Севмаш, НПО Алькор, НИПК ЭЛЕКТРОН, НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко, НПЦ Спектр-АТ, НПЦ ЭХО+, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, НИИТФА, ТЕССОНИКС, Университет ИТМО, УрФУ имени Б.Н. Ельцина, ФАУ ЦАГИ, и другие.

В 2023 году Форум пройдет одновременно с **XXIII Всероссийской научно-технической конференцией по неразрушающему контролю и технической диагностике**. Конференция посвящена «умным» технологиям НК в свете единства теории и практики. С докладами выступают приглашенные лекторы из национальных обществ по НК, ведущих отраслевых научно-исследовательских институтов, государственных корпораций и министерств, производители оборудования и технологий, которые расскажут о задачах, проблемах и достижениях, путях развития систем и методов НК, МС и ТД, затронут общие вопросы обеспечения безопасности.



Экспоненты выставки смогут принять участие и посетить Конференцию бесплатно.

Форум «Территория NDT 2023» привлечет более **3000** посетителей, **60+** компаний-участников, **17+** мероприятий деловой программы.

**Ждем Вас 23—25 октября 2023 года в Москве, ЦВК Экспоцентр, павильон 2.4.
Успейте забронировать стенд по выгодной цене!**

По всем вопросам участия обращаться в **Дирекцию РОНКТД:**

info@ronktd.ru

+7 499 245 56 56

+7 916 619 00 17

expo.ronktd.ru