



ISSN 0130-3082

Российская Академия наук

Дефектоскопия



Неразрушающий контроль

Техническая диагностика

Анализ материалов

№ 2

2024



ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Журнал ежемесячный
Основан в феврале 1965 года
Екатеринбург

№ 2
2024

СОДЕРЖАНИЕ

Акустические методы

Д.А. Дерусова, В.П. Вавилов, В.О. Нехорошев, В.Ю. Шпильной, Д.А. Зуза, Е.Н. Колобова. Исследование газоразрядного электроакустического преобразователя и его применение в задачах неразрушающего контроля.....	3
Абхишек Кумар, Суреш Перияннан. Экспериментальное исследование распространения ультразвуковых волн при контроле уровня жидкости датчиком с длинным волноводом	17
Цюйюэ Ли, Юшу Лай, Дифэй Цао. Исследование шумоподавления сигналов электромагнитно-акустической эмиссии для неразрушающего контроля сплавов: метод кроссрекуррентного количественного анализа.....	30

Неразрушающий контроль проникающими веществами

Н.В. Деленковский, А.Б. Гнусин. Контрольные образцы для капиллярной дефектоскопии	43
---	----

Общие вопросы дефектоскопии

В.В. Муравьев, Л.В. Волкова, О.В. Муравьева, С.А. Мурашов. Анализ результатов тестирования и качества тестов при сертификации специалистов по неразрушающему контролю	49
А.И. Солдатов, А.А. Солдатов, М.А. Костина. Современные тренды применения термоэлектрического метода в неразрушающем контроле (обзор)	64
Информация	84

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОРАЗРЯДНОГО ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В ЗАДАЧАХ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

© 2024 г. Д.А. Дерусова^{1,*}, В.П. Вавилов^{1,**}, В.О. Нехорошев^{2,***}, В.Ю. Шпильной^{1,****},
Д.А. Зуза^{2,*****}, Е.Н. Колобова^{1,*****}

¹Томский политехнический университет, Россия 634028 Томск, ул. Савиных, 7

²Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия 634055 Томск, пр-т Академический, 2/3

E-mail: *red@tpu.ru; **vavilov@tpu.ru; ***nvo@lnp.hcei.tsc.ru;

****vshpilnoy@list.ru; *****zzdnl@yandex.ru; *****ekaterina_kolobova@mail.ru

Поступила в редакцию 30.11.2023; после доработки 15.12.2023

Принята к публикации 22.12.2023

Представлены результаты исследования газоразрядного электроакустического преобразователя (ГЭАП), функционирующего на основе импульсного разряда в воздухе при атмосферном давлении. Путем измерения уровня звукового давления и регистрации амплитудно-частотного спектра колебаний мембраны получена акустическая характеристика ГЭАП в диапазоне частот от 40 Гц до 4 МГц. Изучены электротермоакустические процессы, протекающие в газоразрядной системе «открытого типа», т.е. в случае, когда объем электродной системы сообщается с внешней средой. Выявлены особенности, характерные для подобных ГЭАП, в частности возникающие при их применении в задачах неразрушающего контроля. Показано, что износ электродов и изоляции, с одной стороны, ограничивает ресурс электродной системы преобразователя, а с другой стороны, приводит к напылению микрочастиц на поверхность тестового объекта. Количественно определена скорость износа элементов электродной системы. Приведены результаты химического анализа микрочастиц, выделившихся из объекта в ходе функционирования ГЭАП. Показана возможность применения ГЭАП для бесконтактного возбуждения локальных резонансных колебаний дефектов в композиционных материалах на примере неразрушающего контроля стеклопластикового композита с применением сканирующей лазерной доплеровской виброметрии.

Ключевые слова: акустика, ультразвук, лазерная виброметрия, дефектоскопия, искровой разряд, термоакустический эффект, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия.

ANALYSIS AND NDT APPLICATIONS OF A GAS DISCHARGE ELECTROACOUSTIC TRANSDUCER

D.A. Derusova^{1,*}, V.P. Vavilov^{1,**}, V.O. Nekhoroshev^{2,***}, V.Yu. Shpil'noy^{1,****}, D.A. Zyza^{2,*****},
E.N. Kolobova^{1,*****}

¹Tomsk Polytechnic University, Russia 634028, Tomsk, st. Savinykh, 7

²Institute of High Current Electronics SB RAS, Russia 634055, Tomsk, Akademicheskoy Ave., 2/3

E-mail: *red@tpu.ru; **vavilov@tpu.ru; ***nvo@lnp.hcei.tsc.ru;

****vshpilnoy@list.ru; *****zzdnl@yandex.ru; *****ekaterina_kolobova@mail.ru

In this study, a gas discharge electroacoustic transducer (GDEAT) based on a pulsed electric discharge in the air under atmospheric pressure has been investigated. By evaluating acoustic pressure and recording amplitude-frequency characteristics of membranes, the acoustic characteristic of GDEATs have been obtained in the frequency range from 40 Hz to 4 MHz. The electro-thermo-acoustic processes have been studied in gas discharge systems of an open type where the electrode space is in a direct contact with the ambient. Some features of using the above-mentioned GDEATs in nondestructive testing (NDT) of materials have been demonstrated. It has been shown that, on one hand, the wear of both electrodes and insulation limits a work life of a transducer electrode system, but, from the other hand, this may lead to deposition of micro-particles on the surface of an object under test. The wear of electrode systems was evaluated quantitatively, and the results of the chemical analysis of deposited micro-particles have been presented. The use of a GDEATs for non-contact stimulation of local resonant vibrations in subsurface defects and visualizing vibrations by means of laser dopler vibrometry has been shown in the case of NDT of a glass fiber composite.

Keywords: acoustics, ultrasound, laser vibrometry, defect evaluation, spark discharge, thermoacoustic effect, X-ray photoelectron spectroscopy.

DOI: 10.31857/S0130308224020015

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие промышленного производства конструкционных материалов определяет актуальность контроля их качества с целью обнаружения производственных и эксплуатационных дефектов. Особое внимание уделяют разработке перспективных методов неразрушающего контроля (НК) изделий авиакосмической [1, 2], атомной [3, 4] и металлургической [5] промышленности, включая испытания композиционных материалов, металлов и сплавов. В ряде случаев результаты НК имеют решающее значение для принятия решения о дальнейшей эксплуатации изделий [4—8]. Следует заметить, что контроль тонких, гидрофильных и слоистых структур, а также изделий сложной геометрии, представляет определенные трудности, в связи с чем необходимо разработать новые и усовершенствовать известные виды контроля качества.

Одним из сравнительно новых методов неразрушающих испытаний материалов является сканирующая лазерная доплеровская виброметрия [8—14]. Суть метода заключается в широкополосной акустической стимуляции объектов с целью определения резонансного отклика в области дефектов путем регистрации колебаний на поверхности изделий с использованием сканирующего лазерного виброметра [12—16]. Основным преимуществом метода является возможность проведения исследований без прямого контакта с контролируемым объектом, что позволяет с высокой точностью измерять вибрации на расстоянии до нескольких десятков метров [12], а также исследовать объекты, находящиеся под напряжением, под воздействием высоких температур, в вакуумных камерах и в жидкостях [14, 15]. В последние годы лазерная виброметрия находит все более широкое применение в НК современных конструкционных материалов [15], а также используется для исследования сопутствующего оборудования, в частности акустических излучателей [10, 16—22].

Традиционными типами акустических излучателей, применяемых для возбуждения упругих колебаний при проведении НК, являются пьезоэлектрические [17, 20] и магнитострикционные преобразователи, широко используемые в коммерческих диагностических системах [23]. Ввиду существенного различия акустического импеданса воздушной среды и исследуемых материалов, для эффективной передачи ультразвука, как правило, используют иммерсионные среды. На практике это усложняет техническое исполнение устройств, увеличивает стоимость и длительность процедуры диагностики и ограничивает номенклатуру материалов и изделий, подлежащих контролю качества. Более того, после проведения дефектоскопии изделий с использованием соединительной среды необходима дальнейшая обработка их поверхности с удалением иммерсионной жидкости.

Появление так называемых воздушносвязанных ультразвуковых (у.з.) систем привело к разработке новых способов контроля [24—28]. Общей особенностью бесконтактных систем возбуждения является исключение влияния присоединенной массы и отсутствие необходимости использовать иммерсионный слой для ввода акустического сигнала в исследуемый объект [27—29]. Постоянно совершенствуются имеющиеся технологии и предлагаются новые акустические преобразователи, различающиеся по принципу действия [10, 28, 24—32]. Например, в работах [33, 34] для НК композитов использовали воздушносвязанный магнитострикционный преобразователь, потребляемая электрическая мощность которого составляла 1 кВт. Важно отметить, что магнитострикционные излучатели являются резонансными и работают на фиксированной частоте ультразвука. В связи с этим при проведении НК необходимо исключать совпадение частоты стимулирующих у.з. волн с собственными резонансными частотами элементов конструкции объекта.

Воздушносвязанные излучатели пьезоэлектрического типа также имеют ряд ограничений. Например, в работах [35, 36] показано, что совместное использование лазерного вибросканирования и бесконтактной стимуляции материалов с помощью пьезопреобразователей для контроля многокомпонентных дефектов затруднительно. Пьезоэлектрические преобразователи имеют ограничение по амплитуде приложенного электрического напряжения и, следовательно, по излучаемой мощности. Помимо этого, они характеризуются относительно узким диапазоном рабочих частот, и резонансная частота пьезоэлектрического преобразователя зависит от его размера. Указанные особенности ограничивают применение бесконтактных пьезопреобразователей для контроля слоистых композитов [37—40].

В работе [41] было предложено возбуждать акустические волны с помощью импульсного электрического разряда, который вызывает быстрые изменения давления в окружающей среде. Быстрый рост температуры, сопровождающийся расширением области плазмы газового разряда, вызывает волну сжатия (в ряде случаев подобную ударной), распространяющуюся в окружающем пространстве. Совокупность этих физических явлений условно называют электротермоакустическим эффектом [38]. Волна сжатия распространяется в разрядном промежутке и, кроме того, вза-

имодельствует с электродами и разрядной камерой, вызывая их отклонение от равновесного положения. Соответственно, в процессе релаксации системы энергия колебаний частично трансформируется в окружающую среду с образованием акустических волн, что используют для создания бесконтактных акустических излучателей для НК [38, 41].

В работах [22, 38] нами был предложен газоразрядный электроакустический преобразователь (ГЭАП), принцип работы которого основан на электротермоакустическом эффекте. В частности, в ГЭАП формирование акустических колебаний происходит на основе импульсного разряда в воздухе при атмосферном давлении. При быстром нагреве и расширении газа в области плазмы разряда формируется волна давления, которая распространяется в окружающем пространстве. Было показано, что ГЭАП генерирует акустические волны в воздушной среде в диапазоне от 0 до 100 кГц, а максимальная амплитуда виброперемещения на мембране излучателя сопоставима с источниками возбуждения магнитострикционного и пьезоэлектрического типа [41].

В настоящей работе рассмотрены как акустические, так и эксплуатационные характеристики ГЭАП «открытого типа», т.е. с электродной системой, объем которой сообщается с окружающим пространством. Изучены электротермоакустические процессы, протекающие в газоразрядной системе, оценен химический состав напыления, образованного в электродной системе, проведены ресурсные испытания электродов и изолятора преобразователя.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Использовали ГЭАП, упрощенная схема которого представлена на рис. 1.

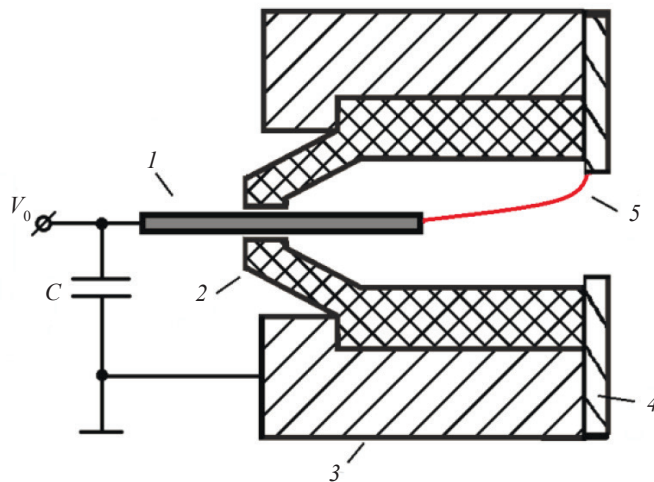


Рис. 1. Упрощенная схема ГЭАП:

1 — острый электрод; 2 — изолятор; 3 — обратный электрод (токопровод); 4 — мембрана (дисковый электрод); 5 — схематическое положение канала разряда.

По своей сути рассматриваемый ГЭАП представляет собой неуправляемый разрядник, работающий в режиме самопробоя. Ввиду наличия отверстия в мембране 4, объем электродной системы сообщается с атмосферой, что позволяет осуществить вывод акустических колебаний в окружающее пространство. В исследуемой конфигурации излучателя система электродов близка к типу «острие—плоскость». В этом случае перед пробоем электрическое поле в межэлектродном промежутке распределяется неоднородно. Кроме того, электрод 1 контактирует с изолятором 2, что может привести к развитию пробоя по поверхности диэлектрика. Оба этих фактора сопровождаются уменьшением напряжения, необходимого для пробоя газоразрядного промежутка.

ГЭАП работает следующим образом: при подаче импульса тока от генератора начинается зарядка емкости C , а напряжение V_0 на газоразрядном промежутке (разность потенциалов между электродами 1 и 4) возрастает до тех пор, пока не произойдет пробой. Протекание тока разряда сопровождается так называемым электротермоакустическим эффектом [38]. Суть этого явления заключается в формировании перепада давления в результате быстрого нагрева и расширения газа

в области канала разряда 5 при протекании электрического тока. Кроме того, под воздействием перепада давления элементы конструкции отклоняются от положения равновесия, осуществляя релаксационные колебания. Таким образом, излучающей поверхностью ГЭАП фактически является область плазмы газового разряда, а также электроды и изолятор. По мере протекания тока разряда емкость C разряжается, и при некотором напряжении ток разряда обрывается, после чего происходит рекомбинация остаточной плазмы газового разряда, электрическая прочность промежутка восстанавливается. В эксперименте суммарная емкость C , с учетом емкости подводящего кабеля и межэлектродной емкости, была на уровне 2 нФ.

Упрощенная схема лабораторной установки и различных средств, использованных в настоящей работе для исследования электротермоакустических процессов в ГЭАП и в воздушном пространстве, приведена на рис. 2.

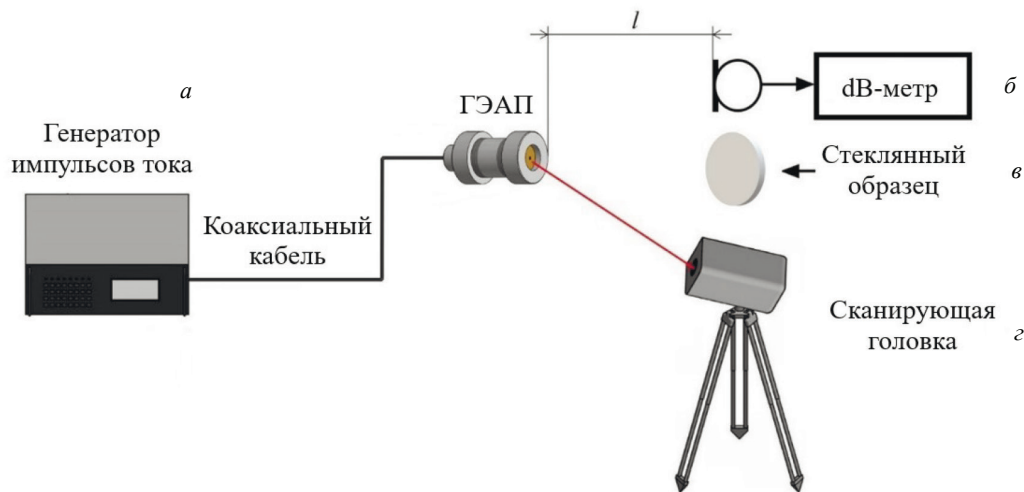


Рис. 2. Упрощенная схема лабораторной установки для исследования ГЭАП:

a — система для возбуждения акустических колебаний на основе ГЭАП; b — измеритель уровня звукового давления; $в$ — образец для исследования напыления; 2 — сканирующая головка лазерного виброметра (l — расстояние до торца преобразователя).

В настоящем исследовании разряд возбуждали с частотой 3 Гц от генератора импульсов тока с выходным напряжением до 20 кВ аналогично принципу, описанному в [22]. Ток короткого замыкания генератора достигал 700 А, время нарастания напряжения на емкости C не превышало 2 мкс.

Для измерения акустического давления, создаваемого в газоразрядном излучателе в области частот от 31,5 Гц до 8 кГц, использовали шумомер «АТЕ-9015» (Актаком, Россия), который размещали на расстоянии $l = 30$ см от торца ГЭАП. Погрешность измерения не превышала $\pm 1,4$ дБ.

При проведении исследования электроизноса элементов конструкции для взвешивания использовали полумикровесы «Госметр ВЛ120-М». Микрофотографии поверхности электродов были получены с помощью металлографического микроскопа «Альтами МЭТ1».

Для оценки напыления, возникающего в результате уноса массы элементов конструкции, использовали стеклянный образец (рис. 2в), размещенный на расстоянии $l = 1$ мм и менее от ГЭАП. Химический состав поверхностного слоя напыления (до 15 нм) был исследован методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии с использованием сверхвысоковакуумного фотоэлектронного спектрометра «Thermo Scientific K-Alpha Nexsa». Для возбуждения монохроматизированного рентгеновского излучения использовали рентгеновскую трубку с анодом Al (1486,74 эВ). Площадь образца составила 200 мкм². Перед помещением в спектрометр образцы хранили в течение 3 дней при атмосферном давлении и комнатной температуре. Обзорные спектры записывали при энергии пропускания 200 эВ с шагом 1 эВ. Обработку полученных спектров проводили с использованием программного обеспечения «Avantage Thermo Fisher software».

Лазерным виброметром PSV-500-3D HV (рис. 2г) измеряли вибрации на поверхности мембраны ГЭАП на расстоянии $l = 1,5$ м в диапазоне частот от 100 кГц до 4 МГц с шагом 30 Гц. Упрощенная схема лабораторной установки для НК приведена на рис. 3.



Рис. 3. Упрощенная схема лабораторной установки для проведения НК с использованием сканирующей лазерной доплеровской виброметрии и бесконтактного способа стимуляции материалов на основе ГЭАП.

Неразрушающие испытания композиционных материалов были выполнены на панели из стеклопластика размерами $315 \times 225 \times 14$ мм³ с дефектами различного происхождения: несквозными круглыми отверстиями и расслоениями. Для проведения НК использовали лабораторную установку [35], включающую сканирующий лазерный доплеровский виброметр PSV-500-3D HV, газоразрядный электроакустический преобразователь и генератор импульсов тока, как показано на рис. 3. В ходе контроля качества ГЭАП размещали на расстоянии 20 мм от торцевой стороны пластины. Лазерное вибросканирование поверхности стеклопластикового композита осуществляли в диапазоне частот от 50 Гц до 50 кГц с шагом по частоте 31 Гц (количество спектральных линий — 1600).

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Исследование акустических характеристик газоразрядного излучателя

С помощью метода лазерной виброметрии проведен спектральный анализ колебаний в пяти точках на мембране излучателя (количество измерений — 5). Время записи колебаний в каждой точке сканирования составило 4 мс при длительности релаксации колебаний мембраны около 2 мс [22]. В ходе лазерного сканирования был измерен амплитудно-частотный спектр колебаний мембраны ГЭАП в диапазоне частот от 100 кГц до 4 МГц с разрешением 30 Гц. На рис. 4 приведен амплитудно-частотный спектр ГЭАП, имеющего отверстие диаметром 1 мм в центре мембраны.

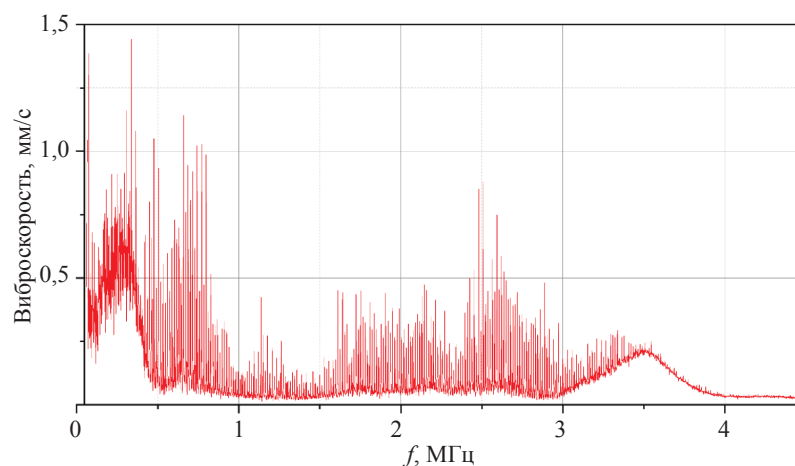


Рис. 4. Спектр колебаний на поверхности мембраны ГЭАП (отверстие диаметром 1 мм в центре) в диапазоне частот от 100 кГц до 4 МГц.

Спектр на рис. 4 представлен явно выраженными полосами в диапазоне частот от 100 до 500 кГц и от 3 до 4 МГц, а также набором большого количества узких линий во всем рассматриваемом интервале частот вплоть до 3,5 МГц. Первая полоса с частотой от 100 до 500 кГц соответствует процессам с характерной длительностью порядка 2—10 мкс, что можно сопоставить, соответственно, с активной длительностью импульса тока и характерной постоянной времени процесса нагрева и расширения газа в области плазмы разряда. Быстропротекающие газоразрядные процессы в электродной системе приводят к возникновению вибраций на поверхности мембраны в диапазоне частот от 3 до 4 МГц с максимумом, соответствующим собственной резонансной частоте газоразрядного контура при индуктивности порядка 1 мкГн и емкости 2 нФ. Сравнительно высокая амплитуда зарегистрированного сигнала в указанном диапазоне частот может быть обусловлена как изменениями состояния плазмы разряда при осцилляции тока в газоразрядном контуре, так и действием потока заряженных частиц и силы Ампера. В целом, полученный вид спектра характерен для импульсных сигналов подобного рода, например, близкая форма акустического спектра при возмущении от искрового разряда была приведена в работе [41]. Наличие большого числа спектральных линий объясняется как собственными резонансами элементов конструкции и их гармониками, так и наличием переотражений в электродной системе. Следует отметить, что спектр на рис. 4 практически непрерывен во всей исследуемой полосе частот, а основная доля энергии выделяется в диапазоне частот до 400 кГц, что фактически соответствует требованиям, предъявляемым к акустическим излучателям в НК [40].

В работе [22] был приведен спектр колебаний мембраны ГЭАП закрытого типа (без отверстия), следовательно, объем электродной системы не сообщался с окружающей средой. Было отмечено влияние собственных частот мембраны излучателя (около 10 кГц) на диапазон его рабочих частот. В настоящем исследовании также наблюдалось влияние резонансных колебаний элементов конструкции ГЭАП, вызванных импульсом разряда, на регистрируемый амплитудно-частотный спектр. Однако характеристика ГЭАП открытого типа (см. рис. 4) существенно шире, чем соответствующие амплитудно-частотные характеристики излучателя закрытого типа [19]. Это можно объяснить тем, что в закрытой конфигурации ГЭАП объем газоразрядного промежутка отделен от окружающей среды мембраной (диафрагмой), в результате чего излучающей поверхностью является только сама мембрана преобразователя. В открытой конфигурации, ввиду наличия отверстия, объем газоразрядного промежутка сообщается с окружающим пространством. Следовательно, акустические волны формируются как у поверхности мембраны, так и в межэлектродном промежутке газоразрядного преобразователя. Резюмируя, можно заключить, что исследуемый источник звука является широкополосным, некогерентным, с неравномерным амплитудно-частотным спектром, отличающимся наличием выраженных полос поглощения и резонансных линий, которые соответствуют собственным колебаниям и переотражениям волн от элементов конструкции. Частотная характеристика изменялась незначительно от импульса к импульсу, однако амплитуда акустического сигнала была нестабильной.

Для исследования стабильности генерации акустических волн и получения интегральной акустической характеристики ГЭАП было измерено давление звука. Давление измеряли на расстоянии 30 см от мембраны ГЭАП. На рис. 5 приведены результаты измерения акустического давления в помещении для 1000 импульсов разряда.

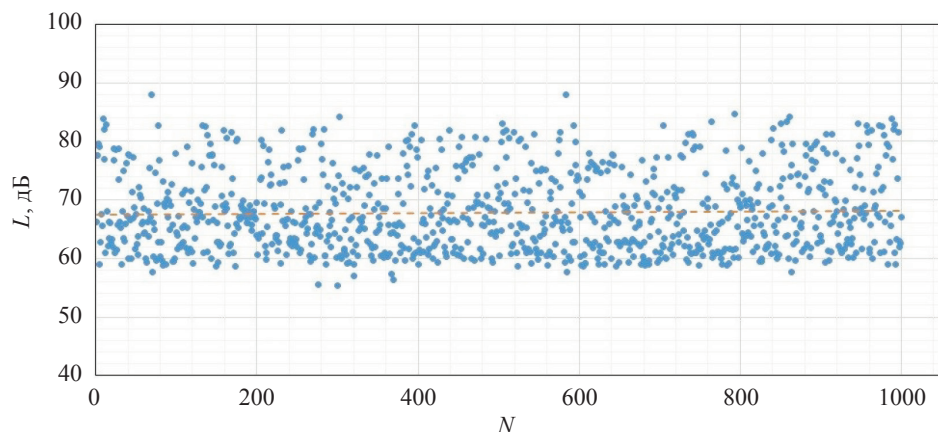


Рис. 5. Уровень шума на расстоянии 30 см от ГЭАП: N — порядковый номер импульса; частота следования импульсов — 2 Гц; межэлектродный зазор 5 мм.

Судя по графику (см. рис. 5), от импульса к импульсу наблюдаются существенные изменения амплитуды звукового давления (разброс от 60 до 90 дБ). В некоторых случаях была достигнута амплитуда звукового давления более 85 дБ, что соответствует перепаду давления в области измерения на уровне 0,2 Па в полосе частот до 8 кГц. При этом, с учетом данных о распределении спектральной плотности мощности (см. рис. 4), суммарный перепад давления будет еще выше. Вероятно, нестабильность амплитуды сигнала связана со спецификой газоразрядных процессов, например, с различной длиной и положением разрядного канала, что также было отмечено в работе [38]. В связи с этим при использовании акустических преобразователей газоразрядного типа необходимо учитывать разброс амплитуды сигнала.

3.2. Ресурсные испытания ГЭАП

Поскольку ГЭАП является газоразрядным устройством, работающим с импульсными токами, для него характерен электроизнос элементов электродной системы. Были проведены ресурсные испытания излучателя, что подразумевает микроскопию поверхности и измерение потери массы элементов электродной системы при наработке порядка 10^3 — 10^4 импульсов.

Микрофотографии дискового электрода до и после проведения ресурсных испытаний приведены на рис. 6.

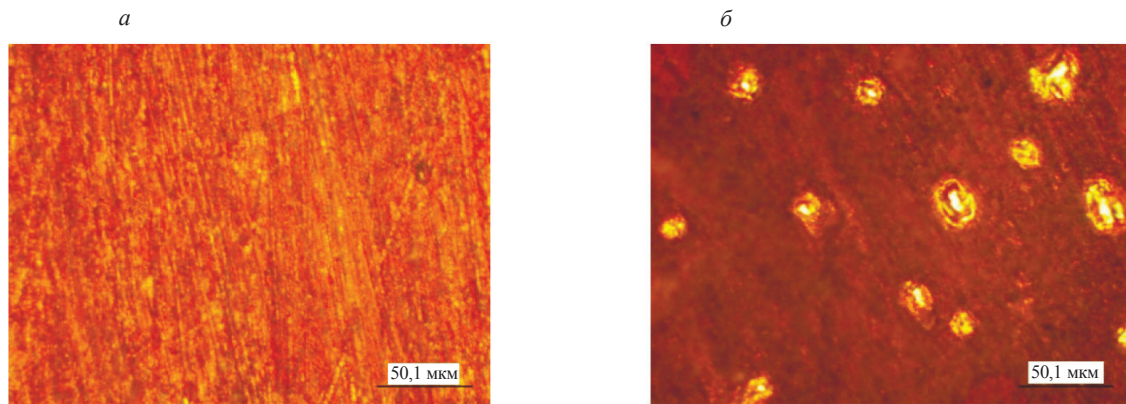


Рис. 6. Фотографии дискового электрода до испытаний (а) и картины микрократеров, образовавшихся на его поверхности (б).

На микрофотографии (рис. 6б) видны характерные оплавления мембраны излучателя — микрократеры. В ходе детального исследования эрозии электродов были обнаружены микрократеры с характерным линейным размером от 10 до 20 мкм. Поскольку края кратера имеют неоднородную структуру, существует значительная вероятность привязки разряда к краю микрократера. В дальнейшем образования из микрократеров перекрываются друг с другом и формируют наплавления субмиллиметрового масштаба. Этот процесс может вносить нестабильности в поведение разряда, приводящие к разбросу уровня звукового давления в ГЭАП, конструкция которого описана в разделе 2. Кроме того, фактически наблюдался износ электродов.

Был исследован унос массы с электродов и изолятора при наработке свыше 10^4 импульсов, для чего проводили серию ресурсных испытаний по 1000 и 10000 импульсов. Затем на основе данных, полученных в результате взвешиваний, были выполнены оценки скорости потери массы электродов и изолятора. Результаты исследования представлены на рис. 7 в виде графиков.

Наименьшая скорость потери массы наблюдалась для острейного электрода и составляла (50—100) нг/имп. Для дискового электрода скорость потери массы составляла (250—500) нг/имп. Ввиду различия материалов электродов (холоднокатаная сталь для острей и латунь для диска) унос массы с дискового электрода был приблизительно в 5 раз больше. Вероятно, это связано с меньшей температурой плавления компонентов латуни и другими различиями физических свойств сплавов, из которых были изготовлены электроды.

Максимальная скорость уноса массы изолятора составляла (0,5—3,5) мкг/имп, что превышает соответствующие значения уноса массы электродов (рис. 7б). Полученный результат, вероятно,

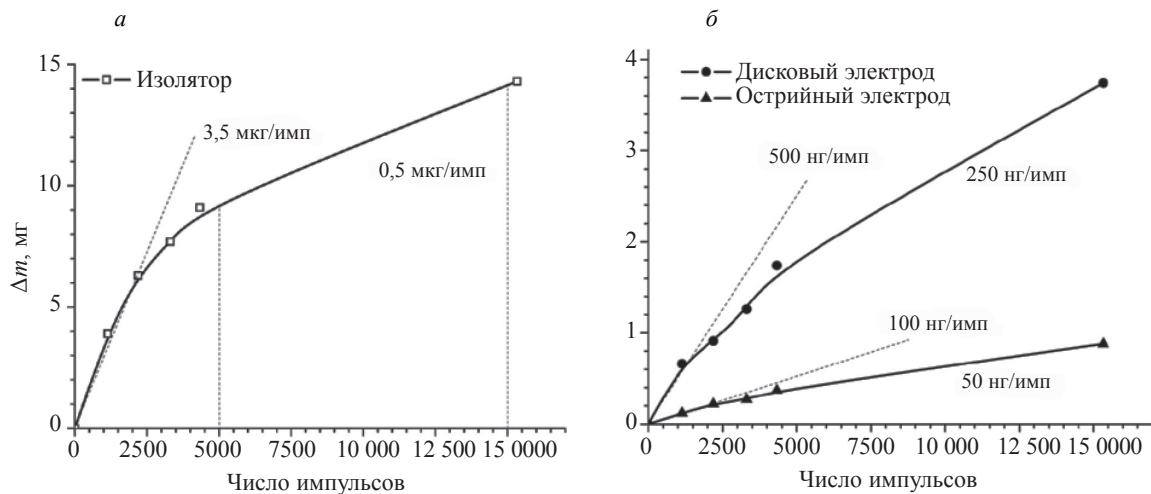


Рис. 7. Унос массы изолятора (а) и электродов (б) в зависимости от количества импульсов разряда (пунктирными линиями обозначены линейные аппроксимации для оценки скорости потери массы, межэлектродный зазор — 10 мм).

объясняется механическим разрушением, испарением и распылением с последующим уносом продуктов этих реакций из объема электродной системы ГЭАП. По мере выхода на режим скорость потери массы изолятора стабилизировалась на уровне 500 нг/имп.

Таким образом, скорость потери массы для изолятора была значительно больше, чем для электродов. Если для металлических электродов потеря массы объясняется испарением и распылением, то для изолятора характерны дополнительные потери массы из-за взаимодействия с плазмой разряда. Кроме того, на металлических токоведущих частях эрозия происходит, в основном, в зонах привязки разряда на электродах (катодные и анодные пятна), в то время как при пробое по поверхности диэлектрика возникает область контакта значительной площади, порядка нескольких мм² и более.

В результате деградации (эрозии) острейного электрода изменялась длина межэлектродного промежутка. Для величины зазора $d = 12$ мм, принимая допустимое относительное изменение длины зазора на уровне 20 %, абсолютное изменение длины электрода составило около 2,4 мм. Принимая плотность стали 7,9 г/см³ и средний диаметр острейного электрода около 3 мм, оценим ресурс газоразрядного излучателя, исходя из состояния электрода. На основе данных о скорости уноса массы (см. рис. 7) оценка ресурса дает величину на уровне 10^6 — 10^7 импульсов. При частоте следования импульсов до 3 Гц полученный результат будет приближаться к 1000 ч непрерывной работы. По прошествии этого времени генерация акустических колебаний не прервется, однако их амплитуда возрастет. Это объясняется тем, что с ростом длины межэлектродного промежутка увеличивается пробивное напряжение, следовательно, возрастает энергия, запасенная в емкостном накопителе генератора.

При изменении массы элементов конструкции продукты этих процессов попадают в окружающее пространство. Часть продуктов может оседать на объекте исследования и приводить к загрязнению его поверхности. Соответствующие исследования описаны ниже.

3.3. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия

Напротив выходного отверстия, вплотную к выходному отверстию ГЭАП, размещали предварительно очищенную стеклянную подложку (схематично показанную как позиция в на рис. 2). На рис. 8а приведена фотография электроакустического преобразователя со стеклянной подложкой для улавливания напыления, на рис. 8б — фотография области напыления на стеклянной подложке по истечении 1000 импульсов.

Как видно из рис. 8б, на поверхности стеклянной подложки образовалось неоднородное матовое напыление, основная доля которого сосредоточена в области окружности диаметром приблизительно 10 мм. После эксперимента на поверхности предметного стекла видно матовое покрытие (см. рис. 8б) светлосерого цвета. Область напыления имеет радиальную симметрию. Однако покрытие неоднородно распределено по поверхности стекла, а именно, заметно

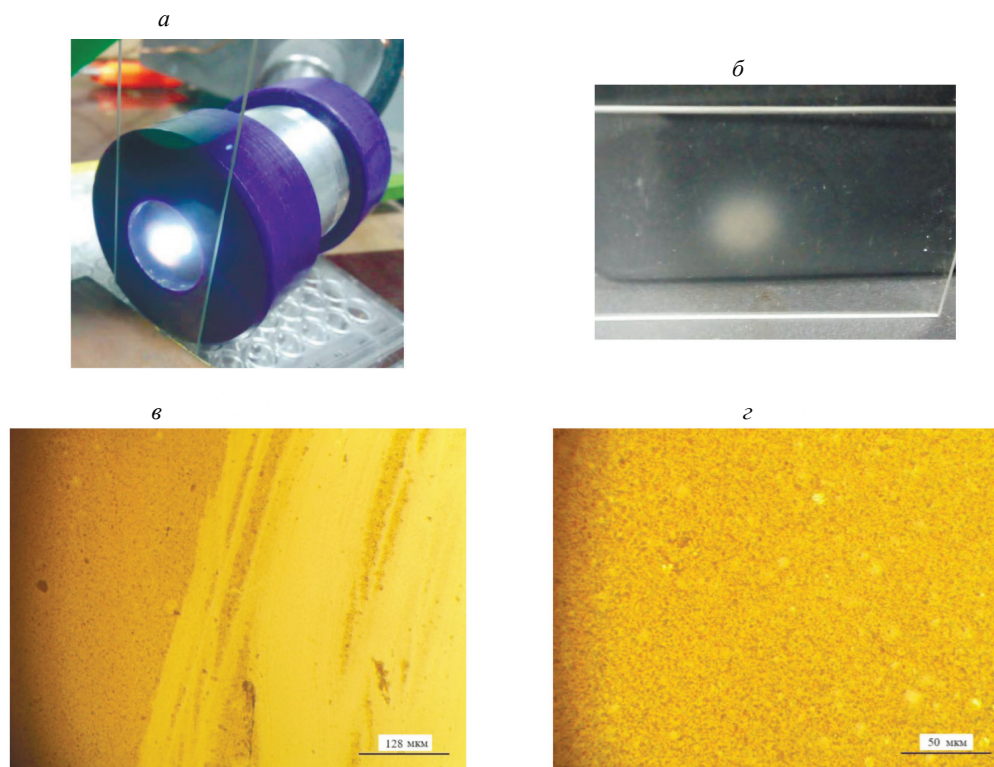


Рис. 8. Фотография ГЭАП в ходе эксперимента (а), напыления на предметном стекле (б) и участков поверхности предметного стекла при различном увеличении (в — след соскоба; г — детальный вид напыления).

снижение плотности напыления от центра к периферии. Для исследования микроструктуры напыления состояние поверхности образца было сфотографировано с использованием металлографического микроскопа.

На фотографии (рис. 8в) изображена картина после соскоба, на левой части снимка наблюдается покрытие, на правой части — поверхность очищенного стекла. Силы адгезионного взаимодействия покрытия к стеклу относительно низкие, что позволило сделать соскоб без существенных усилий. При детальном рассмотрении напыления (рис. 8г) наблюдается структура, состоящая из напыленных микрочастиц с характерным размером менее 1 мкм, однако отмечено присутствие включений размером около 3 мкм и более. Таким образом, наглядно показано, что при функционировании излучателя (вследствие испарения, разрушения электродов и изолятора) образуются микрочастицы, часть которых создает осадок (напыление на тестовом объекте).

С целью определения химического состава напыления был проведен его химический анализ методом рентгеновской фотоэлектронной (РФЭ) спектроскопии, причем по трем точкам на поверхности стекла было показано, что покрытие однородно. На рис. 9 приведен обзорный спектр РФЭ.

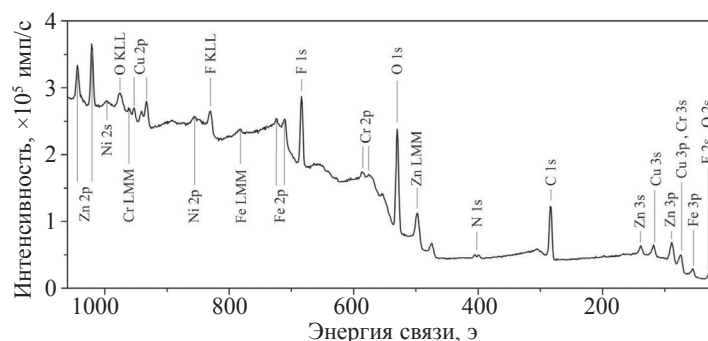


Рис. 9. Обзорный РФЭ-спектр напыления.

На обзорном РФЭ-спектре наблюдается множество линий, соответствующих электронным уровням и подуровням различных химических элементов с их характерными энергиями связей. Это свидетельствует о сложном химическом составе напыления.

Наличие относительно интенсивных фотоэлектронных линий Fe 2s, Fe 3p, Fe 2p и Оже-линии Fe LMM указывает на содержание атомов железа в напылении. Фотоэлектронные линии Cr 3s и Cr 2p совместно с Оже-линией Cr LMM свидетельствуют о содержании хрома. Наблюдаются слабоинтенсивные спектральные линии, соответствующие атомам никеля (Ni 2p, Ni 2s). Все вышеперечисленные линии относятся к нержавеющей стали, из которой был выполнен острый электрод (позиция 1 на рис. 1).

Выраженные спектральные линии Cu 3p, Cu 3s, Cu 2s и Zn 3p, Zn 3s, Zn 2p, Zn LMM относятся к атомам меди и цинка соответственно. Следовательно, происходит распыление материала дискового электрода (позиция 4 на рис. 1), изготовленного из латуни.

Необходимо отметить, что обратный токопровод ГЭАП (позиция 3 на рис. 1) выполнен из алюминия. Следовательно, при вибрации мембраны (позиция 4 на рис. 1) в месте контакта могут образовываться частицы и пары алюминия как при нагреве в месте контакта при протекании электрического тока, так и при механическом взаимодействии колеблющейся мембраны с обратным токопроводом. При вибрациях мембраны пары и микрочастицы алюминия могут проникать через зазор между мембраной и обратным токопроводом в межэлектродный промежуток. Однако перекрытие спектральных линий алюминия Al 2s с Cu 3s и линий Al 2p с Cu 3p не позволяет достоверно утверждать о содержании алюминия в напылении.

Также на РФЭ-спектре наблюдаются спектральные линии, соответствующие атомам углерода (C 1s) и фтора (F 1s, F 2s, F KLL), из которых состоят макромолекулы политетрафторэтилена — материала изолятора.

Таким образом, показано, что в разряде происходит разрушение материалов элементов конструкции (электродов и изолятора). В результате деструктивных плазмохимических и термических процессов в объеме электродной системы образуется многокомпонентная гетерогенная смесь из газов и твердых микрочастиц. При расширении газа вследствие нагрева в области плазмы разряда формируется направленный поток продуктов деструкции на подложку. В итоге, на поверхности подложки образуется напыление, которое может формироваться как из газовой фазы, так и в процессе прилипания микрочастиц. Наличие линий кислорода (O 1s и O KLL) и азота (N 1s) свидетельствует о взаимодействии продуктов реакций с воздухом, прежде всего, об их окислении.

Следовательно, при конструировании и эксплуатации ГЭАП необходимо учитывать влияние тепловых и плазмохимических процессов, протекающих под воздействием плазмы разряда, на материалы системы. Здесь важны три аспекта.

Во-первых, для элементов конструкции газоразрядной системы характерен электроизнос, обусловленный деструктивным воздействием разряда. Появление катодных пятен и локальный разогрев электродов приводят к испарению паров металлов и образованию микрокапель. Пробой по диэлектрику и взаимодействие фотонов и активированных в плазме частиц с изолятором приводит к разрыву ковалентных связей в макромолекулах политетрафторэтилена и выделению низкомолекулярных веществ в газовую фазу [42]. Этот аспект определяет ресурс ГЭАП. В целом, электроизнос элементов конструкции электродной системы характерен для большинства импульсных газоразрядных приборов.

Во-вторых, при использовании в качестве изолятора политетрафторэтилена возможно образование токсичных продуктов деструкции, таких как тетрафторэтилен, гексафторэтилен, карбонилфторид, фтороводород, перфторизобутилен [43, 44]. Отсюда вытекает второй аспект — необходимость обеспечения безопасной эксплуатации при условии выноса в атмосферу продуктов деструкции материалов электродов и изолятора.

В-третьих, часть продуктов реакции оседает на объекте. Следовательно, на поверхности подложки образуется напыление, что может загрязнять объекты исследования. Экспериментально показано, что значительный слой образуется при числе импульсов порядка 10^3 , причем при минимальном расстоянии до выходного отверстия в электродной системе. При увеличении расстояния между газоразрядным излучателем и предметным стеклом более 10 мм, напыление на тестовом объекте практически не наблюдается. Поскольку для проведения виброизмерения в одной точке достаточно одного импульса разряда, в большинстве случаев при проведении НК на практике можно пренебречь этим фактором.

3.4. Применение ГЭАП для бесконтактного возбуждения резонансных колебаний в дефектах при проведении НК

Неразрушающие испытания стеклопластикового композита были проведены с использованием лабораторной установки (см. рис. 3) на основе сканирующей лазерной виброметрии и бесконтактной акустической стимуляции с использованием газоразрядного электроакустического преобразователя, описанного в разделе 2. По результатам лазерного вибросканирования были получены виброграммы (рис. 10), отображающие распределение амплитуды скорости колебаний исследуемого образца на частотах от 7,33 до 35,9 кГц, а также усредненные амплитуды скорости колебаний стеклопластика в диапазоне частот от 50 Гц до 50 кГц (рис. 11). Локальное усиление амплитуды колебаний в зоне дефектов (v_d) по сравнению с бездефектной зоной (v_{nd}) определяется как $k = v_d / v_{nd}$ и отражено на соответствующих виброграммах.

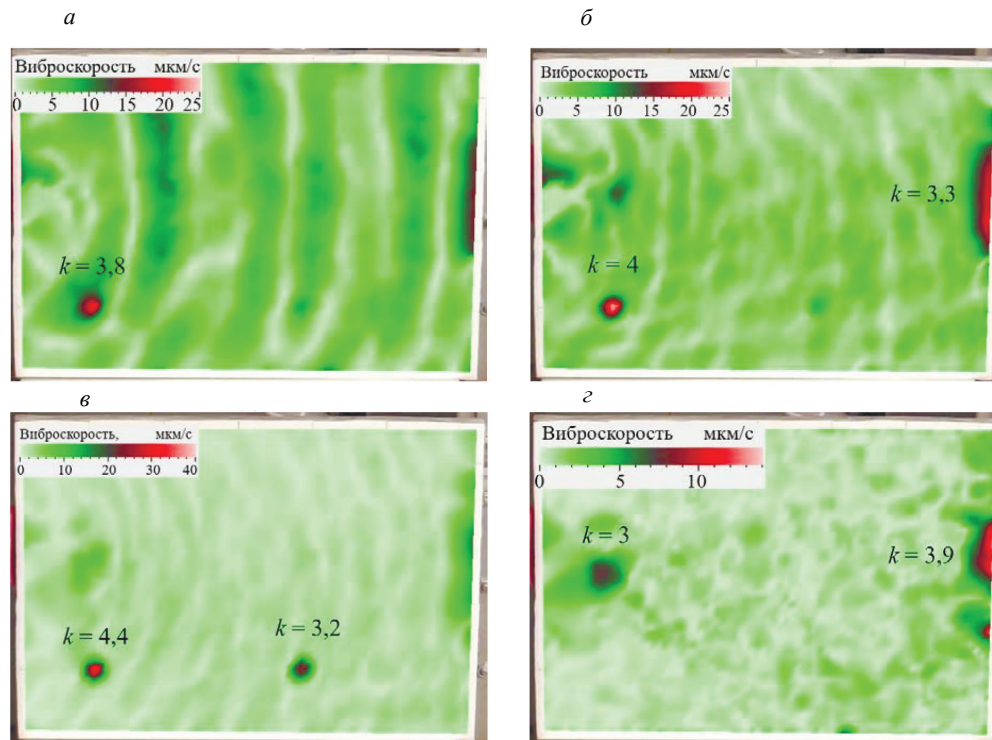


Рис. 10. Виброграммы стеклопластикового композита на частотах 7,33 кГц (а); 10,3 кГц (б); 12,8 кГц (в); 35,9 кГц (г).

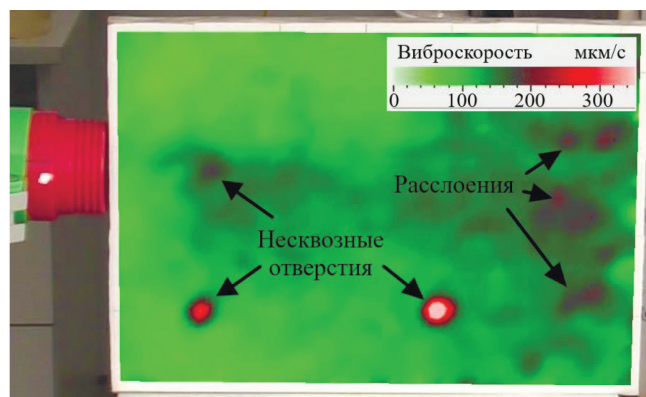


Рис. 11. Виброграмма колебаний стеклопластикового композита, усредненная в диапазоне частот от 50 Гц до 50 кГц (ГЭАП снабжен демпфером).

По результатам лазерного вибространирования были обнаружены три несквозных отверстия, а также расслоения на краю пластины стеклопластикового композита. Несквозные отверстия, имеющие резонанс на частоте 7,33 и 12,8 кГц, были расположены на глубине 3 мм от поверхности композита и имели высокий коэффициент усиления сигнала (от 3,2 до 4,4), в то время как несквозное отверстие, резонанс которого был определен на частоте 35,9 кГц, отличалось меньшим коэффициентом усиления (3) из-за большей глубины залегания (4 мм). Стоит отметить, что на краю пластины наблюдались расслоения, которые проявлялись на частотах 10,3 и 35,9 кГц, однако при усреднении данных эти дефектные отметки оказались менее выраженными по сравнению с колебаниями несквозных отверстий (см. рис. 11). В целом, полученные результаты подтверждают возможность использования газоразрядного излучателя для обнаружения дефектов в виде несквозных отверстий и расслоений в стеклопластиковых композитах.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем исследовании показано, что ГЭАП является мощным широкополосным источником звука, генерирующим акустические волны с частотами от единиц герц до 4 МГц. Данный источник является некогерентным, поскольку излучающая поверхность преобразователя представлена совокупностью поверхности области плазмы разряда и поверхностей элементов конструкции. Выявлены особенности ГЭАП, такие как сильная неравномерность АЧХ ввиду наличия резонансов и полос поглощения, соответствующих колебаниям элементов конструкции, а также существенный разброс амплитуды сигнала от импульса к импульсу. Уровень звукового давления для диапазона частот от 30 Гц до 8 кГц имел существенный разброс (60—85) дБ от импульса к импульсу, что соответствовало максимальному перепаду давления в области измерения на уровне 0,2 Па.

Были определены скорости потери массы элементов конструкции. На основе полученных данных, ресурс электродной системы был оценен на уровне 1000 часов при частоте следования импульсов до 3 Гц. Следует заметить, что по мере износа электродов геометрия газоразрядного промежутка изменялась, что влияло на акустическую характеристику преобразователя.

Показано, что износ электродов и изолятора под воздействием плазмы разряда приводит к образованию микрочастиц, часть которых попадает в атмосферу, а другая часть может оседать на объекте исследования в виде напыления. Состав напыления представлен, в основном, микрочастицами пластика, металлов и их оксидов. Таким образом, фактически происходит загрязнение объекта исследования, однако на практике показано, что количество загрязнений во многих случаях незначительно.

Все вышеперечисленные особенности необходимо учитывать при эксплуатации ГЭАП. Результаты неразрушающих испытаний показали возможность использования системы на основе газоразрядного электроакустического преобразователя для бесконтактной акустической стимуляции материалов. В области частот до 50 кГц методом сканирующей лазерной виброметрии обнаружены дефекты в виде несквозных отверстий и расслоений в стеклопластиковых композитах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания «Наука», проект № FSWW-2023-0019, в работе применяли оборудование ЦКП НОИЦ «Наноматериалы и нанотехнологии» ТПУ».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Круглень А.И. Неразрушающий контроль в аэрокосмической промышленности / Сборник материалов VII Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики: в 3 томах. Т. 2. Под общей редакцией Ю. Ю. Логинова. Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», 2021. С. 813—815.
2. Щербakov М.И. Новые аспекты использования теплового неразрушающего контроля для различных объектов авиационной промышленности / Материалы III отраслевой конференции по измерительной технике и метрологии для исследований летательных аппаратов. Жуковский: Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского, 2018. С. 381—386.
3. Bertovic M., Fahlbruch B., Müller C. Human Factors Perspective on the Reliability of NDT in Nuclear Applications // Materials testing. 2013. № 55 (4). P. 243—253. DOI: 10.3139/120.110431
4. Chatillon S., Cattiaux G., Serre M., Roy O. Ultrasonic non-destructive testing of pieces of complex geometry with a flexible phased array transducer // Ultrasonics. 2000. № 38 (1—8). P. 131—4.

5. Bida G.V. Nondestructive Testing of Mechanical Properties of Rolled Steel (Review): 1. Tests of Strength and Plastic Properties // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2005. № 41(5). С. 296—306. DOI: 10.1007/s11181-005-0169-7
6. Solodov I., Kreutzbruck M. Local defect resonance of a through-thickness crack / // Ultrasonics. 2021. № 118 (21). P. 106565. DOI: 10.1016/j.ultras.2021.106565
7. Malinowski P.H., Wandowski T., Ostachowicz W.M., Sagnard M., Berthe L., Ecault R., Solodov I., Ségur D., Kreutzbruck M. Extended Non-destructive Testing for the Bondline Quality Assessment of Aircraft Composite Structures // Adhesive Bonding of Aircraft Composite Structures. 2021. DOI: 10.1007/978-3-319-92810-4 4
8. Solodov I., Kreutzbruck M. Mode matching to enhance nonlinear response of local defect resonance // Journal of Sound and Vibration. 2019. V. 461. P. 114916.
9. Vanlanduit S., Vanherzeele J., Vuye C., Guillaume P. Characterization of acoustic materials using the scanning laser Doppler vibrometer / Proc. of the 7th Int. Conf. on Vibr. Measur. by Laser Tech. 2006. V. 6345. P. 634517.
10. Derusova D.A., Vavilov V.P., Druzhinin N.V. Investigating vibration characteristics of magnetostrictive transducers for air-coupled ultrasonic NDT of composites // NDT and E Int. 2019. V. 107. Article number 102151.
11. White R.D., Schmid E.S., Neeson I. Flow testing of a sonic anemometer for the martian environment // AIAA Scitech Forum. 2020. No. 1. P. 237189.
12. Polytec Laser vibration measurement. Areas of application / Polytec // polytec.com URL: <https://www.polytec.com/int/vibrometry/areas-of-application> (дата обращения: 06.11.2023).
13. Solodov I., Doring D., Busse G. Air-coupled laser vibrometry: analysis and applications // Appl. Opt. 2009. V. 48. P. 33—37.
14. Solodov I., Kreutzbruck M. Single-sided access remote imaging via resonant airborne activation of damage // NDT & E Int. 2019. V. 107. P. 102146.
15. Najib Abou Leyla, Moulin E., Assaad J., Benmeddour F., Grondel S. Modeling a surface-mounted Lamb wave emission-reception system: Applications to structural health monitoring // PACS. 2008. № 43. 40.Le, 43.20.Ks, 43.60.Qv, 43.38.Ar YHB. P. 3521—3527. DOI: 10.5772/30139
16. Vinogradov S.A., Cobb A. C., Fisher J. New Magnetostrictive Transducer Designs for Emerging Application Areas of NDE // Materials. 2018. № 11(5). С. 755. DOI: 10.3390/ma11050755
17. Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Нестеров В.А., Доровских Р.С. Исследование влияния второстепенных мод колебаний на равномерность распределения колебаний ультразвуковых дисковых излучателей // Научно-технический вестник Поволжья. 2017. № 5. С. 106—108.
18. Гуревич С.Ю., Голубев Е.В., Петров Ю.В. Излучатель и приемник ультразвука для бесконтактного контроля качества тонколистовых металлоизделий // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика. Механика. Физика». 2015. Т. 7. № 1. С. 57—64.
19. Derusova D.A., Vavilov V. P., Xingwang G., Shpil'noi V.Yu., Danilin N.S. Infrared Thermographic Testing of Hybrid Materials Using High-Power Ultrasonic Stimulation // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 10. P. 58—64.
20. Ultrasonic transducers, Technical notes, Olympus NDT, 2006.
21. Xingwang G., Liang Z. Vibro-thermography of calibrated defects in hybrid plates focusing on viscoelastic heat generation // Quantitative InfraRed Thermography Journal. 2021. V. 18. Is. 5. P. 314—331.
22. Derusova D.A., Vavilov V.P., Guo X., Druzhinin N.V. Comparing the Efficiency of Ultrasonic Infrared Thermography under High-Power and Resonant Stimulation of Impact Damage in a CFRP Composite // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 5. P. 356—362.
23. Yano T., Tone M., Fukumoto A. 1 MHz Ultrasonic Transducer Operating in Air / In: A. J. Berkhout, J. Ridder, and L. F. van der Wal. Eds. Acoustical Imaging. Boston, MA: Springer US, 1985. P. 575—584.
24. Schiller S., Hsieh C.K., Chou C., Khuri-yakub B. Novel high frequency air transducers / Review of progress in quantitative NDE. 1990. P. 795.
25. Hutchins D.A., Schindel D.W. Advances in non-contact and air-coupled transducers // Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium. 1993. V. 2. P. 1245—1254. DOI: 10.1109/ULTSYM.1994.401811
26. Chen J., Wang X., Yang X., Zhang L., Wu H. Application of air-coupled ultrasonic nondestructive testing in the measurement of elastic modulus of materials // Applied Sciences. 2021. V. 11. Is. 19. Article number 9240. DOI: 10.3390/app11199240
27. Adelegan O.J., Coutant Z.A., Wu X., Yamaner F.Y., Oralkan O. Design and Fabrication of Wideband Air-Coupled Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers with Varying Width Annular-Ring and Spiral Cell Structures // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2021. V. 68. Is. 8. P. 2749—2759. DOI: 10.1109/TUFFC.2021.3076143
28. Bernhardt Y., Kreutzbruck M. Integrated defect sensor for the inspection of fiber-reinforced plastics using air-coupled ultrasound // Journal of Sensors and Sensor Systems. 2021. V. 9. Is. 1. P. 127—132. DOI: 10.5194/jsss-9-127-2020
29. Marhenke T., Neuenschwander J., Furrer R., Zolliker P., Twiefel J., Hasener J., Wallaschek J., Sanabria S.J. Air-Coupled Ultrasound Time Reversal (ACU-TR) for Subwavelength Nondestructive Imaging

- // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2020. V. 67. Is. 3. P. 651—663. DOI: 10.1109/TUFFC.2019.2951312
30. *Daschewski M., Kreutzbruck M., Prager J., Dohse E., Gaal M., Harrer A.* Resonanzfreie Messung und Anregung von Ultraschall // *Technisches Messen*. 2015. V. 82 (3). P. 156—66.
31. *Gaal M., Kotschate D.* New technologies for air-coupled ultrasonic transducers / *Proceedings of 12th ECNDT conference, 2018, Gothenburg, Sweden*. Author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/325685745>
32. *Migachev S.A., Kurkin M.I., Smorofinskii Y.G.* Noncontact excitation of sound in metals by a video pulse of electric field // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2016. V. 52. Is. 11. P. 653—6561.
33. *Kachanov V.K., Sokolov I.V., Karavaev M.A., Kontsov R.V.* Selecting Optimum Parameters of Ultrasonic Noncontact Shadow Method for Testing Products Made of Polymer Composite Materials // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2020. V. 56. Is. 10. P. 831—842
34. *Shpil'noi V.Yu., Vavilov V.P., Derusova D.A., Druzhinin N.V., Yamanovskaya A.Yu.* Specific Features of Nondestructive Testing of Polymer and Composite Materials Using Air-Coupled Ultrasonic Excitation and Laser Vibrometry // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2021. V. 57. No. 8. P. 647—655.
35. *Derusova D.A., Vavilov V.P., Nekhoroshev V.O., Shpil'noi V.Yu., Druzhinin N.V.* Features of Laser-Vibrometric Nondestructive Testing of Polymer Composite Materials Using Air-Coupled Ultrasonic Transducers // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2021. V. 57. P. 1060—1071.
36. *Solodov I., Dillenz A., Kreutzbruck M.* A new mode of acoustic NDT via resonant air-coupled emission // *J. of Appl. Phys.* 2017. V. 121. P. 245101.
37. *Vuys C., Vanlanduit C., Guillaume P.* Accurate estimation of normal incidence absorption coefficients with confidence intervals using a scanning laser Doppler vibrometer // *Opt. and Las. in Eng.* 2009. V. 47. Is. 6. P. 644—650.
38. *Derusova D.A., Nekhoroshev V.O., Shpil'noi V.Y., Vavilov V.P.* Developing Novel Gas Discharge Emitters of Acoustic Waves in Air for Nondestructive Testing of Materials // *Sensors*. 2022. V. 22. Is. 23. Article number 99056. 14 p.
39. *Zipser L., Seeling H.-D., Franke H.* Refracto-vibrometry for visualizing ultrasound in small-sized channels, cavities and objects / *Proc. - IEEE Ultras. Symp. IUS 2009*. P. 2588—2590.
40. *Solodov I., Rahammer M., Kreutzbruck M.* Analytical evaluation of resonance frequencies for planar defects: Effect of a defect shape // *NDT and E International* this link is disabled. 2019. V. 102. P. 274—280.
41. *Ayrault C., Bequin P., Baudin S.* Characteristics of spark discharge as an adjustable acoustic source for scale model measurements / *Proceedings of the acoustics 2012 Nantes conf.* 23—27 April. P. 3555—3559. Nantes, France. 2012.
42. *Rittmann J., Rahammer M., Holtmann N., Kreutzbruck M.* A mobile nondestructive testing (NDT) system for fast detection of impact damage in fiber-reinforced plastics (FRP) // *Journal of Sensors and Sensor Systems*. 2020. V. 9. Is. 1. P. 43—50.
43. *Suh G., Kim H., Yōiti S.* Measurement of resonance frequency and loss factor of a microphone diaphragm using a laser vibrometer // *Appl. Acoust.* 2010. V. 71. P. 258—261. DOI: 10.1016/j.apacoust.2009.09.007
44. *Zipser L., Franke H.* Laser-scanning vibrometry for ultrasonic transducer development // *Sens. Actuators A Phys.* 2004. V. 110. P. 264—268. DOI: 10.1016/j.sna.2003.10.051

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН ПРИ КОНТРОЛЕ УРОВНЯ ЖИДКОСТИ ДАТЧИКОМ С ДЛИННЫМ ВОЛНОВОДОМ

© 2024 г. Абхишек Кумар^{1,*}, Суреш Перияннан^{1,**}

¹Национальный технологический институт, Варангал, 506004, Телангана, Индия

E-mail: *abhik@student.nitw.ac.in; **sureshp@nitw.ac.in

Поступила в редакцию 29.09.2023; после доработки 26.12.2023

Принята к публикации 28.12.2023

Описывается ультразвуковой датчик с длинным волноводом для измерения уровня жидкости в котором используются продольная $L(0,1)$, крутильная $T(0,1)$ и изгибная $F(1,1)$ волновые моды. Данные волновые моды передавались и принимались одновременно по проволоке из нержавеющей стали. Длинный волновод (>12 м) охватывает более широкую область интереса и подходит для применения в технологической промышленности в неблагоприятных условиях. В этой работе мы использовали жидкости для измерения уровня и температуры, а также такие жидкости, как дизельное топливо, вода и глицерин для измерения уровня жидкости на основе коэффициентов отражения датчика от сигналов во временной и частотной областях. Мы изучили влияние эффектов затухания волновых мод на конструкцию датчика с длинным волноводом датчика при изменении длины волновода. Первоначально мы получили коэффициенты отражения мод $L(0,1)$ и $T(0,1)$ от волновода длиной 12,6 м, когда один конец длинного волновода был закреплен сдвиговым преобразователем с ориентацией 45° . В дальнейшем мы хотим изучить и идентифицировать все волновые моды (особенно F-моды). Следовательно, необходимо исследовать характеристики распространения направленной волны (затухание, скорость ультразвука и частоты всех волновых мод) в длинном волноводе при систематическом разрезании с интервалом в 1 м, начиная с его первоначальной длины волновода 12,6 м, анализируя сигналы А-сканирования различных длин одного волновода. Эта простая и экономически эффективная методика позволяет контролировать большие глубины и температуру жидкости на электростанциях, в нефтяной и нефтеперерабатывающей промышленности при разработке длинного волновода датчика с соответствующими ультразвуковыми параметрами.

Ключевые слова: ультразвуковой датчик, длинный волновод, измерение уровня жидкости, затухание, частотная область.

EXPERIMENTAL STUDY OF ULTRASONIC WAVE PROPAGATION IN A LONG WAVEGUIDE SENSOR FOR FLUID-LEVEL SENSING

Abhishek Kumar^{1,*}, Suresh Periyannan^{1,**}

¹National Institute of Technology, Warangal, 506004, Telangana, India

E-mail: *abhik@student.nitw.ac.in; **sureshp@nitw.ac.in

This work reports an ultrasonic long waveguide sensor for measuring the fluid level utilizing longitudinal $L(0,1)$, torsional $T(0,1)$, and flexural $F(1,1)$ wave modes. These wave modes were transmitted and received simultaneously using stainless-steel wire. A long waveguide (>12 m) covers a broader region of interest and is suitable in the process industry's hostile environment applications, "fluid levels and temperature measurements." In this work, we used fluids "diesel, water, and glycerin" for measuring fluid levels based on the sensor's reflection factors from time domain and frequency domain signals. We examined the impact of wave modes' attenuation effects for long waveguide sensor design while changing the waveguide lengths. Initially, we obtained the $L(0,1)$ and $T(0,1)$ modes reflections from the 12.6 m waveguide length when one end of the long waveguide was fixed with a shear transducer at 45° orientation. Subsequently, we want to study and identify all wave modes" (especially F mode) travel distances. Hence, we would like to investigate the guided wave propagation characteristics (attenuation, ultrasonic velocity, and frequency of all wave modes) in the long waveguide while cutting systematically at intervals of 1 meter, starting from its original length of the waveguide 12.6 meters by analyzing the A-scan signals of various lengths of a single waveguide. This simple and cost-effective technique can monitor the high fluid depths and temperature in power plants, oil, and petrochemical industries while designing a long waveguide sensor with appropriate ultrasonic parameters.

Keywords: ultrasonic sensor, long waveguide, level measurement, attenuation, frequency domain.

DOI: 10.31857/S0130308224020021

ВВЕДЕНИЕ

За последние несколько десятилетий возрос интерес к разработке ультразвуковых датчиков для измерения уровня жидкости в складских контейнерах, на электростанциях (котлах) и нефтехранилищах. Для решения этих задач было изучено множество подходов. Один из таких методов [1, 2] предполагает посылать электрические импульсы по одной линии в резервуар и измерять разницу во

времени между выходными импульсами. Однако необходимо учитывать, что эти электрические импульсы не являются безопасными по своей природе при использовании в резервуарах для хранения нефтепродуктов. Как правило, для определения уровня жидкости в промышленности используются два метода: инвазивный и неинвазивный. В инвазивных методах датчик находится в непосредственном контакте с рассматриваемой жидкостью (например, поплавковый датчик, ультразвуковой датчик) [3—6]. Однако в неинвазивных методах датчик не контактирует с жидкостью. Поэтому неинвазивные методы используются в тех случаях, когда оператору или конечному пользователю требуется повышенная безопасность (например, во взрывоопасной среде или в труднодоступных местах). Для определения уровня жидкости используются различные типы датчиков (поплавковые, электростатические, емкостные и оптоволоконные) [3]. Поплавковые датчики обеспечивают меньшую точность, электростатические датчики не могут работать в областях с изменяющейся температурой, а емкостные системы измерения очень чувствительны к ошибкам, вызванным изменениями свойств материала [4]. Кроме того, в конкретных областях применения требуется способность выдерживать высокие температуры и давления, например, в корпусах ядерных реакторов, где температура достигает 378°C, давление до 15,4 МПа и интенсивные радиационные поля [5]. Если говорить о корпусе ядерного реактора, то очень важно контролировать уровень воды и управлять им, для чего обычно используются измерения перепада давления, полученные с помощью преобразователей, подключенных к дискретным датчикам давления, расположенным на разных высотах. Эти средства не использовались в качестве распределенных датчиков и обеспечивали меньшую точность и информативность для мониторинга и управления безопасностью. Чтобы преодолеть эти проблемы, представлен новый подход к измерению уровня жидкости с использованием ультразвукового уровнемера на основе волновода. Данный метод основан исключительно на ультразвуковых волнах, что позволяет не опасаться электрических искр и других источников возгорания. Благодаря использованию волноводов из коррозионностойкого материала «нержавеющая сталь», данная технология датчика обеспечивает устойчивость к изменениям характеристик материала.

Изменения свойств окружающей среды могут влиять на акустический импеданс волновода, который определяет соотношение между активным акустическим давлением и результирующей скоростью. Для ультразвуковых волноводных датчиков были выбраны различные конфигурации и сечения (включая прямоугольные, ромбовидные и круглые формы) [7—21]. В этих датчиках используются моды $L(0, 1)$ и $T(0, 1)$ с волноводами ограниченной длины. В основном в них применяются ультразвуковые методики для измерения таких параметров, как уровень жидкости, вязкость расплава стекла, плотность жидкости и температура окружающих жидкостей. Кроме того, предлагаемый датчик позволяет измерять уровень жидкости по всей линии датчика, что превосходит ограничения обычных датчиков. Эта система ультразвуковых датчиков имеет полностью разделенные между датчиками функциональные способности и повышает их точность и эффективность. Кроме того, разработанные методы можно использовать в сложных условиях, выбрав подходящий материал волновода для конструкции датчика [15, 19]. Ультразвуковые волны для определения уровня жидкости и высокотемпературных измерений используются уже несколько десятилетий. Однако большинство подходов основано на фундаментальных модах $L(0, 1)$ и $T(0, 1)$. В работе Spratt и др. [10] рассматривается определение уровня жидкости и измерение температуры с помощью моды $T(0, 1)$ на основе эхозеркального метода. Subhash и др. [22] описали измерение уровня с использованием моды $L(0, 1)$ в стержне и волны S_0 в пластине с помощью импульсного эхометода. Shilei и др. [23] использовали волновод круглого сечения для контроля уровня жидкости при различных углах наклона, используя волновую моду $L(0, 1)$ на основе импульсного эхометода. Iwao и др. [24] разработали волноводный датчик трапецевидной конфигурации, использующий клиновые волны для контроля уровня жидкости.

Suresh и др. [11—14] сообщили о различных конфигурациях волноводов, таких как прямые, изогнутые, спиральные и винтовые, с несколькими отражателями для контроля высокой температуры с использованием мод $L(0, 1)$ и $T(0, 1)$. Dhayalan и др. [25] разработали ультразвуковой датчик на основе трубки для мониторинга колебаний уровня воды и смеси жидкого натрия с использованием продольной волны утечки $L(0, 2)$ на основе импульсного эхометода. Roger и Kim и др. [26, 27] продемонстрировали конструкции волноводов прямоугольной и ромбовидной формы, которые повышают чувствительность датчика для контроля уровня, плотности и вязкости жидкости с использованием крутильной акустической моды. Кроме того, Suresh и др. показали, что разъем датчика сдвига и ось волновода ориентированы под углом 45°, что приводит к одновременному использованию мод $L(0, 1)$, $T(0, 1)$ и $F(1, 1)$. Различные методы, включая ультразвуковые датчики с воздушной связью и погружного типа (объемные волны), также могут измерять уровень жидкости. Как показано в предыдущих исследованиях [28, 29], эти методы зависят от эффектов затухания и

изменения продолжительности полета. Эти волноводные датчики обычно находятся в непосредственном контакте с целевой областью для измерений. Температура и давление в области измерения не влияют на датчик, что является преимуществом ультразвуковых волноводных методов. Мы убедились, что датчик надежно подключен к одному концу волновода, и поддерживали его температуру на уровне температуры окружающей среды. Чуприн и др. [30] определили характеристики контроль уровня жидкости/потока жидкости с помощью нормальных ультразвуковых волн. Муравьев и др. [31—33] сообщают об ультразвуковом подходе с использованием электромагнитно-акустических (ЭМА) методов для оценки остаточных напряжений в ободах вагонных колес. Они также продемонстрировали термообработку стальных прутков с использованием ультразвукового метода ЭМА. Контроль осуществлялся с использованием режимов продольных и поперечных волн на основе измерения скорости и затухания ультразвуковых сигналов. Кроме того, они изучили влияние рабочей частоты и конструктивных особенностей противофазного ЭМА-преобразователя на его характеристики направленности. Растегаев и др. [34] предложили волноводный метод с использованием акустико-эмиссионного подхода для мониторинга/обследования промышленных деталей, работающих при высоких температурах. Мы не можем генерировать все три волновые моды одновременно в тонком проводе, используя подход ЭМА, из-за сложной связи между катушкой ЭМА и тонким волноводом при различной ориентации. Тем не менее в данной работе были использованы обычные ультразвуковые приборы.

Данное исследование посвящено разработке ультразвукового волноводного датчика длиной 12,6 м. Чтобы упростить измерение глубины жидкости, используются одновременно три моды ($L(0, 1)$, $T(0, 1)$ и $F(1, 1)$). Для передачи и приема этих мод использовался сдвиговый преобразователь, расположенный под углом 45° к оси волновода. В литературе не было найдено подходящих данных для понимания поведения различных мод направляемых волн (L , T , F) при одновременном распространении этих мод $L(0, 1)$, $T(0, 1)$, $F(1, 1)$ в длинном волноводе (>12 м). При этом было обнаружено, что сигнал моды $F(1, 1)$ не может быть получен из волновода длиной 12,6 м. В дальнейшем планируется исследовать поведение сигнала $F(1, 1)$ при изменении длины волновода. Вначале были проведены измерения уровня жидкости с использованием волновых мод $L(0, 1)$ и $T(0, 1)$ через волновод длиной 12,6 м. Затем определили подходящую длину волновода для распространения всех трех волновых мод с достаточным уровнем сигнала.

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДАТЧИК С ДЛИННЫМ ВОЛНОВОДОМ

Для данной работы был выбран волновод из стальной проволоки. В табл. 1 приведены свойства материалов волноводов, их размеры и рабочая частота. Толщина волновода и рабочая частота были выбраны на основе дисперсионного соотношения [35] для нержавеющей стали, показанного на рис. 1. Одновременно все три моды $L(0, 1)$, $T(0, 1)$ и $F(1, 1)$ передавались и принимались в проводе из нержавеющей стали. Это достигалось при использовании преобразователя сдвиговой волны, соединенного под углом 45° с осью волновода, как показано на рис. 2, где также хорошо видна фотография ультразвукового возбуждения. Мы выбрали диапазон рабочих частот от 200 до 500 кГц для этой конструкции датчика, чтобы минимизировать эффект дисперсии. Для соединения с волноводом без воздушных зазоров был использован обычный датчик сдвиговой волны с кремниевым соединителем. В данном случае датчик отслеживает различные глубины уровня жидкости, такой как глицерин, вода и дизельное топливо. В табл. 2 представлены свойства этих жидкостей.

Таблица 1

Материалы волновода и параметры эксперимента

Материал волновода	Нержавеющая сталь
Длина волновода	12,6 м
Диаметр волновода	1,2 м
Модуль Юнга	219 ГПа
Плотность	7800 кг/м ³
Частота	300 Мвыб/с
Частота дискретизации	125 МГц
Ориентация	45°

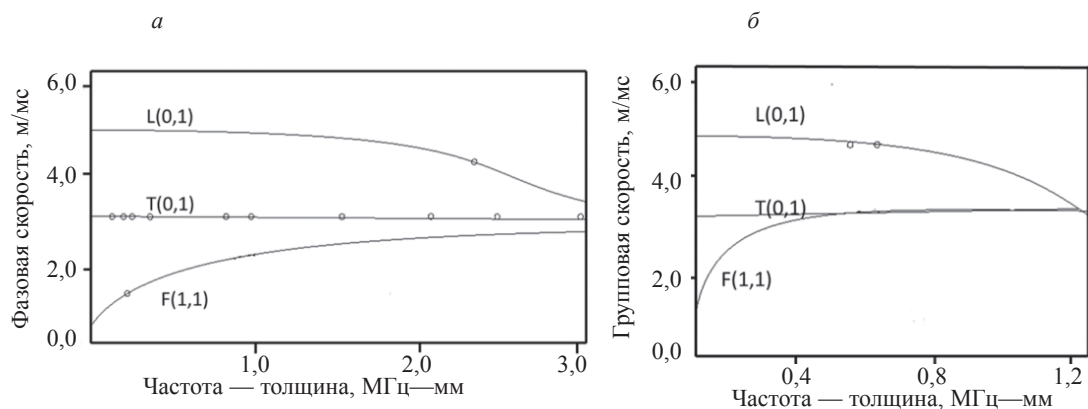


Рис. 1. Дисперсионное соотношение для нержавеющей стали: фазовая скорость (а); групповая скорость (б).

Таблица 2

Свойства жидкостей

Жидкость	Плотность, кг/м ³	Объемный модуль упругости, ГПа
Глицерин	1260	4,36
Вода	1000	2,2
Дизельное топливо	810	1,35

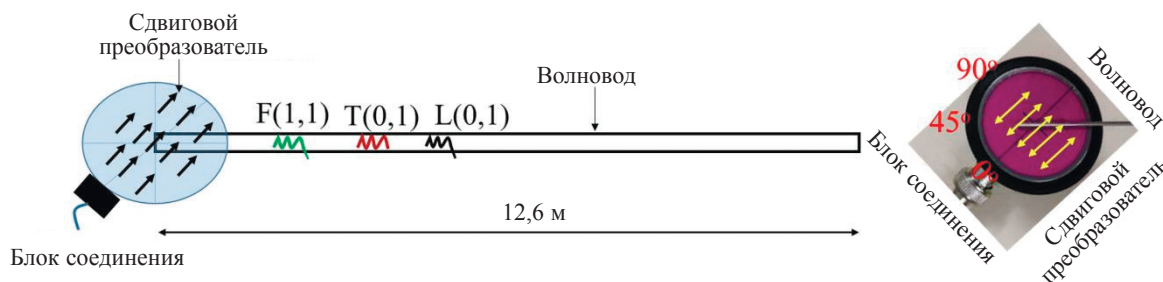


Рис. 2. Ориентация волновода и датчика под углом 45° для распространения мод F(1,1), T(0,1) и L(0,1) в эксперименте и фото возбуждения мод.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ ЖИДКОСТИ

Были проведены эксперименты по измерению уровня жидкости с помощью ультразвукового датчика с волноводом по импульсному эхометоду. В волноводной конструкции датчика использовались моды L(0, 1), T(0, 1) и F(1, 1), которые могут генерироваться при ориентации оси волновода на 45° с помощью сдвигового преобразователя, как показано на схеме рис. 3а. Здесь датчик был надежно соединен с волноводом с соответствующим давлением (через стопорные винты) с помощью изготовленного на заказ держателя датчика без воздушного зазора с использованием тонкого слоя кремниевой смазки. Этот держатель может быть изготовлен в общем виде на основе нашей требуемой конструкции с четкими деталями, как показано на рис. 3б. Это простая конструкция и концепция для соединения датчика и одного из волноводов при различных ориентациях. Однако эта концепция была хорошо описана в ранних работах [16, 20, 35]. На рис. 3в показана реальная экспериментальная установка и оборудование, состоящее из сдвигового датчика (Olympus, V151, 0,5 МГц), длинного волновода из нержавеющей стали (диаметр 1,2 мм, длина 12,6 м), приемника импульсов (JSR Ultrasonic DPR300), пикоскопа (серия 3000,

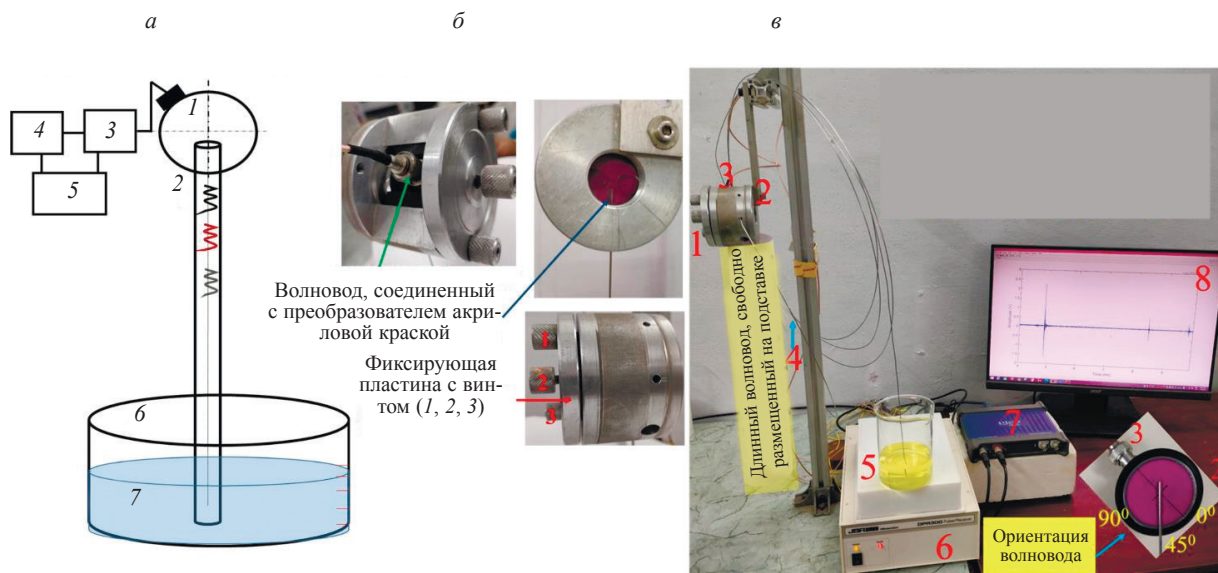


Рис. 3. Блок-схема экспериментальной установки (а): 1 — сдвиговый преобразователь; 2 — волновод; 3 — генератор-приемник; 4 — PicoScope; 5 — компьютер; 6 — контролируемый резервуар; 7 — контролируемый образец. Держатель преобразователя (б); реальная экспериментальная установка для измерения уровня жидкости (в): держатель преобразователя (1); сдвиговый преобразователь с волноводом при 45° (2); соединитель (3); длинный волновод (4); образец и контролируемая труба (5); генератор/приемник (6); PicoScope (7); ПК (8).

Pico Technology) и компьютера. Сигналы мод $L(0, 1)$ и $T(0, 1)$ передаются и принимаются приемником ультразвуковых импульсов. Для генерации ультразвукового импульса, распространяющегося по всей длине волновода, использовался преобразователь с частотой 0,5 МГц. Во время контроля уровня жидкости волновод вертикально располагался внутри контейнера. Конец волновода был соединен с датчиком сдвига, а другой конец датчика находился в жидкой среде. Первоначально волновод держали в воздушной среде и получали сигнал А-скана, показанный на рис. 4, который рассматривали как опорный сигнал. Затем были проведены эксперименты по измерению уровня жидкости с тремя различными жидкостями: глицерином (а), водой (б) и дизельным топливом (в). Как показано на рис. 4, отраженный сигнал А-скана был получен от волновода, когда он был окружен воздушной средой (непосредственно перед заполнением жидкостью).

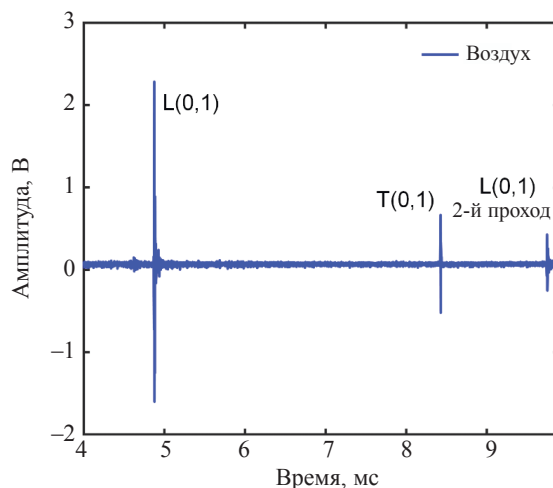


Рис. 4. Полученный сигнал А-скана (волновод в воздушной среде).

Волновод погружали в жидкую среду, изменяя уровень заполнения жидкостью. При этом один конец волновода погружался в жидкую среду, а другой соединялся со сдвиговым датчиком, находящимся в условиях окружающей среды. Был проведен эксперимент по измерению уровня в различных жидкостях, таких как глицерин, вода и дизельное топливо. Наблюдалось уменьшение амплитуды при увеличении уровня погружения волновода в жидкую среду. Здесь было замечено, что изменение амплитуды полученных сигналов А-скана относительно невелико. Следовательно, изменение амплитуды сигнала было минимальным при изменении длины погружения волновода в различные жидкости. Таким образом, определить амплитуду сигнала от пика до пика с помощью ранее описанной идеи отслеживания пиков [27, 28] было сложно. Поэтому преобразование Гильберта (ПГ) было признано альтернативным инструментом для отслеживания пиковой амплитуды принимаемых отраженных сигналов при погружении волновода в различные уровни различных жидкостей, как показано на рис. 5.

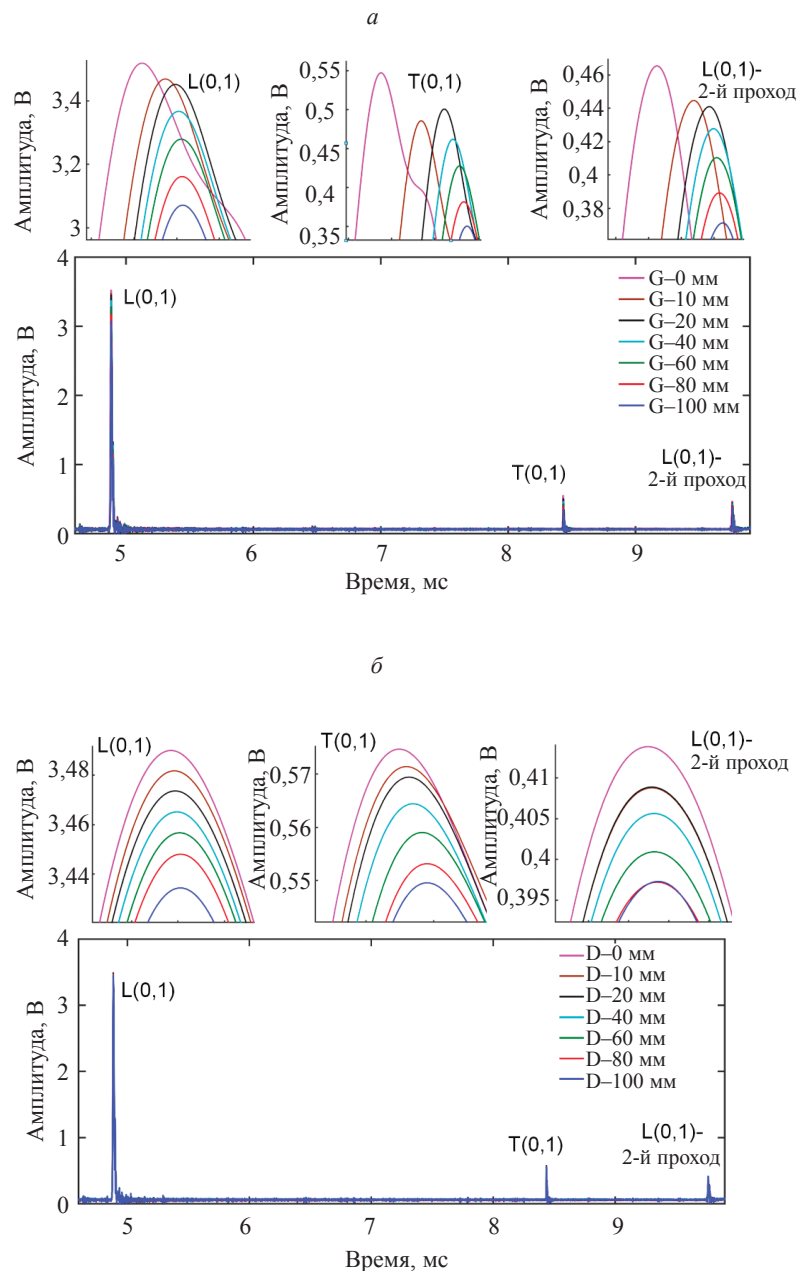
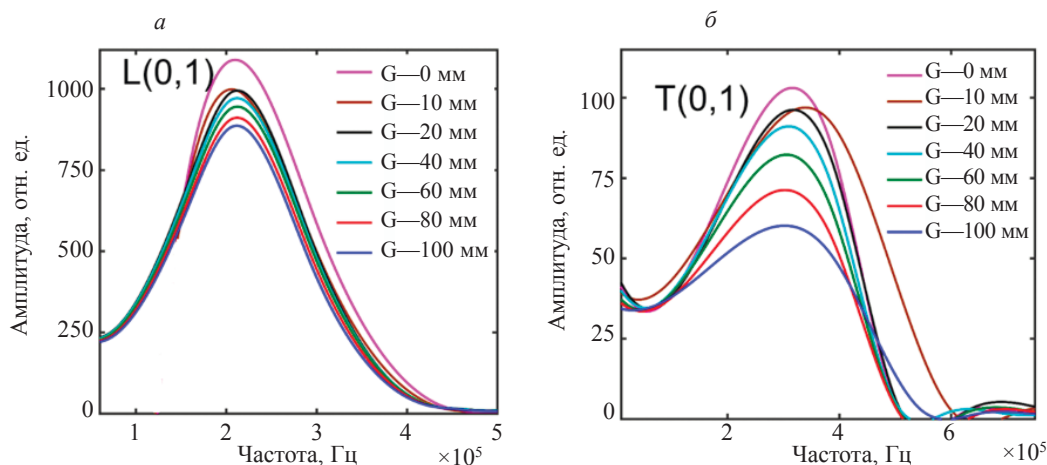
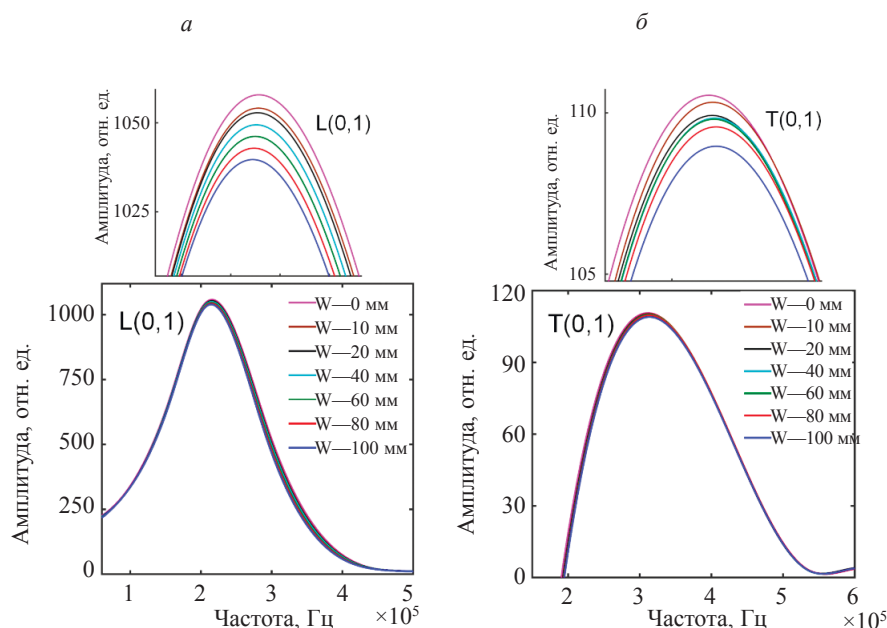


Рис. 5. Преобразование Гильберта полученного сигнала А-скана и его увеличенное изображение для глицерина (*a*) и дизельного топлива (*б*).

Рис. 6. БФП для полученных мод $L(0, 1)$ (а), $T(0, 1)$ (б) сигналов от глицерина.

Измерения уровня в ранних работах в основном изучались с помощью анализа сигналов во временной области различных волновых режимов [22, 25]. На данном этапе разработки датчика было замечено, что амплитудное падение демонстрирует сходство как при анализе во временной, так и в частотной области. Поэтому для обнаружения небольших изменений уровня жидкости было решено использовать подход, основанный на частотной области, с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ). Этот метод оказался более наглядным, чем анализ сигналов во временной области при различных уровнях жидкости. Из сигналов А-скана (во временной области) были извлечены различные волновые моды, а для получения частотных спектров применялась нулевая подстановка. На рис. 6 и рис. 7 представлены частотные спектры, причем для каждого сигнала рассматривалось одинаковое количество образцов при погружении датчика в глицерин или воду. Амплитуда мод $L(0, 1)$ и $T(0, 1)$ уменьшается при погружении датчика на различную глубину в глицериновую и водную среду. При измерении уровня жидкости не обнаружено заметных частотных сдвигов, поскольку волноводный датчик был разработан на основе фундаментальных или низких частот.

Рис. 7. БФП для полученных мод $L(0, 1)$ (а), $T(0, 1)$ (б) сигналов от воды.

Волноводный датчик был откалиброван по коэффициенту отражения, полученному в результате анализа в частотной области на основе падения амплитуды. Коэффициент отражения (КО) имеет решающее значение для исследования свойств жидкости, таких как уровень, вязкость и плотность [11, 18, 21]. Коэффициент отражения — это отношение амплитуды отраженного сигнала в жидкой среде к амплитуде сигнала в воздушной среде. Как показано на рис. 6 и рис. 8, в густой жидкости (глицерин) наблюдается более значительное снижение амплитуды и большее уменьшение коэффициента отражения (КО) из-за высокого затухания. Однако в текучих жидкостях (дизельное топливо или вода) наблюдалось незначительное снижение амплитуды и меньшее уменьшение КО вследствие меньшего затухания, как показано на рис. 7 и рис. 8. Коэффициент отражения (КО) мод $L(0, 1)$ и $T(0, 1)$ был измерен путем анализа падения амплитуды полученного сигнала при различных уровнях погружения. Кроме того, из-за большей чувствительности для измерения уровня жидкости был использован сигнал второго прохождения моды $L(0, 1)$ [20], хотя результаты измерений уровня жидких сред (дизельное топливо, вода) оказались неудовлетворительными. Особенно чувствительность мод $L(0, 1)$ была ниже в прямых волноводах [21, 22] при измерении уровня жидкости на малой глубине. Следовательно, длинный прямой волновод может быть преобразован в датчик с изогнутым или спиральным волноводом [18, 20] для эффективного измерения текучей среды при микроизменениях уровня ($\leq 0,5$ мм) благодаря высокой чувствительности, несмотря на то, что моды L и T могут измерять большую глубину/уровень жидкости из-за постепенного падения [20] КО сигнала при заполнении больших глубин и типов жидкостей. Падение/затухание амплитуды сигнала датчика происходит на границе волновода (твердой среды) и жидкой среды из-за несоответствия импеданса между ними. Как правило, в текучих жидкостях потери (затухание) волн были меньше из-за низкой вязкости или меньшего затухания. Однако в густых жидкостях возникает большее затухание волн из-за большего демпфирования (высокой вязкости). Следовательно, ослабление/падение амплитуды сигнала датчика прямо пропорционально вязкости жидкости. Однако чувствительность датчика хорошо объясняется на основе коэффициента отражения при использовании различных жидкостей в ранних работах [18, 20].

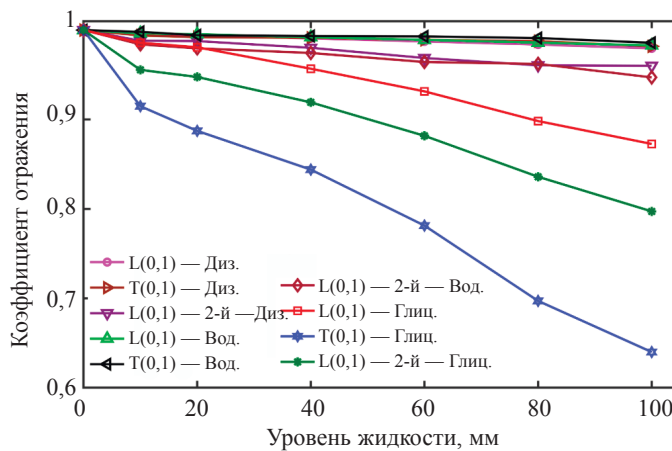


Рис. 8. Зависимость коэффициента отражения от уровня различных жидкостей.

На основании полученных результатов (см. рис. 8) были составлены эмпирические уравнения, основанные на фактическом уровне заполненной жидкости (объемным методом с помощью шприца объемом 20 мл) и соответствующем коэффициенте отражения L - и T -волновых мод датчика. Коэффициенты эмпирических уравнений и коэффициент корреляции (R^2) приведены в табл. 3, x и y представляют собой коэффициент отражения (КО) и уровень жидкости в мм соответственно.

Уровень жидкости измерялся по эмпирическим уравнениям с использованием мод L - и T -волн. Графики погрешностей (рис. 9) были получены при использовании измеренного уровня жидкости с фактическим уровнем жидкости, и средняя погрешность составляет от 2,2 до 3,3 %.

Таблица 3

Коэффициенты аппроксимации с помощью полинома второго порядка для уровня жидкости ($y = ax^2 + bx + c$)

Моды/ жидкость	L(0,1)				T(0,1)				L(0,1) — 2-й проход			
	a	b	c	R^2	a	b	c	R^2	a	b	c	R^2
Вода	86009	-176590	90579	0,995	144796	-295753	150954	0,984	12573	-26347	13773	0,994
Дизельное топливо	50176	-104488	54310	0,993	84312	-172840	88524	0,986	21278	-43918	22639	0,986
Глицерин	-1541,7	2109,6	-568,23	0,996	175,43	-579,07	399,81	0,984	137,56	-766,86	625,21	0,986

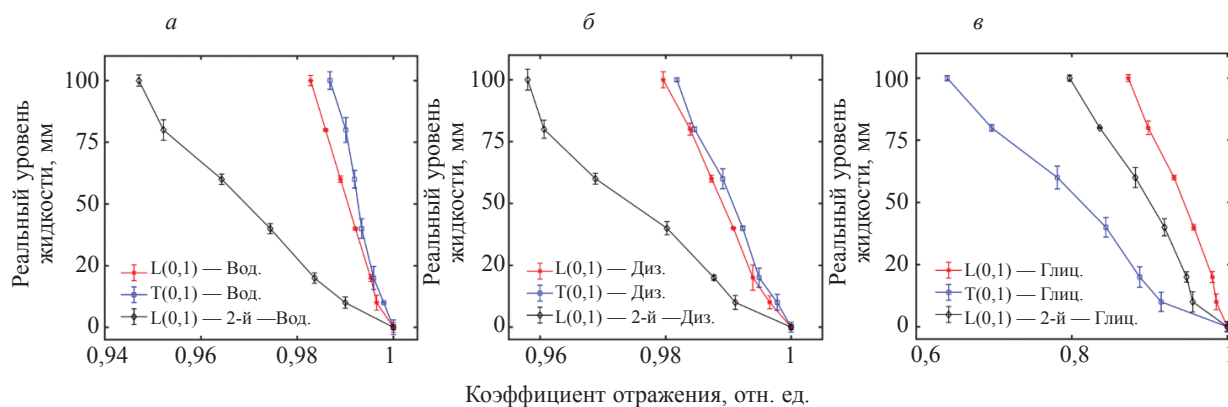


Рис. 9. Границы погрешности для L(0,1), T(0,1) 1-го прохода и L(0,1) 2-го прохода в воде (а); дизельном топливе (б); глицерине (в).

ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ЗАТУХАНИЯ В ДЛИННОМ ВОЛНОВОДЕ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

При разработке длинного датчика был исследован эффект затухания в длинном волноводе из нержавеющей стали путем проведения экспериментов с использованием всех трех мод волны. В этом эксперименте было определено затухание распространения волн для трех режимов, а именно F(1, 1), T(0, 1) и L(0, 1). Для проведения исследования затухания мы рассматривали волновод начальной длины 12,6 м. Полученный сигнал А-скана включал моды L(0, 1) и T(0, 1) на длине 12,6 м, как показано на рис. 10а. После этого длинный волновод отрезали через каждые 1 м, чтобы определить эффект затухания при уменьшении длины волновода от 12,6 м. Во время этого эксперимента датчик сдвига надежно и плотно подсоединили с ориентацией 45 град [20, 35] и приложили соответствующее давление, чтобы получить все три волновые моды. Длина волновода была уменьшена (путем отрезания) с 12,6 до 1,72 м. Волновые моды F(1, 1), T(0, 1) и L(0, 1) совместно наблюдались (см. рис. 10б—г) на определенных длинах волновода (от 6,6 до 1,72 м). Амплитуды сигналов волновых мод L(0, 1) и T(0, 1) увеличивались при одновременном уменьшении длины волновода с 12,6 до 1,72 м.

Направление сдвигового датчика и приложенное давление не менялись в процессе резки волновода. Кроме того, датчик не подвергался помехам, поскольку находился далеко от стороны отреза длинного волновода. Был обнаружен сигнал моды F(1, 1) с небольшой/слабой амплитудой, соответствующий длине волновода 8,6 м при отрезании волновода от 12,6 м. Однако мода F(1, 1) распространялась по всей длине волновода, но ее энергия могла быть ослаблена или затухать на длине волновода 12,6 м. Кроме того, в данном исследовании использовались максимальные настройки усилителя 60 дБ и импульсное напряжение 450 В нашего прибора (импульсный приемник; доступные настройки) для поиска/отслеживания волновой моды F(1, 1) в длинном волноводе. Однако отражение сигнала волновой моды F(1, 1) на длине 12,6 м получить не удалось. В дальнейшем амплитуда сигнала моды F(1, 1) постепенно увеличивалась по мере уменьшения

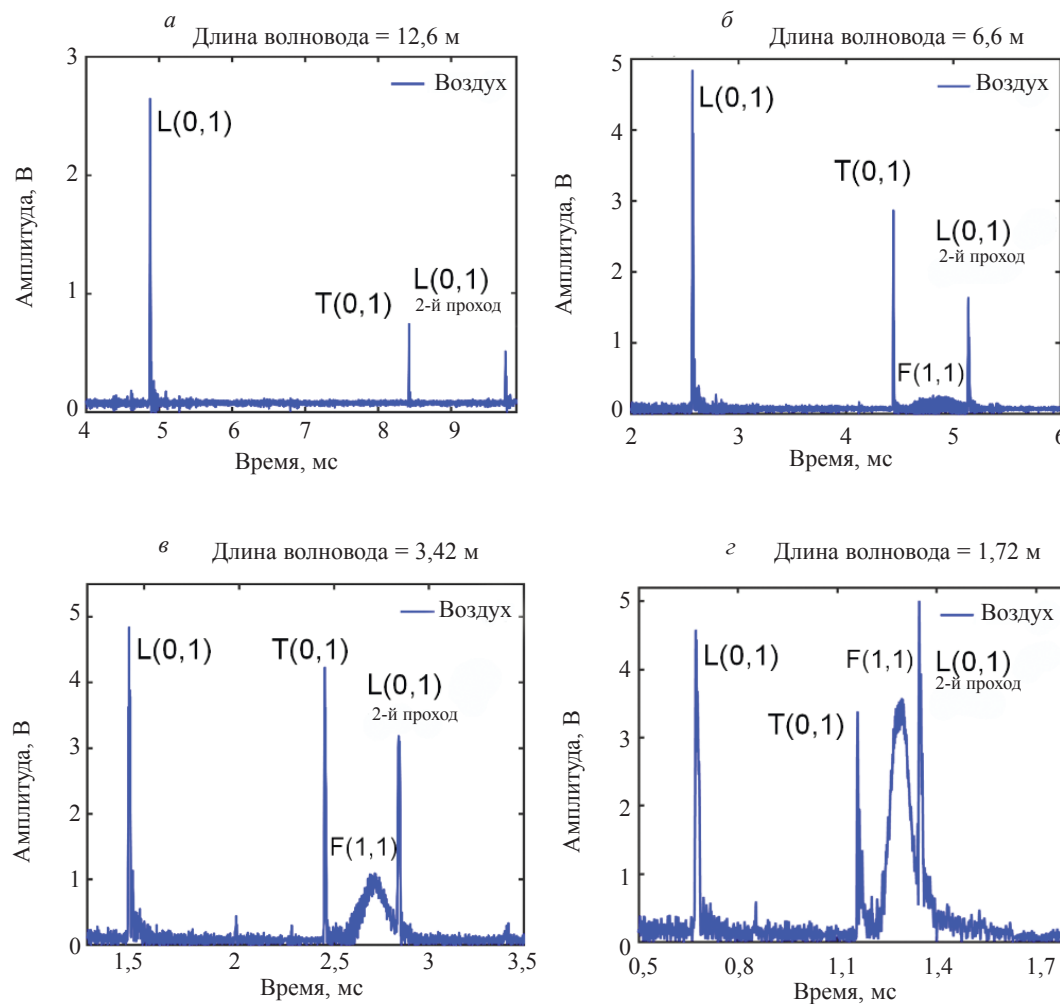


Рис. 10. Преобразование Гильберта для полученных сигналов А-скана при длинах волновода 12,6; 6,6; 3,4 и 1,7 м.

длины волновода. Также было проведено тестирование датчика при уменьшении длины волновода (от длины 12,6 м) на 6,6; 3,42 и 1,7 м. Амплитуда отраженного сигнала, в частности $L(0, 1)$, $T(0, 1)$ и $F(1, 1)$, увеличивалась по мере уменьшения длины волновода. Проведя анализ, было обнаружено, что мода $F(1, 1)$ не обладает достаточной способностью распространяться на большие расстояния в длинном волноводе, в отличие от мод $L(0, 1)$ и $T(0, 1)$. Кроме того, сигнал моды $F(1, 1)$ (слабый уровень сигнала) был зафиксирован на соответствующей длине волновода 8,6 м при применении максимального напряжения и усиления. Ранее сообщалось [20], что мода $F(1, 1)$ была более чувствительной, чем другие моды волн, при измерении уровня жидкости. Поэтому целью нашего исследования было изучение длины волновода, по которому можно передавать и принимать сигнал распространения моды $F(1,1)$ для создания ультразвуковых датчиков. Поэтому уровни сигналов всех трех волновых мод были исследованы при различных длинах волновода (от 12,6 до 1,7 м волновода) с помощью преобразования Гильберта и отслеживания пиковых сигналов, как показано на рис. 11. Здесь амплитуда каждой волновой моды была увеличена при уменьшении длины волновода путем обрезания почти на каждой длине 1 м.

Дисперсные соотношения [36] могут быть использованы для определения рабочей частоты волноводного датчика на основе диаметра волновода и при этом не указывают на зависимость рабочей частоты от длины волновода. Поэтому предполагалось исследовать значения частот, связанных с волноводными модами $L(0, 1)$, $T(0, 1)$ и $F(1, 1)$ при изменении длины волновода от 12,6 до 1,7 м (путем сокращения длины волновода до 12,6; 10,6; 8,6; 6,6; 4,4; 3,4 и 1,7 м). Первоначально мы рассмотрели волновод длиной 12,6 м и установили, что в нем присутствуют только моды $L(0, 1)$ и $T(0, 1)$. На рис. 12 показано изменение частот мод $L(0, 1)$, $T(0, 1)$ и $F(1, 1)$, что подчеркивает

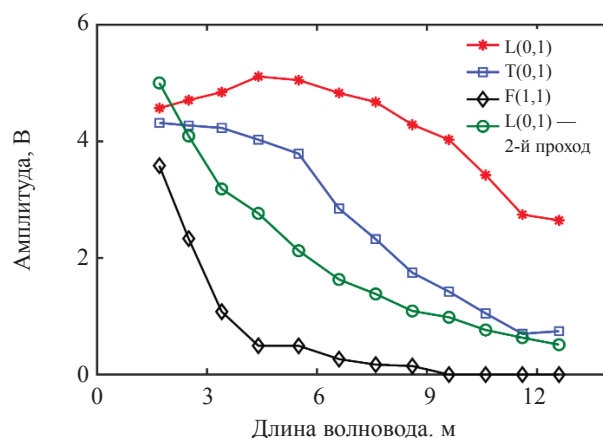


Рис. 11. Изменение амплитуды сигналов мод волн L, T, F при изменении длины волновода.

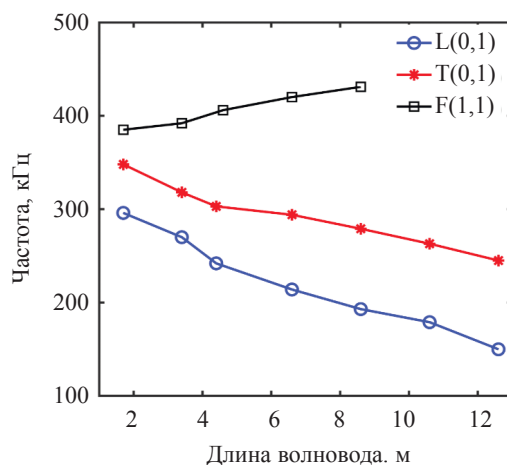


Рис. 12. Зависимость частоты сигнала L(0, 1), T(0, 1), F(1, 1) от длины волновода.

их зависимость от длины волновода. В этом опыте было замечено, что с увеличением длины волновода соответствующая частота полученных сигналов мод L(0, 1) и T(0, 1) уменьшается. В случае сигнала моды F(1,1) частота немного увеличивается при увеличении длины волновода. Кроме того, недисперсионное поведение сигнала моды F(1, 1) может быть эффективно использовано для дальнейшей разработки ультразвукового датчика с использованием моды F. Значительное изменение частоты (f_c) наблюдалось на каждой длине волновода, однако скорости волн L, T и F-мод были практически одинаковыми на соответствующих длинах волновода, как показано в табл. 4.

Таблица 4

Скорости волн мод L(0, 1), T(0, 1) и F(1, 1) при различных длинах L волновода, м/с

L , м	L(0, 1)	T(0, 1)	F(1, 1)
1,72	5158	2971	2656
3,4	5146	2963	2669
6,6	5154	2972	2723
8,6	5150	2983	2752
12,6	5162	2990	—

В ранних работах ультразвуковые датчики уровня и температуры [14, 17, 18, 20] были разработаны (с использованием волноводов длиной $\leq 2,7$ м) и использовались для измерения уровня жидкости

и температуры горячей камеры на основе падения амплитуды (затухания), сдвига времени пролета (δTOF) и ненаблюдаемого сдвига частоты. Таким образом, предлагается разработчикам волноводных датчиков более внимательно относиться к рабочей частоте датчика (недисперсионной, с меньшим значением f_c) при внедрении нескольких отражателей в длинный волновод.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Был разработан ультразвуковой датчик из нержавеющей стали с длинным волноводом для определения уровня жидкости. Моды $L(0, 1)$ и $T(0, 1)$ передавались и принимались (импульсный эхометод) с помощью сдвигового преобразователя в волноводе длиной 12,6 м. Длинный волноводный датчик длиной 12,6 м был сконструирован с использованием режимов L и T и с его помощью измерялись уровни жидкостей (воды, глицерина и дизельного топлива). Мода $F(1, 1)$ не наблюдалась в волноводе длиной 12,6 м с использованием длинной проволоки из нержавеющей стали. Были проведены исследования затухания на разных длинах с использованием ультразвукового длинного волновода со всеми тремя модами. Волновод разрезался с интервалом в 1 м для наблюдения за поведением сигнала и одновременного отслеживания моды $F(1, 1)$. Были определены подходящие длины волноводов для получения желаемой мощности моды $F(1, 1)$, определенной при длине волноводов $\leq 8,6$ м, которые могут быть использованы для разработки датчика уровня на основе моды F . Также было обнаружено, что при увеличении длины волновода частота полученных мод $L(0, 1)$ и $T(0, 1)$ постепенно уменьшается. Однако в случае $F(1, 1)$ частота сигнала моды немного увеличивалась при увеличении длины волновода. Кроме того, данная технология может быть использована для измерения уровня жидкости, температуры и плотности и обладает многочисленными преимуществами по сравнению с традиционными методами. Более того, несколько отражателей («изгибов и вырезов») могут быть размещены в нужном месте по всей длине волновода для различных применений. Ультразвуковые датчики на длинных волноводах отличаются более высокой долговечностью и экономичностью по сравнению с традиционными устройствами.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cummings D.D., Wartmann G., Perdue K.L. Sensor apparatus for process measurement. U.S. Patent 5 661 251. Aug. 26. 1997.
2. Grieger B.D., Cummings D.D. Sensor apparatus for process measurement. U.S. Patent 5 827 985. Oct. 27. 1998.
3. Pelczarl C., Meiners M., Gould D., Lang W., Benecke W. Contactless liquid level sensing using wave damping phenomena in free-space / TRANSDUCERS 2007 — 2007 International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, Lyon, France. 2007. P. 2353—2356. DOI: 10.1109/SENSOR.2007.4300642
4. Xiaowei D., Ruifeng Z. Detection of liquid-level variation using a side-polished fiber Bragg grating // Opt. Laser Technol. 2010. V. 42. P. 214—218.
5. Peng G., He J., Yang S., Zhou W. Application of the fiber-optic distributed temperature sensing for monitoring the liquid level of producing oil wells // Meas. J. Int. Meas. Confed. 2014. V. 58. P. 130—137.
6. Ran Y., Xia L., Niu D., Wen Y., Yu C., Liu D. Design and demonstration of a liquid level fiber sensor based on self-imaging effect // Sensors Actuators. A Phys. 2016. V. 237. P. 41—46.
7. Rogers S.C., Miller G.N. Level, temperature, and density sensor*. 1982.
8. Lynnworth L.C. Ultrasonic Measurements for Process Control: Theory, Techniques, Applications. Acad. Press, 2013.
9. Kim J.O. et al. Torsional Sensor Applications in Two-Phase Fluids // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 1993. V. 40. P. 563—576.
10. Spratt W.K., Vetelino J.F., Lynnworth L.C. Torsional Ultrasonic Waveguide Sensor / 2010 IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings. 978-1-4577-0381-2/10/\$25.00 ©2010 IEEE.
11. Balasubramaniam K., Periyannan S. A novel ultrasonic waveguide technique for distributed sensing and measurements of physical and chemical properties of surrounding media. US Patent No: US 10520370B2. 2019.
12. Periyannan S., Rajagopal P., Balasubramaniam K. Torsional mode ultrasonic helical waveguide sensor for re-configurable temperature measurement // AIP Advances. 2016. No. 6. P. 065116.
13. Periyannan S., Balasubramaniam K. Multi-level temperature measurements using ultrasonic waveguides // Measurement. 2015. V. 61. P. 185—191.

14. Periyannan S., Rajagopal P., Balasubramaniam K. Re-configurable Multi-Level Temperature Sensing by Ultrasonic Spring-like Helical Waveguide // *J. App. Phy.* 2016. V. 119. P. 144502.
15. Rose J.L. Ultrasonic Waves in solid Media. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1999. P. 143—152.
16. Periyannan S., Balasubramaniam K. Simultaneous moduli measurement of elastic materials at elevated temperatures using an ultrasonic waveguide method // *Review of Scientific Instruments.* 2015. V. 86. P. 114903.
17. Periyannan S., Rajagopal P., Balasubramaniam K. Multiple Temperature Sensors Embedded in an Ultrasonic Spiral-like waveguide // *AIP Advances.* 2017. V. 7. P. 035201.
18. Kumar A., Periyannan S. Helical waveguide sensor for fluid level sensing using L(0,1), T(0,1) and F(1,1) wave modes simultaneously // *IEEE Sensors Journal.* Jul. 2023. V. 23 (17). P. 19002—19011. DOI: 10.1109/JSEN.2023.3296931
19. Periyannan S., Rajagopal P., Balasubramaniam K. Ultrasonic Bent Waveguides Approach for Distributed Temperature Measurement // *Ultrasonics.* 2017. V. 74. P. 211—220.
20. Kumar A., Periyannan S. Enhancing the ultrasonic waveguide sensor's fluid level sensitivity using through-transmission and pulse-echo techniques simultaneously // *Review of scientific Instruments.* 2023. V. 94 (6). P. 065007. <https://doi.org/10.1063/5.0145684>
21. Raja N., Balasubramaniam K., Periyannan S. Ultrasonic waveguide based level measurement using flexural mode F(1,1) in addition to the fundamental modes // *Rev. Sci. Instrum.* 2019. V. 90. <https://doi.org/10.1063/1.5054638>
22. Subhash N.N., Balasubramaniam K. Fluid level sensing using ultrasonic waveguides // *Insight-Nondestructive and condition monitoring.* 2014. V. 56 (6). P. 607—612. DOI: doi.org/10.184/insi.2014.56.11.607
23. Huang S. et al. An Optimized Lightweight Ultrasonic Liquid Level Sensor Adapted to the Tilt of Liquid Level and Ripple // *IEEE Sensors Journal.* Jan.1. 2022. V. 22. No. 1. P. 121—129. DOI: 10.1109/JSEN.2021.3127127
24. Matsuya I., Honma Y., Mori M., Ihara I. Measuring Liquid-Level Utilizing Wedge Wave // *Sensors.* 2018. V. 18 (1). P. 2. <https://doi.org/10.3390/s18010002>
25. Dhayalan R., Saravanan S., Manivannan S., Rao B.P.C. Development of ultrasonic waveguide sensor for liquid level measurement in loop system // *Electronics Letters.* 2020. V. 56 (21). P. 1120—1122.
26. Rogers S.C., Miller G.N. Ultrasonic level, temperature, and density sensor // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* Feb. 1982. V. 29. No. 1. P. 665—668.
27. Kim J.O. et al. Torsional sensor applications in two-phase fluids // *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Control.* Sep. 1993. V. 40. No. 5. P. 563—576.
28. Li P., Cai Y., Shen X., Nabuzaale S., Yin J., Li J. An accurate detection for dynamic liquid level based on MIMO ultrasonic transducer array // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2015. V. 64. P. 582—595.
29. Zhang et al. A novel ultrasonic method for liquid level measurement based on the balance of echo energy // *Sensors (Switzerland).* 2017. V. 17. <https://doi.org/10.3390/s17040706>
30. Chuprin V.A. Control of liquid media using ultrasonic normal waves. Moscow: Spectrum, 2015. 216 p. ISBN 978-5-4442-0101-5.
31. Muravyev V.V., Muravyeva O.V. et al. Evaluation of Residual Stresses in Rims of Wagon Wheels Using the Electromagnetic-Acoustic Method // *Russian Journal of Nondestructive Testing.* 2011. V. 47. No. 8. P. 512—521.
32. Muravyev V.V., Muravyeva O.V., Kokorina E.N. Quality Control of Heat Treatment of 60C2A Steel Bars Using the Electromagnetic-Acoustic Method // *Russian Journal of Nondestructive Testing.* 2013. V. 49. No. 1. P. 15—25.
33. Murav'eva O.V., Murav'ev V.V., Myshkina A.V. The Influence of the Design Features of Antiphased Electromagnetic-Acoustic Transducers on the Formation of Directivity Characteristics // *Russian Journal of Nondestructive Testing.* 2014. V. 50. No. 9. P. 531—538.
34. Rastegaev I.A., Merson D.L., Danyuk A.V., Afanas'ev M.A., Khrustalev A.K. Universal Waveguide for the Acoustic-Emission Evaluation of High-Temperature Industrial Objects // *Russian Journal of Nondestructive Testing.* 2018. V. 54. No. 3. P. 164—173.
35. Balasubramaniam K., Periyannan S. Ultrasonic waveguide technique for distribute sensing and measurements of physical and chemical properties of surrounding media. US Patent 11 022 502. June 1. 2021.
36. Pavlakovic B.N., Lowe M.J.S., Cawley P. Disperse: A general purpose program for creating dispersion curves // *Quant. Non-Destructive Eval.* 1997. V. 16. P. 185—192.

ИССЛЕДОВАНИЕ ШУМОПОДАВЛЕНИЯ СИГНАЛОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СПЛАВОВ: МЕТОД КРОССРЕКУРРЕНТНОГО КОЛИЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА

© 2024 г. Цюйюэ Ли^{1,2}, Юшу Лай^{2,*}, Дифэй Цао³

¹Чунцинский профессионально-технический институт технологии безопасности, Чунцин, Китай

²Чунцинский университет трех ущелий, Чунцин, Китай

³Пекинский научно-технологический университет, Пекин, Китай

*E-mail: Laiys@Sanxiau.edu.cn

Поступила в редакцию 13.12.2023; после доработки 24.12.2023

Принята к публикации 28.12.2023

Для решения проблемы, связанной с тем, что сигналы, полученные в результате локальных действий электромагнитного поля, обычно смешиваются с фоновыми шумами (особенно с белым шумом), в данной работе предложена технология разложения сигналов электромагнитной акустической эмиссии, основанная на кроссрекуррентном количественном анализе (КРКА). Для начала опытным путем или с помощью алгоритма оптимизации устанавливаются слой разложения и критерий коррекции разложения по вариационным модам (PBM), после чего исходный сигнал подвергается разложению. Затем основные компоненты выбираются алгоритмом КРКА, и сигнал электромагнитной акустической эмиссии после разложения получается путем суперпозиционного восстановления. Результаты моделирования и экспериментов показывают, что при добавлении шума в 5 дБ метод КРКА может эффективно удалять фоновые шумы в сигналах электромагнитной акустической эмиссии по сравнению с алгоритмом коэффициента корреляции, и это может помочь в реализации высокоточного неразрушающего контроля сплавов.

Ключевые слова: электромагнитно-акустическая эмиссия, неразрушающий контроль, разложение по вариационным модам, кроссрекуррентный количественный анализ.

INVESTIGATING ELECTROMAGNETIC ACOUSTIC EMISSION SIGNALS DENOISING FOR ALLOY MATERIALS NON-DESTRUCTIVE DETECTING: A CRQA METHOD

Qiuyue Li^{1,2}, Yushu Lai^{2,*}, Difei Cao³

¹Chongqing Vocational Institute of Safety Technology, Department of Network and Information Security, Chongqing, China

²Chongqing Three Gorges University, School of Mechanical Engineering, Chongqing, China

³University of Science and Technology Beijing, School of Computer & Communication Engineering, Beijing, China

*E-mail: Laiys@Sanxiau.edu.cn

Aiming at the problem that signals collected from local electromagnetic loading operations are usually mixed with background noises (especially white noise), this paper proposed an electromagnetic acoustic emission signal denoising technology based on cross recurrence quantification analysis (CRQA). Firstly, the decomposition layer and penalty factor of variational mode decomposition (VMD) are set by experience or optimization algorithm, and then the original signal is decomposed. Secondly, the main components are selected by the CRQA algorithm, and the electromagnetic acoustic emission signal after denoising is obtained by superposition reconstruction. The simulation and experimental results show that when 5dB noise is added, CRQA can effectively remove the background noises in electromagnetic acoustic emission signals compared to the correlation coefficient algorithm, and it can assist in realizing the high-precision non-destructive testing of alloy materials.

Keywords: electromagnetic acoustic emission, non-destructive detecting, variational mode decomposition, cross recurrence quantification analysis.

DOI: 10.31857/S0130308224020039

1. ВВЕДЕНИЕ

Сплавы широко применяются в области автоматизации электрооборудования, так как обладают более высокой прочностью на разрыв, лучшей усталостной прочностью и более высокой коррозионной стойкостью по сравнению с обычными материалами [1, 2]. Как известно, при длительной эксплуатации заготовок из сплавов неизбежно возникают дефекты (например,

износ, трещины и т.д.) в структуре, что может привести к травмам и материальному ущербу [3—5]. Поэтому регулярное тестирование различных свойств заготовок является необходимым.

В целом, способы обнаружения дефектов можно разделить на обычный метод испытаний и метод неразрушающего контроля [1]. В первом случае для разрушающего испытания необходимо взять образец исходного материала, что не способствует техническому обслуживанию машины. Напротив, метод неразрушающего контроля (НК) позволяет точно определить состояние ресурса, не повреждая испытываемую деталь [6]. Являясь важнейшей технологией в Индустрии 4.0, она имеет большое значение для безопасности и устойчивости автоматизированных машин [7—9].

Акустическая эмиссия (АЭ) является одним из основных методов неразрушающего контроля для выявления дефектов сплавов. К сожалению, ее недостатком является сложность механического нагружения, вызывающая вторичные повреждения [10]. Электромагнитная акустическая эмиссия (ЭМАЭ) является передовым методом контроля, который сочетает в себе преимущества методов электромагнитного воздействия и АЭ. В жестких условиях эксплуатации метод ЭМАЭ позволяет диагностировать вероятный рост повреждений и процесс разрушения на основе бесконтактного локального электромагнитного воздействия, что имеет большие перспективы развития в области неразрушающего контроля [11]. В целом, полученные сигналы ЭМАЭ подвержены шумовым помехам в сложных условиях эксплуатации. Подавление шумов в сигнале ЭМАЭ позволяет восстановить высококачественную информацию о сигнале, что также является гарантией эффективного извлечения типичных характеристик сигнала [12].

Разложение по вариационным модам (РВМ) — нерекурсивный метод анализа временных и частотных характеристик, предложенный Драгомирецким и др., который адаптивно раскладывает сигнал на несколько эмпирических мод (ЭМ) [13]. Этот метод позволяет эффективно снижать шумность нелинейных и негладких сигналов. Особое внимание в алгоритме РВМ уделяется анализу корреляции между каждой ЭМ и исходным сигналом. После получения сильно коррелированных компонент сигнал может быть в конечном итоге подвергнут процедуре удаления шума путем суперпозиции при восстановлении этих ЭМ. Кроссрекуррентный количественный анализ (КРКА) — это эффективный алгоритм нелинейного анализа сигналов, который предоставляет несколько критериев потенциальной динамики сигналов в высокоразмерном пространстве, эти модели могут быть использованы для объективного анализа корреляции двух последовательностей сигналов с нескольких точек зрения, таких как частота повторения, задержка, расслоение, средняя длина диагонали и т.д. По сравнению с обычными линейными характеристиками (например, частотой, величиной и т.д.), рекуррентные характеристики более чувствительны к динамическим изменениям [14, 15].

Основываясь на вышеупомянутых утверждениях, в данной работе применяется КРКА для исследования корреляционных характеристик между каждой ЭМ, полученной в результате РВМ сигналов ЭМАЭ, и исходным сигналом. Затем находим точку мутации через среднее геометрическое (СГ) нескольких метрик для определения диапазона оптимальной комбинации компонентов, тем самым осуществляя выбор оптимального параметра и окончательное снижение шума сигнала ЭМАЭ. Следовательно, эта методика уменьшения шума может способствовать обеспечению возможности точного неразрушающего контроля легированных материалов, что гарантирует устойчивое развитие автоматизации производства электрооборудования.

2. СМЕЖНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Поскольку наше исследование тесно связано по своей сути с применением РВМ, рассматриваются последние исследования на эту тему. Кроме того, разясняется основная направленность работы. Общеизвестно, что алгоритм РВМ стал объектом исследований и нашел широкое применение в задачах деноазиса в различных областях.

Решая задачу шумоподавления, Wei и др. совместили метод РВМ с быстрым преобразованием Фурье для уменьшения частотных составляющих мощности и шума в переходном токе нулевой последовательности [16]. Ну и др. выделили шум внешней среды из сигналов векторных гидрофонов микроэлектромеханической системы с помощью РВМ и нелинейного порога вейвлетов, чтобы избежать дрейфа базовой линии и других искажений [17]. Для достижения той же цели был предложен комбинированный метод, основанный на оптимизированном по алгоритму китов РВМ и коэффициенте корреляции (КК) [18]. Dhandapani и др. предложили совместный алгоритм, сочетающий РВМ с мерами групповой вариации (Group-Sparse Total Variation) и энтропии для удаления многочисленных шумов, смешанных с сигналами частичного разряда [19]. Li и др. разработали

оптимизацию VMD и двухпороговые критерии для уменьшения сложного океанического шума, смешанного с судовыми помехами [20]. В работах [21, 22] Jiang и др. исследовали метод RBM и модифицированный метод RBM для уменьшения влияния состояния трубопровода и оборудования для регистрации сигналов для точного выделения характеристик сигнала повреждения при утечке в трубопроводе.

В целом, являясь важным элементом классического алгоритма RBM, несмотря на то, что метод коэффициента корреляции (КК) может эффективно моделировать корреляционные характеристики, он зависит от эмпирической настройки порога КК и иногда может не получить оптимальные компоненты, что, в свою очередь, приводит к ухудшению характеристик шумоподавления сигналов. Очевидно, что метод КРКА, упомянутый во введении, является подходящим благодаря своей сущности и соответствующим показателям. Для решения задачи подавления шума сигнала ЭМАЭ необходимо изучить возможности комбинации RBM и КРКА, т.е. метода RBM—КРКА.

3. МЕТОДОЛОГИЯ

3.1. Традиционный алгоритм RBM

Традиционное RBM (ТРBM) — это полностью нерекурсивный метод обработки сигналов [23, 24]. В рамках вариационной модели с ограничениями вариационная модель решается итеративно для разложения исходного сигнала на ряд амплитудно-модулированных частотных сигналов, и полученные узкополосные компоненты эмпирических мод могут хорошо отображать локальные характеристики сигнала.

1) Вариационная модель с ограничениями (задача поиска минимального значения) имеет вид:

$$\min \left\{ \sum_k \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) \times u_k(t) \right] e^{-j\{\omega_k\}t^2_2} \right\} \text{ s.t. } \sum_k u_k = x(t), \quad (1)$$

где $\{u_k\}$, $\{\omega_k\}$ — собственные модальные компоненты ЭМ и их центральные частоты; k — количество собственных модальных функций; $x(t)$ — исходный сигнал.

2) Решение модели с ограничениями:

Чтобы найти оптимальное решение вышеуказанной вариационной задачи с ограничениями, вводится дополненная функция Лагранжа, которая определяется как

$$L(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda) = \alpha \sum_k \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) \times u_k(t) \right] e^{-j\{\omega_k\}t^2_2} + f(t) - \sum_k u_k(t)^2 + \lambda(t), f(t) - \sum_k u_k(t), \quad (2)$$

где α — критерий коррекции 2-го порядка, также известный как равновесный параметр полноты разложения, и его значение оказывает влияние на точность восстановления сигнала; λ — множитель Лагранжа, множитель, который контролирует строгость ограничений. Седловые точки вышеуказанной дополненной функции могут быть получены с помощью метода множителей переменного направления, который является оптимальным решением вариационной модели с ограничениями в уравнении (2), так что модальная составляющая u_k и центральная частота ω_k могут уточняться.

Условие завершения:

$$\frac{\sum_k \|\hat{u}_k^{n+1} - \hat{u}_k^n\|}{\|\hat{u}_k^n\|_2^2} < \varepsilon, \quad (3)$$

где ε — точность сходимости.

3.2. Алгоритм оптимизации параметров RBM

Процесс разложения RBM имеет предустановленные параметры, где критерий коррекции α и количество мод разложения K влияют на производительность алгоритма RBM. Значение K определяет, насколько эффективно разложен сигнал, а подходящее количество слоев разложения позволяет избежать чрезмерного или недостаточного разложения. Критерий коррекции α — это началь-

ное центральное ограничение каждой моды, которое определяет ширину полосы пропускания компонентов ЭМ, а полнота метода РВМ может быть отрегулирована путем выбора параметров.

Для решения задачи подбора параметров РВМ исследуется метод шумоподавления для РВМ, основанный на алгоритме оптимизации. Генетический алгоритм (ГА) — это нелинейный алгоритм глобальной оптимизации, основанный на принципах естественного отбора и генетики [25, 26]. Он представляет собой итерационный процесс поиска лучшего, где каждое поколение популяции является циклом, а генетическое наследование заканчивается при достижении заданного количества циклов или критерия сходимости, в итоге, из всех генетических поколений находится лучшая хромосома. Для каждого поколения популяции выполняется отбор, скрещивание и мутация для завершения генетической операции, а все параметры оптимизируются в направлении целевой функции с помощью функции пригодности как генетического показателя оценки. Метод оптимизации серых волков (ОСВ) — это еще один метод оптимизационного поиска, который моделирует охотничью деятельность серых волков [27]. Его процесс содержит этапы стратификации социальной иерархии, отслеживания, окружения и нападения на добычу серых волков. Оптимальные параметры ВМД выводятся с помощью энтропии огибающей в качестве функции приспособленности и глобального минимума значения приспособленности в качестве цели оптимизации.

В данной работе для получения оптимальных заданных параметров разложения сигнала используются методы ГА и ОСВ, которые определяются как генетический алгоритм вариационного разложения (ГАВР) и вариационное разложение, оптимизированное серыми волками (ОСВРВМ) соответственно. Энтропия выборки используется в качестве фитнес-функции, а глобальный минимум фитнесзначения — в качестве цели оптимизации для фильтрации наилучшей комбинации параметров РВМ. Диапазон K — [2, 10]; диапазон α — [200, 2500]; количество итераций — 30; размер популяции — 10; вероятность кроссинговера — 0,8; вероятность дисперсии — 0,1.

3.3. Кроссрекуррентный количественный анализ

Восстановление фазового пространства (ВФП) является необходимым условием для реализации перекрестного рекуррентного анализа, который может отобразить ЭМ в то же высокоразмерное пространство, что и исходная последовательность сигналов, а восстановленные две последовательности обладают более нелинейными динамическими свойствами [28]. Предположим, что ряд ЭМ z имеет длину L , соответствующее ему фазовое пространство строится по теореме вложения Такенса [29], которая выражается следующим образом:

$$F_\varphi = \{z_\varphi, z_{\varphi+t}, \dots, z_{\varphi+(d-1)t}\}, \quad (4)$$

где $\varphi = 1, 2, \dots, L - (d-1)t$; d — размерность вложения; t — время задержки. Точный выбор этих двух параметров гарантирует, что система ВФП сохранит исходные суммарные характеристики системы. В данном случае для вычисления этих двух параметров восстановления используются взаимная информация [30] и метод ложного ближайшего соседа [31] соответственно. Для вычисления метрики КРКА выбираются одинаковые параметры реконструкции, причем меньшее t и большее d выбираются как наилучшие параметры реконструкции для обеих последовательностей ЭМ и исходных сигналов.

КРКА позволяет количественно оценить характеристики сходства между временными данными. В данной работе для измерения характеристик синхронизации между исходным сигналом и несколькими компонентами ЭМ в методе КРКА рассматриваются в основном три метрики, такие как частота повторения (ЧП), детерминизм (DET) и ламинарность (LAM).

По ЧП определяется вероятность возвращения двух последовательностей в одну и ту же область в фазовом пространстве, которая определяется:

$$\text{ЧП} = \frac{1}{L^2} \sum_{a,b=1}^L R_{a,b}. \quad (5)$$

В общем, большее значение ЧП обозначает более стабильное изменение системы, построенной на двух последовательностях.

С помощью DET измеряется прогнозирование и постоянство системы, построенной на два сигналах за все время. Если DET стремится к 0, система является периодической, а если DET стремится к 1, то система независима от времени. Эта величина определяется как

$$\text{DET} = \frac{\sum_{c=c_{\min}}^L cP(c)}{\sum_{c=1}^L cP(c)} \in [0,1], \quad (6)$$

где c — длина диагонали, а минимальное значение c равняется 2. $P(c)$ — распределение вероятности диагонали длиной c :

$$P(c) = \sum_{a,b=1}^A (1 - R_{a-1,b-1})(1 - R_{a+1,b+1}) \prod_{k=0}^{c-1} R_{a+k,b+k}. \quad (7)$$

С помощью LAM определяется доля рекуррентных точек, образующих перпендикулярные линии ко всем рекуррентным точкам, что свидетельствует о существовании ламинарных состояний в системе, по следующей формуле:

$$\text{LAM} = \frac{\sum_{e=e_{\min}}^L eP(e)}{\sum_{e=1}^L eP(e)}, \quad (8)$$

где e — длина перпендикуляра, а пороговое значение минимальной длины перпендикуляра устанавливается равным 2. $P(e)$ — распределение вероятности длины перпендикуляра e и выражается:

$$P(e) = \sum_{a,b=1}^G (1 - R_{a,b})(1 - R_{a,b+e}) \prod_{k=0}^{e-1} R_{a,b+k}, \quad (9)$$

где G — номер длины перпендикуляра.

Согласно выбранному алгоритму, после разложения сигнала ЭМАЭ будет получен набор ЭМ, а каждая ЭМ поочередно анализируется с помощью КРКА вместе с исходным сигналом. Затем рассчитываются три показателя, которые располагаются в порядке от наибольшего до наименьшего ГС. Затем эти компоненты накладываются друг на друга, менее коррелирующие компоненты поочередно отбрасываются, вычисляется значение ГС с исходным сигналом до мутации. В это время компонента наложения, выбранная вблизи точки мутации, представляет собой обесшумленный сигнал ЭМАЭ.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

4.1. Модельные расчеты

1) Генерация имитационных сигналов

Чтобы облегчить анализ сигнала ЭМАЭ, используется математическая модель для моделирования сигнала ЭМАЭ. Как правило, сигналы ЭМАЭ являются слабыми [32], на которые обычно влияет неизвестный фоновый шум, особенно в диапазоне от 0 до 5 дБ [33]. Поэтому для более реалистичного моделирования сигнала, получаемого датчиком в процессе эксперимента в рабочей среде, к моделируемому сигналу добавляется гауссовский белый шум с отношением сигнал/шум (ОСШ) 5 дБ, модель выражается следующим образом:

$$f(t) = \sum_i^n A_i e^{-R_i(t-t_i)^2} \sin[2\pi f_i(t-t_i)] + y(t), \quad (10)$$

где A_i , P_i , t_i , f_i — амплитуда, коэффициент затухания, время задержки и основная частота i -го наложенного сигнала соответственно; n — количество наложенных сигналов в модели; $y(t)$ — гауссовый белый шум; частота опроса смоделированного сигнала АЭ — $f_i = 1$ МГц. Временная область и частотная область смоделированного сигнала показаны на рис. 1.

2) РВМ—КРКА-анализ шумоподавления сигнала

В моделировании рассматриваются три модели (ТРВМ, ГАВР и ОСВРВМ) для анализа шумоподавления сигнала, а корреляционные характеристики различных комбинаций компонентов с исход-

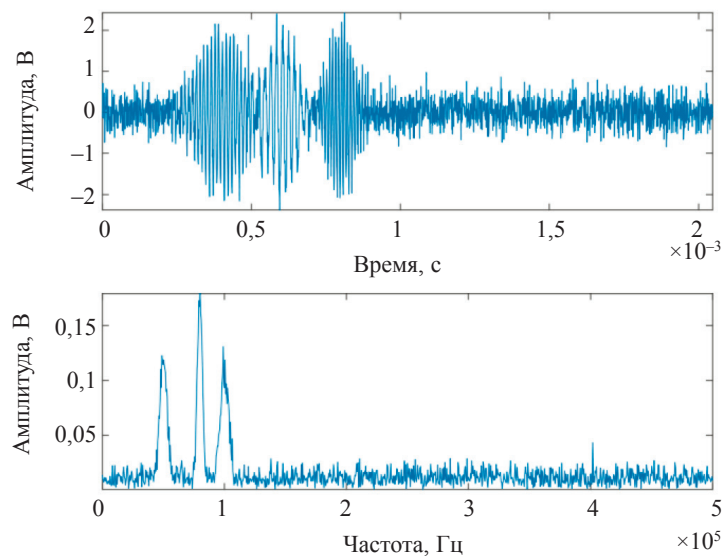


Рис. 1. Временная и частотная области смоделированного сигнала с шумом.

Таблица 1

Результаты КРКА-анализа

Модель	Порядковый номер	Комбинация ЭМ	ЧП	DET	LAM	ГС
ТРВМ— КРКА	1	ЭМ 3,4,2,5,1	0,1118	0,3028	0,4400	0,2460
	2	ЭМ 3,4,2,5	0,1631	0,5479	0,5510	0,3665
	3	ЭМ 3,4,2	0,1835	0,5881	0,5926	0,3999
	4	ЭМ 3,4	0,2270	0,6345	0,6374	0,4511
	5	ЭМ 3	0,2550	0,6502	0,6510	0,4761
ГАВР— КРКА	1	ЭМ 2,1,3,9,4,5,7,8,6	0,1200	0,2806	0,4468	0,2469
	2	ЭМ 2,1,3,9,4,5,7,8	0,1291	0,4268	0,4921	0,3005
	3	ЭМ 2,1,3,9,4,5,7	0,1124	0,2757	0,4026	0,2319
	4	ЭМ 2,1,3,9,4,5	0,1507	0,3690	0,4883	0,3006
	5	ЭМ 2,1,3,9,4	0,1659	0,3961	0,5037	0,3211
	6	ЭМ 2,1,3,9	0,1827	0,5807	0,5914	0,3974
	7	ЭМ 2,1,3	0,1965	0,6155	0,6176	0,4211
	8	ЭМ 2,1	0,2285	0,6390	0,6401	0,4538
	9	ЭМ 2	0,2661	0,5036	0,5576	0,4212
ОСВ— КРКА	1	ЭМ 2,3,1,4,9,7,8,6,5	0,1333	0,4371	0,4969	0,3070
	2	ЭМ 2,3,1,4,9,7,8,6	0,1471	0,4731	0,5249	0,3318
	3	ЭМ 2,3,1,4,9,7,8	0,1566	0,5056	0,5428	0,3502
	4	ЭМ 2,3,1,4,9,7	0,1706	0,5482	0,5655	0,3753
	5	ЭМ 2,3,1,4,9	0,1830	0,5810	0,5906	0,3975
	6	ЭМ 2,3,1,4	0,1956	0,6140	0,6157	0,4197
	7	ЭМ 2,3,1	0,2248	0,6325	0,6337	0,4483
	8	ЭМ 2,3	0,2314	0,6547	0,6549	0,4629
	9	ЭМ 2	0,2464	0,6489	0,6496	0,4701

ным сигналом, дополненным шумом, оцениваются по параметру КРКА. Для каждой модели последовательность ЭМ сначала раскладывают, чтобы выполнить корреляционный анализ с помощью КРКА с исходным сигналом с добавлением шума, значения ГС рассчитываются по полученным

данным КРКА и располагаются в порядке от наибольшего к наименьшему. Затем слабо коррелированные компоненты постепенно отбрасываются, и вычисляются значения ГС оставшихся комбинаций составляющих, пока не останется только последняя составляющая. Результаты анализа представлены в табл. 1. В частности, точка резкого изменения значения ГС выделена жирным шрифтом, то есть резкое изменение значения ГС произошло в моделях ТРВМ—КРКА, ГАВР—КРКА и ОСВРВМ—КРКА под номерами 2, 6 и 7 соответственно. Это указывает на то, что снижение уровня шума в сигнале близко к критической точке, и если продолжать отбрасывать шумовые компоненты, то это приведет к потере основных компонентов и искажению восстановленного сигнала. Поэтому необходимо выбрать оптимальную комбинацию компонентов вблизи точки перехода.

Таблица 2

Сравнение результатов моделирования шумоподавления

Модель	ОСШ	СКО
ТРВМ—КК	07,2637	0,2291
ТРВМ—КРКА	11,4636	0,1413
ГАВР—КК	10,7208	0,1539
ГАВР—КРКА	12,6332	0,1235
ОСВРВМ—КК	10,8029	0,1524
ОСВРВМ—КРКА	12,5267	0,1250

Чтобы определить результаты шумоподавления сигнала, в ходе моделирования сравнивается классическая модель отбора компонентов, т. е. КК, и оцениваются две модели шумоподавления с помощью ОСШ и среднеквадратического отклонения (СКО) как показателей эффекта шумоподавления (см. табл. 2). Результаты моделирования показывают, что КРКА имеет больше преимуществ в отборе эффективных компонентов, а эффект шумоподавления ГАВР—КРКА лучше по сравнению с двумя другими моделями РВМ.

4.2. Анализ данных измерения сигналов ЭМАЭ

1) Порядок проведения эксперимента по ЭМАЭ

Идея эксперимента по измерению ЭМАЭ заключается в создании силы Лоренца путем формирования локального электромагнитного воздействия на металлический образец, и при непрерывном воздействии магнитным полем создается достаточно большое по величине напряжение, приводящее к расширению трещин. При этом выделяется большое количество упругой энергии, что позволяет обнаружить сигналы АЭ вблизи дефектов с целью проведения неразрушающего контроля. Схема показана на рис. 2.

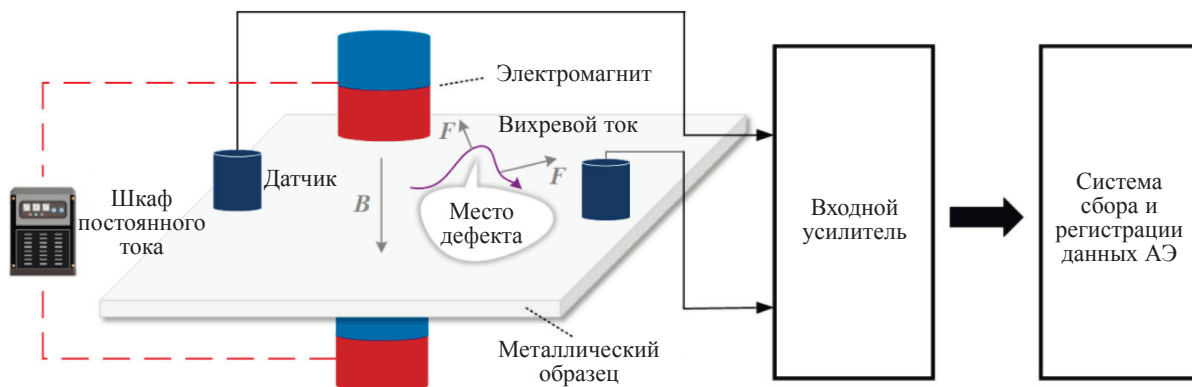


Рис. 2. Схема эксперимента по ЭМАЭ.

В частности, в эксперименте используется шкаф постоянного тока для питания электромагнита, создающего большое магнитное поле B . Когда на металлический образец действует сильное магнитное поле, в соответствии с принципом электромагнитной индукции, изменяющееся магнитное поле создает ток, а затем на участок дефекта действует лоренцева сила F , и из-за разного направления силы на дефект он продолжает расширяться [34, 35]. Когда F превысит определенное критическое значение, возникнет упругая или даже пластическая деформация, которая приведет к расширению трещины, стимулируя тем самым явление АЭ [36]. Генерируемый сигнал ЭМАЭ представляет собой импульсную волну напряжения, стимулированную внешней силой, которая по сути является механической вибрационной волной. Распространяясь по поверхности металлического материала, он попадает на датчик приемного устройства, и механический сигнал преобразуется в электрический для передачи на следующий уровень оборудования. Затем усиленный сигнал передается в систему сбора АЭ через входной усилитель для совместного восстановления исходного сигнала.

2) Экспериментальная установка

Мы используем цифровую систему сбора данных SAEU2S, электромагнит СН-130, источник тока с программным управлением Model-10030, фронтальный датчик SR150N, усилитель РА и компьютерную платформу для создания нового типа бесконтактного экспериментального устройства ЕМАЕ (см. рис. 3), которое обеспечивает инфраструктуру для проведения эксперимента. В частности, источник тока с программным управлением Model-10030 является устройством, обеспечивающим работу всей платформы экспериментальной системы, которая может поддерживать выходной ток в диапазоне от -33 до 33 А и достигать возбуждения напряженности электромагнитного поля до $1,7$ Т.

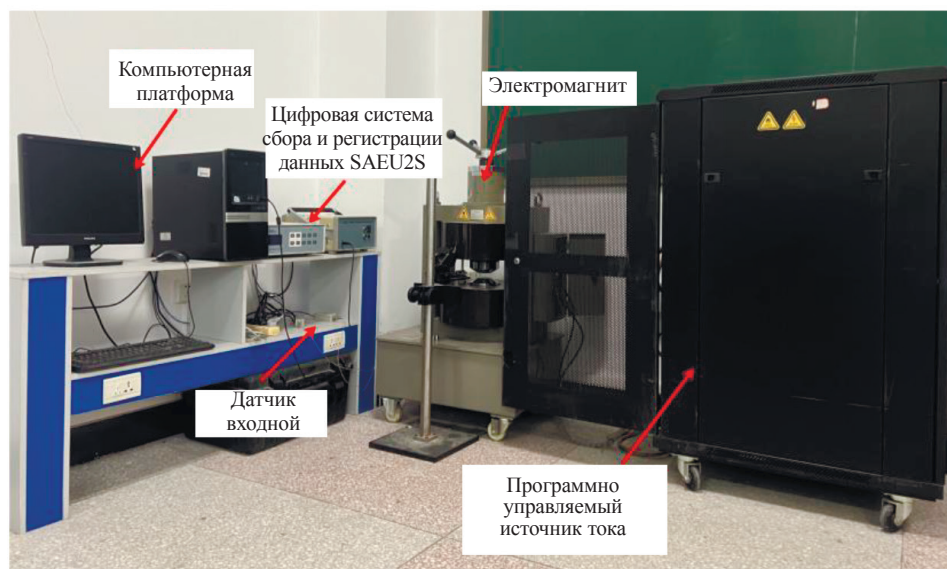


Рис. 3. Экспериментальная платформа.

Для изготовления образцов использовали алюминиевый сплав 6061 [37] и магниевый сплав AZ31B [38]. Тип повреждения образца — типичное круглое отверстие на месте трещины, а размеры образца следующие: алюминиевая пластина $l \times w \times h = 330 \text{ мм} \times 100 \text{ мм} \times 1 \text{ мм}$; круглое отверстие $d = 10 \text{ мм}$; трещина $l \times w = 16 \text{ мм} \times 0,3 \text{ мм}$. Размеры образца обозначены на рис. 4.

С помощью связующего вещества датчик располагается на расстоянии 10 см от дефекта металлического листа, магнитное поле создается в процессе плавного увеличения силы тока от 0 до 20 А. После нескольких повторных сравнительных экспериментов были получены сигналы с трех разных образцов, частотный диапазон сигнала акустической эмиссии был определен путем сравнительного анализа и предварительно подвергнут обработке для удаления большого пикового шума.

Для согласованности с экспериментами по моделированию сигнала ЭМАЭ к реальному зарегистрированному сигналу также добавили 5 дБ гауссового белого шума, обработанный сигнал ЭМАЭ показан на рис. 5. Из графика видно, что ОСШ низкое, а амплитуда информативных частот

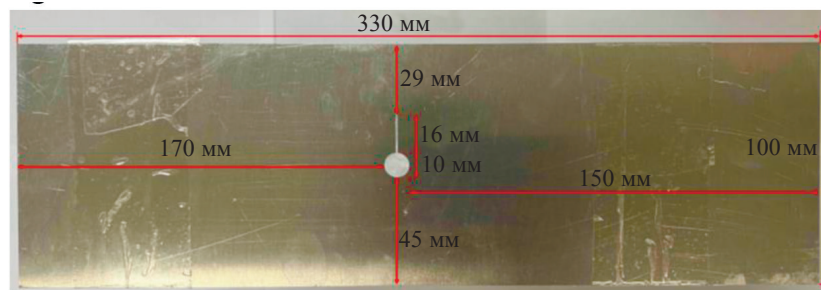


Рис. 4. Образец, используемый в эксперименте.

Таблица 3

Сравнение различных методов уменьшения уровня шума измеренных сигналов на образце из алюминиевого сплава 6061

Модель	ОСШ	СКО
ТРВМ—КК	09,4382	3,9380e-04
ТРВМ—КРКА	12,6605	2,7175e-04
ГАВР—КК	11,5423	3,0908e-04
ГАВР—КРКА	13,6279	2,4311e-04
ОСВРВМ—КК	12,4457	2,7855e-04
ОСВРВМ—КРКА	13,0311	2,6040e-04

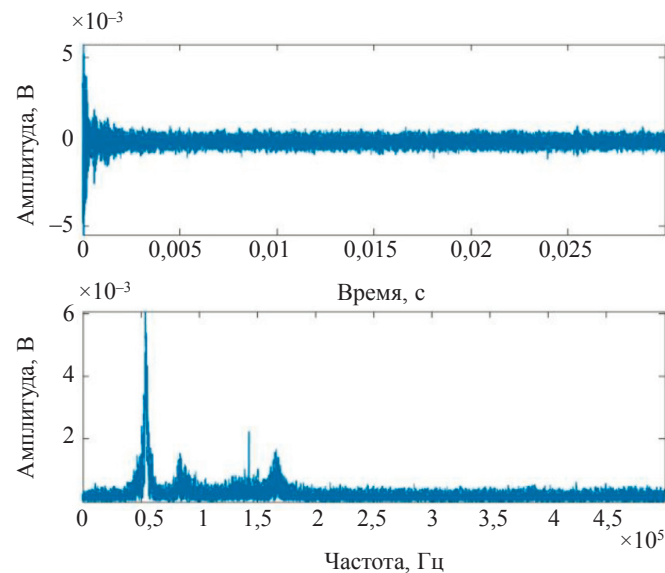


Рис. 5. Амплитуда сигнала, полученного на образце из алюминиевого сплава 6061, во временной и частотной областях.

в спектре сигнала размыта, что подтверждает необходимость снижения шума в сигналах ЭМАЭ, полученных в реальных условиях эксплуатации. Для того чтобы лучше продемонстрировать эффект снижения шума предложенной схемы, в качестве объекта анализа выбираются первые 2048 точек во временной области реальных зафиксированных сигналов ЭМАЭ.

3) Анализ уменьшения шума сигналов в эксперименте

В эксперименте с целью анализа шумоподавления экспериментальных сигналов использовались методы ТРВМ, ГАВР и ОСВРВМ, а сигналы ЭМАЭ анализировались и обрабатывались методами скрининга и оценочными индексами, аналогичными методам обработки сигналов при моделировании. В табл. 3 представлены результаты шумоподавления.

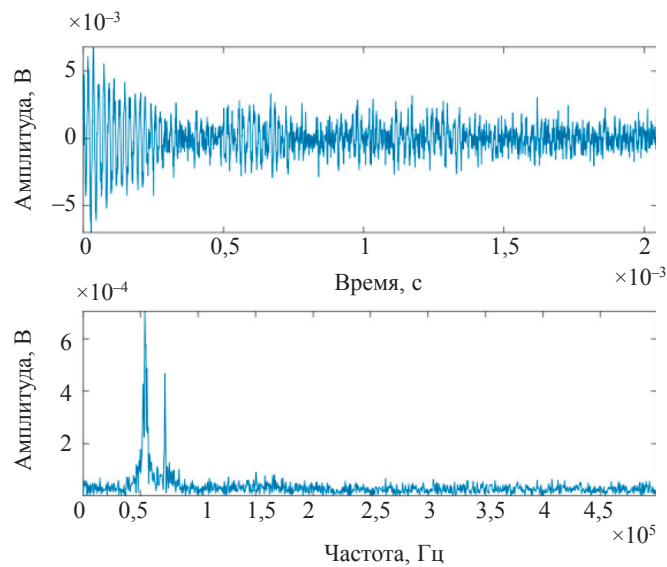


Рис. 6. Амплитуда сигнала, полученного на образце из алюминиевого сплава 6061, во временной и частотной областях с гауссовым белым шумом.

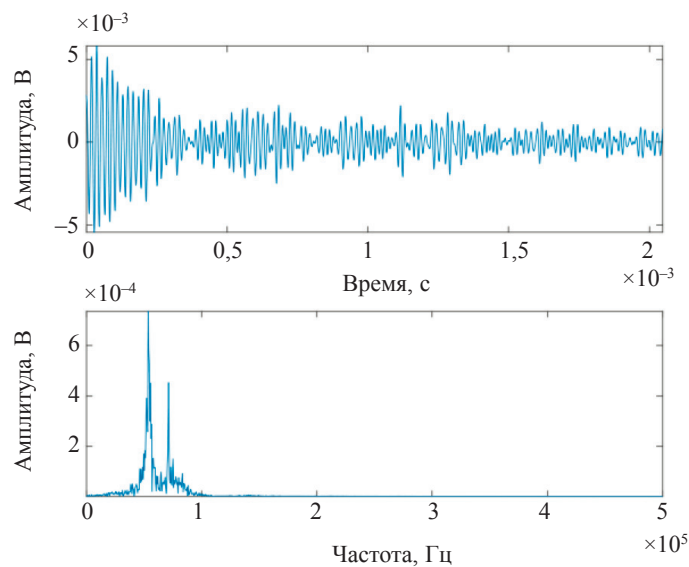


Рис. 7. Амплитуда сигнала, полученного на образце из алюминиевого сплава 6061, во временной и частотной областях после обработки методом ГАВР—КРКА.

Результаты анализа показывают, что теория КРКА имеет больше преимуществ при анализе корреляции по сравнению с КК, что позволяет более эффективно отсеивать шумовые составляющие и точно восстанавливать исходный сигнал. В частности, на рис. 7 показаны графики осциллограмм сигнала во временной и частотной областях после уменьшения шума с помощью модели ГАВР—КРКА. По сравнению с рис. 6, изменения обеих осциллограмм в основном одинаковы. Опять же, из табл. 3 видно, что ГАВР—КРКА имеет наибольшее значение ОСШ и наименьшее СКО, что доказывает, что этот метод обладает оптимальным эффектом шумоподавления.

Для дальнейшей проверки обобщающей способности разработанного метода анализа рассматривается также набор данных измерений на образце магниевого сплава AZ31В, который

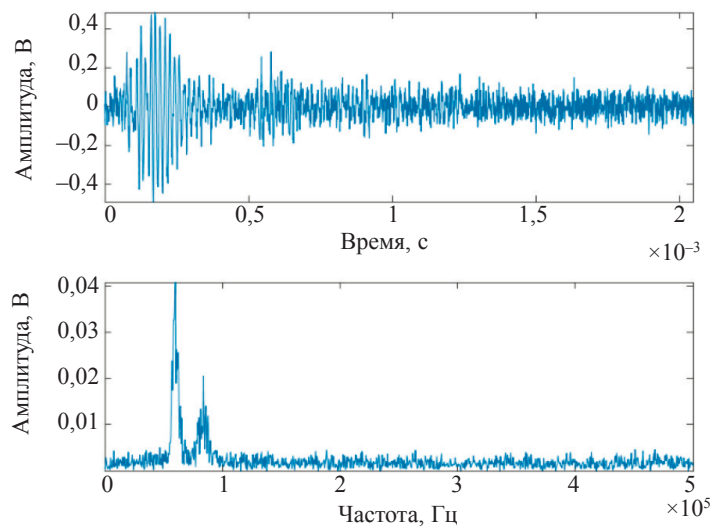


Рис. 8. Амплитуда сигнала, полученного на образце из магниевого сплава AZ31В, во временной и частотной областях с гауссовым белым шумом.

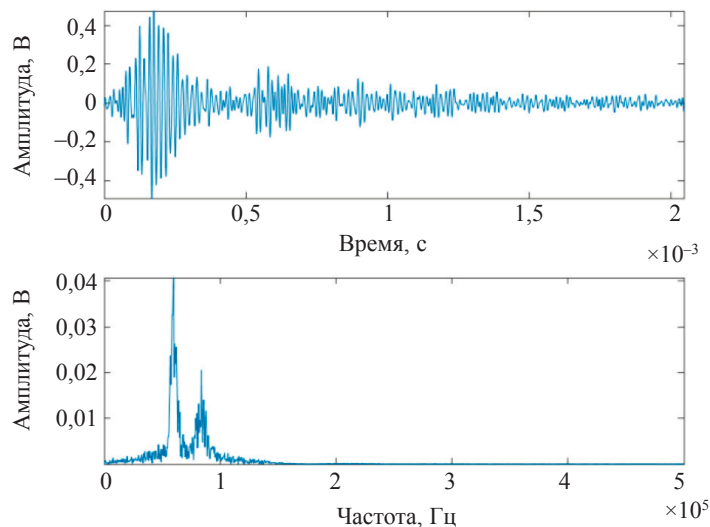


Рис. 9. Амплитуда сигнала, полученного на образце из магниевого сплава AZ31В, во временной и частотной областях после обработки методом ГАВР—КРКА.

был получен на базе той же экспериментальной установки, что и образец алюминиевого сплава 6061. На рис. 8, 9 поочередно показаны графики сигнала ЭМАЭ во временно-частотной области до и после удаления шума, полученные на образце из магниевого сплава как объекта исследования. Судя по визуальным данным, метод понижения шума в некоторой степени уменьшает количество неровностей и выпуклостей в исходном сигнале ЭМАЭ. Кроме того, в табл. 4 показаны различные методики численного сравнения результатов ослабления шума сигнала, измеренного на образце магниевого сплава. Аналогично, предлагаемый метод КРКА значительно превосходит другие методы по показателям ОСШ и СКО. На примере ОСШ КРКА может быть рассчитан как среднее увеличение примерно на 33,3 % в различных вариантах РВМ по сравнению с КК, что также является доказательством высокой эффективности уменьшения шума сигнала КРКА.

Таблица 4

Сравнение различных методик обработки результатов шумоподавления сигналов, измеренных на образце из магниевого сплава

Модель	ОСШ	СКО
TPBM—КК	06,8579	0,0366
TPBM—КРКА	11,5925	0,0212
ГABP—КК	11,3401	0,0219
ГABP—КРКА	13,0143	0,0180
OCBPBM—КК	11,0085	0,0227
OCBPBM—КРКА	12,7771	0,0185

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе исследуется алгоритм шумоподавления на основе КРКА для решения задачи устранения шумовых помех, часто присутствующих в сигналах ЭМАЭ. В процессе построения PBM данные по КРКА ЭМ и исходного сигнала используются для объективного отсеивания основных компонентов, а затем эффективный сигнал восстанавливается с помощью суперпозиции, преодолевая ограничение на пороговое значение КК. Результаты моделирования и экспериментов показывают, что модель PBM—КРКА оказывает хорошее шумоподавляющее действие на сигнал ЭМАЭ, что способствует точному неразрушающему контролю материалов сплавов, имеет справочное значение для последующей идентификации нарушений, прогнозирования срока службы и раннего прогнозирования состояния материалов металлических компонентов. В будущем планируется применить метод КРКА к другим современным моделям, таким как ансамблевое разложение на эмпирические моды (APЭМ), полагая, что это позволит получить лучшие результаты по снижению шума.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Данная работа частично поддержана Фондом естественных наук Чунцинской муниципальной комиссии по науке и технике (cstc2019jcyj-msxmX0505).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liu L., Chen L., Wang Z., Liu D. Early fault detection of planetary gearbox based on acoustic emission and improved variational mode decomposition // IEEE Sens. J. 2020. V. 21. No. 2. P. 1735—1745.
2. Su Y., Dong L., Pei Z. Non-destructive testing for cavity damages in automated machines based on acoustic emission tomography // Sensors. 2022. V. 22. No. 6. P. 2201.
3. Ghorbani H., Farhangi H., Malekan M. Material characterization of long-term service-exposed GTD-111 nickel based superalloy // Eng. Fail. Anal. 2023. V. 148. P. 107061.
4. Rockenhäuser C., Rowolt C., Milkereit B., Darvishi Kamachali R., Kessler O., Skrotzki B. On the long-term aging of S-phase in aluminum alloy 2618A // J. Mater. Sci. 2021. V. 56. No. 14. P. 8704—8716.
5. Gwoździk M., Motylenko M., Rafaja D. Microstructure changes responsible for the degradation of the 10CrMo9-10 and 13CrMo4-5 steels during long-term operation // Mater. Res. Express. 2019. V. 7. No. 1. P. 016515.
6. Skalskyi V., Pochaps'kyi Y., Stankevych O., Klym B., Melnyk N. Application of the magnetoacoustic emission method for estimation of pipelines material state / In Degradation Assessment and Failure Prevention of Pipeline Systems. 2021. Springer. P. 217—229.
7. Chen X.Y., Wu X.Y., Liu F.F., Zeng B.H., Tu Y.M., Cao L.L. Acoustic emission signal-based non-destructive testing of carbon content of Pr-Nd alloys // Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring. 2022. V. 64. No. 9. P. 503—510.
8. Fricke L. V., Thürer S.E., Kahra C. et al. Non-destructive evaluation of workpiece properties along the hybrid bearing bushing process chain // J. Mater. Eng. Perform. 2023. V. 32. No. 15. P. 7004—7015.
9. Zheltonozhskaya M.V., Iyusyuk D.A., Chernyaev A.P., Kovacs T. Non-destructive method for determining the ^{63}Ni activity in reactor steels and alloys // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2023. P. 1—8.
10. Chang Y., Zhang X., Song S., Song Q., Shen Y. Rail crack defect recognition based on a multi-feature fusion algorithm using electromagnetic acoustic emission technique // Meas. Sci. Technol. 2023. V. 34. No. 11. P. 115002.
11. Sikorski W. Active dielectric window: A new concept of combined acoustic emission and electromagnetic partial discharge detector for power transformers // Energies. 2019. V. 12. No. 1. Art. No. 1.

12. Lin Q., Lyu F., Yu S., Xiao H., Li X. Optimized denoising method for weak acoustic emission signal in partial discharge detection // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2022. V. 29. No. 4. P. 1409—1416.
13. Guo J., Xie R., Wang Y., Xiao L., Fu J., Jin G., Luo S. Variational mode decomposition for NMR echo data denoising // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2023. V. 61. P. 1—14.
14. Li Z., Cai D., Wang J. et al. Machine learning based dynamic correlation on marine environmental data using cross-recurrence strategy // IEEE Access. 2019. V. 7. P. 185121—185130.
15. Zhou Y., Peng M., Zuo X., Xu J. Correlation between friction coefficient and friction vibration in running-in process based on cross recurrence plots // J. Tribol. 2021. V. 144. No. 1.
16. Wei K., Zhang J., He Y., Yao G., Zhang Y. Faulty feeder detection method based on VMD-FFT and Pearson correlation coefficient of non-power frequency component in resonant grounded systems // Energies. 2020. V. 13. No. 18. P. 4724.
17. Hu H., Zhang L., Yan H., Bai Y., Wang P. Denoising and baseline drift removal method of MEMS hydrophone signal based on VMD and wavelet threshold processing // IEEE Access. 2019. V. 7. P. 59913—59922.
18. Yan H., Xu T., Wang P., Zhang L., Hu H., Bai Y. MEMS hydrophone signal denoising and baseline drift removal algorithm based on parameter-optimized variational mode decomposition and correlation coefficient // Sensors. 2019. V. 19. No. 21. P. 4622.
19. Dhandapani R., Mitiche I., McMeekin S., Mallela V.S., Morison G. Enhanced partial discharge signal denoising using dispersion entropy optimized variational mode decomposition // Entropy. 2021. V. 23. No. 12. P. 1567.
20. Li Y., Xiao L., Tang B., Liang L., Lou Y., Guo X., Xue X. A denoising method for ship-radiated noise based on optimized variational mode decomposition with snake optimization and dual-threshold criteria of correlation coefficient // Math. Probl. Eng. 2022. V. 2022.
21. Jiang Z., Xie J., Zhang J., Zhang X. Denoising method of pipeline leakage signal based on VMD and Hilbert transform // J. Sens. 2023. V. 2023.
22. Jiang Z., Guo G., Liu B. Application research of negative pressure wave signal denoising method based on VMD // Appl. Sci. 2023. V. 13. No. 7. P. 4156.
23. Dragomireskiy K., Zosso D. Variational mode decomposition // IEEE Trans. Signal Process. 2013. V. 62. No. 3. P. 531—544.
24. Ur Rehman N., Aftab H. Multivariate variational mode decomposition // IEEE Trans. Signal Process. 2019. V. 67. No. 23. P. 6039—6052.
25. Li Y., Tang B., Jiang X., Yi Y. Bearing fault feature extraction method based on GA-VMD and center frequency // Math. Probl. Eng. 2022. V. 2022. P. e2058258.
26. Li Q., Lai Y., Yang C., Cao D. Investigating electromagnetic acoustic emission signal processing based on optimized variational mode decomposition / In 2022 7th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing (ICSP), 2022. IEEE. P. 1863—1868.
27. Yao G., Wang Y., Benbouzid M., Ait-Ahmed M. A hybrid gearbox fault diagnosis method based on GWO-VMD and DE-KELM // Appl. Sci. 2021. V. 11. No. 11. Art. no. 11.
28. Ghosh S., Mitra A., Chakrabarti S., Sharma A. Data-driven strategy for appliance identification using phase-space reconstruction // IEEE Trans. Smart Grid. 2023.
29. Ma J., Yang M., Lin Y. Ultra-short-term probabilistic wind turbine power forecast based on empirical dynamic modeling // IEEE Trans. Sustain. Energy. 2019. V. 11. No. 2. P. 906—915.
30. Amiri A., Samet H., Ghanbari T. Recurrence plots based method for detecting series Arc faults in photovoltaic systems // IEEE Trans. Ind. Electron. 2022. V. 69. No. 6. P. 6308—6315.
31. Li Y., Cai D., Wang J., Sun X., Li Z., Zhang H., Wang N. Recurrence behavior statistics of blast furnace gas sensor data in industrial Internet of Things // IEEE Internet Things J. 2020. V. 7. No. 6. P. 5666—5676.
32. Yang Z., Yan W., Jin L., Li F., Hou Z. A novel feature representation method based on original waveforms for acoustic emission signals // Mech. Syst. Signal Pr. 2020. V. 135. P. 106365.
33. Zhang D., Ding W., Zhang B., Liu C., Han J., Doermann D. Learning modulation filter networks for weak signal detection in noise // Pattern Recogn. 2021. V. 109. P. 107590.
34. Kostin V.N., Filatenkov D.Y., Chekasina Y.A., Vasilenko O.N., Serbin E.D. Features of excitation and detection of magnetoacoustic emission in ferromagnetic objects // Acoust. Phys. 2017. V. 63. P. 237—244.
35. Kostin V.N., Vasilenko O.N., Filatenkov D.Y., Chekasina Y.A., Serbin E.D. Magnetic and magnetoacoustic testing parameters of the stressed-strained state of carbon steels that were subjected to a cold plastic deformation and annealing // Russ. J. Nondestruct. Test. 2015. V. 51. No. 10. P. 624—632.
36. Piotrowski L., Chmielewski M., Kowalewski Z. On the application of magnetoelastic properties measurements for plastic level determination in martensitic steels // J. Electr. Eng. 2018. V. 69. No. 6. P. 502—506.
37. Rudnytskyj A., Simon P., Jech M., Gachot C. Constitutive modelling of the 6061 aluminium alloy under hot rolling conditions and large strain ranges // Mater. Des. 2020. V. 190. P. 108568.
38. Cai C., Alves M.M., Song R., Wang Y., Li J., Montemor M.F. Non-destructive corrosion study on a magnesium alloy with mechanical properties tailored for biodegradable cardiovascular stent applications // J. Mater. Sci. Technol. 2021. V. 66. P. 128—138.

КОНТРОЛЬНЫЕ ОБРАЗЦЫ ДЛЯ КАПИЛЛЯРНОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ

© 2024 г. Н.В. Деленковский^{1,*}, А.Б. Гнусин^{1,**}

¹Институт прикладной физики НАН Беларуси,
Беларусь 220072 Минск, ул. Академическая, 16
E-mail: *delenkovsky@iaph.bas-net.by; **dubelxp@gmail.com

Поступила в редакцию 19.01.2024; после доработки 30.01.2024

Принята к публикации 30.01.2024

Разработаны образцы для капиллярной дефектоскопии, на которых возможны измерения на оптическом микроскопе как ширины раскрытия поверхностных дефектов, так и их глубин при одновременном соблюдении условий невыхождения полостей дефектов на боковые грани образцов. Приведены экспериментальные данные по зависимостям площадей следов дефектов после проявления от их раскрытий в диапазоне 0,5—8,5 мкм и глубин 40—860 мм. С использованием корреляционного анализа показана статистическая значимость вышеуказанных параметров.

Ключевые слова: капиллярная дефектоскопия, капиллярный контроль, чувствительность капиллярного контроля, образцы для капиллярного контроля, пенетрант, проявитель.

REFERENCE BLOCKS FOR PENETRANT TESTING

N.V. Delenkovsky^{1,*}, A.B. Gnusin^{1,**}

¹Institute of Applied Physics, Belarus 220072 Minsk, Akademicheskaya str., 16
E-mail: *delenkovsky@iaph.bas-net.by; **dubelxp@gmail.com

Reference blocks for penetrant testing have been developed, allowing measurements using an optical microscope of both the opening width of surface defects and their depth. In this case, the condition that defect cavities do not extend onto the side faces of the blocks is met. Experimental data on the dependence of the defect's indications area after development on their width (0.5—8.5 μm) and depth (40—860 mm) are presented. Using correlation analysis, the statistical significance of the above parameters is shown.

Keywords: penetrant testing, penetrant sensitivity, reference block, penetrant product family, penetrant, developer.

DOI: 10.31857/S0130308224020041

ВВЕДЕНИЕ

Качество капиллярной дефектоскопии в значительной мере зависит от чувствительности набора применяемых дефектоскопических материалов, которая по существующим отечественным и зарубежным стандартам определяется с использованием контрольных образцов. В настоящее время в зависимости от вида таких образцов существуют два различных способа определения чувствительности контроля.

Согласно первому способу, основанному на сравнении результатов капиллярного контроля испытуемых дефектоскопических материалов с эталонными [1], контрольные образцы изготавливают в виде латунных пластин, покрытых никельхромовыми гальваническими покрытиями с толщинами 10—50 мкм [2]. Дефекты на покрытиях в виде ряда трещин получают или путем деформации растяжения образцов (тип 1), или ударной нагрузкой (тип 2). Глубины трещин принимаются равными толщине гальванических покрытий. Ширины раскрытия дефектов в стандарте [2] для образцов обоих типов непосредственно не нормируются. Для образцов типа 1 приводится только требование необходимого отношения ширины раскрытия дефектов к их глубинам, которое должно составлять 1:20 [2].

Существенным недостатком рассматриваемых образцов является то, что трещины в гальванических покрытиях на образцах типа 1 неподобны реальным дефектам изделий:

- такие трещины незамкнуты и выходят на края образцов, что приводит к легкому удалению воздуха из полостей дефектов при их пропитке пенетрантом и искажению результатов контроля по сравнению с использованием дефектов с замкнутыми полостями соответственно;

- ширины раскрытия и глубины полостей реальных дефектов на изделиях могут на 1—1,5 порядка и более превышать аналогичные параметры трещин на образцах с гальваническими покрытиями.

Кроме того, приводимые в стандарте [2] данные о геометрических размерах дефектов не могут относиться к метрологической аттестации образцов. В указанных стандартах также не указан обоснованный способ проверки качества самих эталонных дефектоскопических материалов.

Второй способ определения чувствительности дефектоскопических материалов основан на применении контрольных образцов, изготавливаемых обычно из нержавеющей стали без применения покрытий и содержащих один замкнутый тупиковый дефект, невыходящий на края образца [3—7].

Несомненным достоинством таких образцов является полное подобие их дефектов, представляющих замкнутые, невыходящие на края образца полости, реальным трещинам на металлических изделиях.

Существенный недостаток образцов заключается в том, что требования вышеуказанных стандартов относятся только к аттестации ширин раскрытия дефектов. Аттестация дефектов по глубине стандартами не предусматривается, и фактически этому важному параметру не уделяют никакого внимания как производители образцов, так и потребители. Это связано с тем, что измерения и аттестация замкнутых дефектов по глубине методами неразрушающего контроля крайне затруднительна и не может быть выполнена на существующих контрольных образцах с необходимой точностью.

Данный факт приводит к неоднозначности и искажению результатов контроля при проверке качества дефектоскопических материалов на образцах разных производителей, в результате чего существенно снижаются чувствительность и качество контроля в целом. При этом необходимо отметить, что предположение о значительном влиянии глубины дефектов на чувствительность капиллярного контроля следует как из простого логического рассуждения и понимания сущности капиллярного контроля, так и из экспериментальных данных, полученных нами ранее [8]. Поэтому несомненна и актуальна задача разработки методики, которая позволила бы с достаточной точностью выполнять средствами неразрушающего контроля измерения и аттестацию глубин дефектов на контрольных образцах при условии сохранения замкнутости их полостей.

В Институте прикладной физики НАН Беларуси нами разработана технология получения дефектов на образцах для капиллярной дефектоскопии, которая эффективно решает вышеуказанную задачу. Технология позволяет получить на контрольных образцах ряд поперечных дефектов с одинаковыми глубинами, расположенных строго на одной линии.

Контрольный образец изготавливают из нержавеющей стали в виде прямоугольной металлической пластины с рядом исходных поперечных дефектов одинаковой глубины H , которые выходят на края образца (рис. 1) [9]. По длинам каждого из дефектов дополнительно выполняют перемычки 2 и 4, разделяя их на ряд других, более мелких дефектов необходимой длины. На таком контрольном образце обеспечиваются как замкнутость полостей основных дефектов 3 (их края не выходят на боковые поверхности образца), так и возможность точного измерения глубин на дополнительных боковых дефектах 1 и 5, выходящих на края образца, с помощью оптического микроскопа с точностью до $\pm 0,01$ мм.

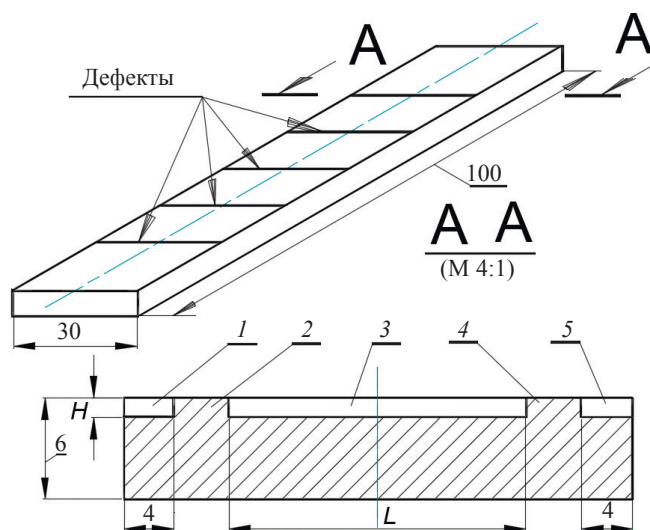


Рис. 1. Контрольный образец для капиллярной дефектоскопии.

С использованием разработанных контрольных образцов нами проведены комплексные исследования по определению влияния ширины раскрытия дефектов и их глубин на чувствительность капиллярного контроля.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

При проведении экспериментальных исследований нами использовалась автоматизированная система обработки и анализа видеоизображений [10], позволяющая проводить измерения площадей следов дефектов после их проявления.

Были изготовлены 20 образцов из нержавеющей стали AISI 430 (08X17) в виде прямоугольных металлических пластин с размерами 100×30×6 мм (см. рис. 1). Каждый образец содержал по 5 исходных поперечных дефектов с одинаковыми раскрытиями и глубинами в его пределах, которые, как указано выше, дополнительно разделялись двумя перемычками на три дополнительных дефекта. Длины L основных дефектов 3 (см. рис. 1) принимались для первых десяти образцов 17 мм, для последующих десяти — 15 мм. Ширины раскрытия исходных дефектов варьировались на каждом образце в пределах 0,5—8,5 мкм, а глубины — в пределах 40—860 мкм. Результаты исследований подвергались корреляционному анализу средствами приложения Microsoft Excel.

Капиллярный контроль образцов осуществляли в соответствии с ГОСТ 18442—80 [3]. Применялись дефектоскопические материалы: люминесцентный пенетрант Vycotest FP42, цветные пенетранты U88 и Rot1001, а также аэрозольный проявитель U89.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 2 приведены результаты люминесцентного капиллярного контроля одного из разработанных образцов.

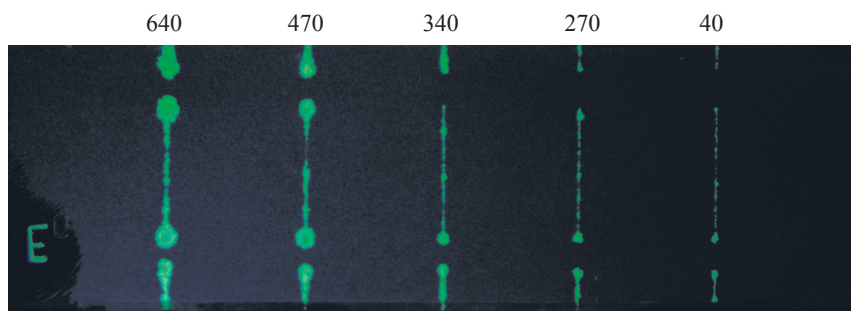


Рис. 2. Результаты люминесцентного капиллярного контроля образца с 5 дефектами с одинаковыми раскрытиями 2—3 мкм и переменными глубинами 40—640 мкм (указаны сверху).

Таблица 1

Результаты корреляционного анализа зависимости площади следов дефектов от их глубины и ширины

№ партии	Пенетрант	Кол-во опытов в партии	Коэффициент корреляции X1 (глубина)	Коэффициент корреляции X2 (ширина)	R-квадрат
1	FP42	145	0,82	0,84	0,87
2	FP42	178	0,74	0,80	0,77
3	FP42	34	0,68	0,69	0,47
4	FP42	44	0,73	0,76	0,53
5	U88	65	0,55	0,57	0,48
6	Rot1001	63	0,40	0,67	0,49

Результаты корреляционного анализа полученных данных представлены в табл. 1, а на рис. 3—5 — данные по влиянию геометрических характеристик дефектов на площади их следов после проявления.

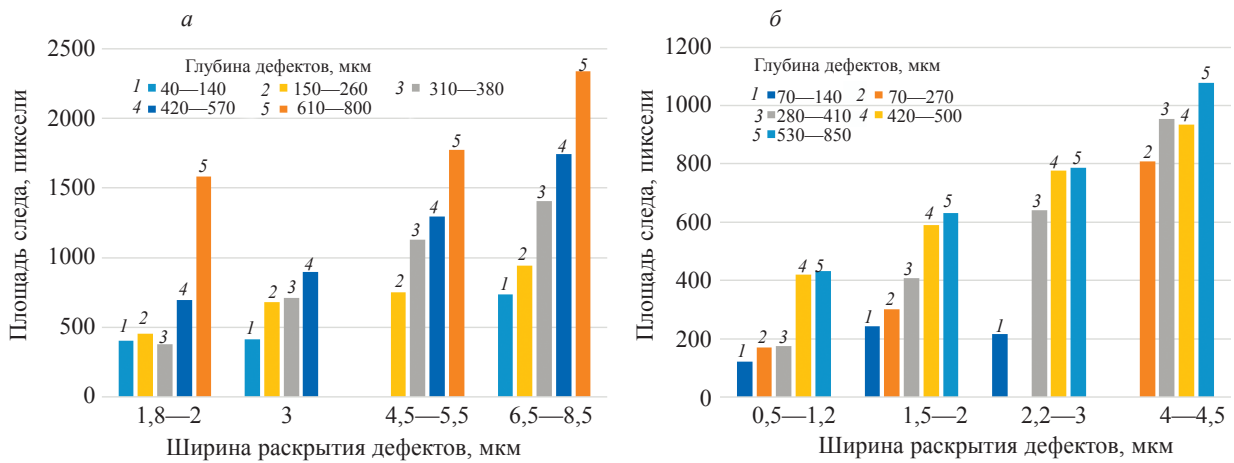


Рис. 3. Зависимости площадей следов дефектов от их глубин в диапазоне 40—850 мкм: *а* — длина дефектов $L = 17$ мм; *б* — $L = 15$ мм. Пенетрант — Bycotest FP42.

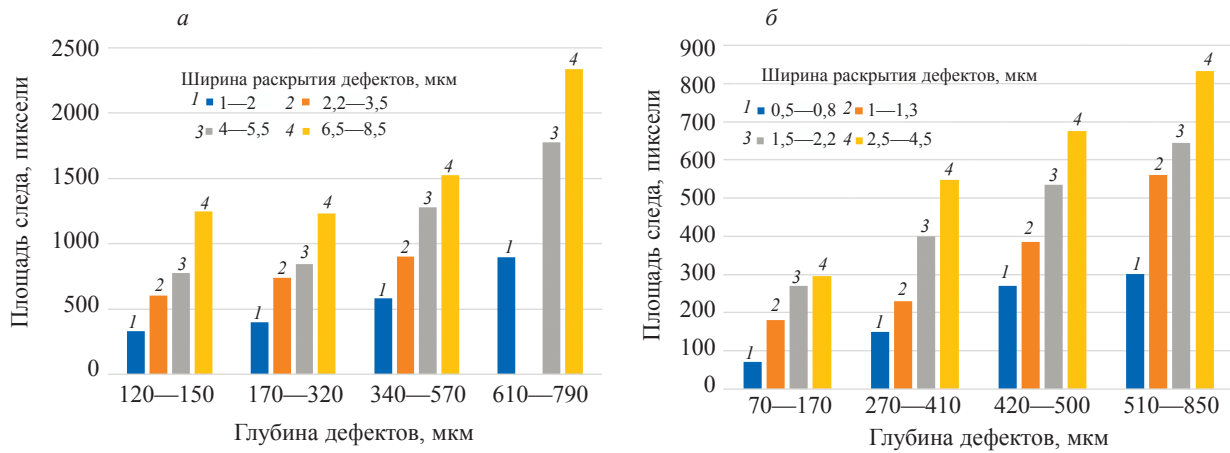


Рис. 4. Зависимости площадей следов дефектов от их ширин раскрытия в диапазоне 0,5—8,5 мкм: *а* — длина дефектов $L = 17$ мм; *б* — $L = 15$ мм. Пенетрант — Bycotest FP42.

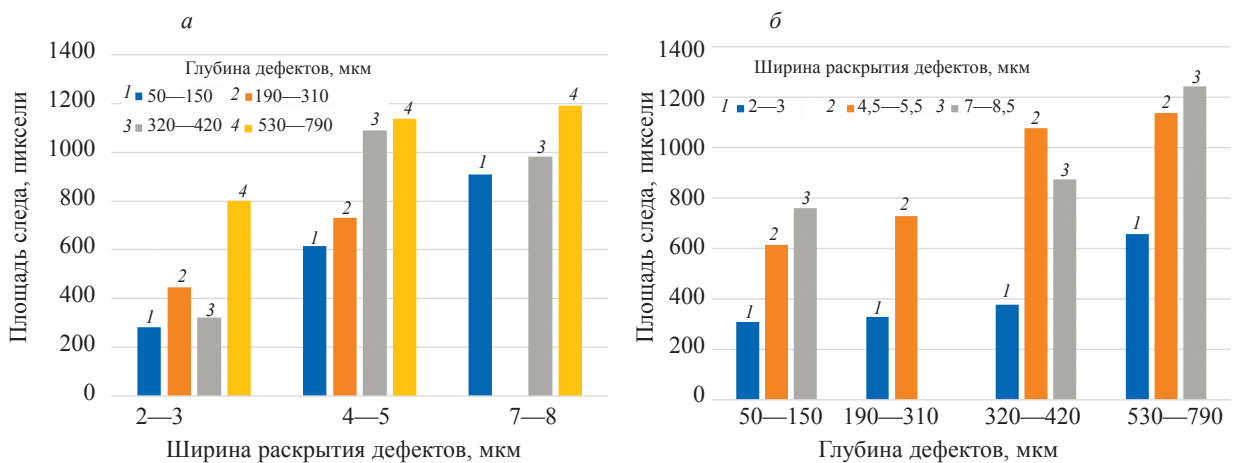


Рис. 5. Зависимости площадей следов дефектов от их глубин (*а*) и ширин раскрытия (*б*). Пенетрант — U88; длина дефектов $L = 17$ мм.

Как видно из табл. 1, коэффициенты множественной линейной корреляции X_1 (глубина) и X_2 (ширина) значимы и примерно равны между собой, что указывает на существенную значимость и равенство влияния рассматриваемых геометрических характеристик дефектов на чувствительность контроля. Данный факт дополнительно подтверждается значимостью статистического критерия R -квадрат (коэффициента детерминации), показывающего, какая доля дисперсии значений исследуемых площадей следов дефектов определяется переменными X_1 и X_2 .

Характер и существенную значимость влияния ширин раскрытия и глубин дефектов на площади их следов после проявления и, следовательно, чувствительность капиллярного контроля также можно видеть из диаграмм, приведенных на рис. 3—5.

ВЫВОДЫ

Разработаны образцы для капиллярной дефектоскопии, на которых возможны измерения на оптическом микроскопе как ширин раскрытия поверхностных дефектов, так и их глубин при одновременном соблюдении условий невыхождения полостей дефектов на боковые грани образцов.

Экспериментально с использованием корреляционного анализа установлено существенное влияние ширин раскрытия и глубин дефектов в контрольных образцах на чувствительность капиллярного контроля.

Представляется обоснованной необходимость внесения в соответствующие стандарты дополнений по учету глубин дефектов на контрольных образцах для капиллярной дефектоскопии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р ИСО 3452-2—2009. Контроль неразрушающий. Проникающий контроль. Часть 2. Испытания пенетрантов. М.: Стандартинформ, 2011.
2. ГОСТ Р ИСО 3452-3—2009. Контроль неразрушающий. Проникающий контроль. Часть 3. Испытательные образцы. М.: Стандартинформ, 2011.
3. ГОСТ 18442—80. Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования. М.: Изд-во стандартов, 1987.
4. ГОСТ Р 50.05.09—2018. Система оценки соответствия в области использования атомной энергии. Оценка соответствия в форме контроля. Унифицированные методики. Капиллярный контроль. М.: Стандартинформ, 2018.
5. РД-13-06—2006. Методические рекомендации о порядке проведения капиллярного контроля технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах. 2011.
6. СТБ 1172—99. Контроль неразрушающий. Контроль проникающими веществами (капиллярный). Основные положения. Мн: БелГИСС, 1999.
7. Мигун Н.П., Деленковский Н.В., Гнусин А.Б. Новые средства определения чувствительности дефектоскопических материалов для капиллярного контроля // Метрология и приборостроение. 2007. № 2. С. 16—18.
8. Деленковский Н.В., Гнусин А.Б. Оценка глубины поверхностных дефектов при капиллярном контроле // Дефектоскопия. 2017. № 3. С. 74—78.
9. Деленковский Н.В. Патент на полезную модель № 13255. Контрольный образец для капиллярной дефектоскопии. Республика Беларусь, Национальный Центр интеллектуальной собственности, 2023.08.30.
10. Мигун Н.П., Гнусин А.Б., Волович И.В. Компьютеризированная система определяет качество дефектоскопических материалов // Промышленная безопасность. 2004. № 1. С. 34—36.

REFERENCES

1. GOST R ISO 3452-2—2009. Non-destructive testing. Penetrant testing. Part 2. Testing of penetrant materials. M.: Standardinform. 2011.
2. GOST R ISO 3452-3—2009. Non-destructive testing. Penetrant testing. Part 3. Reference test blocks. M.: Standardinform. 2011.
3. GOST 18442—80. Non-destructive testing. Capillary methods. General requirements. M.: Izdatelstvo standartov. 1987.
4. GOST R 50.05.09—2018. Conformity assessment system for the use of nuclear energy. Conformity assessment in the form of control. Unified methods. Liquid penetrant control. M.: Standardinform. 2018.
5. RD-13-06—2006. Methodological recommendations on the procedure for carrying out penetrant testing of technical devices and structures used and operated at hazardous production facilities. 2011.

6. STB 1172—99. Non-destructive testing. Penetrant testing. General requirements. Mn.: BelGISS, 1999.
 7. Migoun N.P., Delenkovsky N.V., Gnusin A.B. New means for determining the sensitivity of product families for penetrant testing // Metrology and instrument-making. 2007. № 2. P. 16—18.
 8. Delenkovsky N.V., Gnusin A.B. Estimation of the depth of surface defects in penetrant testing // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2017. №3. P. 74—78.
 9. Delenkovsky N.V. Patent № 13255. Reference test block for penetrant testing // Republic of Belarus, National Center for Intellectual Property, 2023.08.30.
 10. Migoun N.P., Gnusin A.B., Volovich I.V. A computerized system determines the quality of penetrant materials // Industrial Safety. 2004. № 1. P. 34—36.
-

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕСТИРОВАНИЯ И КАЧЕСТВА ТЕСТОВ ПРИ СЕРТИФИКАЦИИ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ

© 2024 г. В.В. Муравьев^{1,2,*}, Л.В. Волкова¹, О.В. Муравьева^{1,2}, С.А. Мурашов¹

¹ФГБОУ ВО ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, Россия 426069 Ижевск, ул. Студенческая, 7

²ФГБУН «УдмФИЦ УрО РАН», Россия 426067 Ижевск, ул. им. Татьяны Барамзиной, 34

E-mail: *vmuraviev@mail.ru

Поступила в редакцию 29.01.2024; после доработки 12.02.2024

Принята к публикации 13.02.2024

Анализируются результаты квалификационных экзаменов при сертификации персонала по неразрушающему контролю акустическими, магнитным и вихретоковым методами объектов железнодорожного транспорта. Проанализировано влияние уровня образования, стажа работы, возраста кандидатов на результат прохождения квалификационных экзаменов. Проведен анализ результатов общего и специального экзамена по неразрушающему контролю вихретоковым методом за 2021 и 2022 годы на выявление экстремальных вопросов теста. По методу Раша проведен анализ соответствия трудности тестовых заданий уровню подготовленности кандидатов на сертификацию. Построены характеристические кривые трудности тестовых заданий и характеристические кривые обученности тестируемых. По результатам анализа выявлены тестовые задания с завышенным и заниженным логитами трудности задания по сравнению с логитом обученности кандидатов. Оценено соответствие трудности теста уровню подготовленности персонала и равномерность распределения заданий по трудности. Рассчитан требуемый логит обученности кандидата на сертификацию для успешного прохождения тестов общего и специального экзамена.

Ключевые слова: сертификация персонала, неразрушающий контроль, метод Раша, латентный параметр, квалификационный экзамен.

ANALYSIS OF TEST RESULTS AND TEST QUALITY DURING CERTIFICATION OF NON-DESTRUCTIVE TESTING SPECIALISTS

V.V. Murav'ev^{1,2,*}, L.V. Volkova¹, O.V. Murav'eva^{1,2}, S.A. Murashov¹

¹Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia 426069, Izhevsk, Studencheskaya, 7

²Udmurt Federal Research Center Ural Branch Russian Academy of Sciences, Russia 426067 Izhevsk, st. them. Tatyana Baramzina, 34

E-mail: *vmuraviev@mail.ru

This article analyzes the results of personal certification for eddy current testing of railway facilities. The influences of education level, the work experience, the candidate age on the qualifying examinations results are considered. The conformity between test task difficulties and certification candidate training is analyzed with Rasch method. The characteristic curves of test task difficulties and the characteristic curves of candidate training levels are constructed. The results general and special examinations of 2020 and 2021 are analyzed to identify extreme test questions. The research results enable to assess the candidate training and the test task difficulties through latent parameters measured as logit unit. The analysis identified test tasks with overstated and understated task difficulty logits compared with the logits of the candidate training, assessed the correspondence between test difficulties and training candidate level, and assessed a distribution uniformity of the tasks difficulty. The required training logit of candidates for the certification is calculated for successful passing general and special exam tests. The getting results give a basis for further analysis of the tasks complexity, identification the reasons for the insufficiency of the auditory material familiarization for the tasks with low rate of response, for making adjustments to the consulting sessions, as well as the content and form of the test.

Keywords: Non-destructive inspection, eddy current testing, staff certification, qualification exam, Rasch method.

DOI: 10.31857/S0130308224020052

ВВЕДЕНИЕ

Тестирование — это стандартизированная форма контроля, позволяющая оценить знания, умения и навыки экзаменуемого. Тестирование широко используется при сертификации и аттестации различных категорий персонала технических, педагогических и других специальностей.

Сертификация персонала в области неразрушающего контроля (НК) объектов железнодорожного транспорта является процедурой проверки квалификации персонала, проводимой уполномоченной организацией, согласно ГОСТ Р ИСО 9712—2023 «Контроль неразрушающий. Квалификация и сертификация персонала. Основные требования».

Сертификация персонала в области НК проводится в целях подтверждения достаточности теоретической и практической подготовки, опыта, компетентности персонала, т.е. его профессиональных знаний, навыков, мастерства, и предоставления права на выполнение работ по одному или нескольким видам (методам) НК. Оценка знаний персонала при их сертификации на уровень квалификации по видам и методам НК является одной из наиболее трудоемких и ответственных операций. На достоверность и объективность оценки качества знаний персонала может влиять ряд факторов, обусловленных когнитивными и личностными трудностями кандидата на сертификацию при взаимодействии с экзаменаторами, методикой проведения собеседования и др. ГОСТ Р ИСО 9712—2023 регламентирует при сертификации персонала тестовую форму проведения общего и специального экзамена. К безусловным достоинствам компьютерного тестирования при сертификации относятся объективность, независимость, единые требования оценки знаний кандидата на сертификацию, оперативность сертификации, охват тестовыми заданиями всего требуемого программой сертификации объема знаний физических основ и технологий метода НК.

Следует иметь в виду, что на результаты тестирования влияют стаж работы, уровень образования, средний возраст испытуемого [1—3]. Содержание тестовых вопросов может быть неравномерным и неоднородным, при этом способность усвоения различных разделов программы сертификации зависит не только от уровня подготовки специалиста к тестированию и качества преподавания в учебных центрах, но и от проработанности самих тестовых заданий.

В статье представлен анализ результатов тестирования при проведении квалификационных экзаменов в процессе сертификации персонала по вихретоковому контролю (ВТК) с использованием метода Раша [4—7], проводимых в экзаменационном центре по неразрушающему контролю Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (ЭЦНК).

Цель работы — проанализировать влияние уровня образования, стажа работы, возраста кандидатов на результат квалификационных экзаменов по НК, оценить соответствие трудности тестовых заданий по вихретоковым методам и уровня подготовленности экзаменуемого кандидата к сертификации, дать рекомендации по модернизации материалов тестирования.

ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Анализ проведен на основании архива личных дел ЭЦНК — Экзаменационного центра по неразрушающему контролю ИжГТУ имени М. Т. Калашникова (рег. № РОСС RU.0001.03Н300.ЭЦ-38 от 25 февраля 2021 г.). Исследовалось влияние возраста, стажа работы, уровня образования кандидатов на сертификацию на результаты тестирования. Качество тестовых материалов рассмотрено на примере анализа результатов тестирования по вихретоковому виду НК за 2021—2022 гг.

Согласно ГОСТ Р ИСО 9712—2023, для подтверждения общей компетенции лица, проводящего контроль, орган по сертификации должен провести квалификационный экзамен, на котором оцениваются общие, специальные и практические знания и навыки кандидата. Для прохождения общего и специального экзамена кандидату требуется дать ответы на экзаменационные вопросы с вариантами ответов (тестовые вопросы). Любое лицо, успешно сдавшее квалификационные экзамены, получает заявленный уровень сертификации, соответствующий продемонстрированным компетенциям при проведении НК. (В заявке на сертификацию работодатель указывает первый или второй квалификационный уровень сертификации направляемого претендента.) В рамках своих компетенций персонал первого уровня имеет право подготавливать оборудование для проведения контроля, проводить контроль, записывать и классифицировать результаты контроля, составлять отчеты о результатах контроля.

Персонал второго уровня дополнительно разрабатывает технологические карты для проведения контроля, определяет и проверяет установки оборудования, проводит и руководит контролем, оценивает результаты контроля.

Персонал третьего уровня должен обладать компетенциями, которые позволяют ему принимать полную ответственность за аппаратуру контроля, разрабатывать инструкции и процедуры по НК, определять конкретные методы контроля, методики и инструкции по НК, подлежащие применению, участвовать в подготовке персонала или в качестве экзаменатора при проведении квалификационных экзаменов.

Тестовые материалы составлены на основе утвержденных программ сертификации и включают по общему экзамену следующие основные разделы: общие вопросы НК, материаловедение, физические основы, методы и аппаратура вихретокового контроля.

Таблица 1

Количество анализируемых тестовых вопросов и протоколов тестирования по вихретоковому контролю

Вид экзамена	Количество анализируемых вопросов		Количество анализируемых протоколов	
	2021 г.	2022 г.	2021 г.	2022 г.
Общий	201	217	23	15
Специальный	57	95	24	17

Базы данных ЭЦНК включают в себя как тестовые задания, используемые при проведении общего экзамена, так и результаты тестирования в виде протоколов. Общее количество анализируемых вопросов и протоколов указано в табл. 1.

Тесты общего экзамена по определенному виду контроля содержат по 50 заданий для каждого сертифицируемого с весом каждого задания 2 %. Задания для теста выбираются из базы данных случайным образом, но с разделением на темы и без повторов. Тестирование каждого кандидата на сертификацию продолжается не более 120 мин. По окончании тестирования формируются протоколы тестирования, содержащие результаты ответов на каждый вопрос и соответствующий им процент правильных ответов. Результат теста общего экзамена не менее 70 % (количество правильных ответов 35 и более) засчитывается как успешно сданный. Кандидаты, успешно прошедшие тестирование по общему экзамену, допускаются к собеседованию по 2-3 несданным вопросам, требующим развернутых ответов.

Тест специального экзамена содержит 20 заданий для каждого кандидата с весом каждого задания 5 % и продолжается не более 60 мин. Несдавшим специальный экзамен считается кандидат, получивший по результатам тестирования менее 70 % правильных ответов, т. е. ответивший правильно менее чем на 14 вопросов. Собеседование по специальному экзамену включает ответы на 3 вопроса по технологии контроля объекта согласно заявленному производственному сектору.

В программе и тестах специального экзамена рассматриваются вопросы технологии вихретокового контроля деталей вагонов и средства контроля, нормативные документы на проведение контроля, типы выявляемых дефектов, критерии браковки, этапы проведения контроля, настройка оборудования для контроля, схемы сканирования, оценка качества.

При анализе результатов тестирования с использованием логистических моделей возможно оценить не только количество и долю правильных ответов, но и ряд других (латентных — недоступных для прямого наблюдения) параметров. Латентные параметры определяются косвенно как функции от доступных для прямого наблюдения индикаторных переменных, в качестве которых выступают непосредственно испытуемые и задания тестов (в виде их порядковых номеров или индексов). Значениями индикаторных переменных могут быть правильность или неправильность ответа конкретного испытуемого на конкретное тестовое задание.

Латентные параметры измеряются в безразмерных условных единицах (логитах), легко переводимых в любую интервальную шкалу и в дальнейшем используемых в широком классе процедур статистического анализа [8—10].

При анализе качества тестовых заданий с позиций соответствия их трудности уровню подготовленности кандидатов на сертификацию использовалась математическая модель Раша [10—13], согласно которой анализируется статистика количества правильных и неправильных ответов кандидатов на вопросы теста и рассчитываются логит подготовленности (обученности) i -го тестируемого θ_i и логит трудности j -го вопроса β_j в относительных единицах измерения одной шкалы:

$$\theta_i = \ln(C_i/I_i), \quad (1)$$

$$\beta_j = \ln(W_j/R_j), \quad (2)$$

где C_i и I_i — количество соответственно правильных и неправильных ответов i -го кандидата на вопросы теста; R_j и W_j — количество соответственно правильных и неправильных ответов на j -й вопрос теста.

Латентные параметры обученности и трудности позволяют определить вероятность $P_i(\theta)$ того, что кандидат с уровнем подготовки θ_i справится с заданием со сложностью β :

$$P_i(\theta) = \{1 + \exp[-1,7(\theta_i - \beta)]\}^{-1}, \quad (3)$$

и вероятность $P_j(\beta)$ того, что с заданием сложностью β_j справится тестируемый с уровнем подготовки θ :

$$P(\beta_j) = \{1 + \exp[-1,7(\theta - \beta_j)]\}^{-1}. \quad (4)$$

В частности, если разность между уровнем подготовленности участника тестирования и трудностью тестового задания составляет 1 логит, то вероятность верного выполнения этим испытуемым такого задания равна 73 %.

Знание латентных параметров позволяет также оценить надежность теста, характеризующую точностью и устойчивостью результатов тестирования при многократном применении, что ранее было показано на примерах магнитного и акустико-эмиссионного методов [14, 15].

Анализ связи характеристик сертифицируемых кандидатов и результатов тестирования

Для оценки качества тестовых материалов и процедуры сертификации в ЭЦНК был проведен анализ результатов тестов по нескольким критериям:

- распределение кандидатов, выдержавших испытания на II уровень сертификации по различным видам НК;
- распределение кандидатов по присвоенному уровню сертификации;
- распределение кандидатов, справившихся с общим и специальным экзаменом;
- распределение кандидатов по стажу работы и уровню образования;
- распределение кандидатов по возрасту.

Также произведена оценка логитов трудности заданий и уровня подготовленности специалистов. Анализ результатов тестов произведен по четырем видам контроля, по которым проводится квалификационный экзамен в экзаменационном центре по неразрушающему контролю: ультразвуковому, магнитному, вихретоковому, акустико-эмиссионному.

Результаты деятельности ЭЦНК по сертификации персонала на I, II, III уровни по всем аккредитованным видам НК за период 8 лет показаны на рис. 1.

Общее количество кандидатов по всем видам НК, выдержавших испытания на II уровень сертификации, составляет 1765 человек; кроме того, 124 человека сдали на I уровень и 11 человек — на III уровень сертификации (рис. 1а). Существенное преобладание специалистов, получающих II уровень сертификации, связано с требованиями работодателей, которым необходим персонал с допуском на проведение НК и выдачу заключений о его результатах, но без обязанности по составлению технологических инструкций НК.

На рис. 1б представлено распределение кандидатов, выдержавших квалификационные испытания на II уровень сертификации по различным видам НК: видно, что по вихретоковому контролю

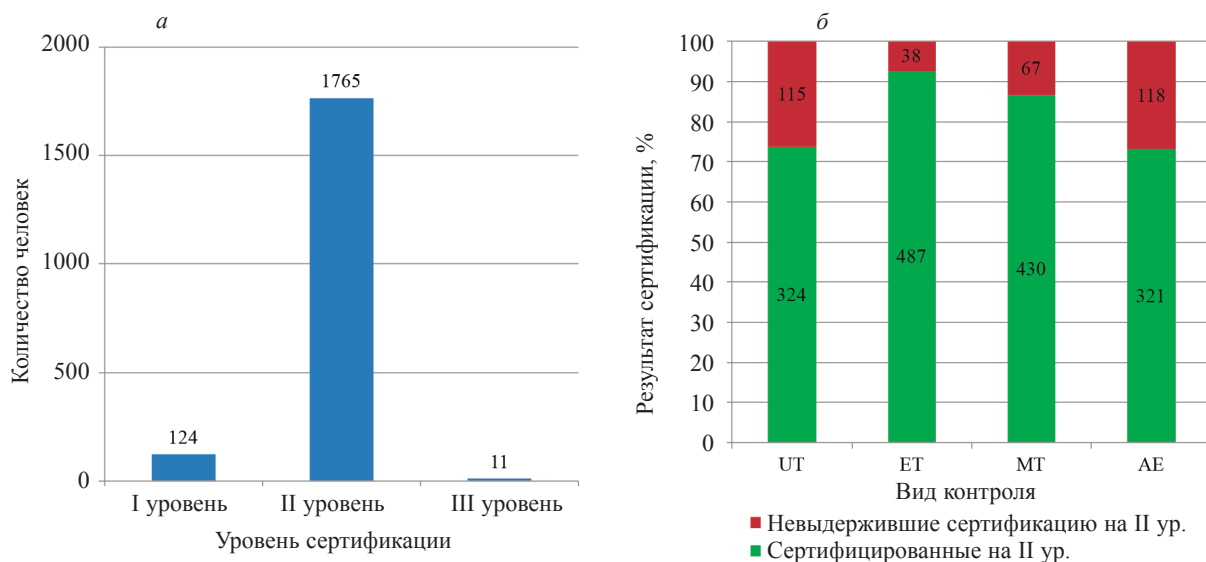


Рис. 1. Результаты присвоения уровней сертификации (а) и II уровня сертификация по различным видам неразрушающего контроля (б).

(ЕТ) специалисты получают II уровень в 93 % случаев, по магнитному контролю (МТ) — в 87 % случаев, по ультразвуковому (УТ) и акустико-эмиссионному контролю (АЕ) — по 73 % случаев.

Результаты тестирования в зависимости от производственного стажа кандидата

На результат тестирования по общему и специальному экзамену может влиять стаж работы кандидата на сертификацию, который для получения II уровня сертификации по ВТК должен составлять не менее 12 месяцев. Для оценки данного фактора построено распределение результатов общего и специального экзамена в зависимости от стажа работы (рис. 2а). Получено, что с общим экзаменом, независимо от стажа работы, кандидаты справляются с вероятностью успеха около 85 %. Со специальным экзаменом на знание технологии контроля кандидаты с низким стажем (1 год) справляются с вероятностью 78 %, а кандидаты со стажем более 15 лет справляются с вероятностью около 90 %.

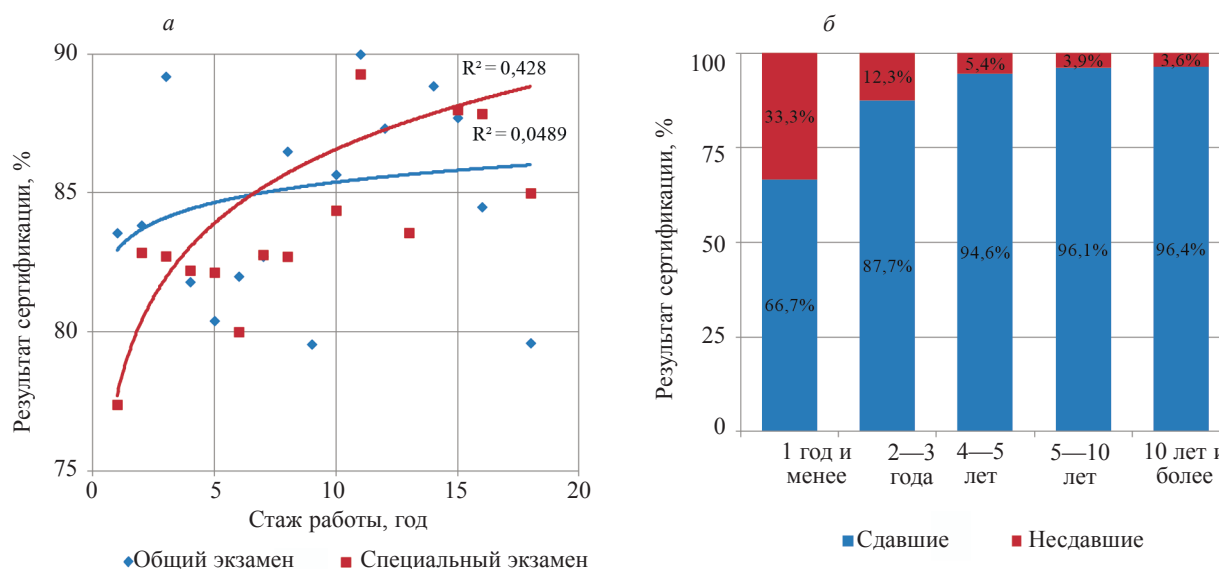


Рис. 2. Результат прохождения общего и специального экзаменов в зависимости от стажа работы (а) и сертификации специалистов в зависимости от стажа работы (б).

Общий процент сдачи аттестационных экзаменов для кандидатов со стажем 1 год составляет 66,7 %, со стажем 2-3 года — 87 %, а для кандидатов со стажем работы от 4 лет и более — стремится к 100 % (рис. 2б).

Распределение сертифицируемых кандидатов по образованию

Распределение кандидатов, приезжающих для прохождения квалификационных экзаменов, по имеющемуся у них образованию показано на рис. 3: среднее профессиональное и среднее специальное образование имеют 62 % кандидатов, высшее образование — 27 %, среднее — 9 %, незаконченное высшее образование — 2 %.

Оценка результатов присвоения кандидатам уровня сертификации в зависимости от образования показывает, что кандидаты с высшим образованием получают уровень сертификации в 90 % случаев, со средним специальным — в 88 %, а со средним образованием — в 85 % (рис. 4). То есть, уровень образования в меньшей степени влияет на получение 2 уровня сертификации по сравнению со стажем работы, так как в процессе работы кандидаты на сертификацию проходят периодическое повышение квалификации и техническую учебу, что повышает их базовый уровень знаний, умений и навыков.

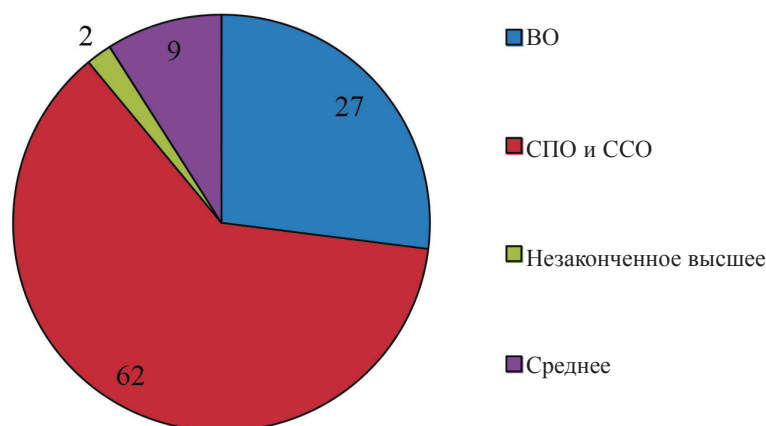


Рис. 3. Распределение кандидатов на сертификацию по уровню образования.

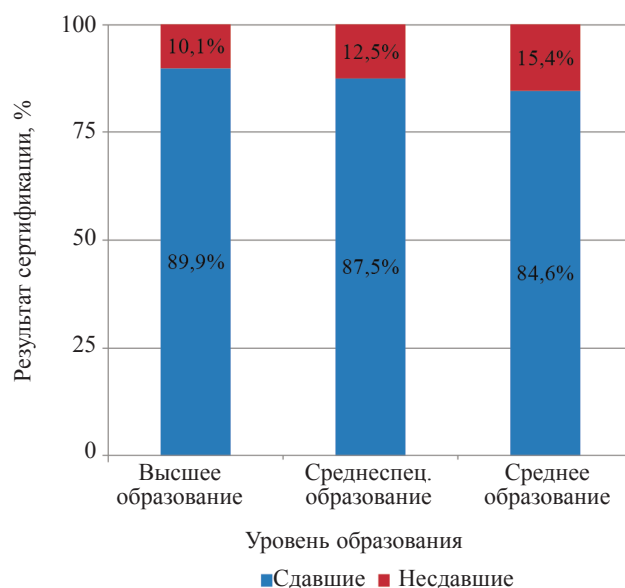


Рис. 4. Результат сдачи квалификационных экзаменов в зависимости от уровня образования.

Распределение сертифицируемых кандидатов по возрасту

Средний процент сдачи квалификационных экзаменов повышается с возрастом кандидатов (рис. 5): для кандидатов 1971 г. рождения и старше он составляет 95 %, для кандидатов 1981—1990 гг. рождения — 85 %, что также является хорошим результатом, для кандидатов 1991—1998 гг. рождения — 74 %, что всего лишь на 4 % выше порогового значения, при котором экзамен считается сданным. Данные показатели также обусловлены стажем работы кандидатов и накопленными знаниями, умениями и навыками в процессе производственной деятельности, а также предыдущих процедур сертификаций по НК.

На результат прохождения квалификационных экзаменов в большей степени влияет качество тестового материала как измерительного инструмента, то есть совместимость вопросов теста при измерении уровня знаний кандидатов.

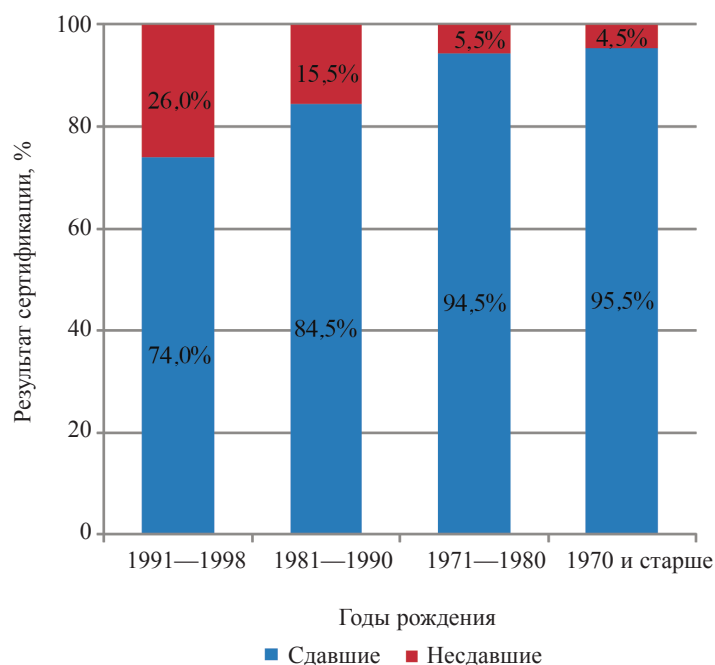


Рис. 5. Результат прохождения квалификационных экзаменов в зависимости от возраста испытуемых.

Анализ результатов общего экзамена

На рис. 6 представлены гистограммы результатов тестирования группы испытуемых по общему экзамену вихретокового контроля, проведенного в 2021 (а) и в 2022 гг. (б). Данные ранжированы по возрастанию результата кандидата с условным номером протокола (первый условный номер протокола присвоен специалисту с минимальным результатом тестирования). Согласно рис. 6а, в 2021 г. все 23 кандидата были допущены, из них 12 кандидатов (52 %) имели результат тестирования не ниже 90 %. Согласно рис. 6б, в 2022 г. из 15 тестируемых кандидатов 5 человек (30 %) имели результат тестирования не ниже 90 % и 1 кандидат не справился с тестом.

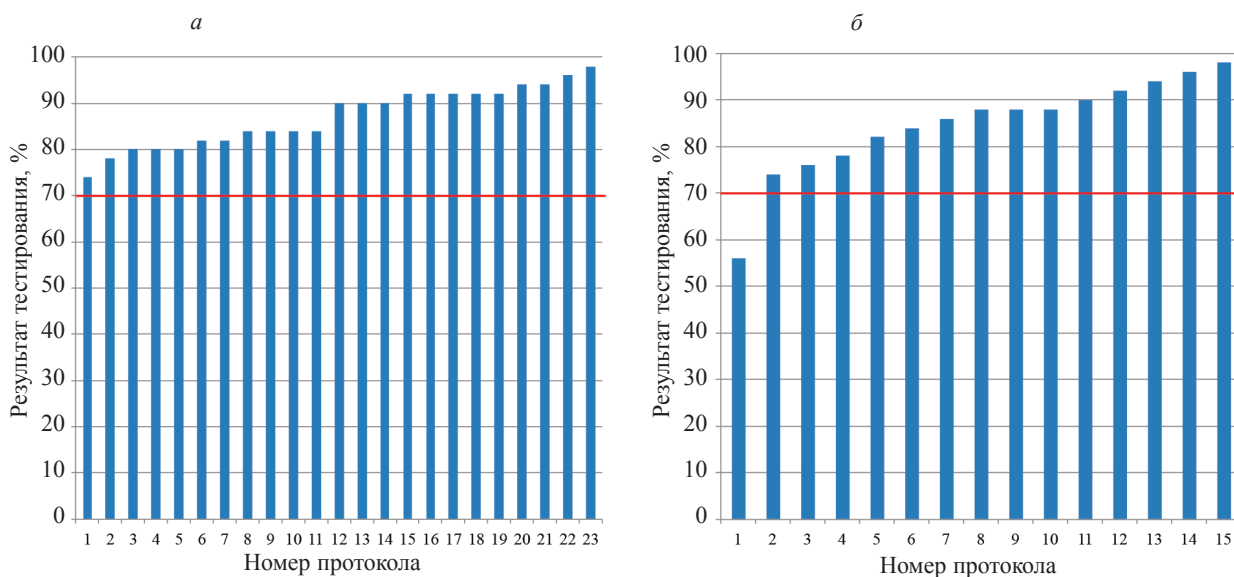


Рис. 6. Результаты тестирования по общему экзамену вихретокового контроля в 2021 (а) и 2022 (б) гг.

Следует отметить, что в 2022 г. тестовые задания были пересмотрены с целью более равномерного охвата разделов программы, улучшения формулировок, усиления сложности вопросов. В связи с группировкой вопросов по темам, распределение вероятностей попадания вопросов в тест является неравномерным и варьируется от 5 до 60 %. В рассматриваемом тесте за 2021 г. из банка вопросов общего теста хотя бы один раз был задан 201 вопрос, в тесте за 2022 г. были использованы 217 вопросов.

Распределение результатов ответов по отдельным вопросам тестов по общему экзамену вихревого контроля иллюстрирует рис. 7. Гистограммы ранжированы по возрастанию процента правильных ответов на вопрос с условным номером (первый условный номер протокола соответствует вопросу, на который был дан минимальный процент правильных ответов). Видно, что в тесте 2021 г. 70 % испытуемых дали верные ответы на 163 задания из 201 (81 % заданий), а в тесте за 2022 г. 70 % испытуемых дали верные ответы на 165 заданий из 217 (76 % заданий). В тестах выявлены экстремально по сложности задания, на которые не было получено верных ответов или, наоборот, все ответы были верными. Если исключить из рассмотрения задания, заданные всего один раз, то в тесте 2021 г. выявлено 2 задания без верных ответов (сложные) и 106 заданий со стопроцентным положительным результатом (простые), в тесте 2022 г. — 4 и 109 заданий соответственно. При этом количество полученных ответов варьируется от 2 до 3 для экстремально сложных вопросов и от 2 до 13 для экстремально простых. Номера экстремально сложных вопросов в тестах 2021 и 2022 гг. не совпадают. Количество экстремально простых вопросов приближается к 50 %, что требует их пересмотра в сторону усложнения либо исключения из теста.

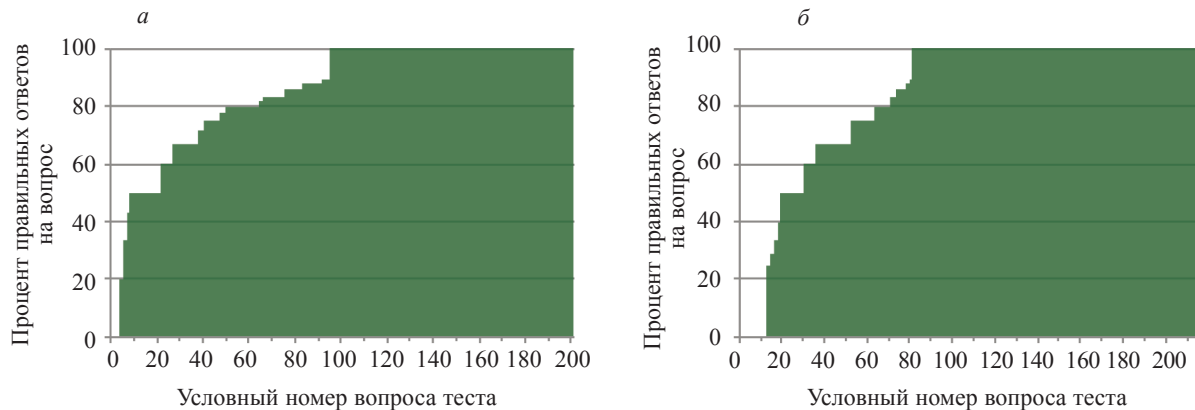


Рис. 7. Распределение правильных ответов по отдельным вопросам теста общего экзамена в 2021 (а) и 2022 (б) гг.

Гистограммы распределения значений латентных параметров уровня подготовленности кандидатов и трудности заданий в логитах представлены на рис. 8. Отрицательным значениям логитов трудности заданий и обученности кандидатов соответствуют наиболее легкие задания и низкий уровень подготовки кандидатов. Напротив, положительным значениям логитов — наиболее сложные задания и хорошо подготовленные кандидаты. Известно, что средняя трудность заданий не должна отличаться от среднего уровня подготовленности более чем на 0,5 логита [6, 7]. В противном случае оценка уровня знаний кандидатов будет производиться с различной точностью в зависимости от диапазона трудностей заданий.

Из анализа результатов следует, что средний уровень подготовленности кандидатов (среднее значение логита обученности) в 2022 г. составил $\theta = 0,96$ логита, что на 0,2 логита меньше среднего уровня трудности задания (среднего значения логита трудности задания $\beta = 1,16$), тогда как в 2021 г. средний уровень логита подготовленности кандидатов составил $\theta = 0,95$, что на 0,34 логита больше среднего уровня трудности заданий $\beta = 0,64$. Последнее подтверждает, что уровень подготовленности кандидатов соответствует уровню трудности заданий. Диапазон изменения уровня подготовленности кандидатов находился в диапазоне $\theta = -0,5—2,5$ логита в 2022 г. и $\theta = 0—2,5$ логита в 2021 г. При этом уровень трудности заданий изменялся в диапазоне $\beta = -1,0—3$ логита и полностью покрывал интервал изменения уровня подготовленности кандидатов как в 2021 г., так и в 2022 г.

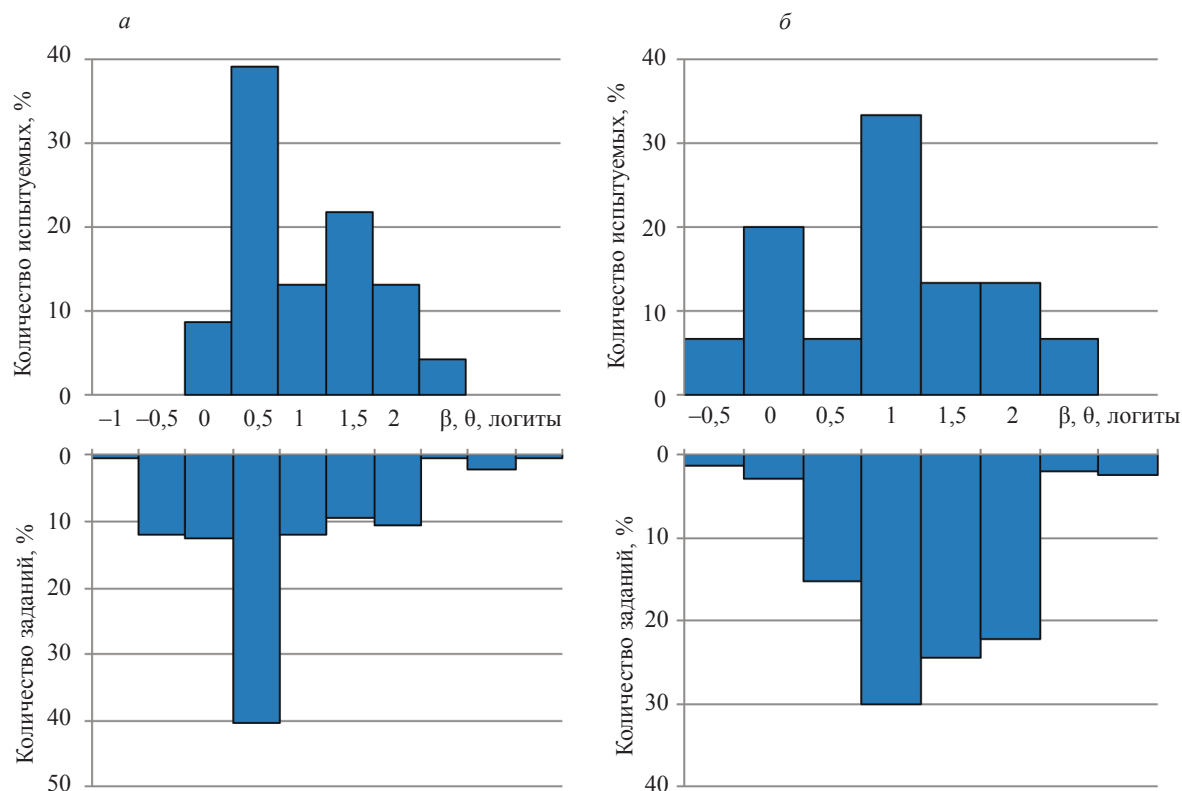


Рис. 8. Результаты распределения уровня подготовленности кандидатов и трудности заданий общего экзамена в 2021 (а) и в 2022 (б) гг.

Для достоверной оценки уровня подготовленности кандидатов при анализе качества тестовых заданий необходимо, чтобы гистограмма распределения уровня трудностей заданий была близка к равномерному закону распределения и охватывала весь диапазон. В исследуемом тесте распределение трудностей заданий достаточно равномерно. Смещение максимума распределения на 0,5—1 логит вправо вполне оправданно, так как процент сдачи должен составлять 70 %. Анализируя гистограмму распределения трудностей заданий, можно определить, какие задания необходимо пересмотреть с точки зрения увеличения или уменьшения их трудности. В исследуемом тесте к наиболее легким тестовым заданиям относятся задания с логитом трудности $\beta = -1,0$ —0,5, к заданиям средней трудности — с логитом $\beta = 1,0$ —2,0, к наиболее трудным — с логитом $\beta > 2,5$.

Примеры экстремальных вопросов теста (с минимальными и максимальными логитами трудности), выделенные в 2021 и 2022 гг., представлены в табл. 2.

Такого рода экстремальные задания требуют пересмотра формулировки либо исключения из теста. Для обеспечения равномерного распределения трудностей заданий необходимо уменьшить количество заданий с логитом трудности от 1,0 и выше и увеличивать количество заданий с логитом трудности 0,5.

Анализ результатов специального экзамена

База данных, используемая при проведении специального экзамена, включает тестовые задания в количестве 142 вопроса. Сдавшим тестирование при специальном экзамене считается кандидат, правильно ответивший не менее чем на 14 вопросов (70 %) из предложенных 20. Кандидаты, успешно прошедшие тестирование, допускаются на собеседование, где экзаменационная комиссия задает 2 или 3 вопроса, касающиеся методики работы и требующие развернутого ответа. Анализ результатов тестирования по специальному экзамену 24 кандидатов за 2021 г. и 12 кандидатов за 2022 г., претендовавших на II уровень сертификации по вихретоковому контролю, представлен на рис. 9.

Таблица 2

Экстремальные вопросы общего экзамена по ВТК

Логит	Номер вопроса	Формулировка вопроса	Варианты ответа
Тест 2021 г.			
-0,74	31	К источнику синусоидального напряжения частотой ω подключены последовательно соединенные конденсатор емкостью C и катушка индуктивностью L . В каком случае ток в цепи будет максимальным?	1. $\omega L = \omega C$ 2. $\omega L = 1/(\omega C)$ 3. $\omega L \gg \omega C$ 4. $\omega L \ll \omega C$
3,58	145	Чем обусловлено изменение индуктивного сопротивления вихретокового преобразователя?	1. Потерями энергии на вихревые токи за счет нагрева объекта контроля вихревыми токами 2. Изменением потокоцепления индуктивной катушки за счет действия вихревых токов 3. Изменением емкости катушки
Тест 2022 г.			
-0,15	25	Активное сопротивление обмотки определяется:	1. Материалом провода обмотки 2. Длиной провода 3. Поперечным сечением провода 4. Всеми указанными факторами
+2,99	132	К чему приводит уменьшение плотности вихревых токов в поверхностном слое?	1. Уменьшается влияние шероховатости и уменьшается чувствительность к мелким поверхностным дефектам 2. Увеличивается влияние шероховатости и уменьшается чувствительность к мелким поверхностным дефектам 3. Увеличивается влияние шероховатости и увеличивается чувствительность к мелким поверхностным дефектам 4. Уменьшается влияние шероховатости и увеличивается чувствительность к мелким поверхностным дефектам

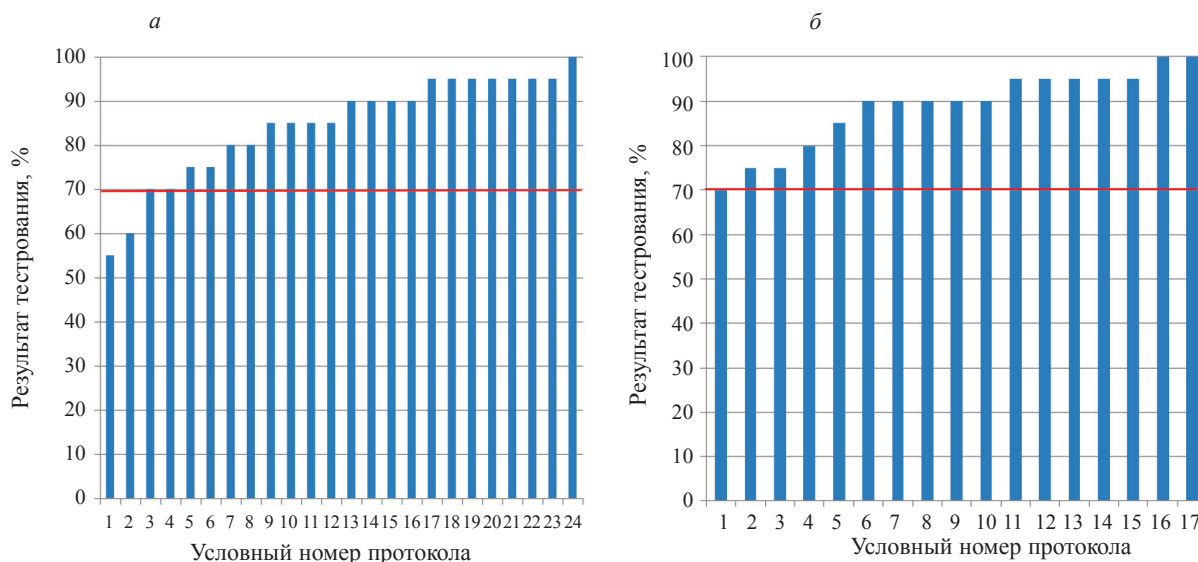


Рис. 9. Результаты тестирования кандидатов на сертификацию по специальному экзамену вихретокового контроля в 2021 (а) и 2022 (б) гг.

Согласно рис. 9, среди 24 кандидатов, претендующих на II уровень квалификации по вихретоковому контролю в 2021 г., 1 кандидат прошел тест с результатом 100 %, 2 кандидата набрали менее

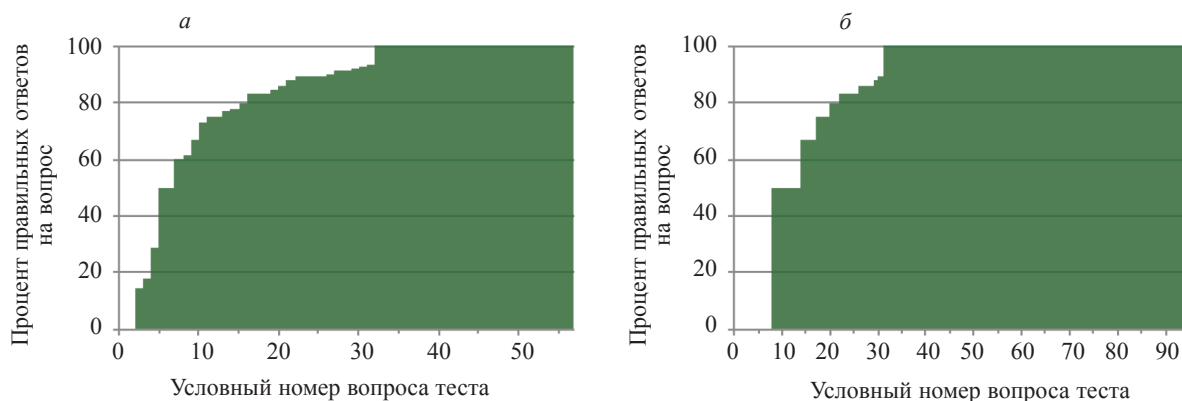


Рис. 10. Распределение правильных ответов по отдельным вопросам теста специального экзамена по вихретоковому контролю в 2021 (а) и 2022 (б) гг.

70 % и не были допущены к собеседованию. В 2022 г. из 17 тестируемых кандидатов все допущены к собеседованию, из них 2 прошли тест со 100 % результатом. Анализ результатов тестирования по отдельным вопросам теста специального экзамена (рис. 10) показывает, что процент правильных ответов на вопросы находится в тесте 2021 г. в интервале 15—100 %, в тесте 2022 г. — в интервале 50—100 %. Банк вопросов состоит из 146 вопросов. Из них в тесты хотя бы один раз попали 56 вопросов в тесте 2021 года и 94 вопроса в тесте 2022 года. Сто процентов кандидатов на сертификацию ответили на 25 вопросов в тесте 2021 г. и на 64 вопроса в тесте 2022 г. Правильный ответ не был дан ни одним из кандидатов на 2 вопроса в тесте 2021 г., на 8 вопросов в тесте 2022 г., что свидетельствует об увеличении трудности после переработки тестов.

Анализ гистограмм распределения значений латентных параметров уровня подготовленности кандидатов на сертификацию и трудности заданий (рис. 11) показывает, что средний уровень подготовленности кандидатов в 2021 г. на 0,29 логита больше уровня трудности заданий, а в 2022 г. — на 0,16 логита меньше.

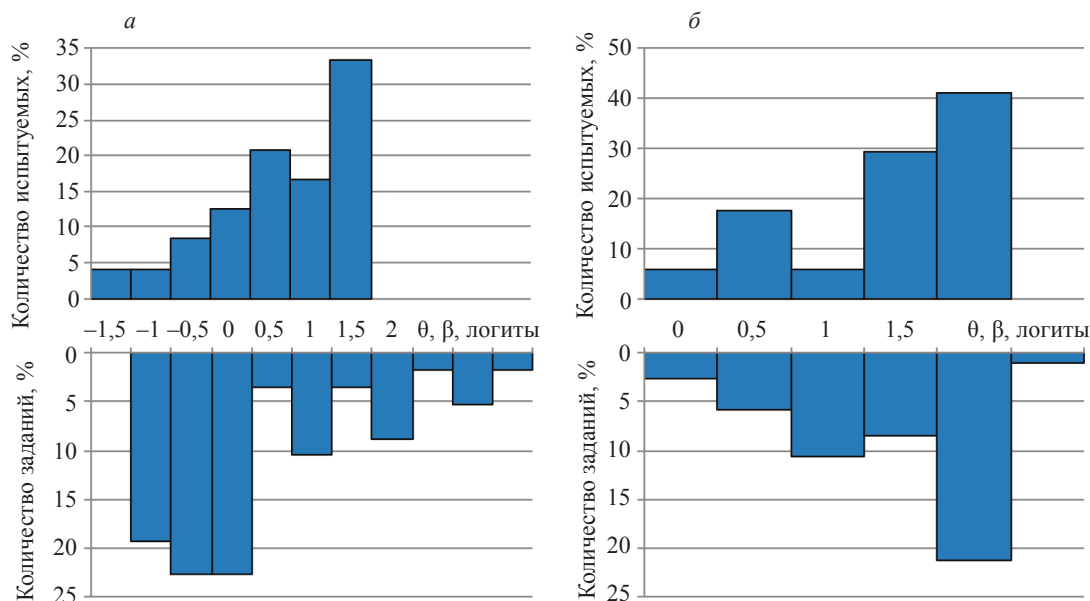


Рис. 11. Распределение уровня подготовленности кандидатов на сертификацию и трудности заданий специального экзамена по вихретоковому контролю в 2021 (а) и 2022 (б) гг.

В 2021 г. уровень трудности заданий изменялся в диапазоне 1,0—3,5 логита, в 2022 г. диапазон изменения трудности заданий составлял 0—2,5 логита, при этом равномерность в распределении

трудностей заданий отсутствовала. Уровень трудности заданий не покрывает уровень подготовленности кандидатов в 2021 г., что говорит о трудности теста. В 2022 г. уровень трудности полностью покрывал интервал изменения уровня подготовленности кандидатов, что позволяет говорить о соизмеримости уровня трудности заданий и уровня подготовленности кандидатов на сертификацию.

Примеры экстремальных вопросов, выявленных в тестах специального экзамена по вихретоковому контролю, представлены в табл. 3.

Таблица 3

Экстремальные вопросы специального экзамена по вихретоковому контролю

Логит	Номер вопроса	Формулировка вопроса	Варианты ответа
Тест 2021 г.			
-0,97	11	В каких дефектоскопах используются роторные вихретоковые преобразователи?	1) ВД-12НФМ, ВД-12НФ, ВД-15НФ 2) ВД-12НФМ 3) ВД-113.5, ВД-113 4) ВД-12НФ
4,01	32	С помощью какого стандартного образца устанавливают порог чувствительности при контроле валика тягового хомута?	1) СОП—НО-038, используя ИД-2 2) СОП—НО-038, используя ИД-1 3) СОП—НО-038, используя ИД-5 4) СОП—НО-038, используя ИД-3
Тест 2022 г.			
0	6	Что относится к помехам вихретокового вида неразрушающего контроля?	1) Шероховатость поверхности детали 2) Локальные изменения размера зерна металла объекта контроля 3) Локальные изменения электромагнитных свойств металла 4) Локальные изменения твердости объекта контроля 5) Изменение зазора между ВП и металлической поверхностью детали 6) Изменение кривизны контролируемой поверхности 7) Верны 1), 3), 5), 6) 8) Верны 1), 2), 3), 6)
2,87	51	Какова шероховатость рабочей поверхности отраслевого стандартного образца ОСО-Г-043:	1) Rz 160 2) Rz 20 3) Rz 320 4) Ra 20

Общее качество тестовых материалов, используемых при сертификации кандидатов на сертификацию по вихретоковому контролю, можно оценить по характеристическим кривым трудности заданий и обученности кандидатов.

Анализ характеристической кривой теста для общего экзамена (рис. 12а) показывает, что для успешной сдачи экзамена кандидаты на сертификацию должны были иметь логит обученности не менее 1,5 в 2021 г. и не менее 2 в 2022 г. Средняя сложность тестовых заданий (рис. 12б) в 2021 г. составила 0,9 логита, вероятность ответа на тест составила 0,55, а в 2022 г. — 1,2 логита и вероятностью ответа на тест 0,49. Высокий процент сдачи по общему экзамену связан с большим количеством легких вопросов, на которые все кандидаты дают правильные ответы.

Из характеристических кривых тестовых заданий общего экзамена (рис. 13а) видно, что задания неравномерно покрывают требуемый диапазон уровней подготовленности испытуемых (θ от -5 до +7), особенно выпадают из равномерного распределения задания с трудностью +3,59 логит. Сравнение характеристических кривых уровня подготовленности (рис. 13б), показывает что логит обученности специалистов лежит в достаточно широком диапазоне от 1,13 до 3,89, однако все кривые равномерно покрывают уровень трудности заданий от -4 до +7 логита трудности заданий.

Анализ характеристической кривой теста специального экзамена (рис. 14а) показывает, что для успешной сдачи теста логит обученности должен быть не менее 1,5 в 2021 г. и не менее 1,8 в 2022 г. Средняя сложность тестовых заданий в 2021 и в 2022 гг. составила 0,9 логита, а вероятность ответа на тест в 2021 г. составила 0,35, в 2022 г. — 0,55 (рис. 14б).

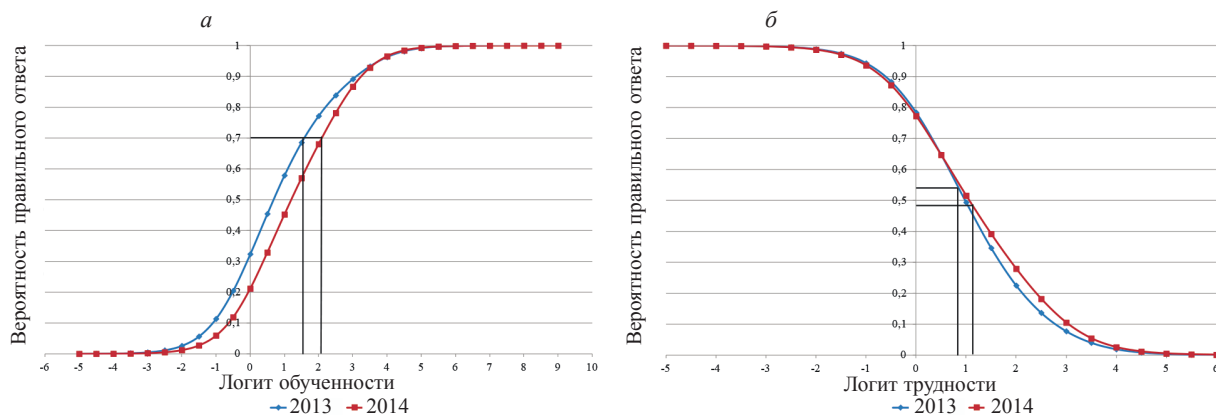


Рис. 12. Характеристические кривые теста общего экзамена (а) и подготовленности кандидатов на сертификацию (б) в 2021—2022 гг.

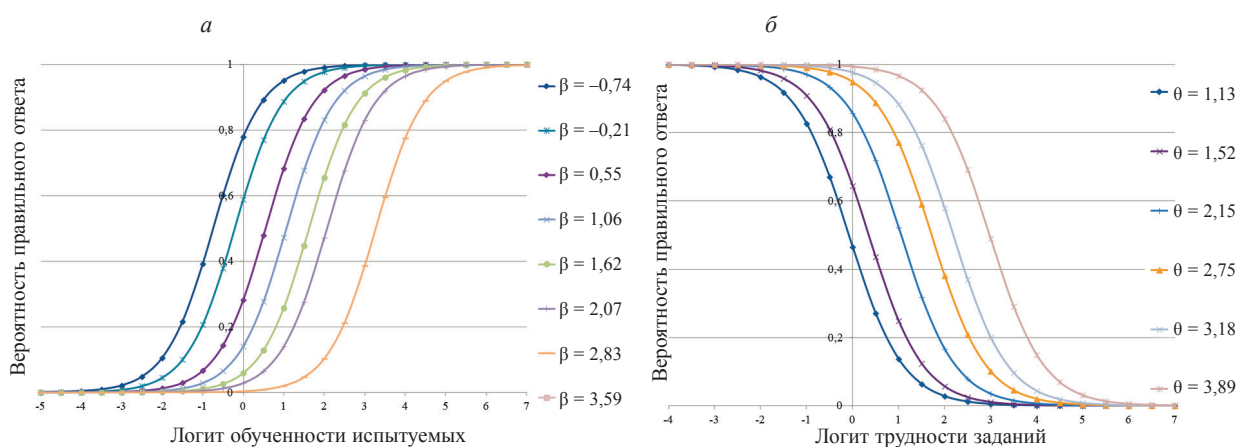


Рис. 13. Характеристические кривые тестовых заданий общего экзамена (а) и испытуемых (б).

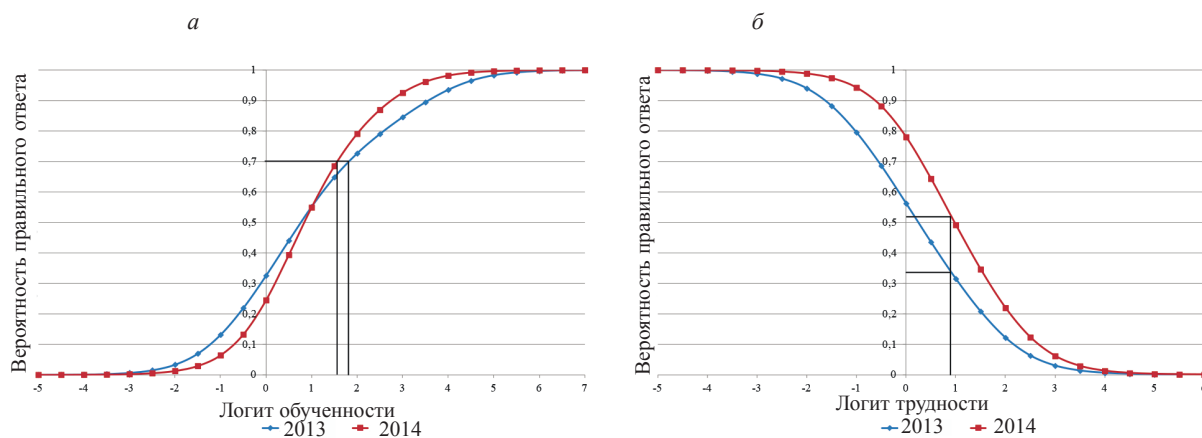


Рис. 14. Характеристические кривые теста специального экзамена (а) и испытуемых (б).

ВЫВОДЫ

Анализ результатов прохождения сертификационных испытаний на различные виды неразрушающего контроля показал, что большинство специалистов имеют высокий уровень подготовки к

экзаменам, связанный с уровнем образования, приобретенными навыками и опытом работы в НК не менее одного года.

Для исключения предвзятости при тестировании в экзаменационном центре кандидаты проходят собеседование, в процессе которого оценивается уверенность кандидата на сертификацию в применении основных понятий, знании технологий контроля, а также применении знаний в решении практических задач контроля.

Анализ качества заданий согласно модели Раша позволяет:

- выявить и исключить тестовые задания с экстремальными значениями;
- оценить соответствие трудности теста уровню подготовленности тестируемых специалистов;
- определить диапазон варьирования трудности тестовых заданий;
- оценить равномерность распределения заданий по трудности.

Анализ результатов тестовых материалов при сертификации специалистов по вихретоковому виду НК показал:

- наличие отклонений в гистограммах распределения уровня трудности тестовых заданий от равномерного закона, особенно для тестов специального экзамена, что требует увеличения числа заданий с низкими и высокими логитами трудности, где наблюдаются минимумы функции;
- необходимость усиления подготовки специалистов по вопросам, соответствующим минимальным логитам обученности.

Полученные результаты дают основания для дальнейшего анализа заданий по сложности, причин недостаточного усвоения материала в вопросах с низким процентом ответов, возможных внесений корректировки в консультационные занятия, а также в содержание и форму теста.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Berrio Angela I., Gomez-Benito J., Arias E.M.* Developments and Trends in Research on Methods of Detecting Differential Item Functioning // *Educational Research Review*. 2020. V. 31. P. 100340. DOI:10.1016/j.edurev.2020.100340
2. *Boon H.J., Lewthwaite B.* Development of an Instrument to Measure a Facet of Quality Teaching: Culturally Responsive Pedagogy // *International Journal of Educational Research*. 2015. V. 72. P. 38—58. DOI: 10.1016/j.ijer.2015.05.002
3. *Aghekyan R.* Validation of the SIEVEA Instrument Using the Rasch Analysis // *International Journal of Educational Research*. 2020. V. 103. P. 101619. DOI:10.1016/j.ijer.2020.101619
4. *Kruit P., Oostdam R., van den Berg E., Schuitema J.* Performance Assessment as a Diagnostic Tool for Science Teachers // *Research in Science Education*. 2020. V. 50. No. 3. P. 1093—117. DOI:10.1007/s11165-018-9724-9
5. *Vaughan B.* A Rasch Analysis of the Revised Study Process Questionnaire in an Australian Osteopathy Student Cohort // *Studies in Educational Evaluation*. 2018. V. 56. P. 144—53. DOI:10.1016/j.stueduc.2017.12.003
6. *Ehrich J.F., Woodcock S., West C.* The Effect of Gender on Teaching Dispositions: A Rasch Measurement Approach // *International Journal of Educational Research*. 2020. V. 99. P. 101510. DOI:10.1016/j.ijer.2019.101510
7. *Zhao Yue, Huen J.M., Chan Y.W.* Measuring Longitudinal Gains in Student Learning: A Comparison of Rasch Scoring and Summative Scoring Approaches // *Research in Higher Education*. 2017. V. 58. No. 6. P. 605—16. DOI:10.1007/s11162-016-9441-z
8. *Sabetova T.V.* The use of latent variable method in human resource management // *Russian Journal of Agricultural and Socio-Economic Sciences*. 2017. V. 66. No. 6. P. 123—29. DOI:10.18551/rjoas.2017-06.14
9. *Van Zile-Tamsen C.* Using Rasch Analysis to Inform Rating Scale Development // *Research in Higher Education*. 2017. V. 58. No. 8. P. 922—33. DOI:10.1007/s11162-017-9448-0
10. *Jääskä E., Aaltonen K.* Teachers' Experiences of Using Game-Based Learning Methods in Project Management Higher Education // *Project Leadership and Society*. 2022. V. 3. P. 100041. DOI:10.1016/j.plas.2022.100041
11. *Chang W.-Ch., Ludlow L., Grudnoff L., Ell F., Haigh M., Hill M.* Measuring the Complexity of Teaching Practice for Equity: Development of a Scenario-Format Scale // *Teaching and Teacher Education*. 2019. V. 82. P. 69—85. DOI: 10.1016/j.tate.2019.03.004
12. *Красова Н.А., Алейникова Н.Е.* Математическое моделирование задачи определения набора контрольных мероприятий с помощью нечеткого метода анализа иерархий и метода, основанного на измерении латентных переменных // *Моделирование, Оптимизация и Информационные Технологии*. 2019. Т. 7. № 3 (26). С. 33. DOI: 10.26102/2310-6018/2019.26.3.024
13. *Корытаева Ю.В., Красова Н.Е., Пешков В.В., Рябов С.В.* Методика организации и оценки качества научно-исследовательских работ курсантов военно-научного общества на основе математической

модели Раша // Вестник Воронежского Государственного Технического Университета. 2020. Т. 16. № 2. С. 65—70. DOI: 10.25987/VSTU.2020.16.2.010

14. Муравьев В.В., Волкова Л.В., Платунов А.В., Булатова Е.Г., Байкалова Т.Н. Анализ результатов тестирования специалистов по магнитному виду неразрушающего контроля при сертификации // Контроль. Диагностика. 2015. № 10. С. 36—42. EDN UJZFEL. DOI: 10.14489/td.2015.010.pp.036-042

15. Муравьев В.В., Муравьева О.В., Волкова Л.В., Богдан О.П., Платунов А.В., Байкалова Т.Н. Анализ качества тестов при сертификации специалистов по акустико-эмиссионному методу контроля объектов железнодорожного транспорта // В мире неразрушающего контроля. 2015. Т. 18. № 3. С. 66—71. EDN UDJSQX.

REFERENCES

1. Berrío Ángela I., Gomez-Benito J., Arias E. M. Developments and Trends in Research on Methods of Detecting Differential Item Functioning // Educational Research Review. 2020. V. 31. P. 100340. DOI:10.1016/j.edurev.2020.100340

2. Boon H.J., Lewthwaite B. Development of an Instrument to Measure a Facet of Quality Teaching: Culturally Responsive Pedagogy // International Journal of Educational Research. 2015. V. 72. P. 38—58. DOI:10.1016/j.ijer.2015.05.002

3. Aghekyan R. Validation of the SIEVEA Instrument Using the Rasch Analysis // International Journal of Educational Research. 2020. V. 103. P. 101619. DOI:10.1016/j.ijer.2020.101619

4. Kruit P., Oostdam R., van den Berg E., Schuitema J. Performance Assessment as a Diagnostic Tool for Science Teachers // Research in Science Education. 2020. V. 50. No. 3. P. 1093—117. DOI:10.1007/s11165-018-9724-9

5. Vaughan B. A Rasch Analysis of the Revised Study Process Questionnaire in an Australian Osteopathy Student Cohort // Studies in Educational Evaluation. 2018. V. 56. P. 144—53. DOI:10.1016/j.stueduc.2017.12.003

6. Ehrich J.F., Woodcock S., West C. The Effect of Gender on Teaching Dispositions: A Rasch Measurement Approach // International Journal of Educational Research. 2020. V. 99. P. 101510. DOI:10.1016/j.ijer.2019.101510

7. Zhao Yue, Huen J.M., Chan Y.W. Measuring Longitudinal Gains in Student Learning: A Comparison of Rasch Scoring and Summative Scoring Approaches // Research in Higher Education. 2017. V. 58. No. 6. P. 605—16. DOI:10.1007/s11162-016-9441-z

8. Sabetova T.V. The use of latent variable method in human resource management // Russian Journal of Agricultural and Socio-Economic Sciences. 2017. V. 66. No. 6. P. 123—29. DOI:10.18551/rjoas.2017-06.14

9. Van Zile-Tamsen C. Using Rasch Analysis to Inform Rating Scale Development // Research in Higher Education. 2017. V. 58. No. 8. P. 922—33. DOI:10.1007/s11162-017-9448-0

10. Jääskä E., Aaltonen K. Teachers' Experiences of Using Game-Based Learning Methods in Project Management Higher Education // Project Leadership and Society. 2022. V. 3. P. 100041. DOI:10.1016/j.plas.2022.100041

11. Chang W.-Ch., Ludlow L., Grudnoff L., Ell F., Haigh M., Hill M. Measuring the Complexity of Teaching Practice for Equity: Development of a Scenario-Format Scale // Teaching and Teacher Education. 2019. V. 82. P. 69—85. DOI:10.1016/j.tate.2019.03.004

12. Krasova N.A., Aleynikova N.E. Mathematical modeling of the problem of determining a set of control measures using the fuzzy method of analyzing hierarchies and a method based on measuring latent variables // Modeling, Optimization and Information Technologies. 2019. V. 7. No. 3 (26). P. 33. DOI:10.26102/2310-6018/2019.26.3.024

13. Korypaeva Yu.V., Krasova N.E., Peshkov V.V., Ryabov S.V. Methodology for organizing and assessing the quality of research work of cadets of the military scientific society based on the Rush mathematical model // Bulletin of Voronezh State Technical University. 2020. V. 16. No. 2. P. 65—70. DOI:10.25987/VSTU.2020.16.2.010

14. Murav'ev V.V., Volkova L.V., Platunov A.V., Bulatova E.G., Bajkalova T.N. Analysis of test results mean specialists in magnetic non-destructive testing for the certification // Kontrol. Diagnostika. 2015. No. 10. P. 36—42. EDN UJZFEL. DOI: 10.14489/td.2015.010.pp.036-042.

15. Muravjev V.V., Muravjeva O.V., Volkova L.V., Bogdan O.P., Platunov A.V., Bajkalova T.N. Test quality analysis during specialist certification on acoustic emission nondestructive testing of railway objects // In the world of non-destructive testing. 2015. V. 18. No. 3. P. 66—71. EDN UDJSQX.

СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕНДЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МЕТОДА В НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ (ОБЗОР)

© 2024 г. А.И. Солдатов^{1,*}, А.А. Солдатов^{1,**}, М.А. Костина^{1,***}

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия 634050 Томск, ул. Ленина, 30

E-mail: *asoldatof@tpu.ru; **soldatov_aa@tpu.ru; ***kostina_ma@tpu.ru

Поступила в редакцию 01.01.2024; после доработки 16.02.2024

Принята к публикации 16.02.2024

Проведен обзор основных направлений использования термоэлектрического метода контроля в различных сферах народного хозяйства. Наиболее широко он применяется в промышленности. Имеются публикации по применению этого метода для контроля качества токарной обработки и сварки металлов методом трения с перемешиванием. Показано, что термоэлектрический метод позволяет повысить достоверность контроля и на основе данных контроля обеспечивать оптимальные режимы технологического процесса металлообработки и сварки. Ряд работ посвящен применению термоэлектрического метода для контроля пластической деформации, выявлена зависимость термоЭДС от степени пластической деформации. В последнее время появились публикации по применению термоэлектрического метода для контроля теплового сопротивления конструкции «корпус силового полупроводникового прибора—термоинтерфейс—радиатор охлаждения». Такая конструкция очень широко распространена в радиоэлектронной аппаратуре. Кроме того, имеются работы по использованию термоэлектрического метода для контроля переходного сопротивления контактов в сети электроснабжения. Показано, что с увеличением контактного сопротивления пропорционально увеличивается величина термоЭДС, что можно использовать для предотвращения аварийных ситуаций в сети электроснабжения. Термоэлектрический метод успешно применен и для диагностики степени наводораживания титана. Выявлена зависимость величины термоЭДС от степени наводораживания. Использование термоэлектрического метода не ограничивается сферой промышленного производства, он успешно применяется в медицине для безметочного обнаружения последовательностей нуклеиновых кислот, для температурной диагностики состояния зубов человека, а также для диагностики воспалительных процессов в организме человека.

Ключевые слова: термоЭДС, сварка трением с перемешиванием, токарная металлообработка, пластическая деформация, тепловое сопротивление, контроль наводораживания.

MODERN TRENDS IN THE APPLICATION OF THERMOELECTRIC METHOD IN NON-DESTRUCTIVE TESTING (REVIEW)

© 2024 г. A.I. Soldatov^{1,*}, A.A. Soldatov^{1,**}, M.A. Kostina^{1,***}

¹Tomsk Polytechnic University, Russia 634050 Tomsk, Lenin avenue, 30

E-mail: *asoldatof@tpu.ru; **soldatov_aa@tpu.ru; ***kostina_ma@tpu.ru

The article provides an overview of the main directions of using the thermoelectric testing method in various spheres of the national economy. The thermoelectric method is most widely used in industry. There are publications on the application of the thermoelectric method for quality monitoring of turning and friction stir welding. It is shown that the thermoelectric method makes it possible to increase the reliability of testing and, based on testing data, ensure optimal modes of the technological process of metalworking and welding. A number of articles are devoted to the application of the thermoelectric method to plastic deformation testing, the dependence of thermal EMF on the degree of plastic deformation is revealed. Recently, publications have appeared on the application of the thermoelectric method to testing the thermal resistance of the design “housing of a power semiconductor device-thermal interface-cooling radiator”. This design is very widespread in electronic equipment. In addition, there are articles on the use of the thermoelectric method to testing the transient resistance of contacts in the power supply network. It is shown that with an increase in contact resistance, the value of thermal EMF increases proportionally, which can be used to prevent emergencies in the power supply network. The thermoelectric method has also been successfully applied to diagnose the degree of titanium flooding. The dependence of the thermal EMF value on the degree of hydrogenation has been revealed. The use of the thermoelectric method is not limited to the field of industrial production. The thermoelectric method is successfully used in medicine for the undetectable detection of nucleic acid sequences, for the temperature diagnosis of human teeth, as well as for the diagnosis of inflammatory processes in the human body.

Keywords: thermal EMF, friction welding with stirring, turning metalworking, plastic deformation, thermal resistance, water cooling control.

DOI: 10.31857/S0130308224020061

ВВЕДЕНИЕ

Термоэлектрический эффект был открыт в начале 19 века и с тех пор находит применение в практике неразрушающего контроля. Он позволяет эффективно решать некоторые производственные задачи: входной контроль материалов, определение глубины обезуглероженного слоя, определение толщины цементации, сортировка готовой продукции по маркам стали и сплавов, проверка качества термической обработки, проверка качества электронно-лучевой сварки, контроль пластической деформации, контроль режущего инструмента в процессе токарной обработки и измерение температуры как окружающей среды, так и различных технологических процессов [1—24]. Несколько положительных свойств, присущих термоэлектрическому методу, среди которых можно отметить простоту, компактность и автономность устройств, простоту подготовки объектов контроля, простота методики контроля, не требующая специальной подготовки персонала, и наконец возможность экспрессдиагностики, способствовали его широкому внедрению в различные сферы деятельности человека.

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ И СВАРКИ МЕТАЛЛОВ

В начале 21 века во многих отраслях промышленности стала широко внедряться технология сварки трением с перемешиванием (friction stir welding (FSW)). Получаемое сварное соединение при этом имеет более высокие механические свойства по сравнению с соединением, полученным дуговой сваркой. Другими преимуществами сварки трением с перемешиванием является способность сваривать «несвариваемые» алюминиевые сплавы, а также низкая деформация свариваемых изделий. Качество сварного шва зависит от температуры сварки. Для контроля температуры сварного шва было предложено использовать термоэлектрический метод, основанный на измерении температуры термопарой, образованной соединением инструмент—заготовка [25—29]. На рис. 1 показана схема контроля температуры методом контактной пары инструмент—деталь. Сравнение трех методов контроля температуры в процессе сварки трением с перемешиванием: термопарой, встроенной в инструмент, термопарой, встроенной в заготовку, и термопарой, образованной соединением инструмент—заготовка, показало преимущества метода, основанного на контактной паре инструмент—деталь [28]. При таком подходе время реакции термопары на изменение температуры существенно сокращается, кроме того, увеличивается точность измерения температуры т.к. термопара расположена в самом сварном соединении [24]. Авторы исследовали влияние тепловыделения, вызванного теплопроводностью подложки, на температуру сварного шва и реакцию терморегулятора на нее. Было выявлено сильное влияние рассеивания тепла, вызванного геометрическими особенностями и окружающей средой, на конечное качество сварного шва. При этом определялась скорость охлаждения сварного шва, исследовалась структура сварного шва по макрофотографии и проводились испытания на растяжение.

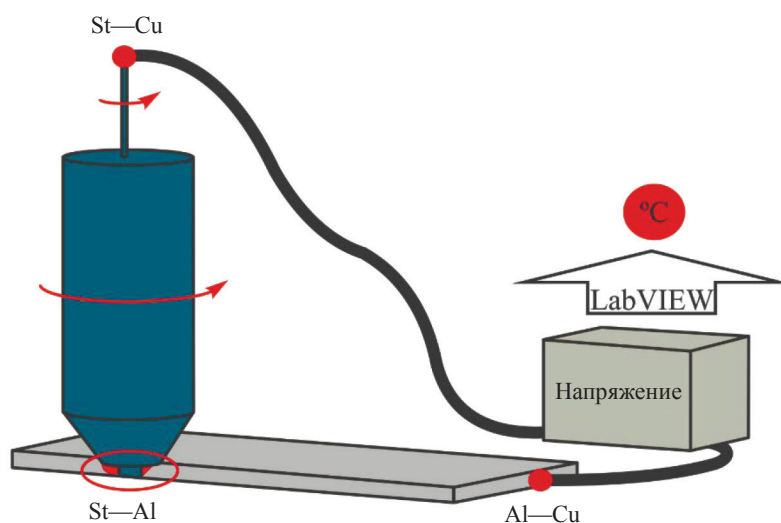


Рис. 1. Схема контроля температуры методом контактной пары инструмент—деталь [28].

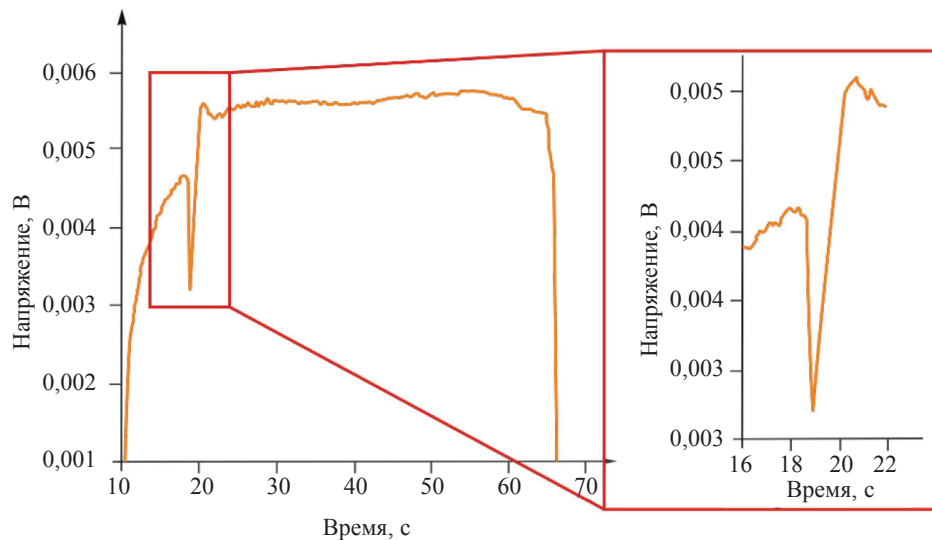


Рис. 2. Изменение термоЭДС в процессе сварки [28].

Изменение термоЭДС контактной пары инструмент—деталь показано на рис. 2 [29]. На характеристике наблюдается уменьшение термоЭДС в момент времени 19 с. Это происходит из-за контакта плеча сварочного инструмента с образцом.

Температура образца уменьшается за счет теплоотдачи сварочному инструменту и соответственно уменьшается термоЭДС. Затем температура плеча увеличивается и увеличивается термоЭДС. Авторы предложили использовать эту характеристику для управления инструментом. При обнаружении плечевого контакта происходит наклон инструмента, а затем ожидается достижение заданной температуры, предварительно выбранной оператором, и начинается сварка. Время ожидания зависит от заданных параметров погружения и выбранной температуры. На рис. 3 показаны стадии сварки трением с перемешиванием с управлением по температуре [29].

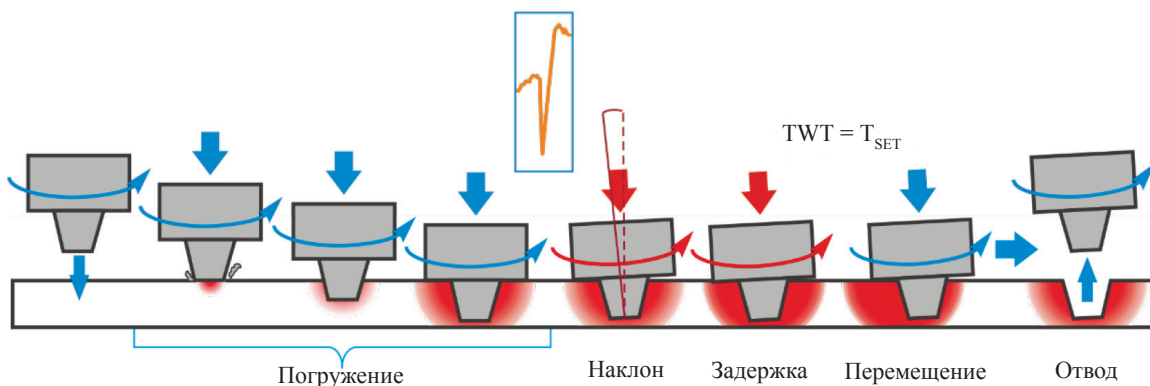


Рис. 3. Стадии сварки трением с перемешиванием с управлением по температуре (красные стрелки обозначают модернизацию терморегулятора) [28].

В последние двадцать лет интенсивно стало развиваться направление по контролю режимов работы режущего инструмента при токарной обработке металлических изделий стружкообразующим способом. Такой контроль позволяет существенно повысить стабильность и качество обработки, а также экономическую эффективность производства. Для этого необходим мониторинг температурного режима контактной пары режущий инструмент—заготовка. Было предложено использовать сигнал термоЭДС в естественной термопаре инструмент—заготовка [33, 34]. Термопара образована обрабатываемым материалом, обозначенным «а», и материалом, из которо-

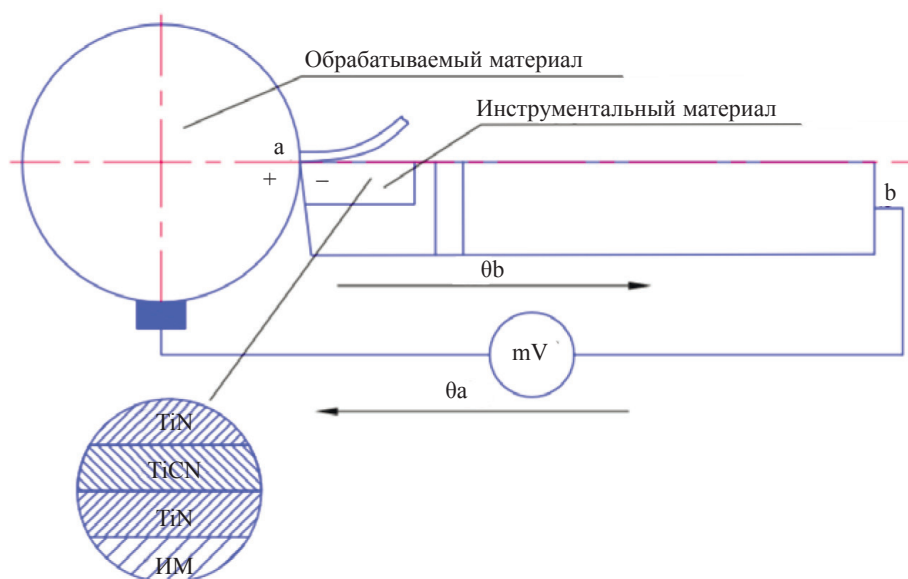


Рис. 4. Электрическая цепь естественной термопары режущий инструмент—заготовка [34].

го изготовлен инструмент, обозначенным «b» (рис. 4). Спаи полученной термопары находятся при температурах θ_a и θ_b .

Авторы выявили влияние слоев покрытия режущего инструмента на результирующую термоЭДС, что связано с неодинаковой температурой разных слоев покрытия, а также из-за образования модифицированного многокомпонентного слоя на режущих поверхностях с измененным химическим составом и физико-механическими свойствами. Исследователи получили закономерности процесса изнашивания твердосплавного инструмента с покрытием, что позволяет определить период стойкости режущего инструмента с покрытием, либо скорость резания в соответствии с заданными технологическими условиями точения и на этой основе управлять процессом механической обработки [35—37].

Дальнейшие исследования выявили значительные несоответствия расчетных и фактических значений скорости резания углеродистой, конструкционной и коррозионностойкой стали. Это связано с некоторым разбросом теплофизических свойств, как заготовок, так и режущего инструмента и использованием в расчетных моделях средних значений этих свойств из всего допустимого диапазона вариаций. Авторы предложили использовать некоторые режимы резания для предварительного испытательного пробега с целью получения информации о теплофизических свойствах контактной пары режущий инструмент—заготовка, и на основе полученных данных управлять процессом механической обработки [38].

Влияние переходного сопротивления в существующих конструкциях подвижных токосъемников было исследовано в работе [39]. Авторы предложили использовать устройство стационарной токосъемной связи, что привело к уменьшению погрешность измерения сигнала термоЭДС и одновременно повысило его достоверность. Влияние неоднородности свойств клеммной пары было исследовано в работе [40]. Было выявлено снижение стабильности и качества обработки при флуктуации свойств контактной пары. Существование допусков на содержание химических элементов в стали обусловлено сложностью управления металлургическими процессами. Для определения оптимального режима резания было предложено использовать сигнал термоЭДС пары инструмент—заготовка, полученный на строго определенных режимах калибровочного резания. Полученные данные при калибровочной резке авторы предложили использовать для определения текущих свойств контактной пары. Авторы также установили влияние состояния противоизносного покрытия реза на сигнал термоЭДС.

ИЗМЕРЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ТЕРМОЭДС

Кроме приборов непосредственного измерения термоЭДС используются приборы для измерения дифференциальной термоЭДС. Наибольшую популярность получил прибор «ТЕРМОТЕСТ»

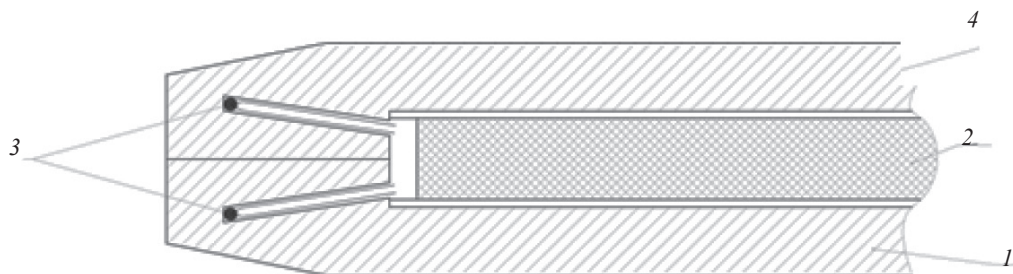


Рис. 5. Конструкция датчика:

1 — первый горячий электрод; 2 — нагревательный элемент; 3 — термопары; 4 — второй горячий электрод.

различных модификаций [41—44]. Отличительной особенностью этого термоэлектрического прибора является использование дифференциального датчика с общей системой нагрева и стабилизацией температуры двух нагреваемых электродов. Оригинальная конструкция датчика с двумя горячими электродами разработана авторами и приведена на рис. 5.

Фотография прибора с датчиком показана на рис. 6. Прибор имеет связь с ПК для визуализации поступающих данных. Еще одной отличительной особенностью является встроенная система мониторинга контактного сопротивления.

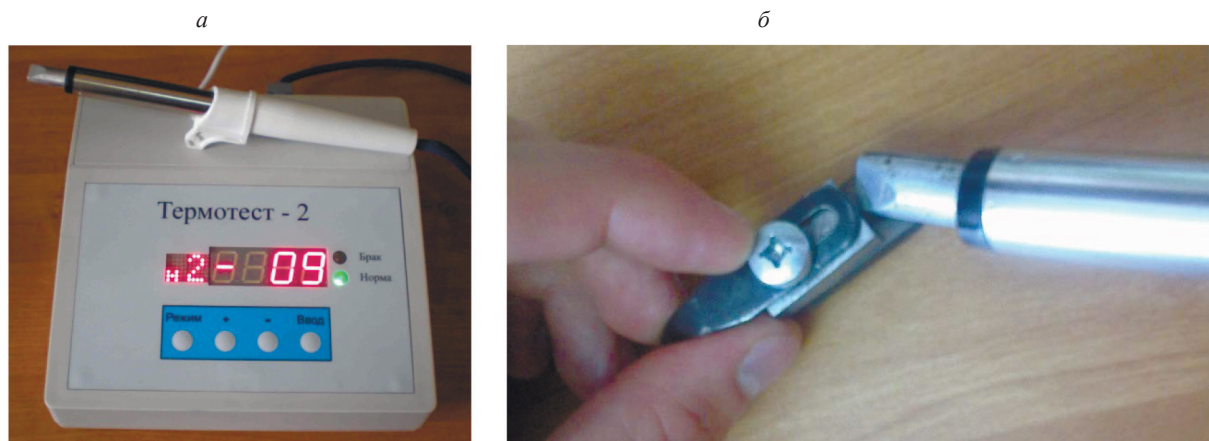


Рис. 6. Прибор термоэлектрического контроля с дифференциальным датчиком «ТЕРМОТЕСТ»:
а — блок электроники; б — дифференциальный датчик с эталоном и тестируемым образцом.

Поступающие данные отображаются на экране монитора в виде графиков, каждый в своем окне. Пример программного интерфейса приведен на рис. 7.

В верхнем окне отображаются данные, поступающие в персональный компьютер после включения прибора. Данные о величине термоЭДС закодированы зеленым цветом, а данные о величине контактного сопротивления — красным цветом. При разомкнутой измерительной цепи (отсутствие контакта горячего электрода с тестируемым объектом) контактное сопротивление велико, красная линия отображается на уровне 44 единиц, что соответствует переполнению аналого-цифрового преобразователя. При замыкании измерительной цепи контактное сопротивление между горячим и холодным электродами уменьшается до нуля. Это произошло в момент времени 6,3 с (630 по шкале абсцисс). При этом значение термоЭДС составило -12 мкВ. Через 2,3 с процесс измерения термоЭДС завершен (момент времени 860 по шкале абсцисс), измерительная цепь разомкнулась и контактное сопротивление вернулось к первоначальному значению 44, а термоЭДС стала равна нулю.

В нижнем окне отображаются данные о температуре горячего электрода (красная линия) и термоЭДС (зеленая линия) только при замкнутой измерительной цепи, т.е. в интервале времени

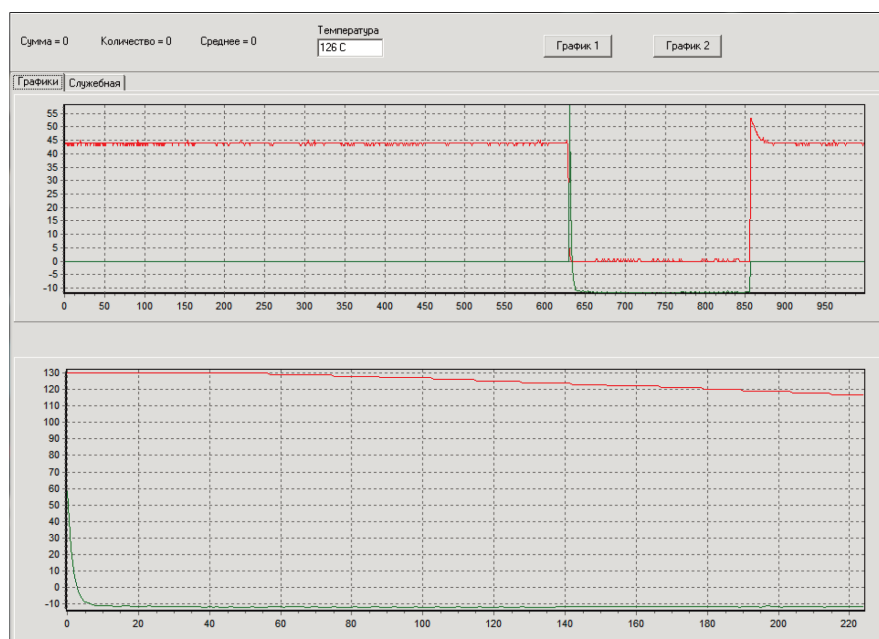


Рис. 7. Программный интерфейс.

от 6,3 до 8,6 с. На графике хорошо видно уменьшение температуры горячего электрода со 130 град до 116 за счет передачи тепла объекту контроля.

КОНТРОЛЬ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Кроме традиционной разбраковки металлов и сплавов термоэлектрический метод применяется для контроля пластически деформированных металлов и сплавов [4, 13, 45, 46]. В работе [45] была исследована термоэлектрическая зависимость нержавеющей стали марки X5CrNi1810 от величины пластической деформации. На рис. 8 показаны зависимости термоЭДС от температуры горячего электрода для различной величины пластической деформации.

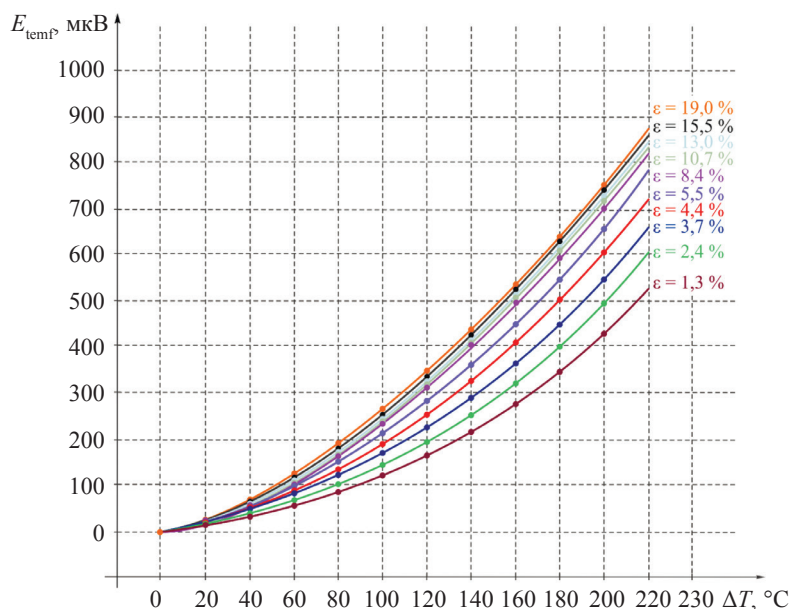


Рис. 8. Зависимость термоЭДС от температуры горячего электрода из меди для различной степени пластической деформации (ϵ) стальной проволоки диаметром $\approx 2,8$ мм, изготовленной из нержавеющей стали X5CrNi1810 [45].

Из рис. 8 можно сделать вывод о увеличении термоЭДС при увеличении температуры горячего электрода. Кроме того, по мере увеличения степени деформации также наблюдается увеличение термоЭДС. Используя данные, представленные на рис. 8, была получена зависимость термоЭДС от степени пластической деформации.

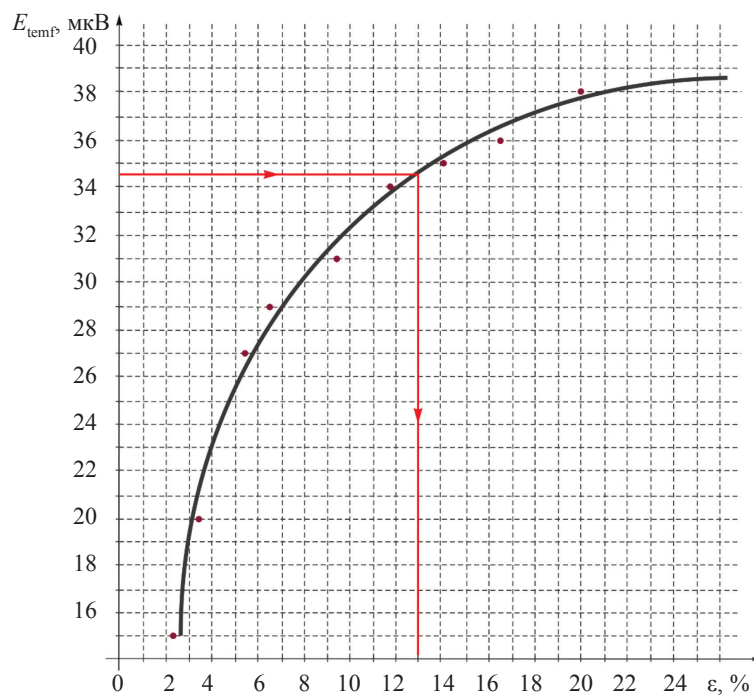


Рис. 9. Зависимость термоЭДС от относительной деформации (ϵ) при температуре 40 °С для проволоки диаметром $\approx 2,8$ мм из стали X5CrNi1810 [45].

Основываясь на полученной зависимости, авторы показали, что при величине термоЭДС 34,5 мВ относительная деформация образца, изготовленного из нержавеющей стали X5CrNi1810, составит 11,9 %.

Схожие результаты получены в работах [4, 13, 46]. Авторы исследовали зависимость термоЭДС от степени пластической деформации сталей ST3, 08KP AND 12H18N10T. Была получена зависимость термоЭДС от относительной степени удлинения тестируемых образцов из сталей ST3, 08KP AND 12H18N10T.

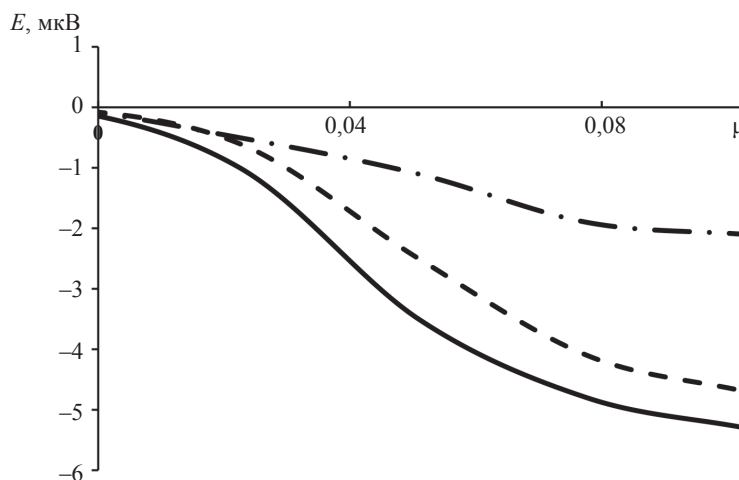


Рис. 10. Зависимость дифференциальной термоЭДС от величины деформации: сплошная линия — ST3; штриховая линия — 08KP; штрихпунктирная линия — 12H18N10T.

Из рис. 10 видно, что при небольших значениях относительного удлинения образцов $\mu < 0,02$, что соответствует области упругой деформации, изменение термоЭДС незначительно. С увеличением относительного удлинения $\mu > 0,02$, что соответствует области пластической деформации, изменение термоЭДС увеличивается. Максимальное изменение термоЭДС наблюдается при максимальном значении деформации перед разрушением образца.

КОНТРОЛЬ ТЕПЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Термоэлектрический метод был применен и для контроля теплового сопротивления системы радиатор охлаждения—корпус силового полупроводникового элемента [47—51]. Такая система широко применяется в радиоэлектронной аппаратуре для обеспечения требуемого теплового режима работы силового полупроводникового прибора. Для улучшения теплового контакта корпуса силового полупроводникового прибора с радиатором охлаждения используют теплопроводящую пасту (термоинтерфейс). Дефекты, появившиеся после нанесения теплопроводящей пасты на радиатор охлаждения, могут привести к нарушению теплового режима работы силового полупроводникового прибора и выходу его из строя. В настоящее время контроль теплового сопротивления термоинтерфейса после его нанесения на теплоотводящую поверхность осуществляется вручную либо косвенными методами. До сих пор не существовало способа контроля теплового сопротивления системы радиатор охлаждения—корпус силового полупроводникового элемента в собранном состоянии.

Авторами предложен способ термоэлектрического контроля теплового сопротивления системы радиатор охлаждения—корпус силового полупроводникового элемента в собранном состоянии, основанный на зависимости термоЭДС от характера распределения теплопроводящей пасты между двумя металлическими поверхностями [47].

Исследования распространения теплового потока в исследуемом объекте во времени авторы провели на модели, состоящей из двух цилиндров радиусом R и высотой L_1 и L_2 , соединенных между собой (рис. 11а). При моделировании нижний цилиндр от точки A до точки D нагревается мгновенно до 100°C . Часть нижнего цилиндра от точки D до точки B_1 и верхний цилиндр находятся при комнатной температуре. Тепловой поток распространяется вверх по нижнему цилиндру до точки B_1 и через термоинтерфейс (расстояние между точками B_1 и B_2) поступает в точку B_2 , нагревая верхний цилиндр. При моделировании считалось, что контакт между цилиндрами идеальный, коэффициенты теплопроводности веществ не зависят от температуры и являются постоянными, тепловое сопротивление в зоне контакта двух цилиндров полностью описывается эффективным тепловым сопротивлением контактного слоя. Температурно-временной срез, полученный на модели показан на рис. 11б. На этом графике хорошо виден перепад температур между нижним и верхним цилиндрами (расстояние $0,18\text{ м}$). Разность температур между нижним и верхним цилиндром будет зависеть от теплового сопротивления между ними, следовательно, и термоЭДС будет также зависеть от теплового сопротивления.

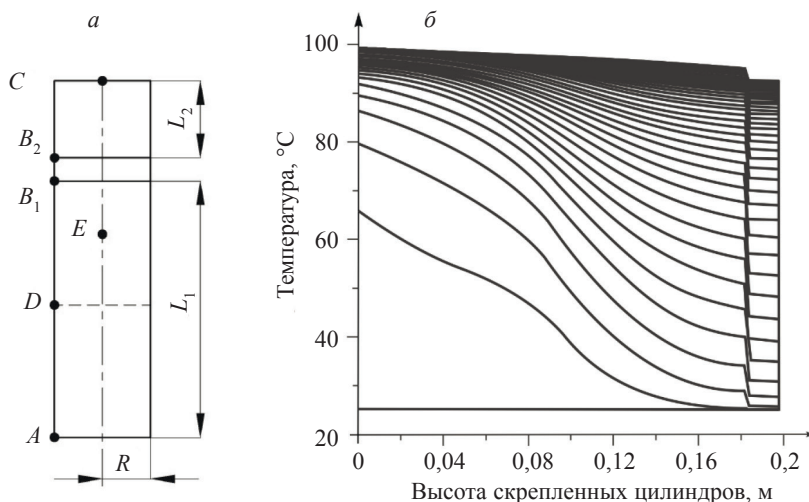


Рис. 11. Схематическое изображение объекта исследования (а) и температурно-временной срез распределения тепла в цилиндре (б).

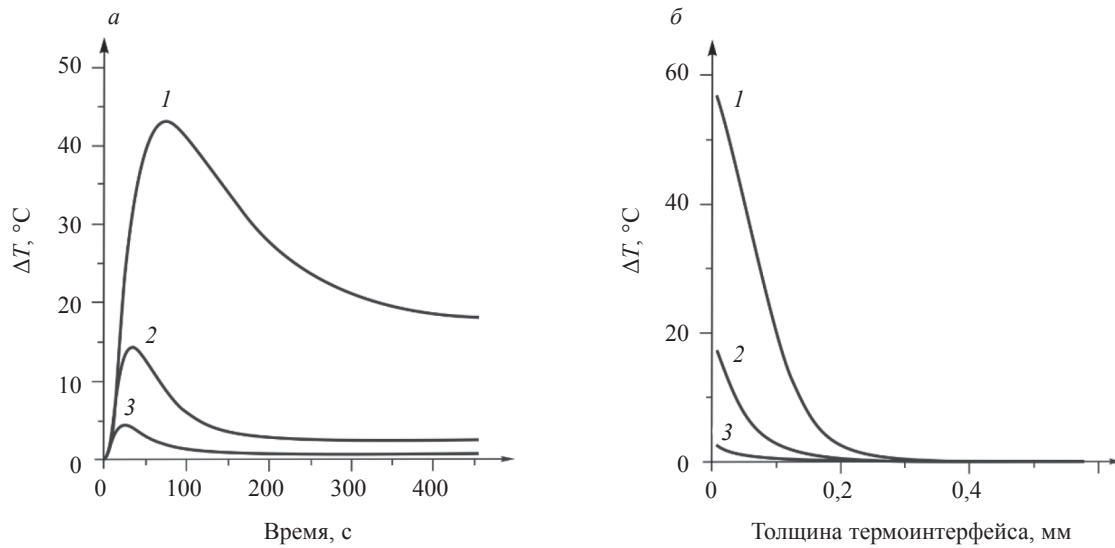


Рис. 12. Зависимость разницы температур от времени (а) и толщины термопасты (б): 1 — удельная теплопроводность термопасты в 10 раз больше номинальной; 2 — номинальная удельная теплопроводность; 3 — удельная теплопроводность термопасты в 10 раз меньше номинальной.

При изменении удельной теплопроводности термоинтерфейса и его толщины изменяется время установления переходного процесса и максимальная температура (рис. 12).

Результаты моделирования влияния толщины термоинтерфейса на термоЭДС приведены на рис. 13. При моделировании коэффициент Зеебека был взят 3,2 мкВ/К, что соответствует сплаву АМг6, наиболее распространенному для изготовления радиаторов охлаждения.

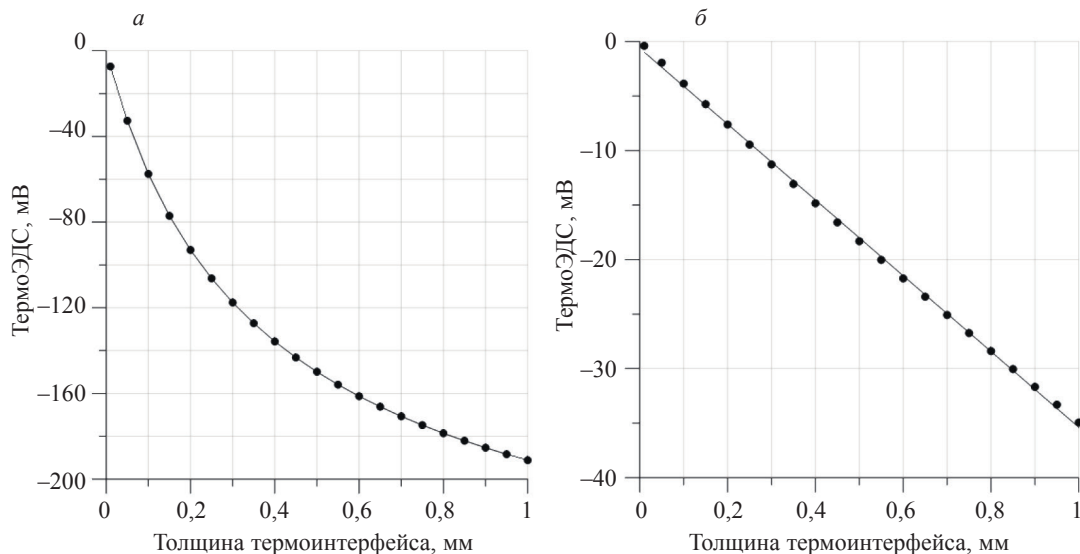


Рис. 13. Зависимость термоЭДС от толщины слоя термоинтерфейса: а — переходной режим; б — установившийся режим.

Как видно из рис. 13, изменение термоЭДС в переходном режиме более чем в 5 раз превосходит изменение термоЭДС в установившемся режиме. Однако зависимость термоЭДС от толщины термоинтерфейса в переходном режиме носит нелинейный характер, а в установившемся — линейный, что делает этот режим более предпочтительным для контроля теплового сопротивления. Экспериментальные исследования подтвердили правильность теоретических исследований. В

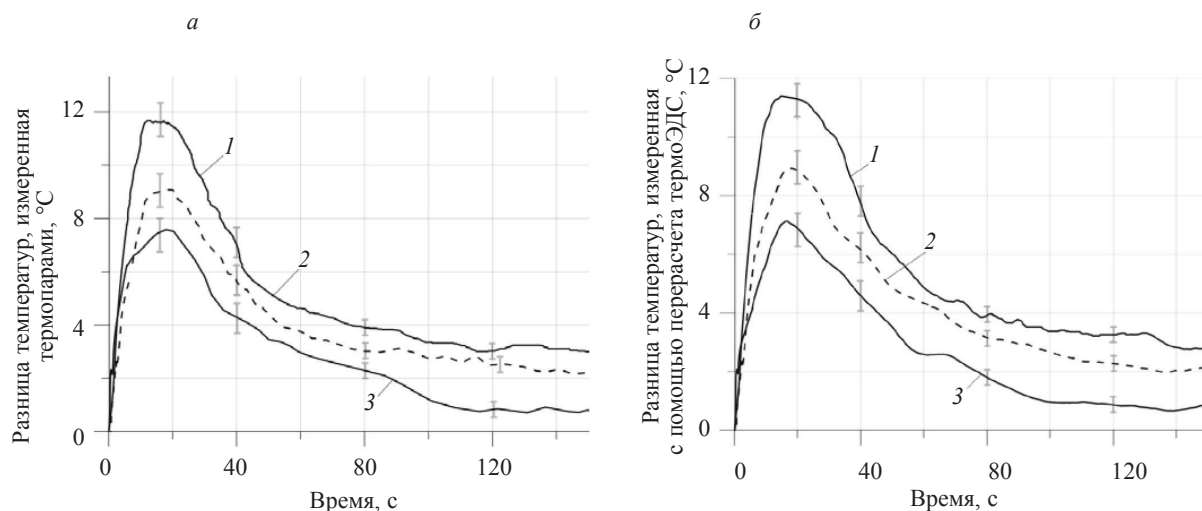


Рис. 14. Зависимость разницы температур корпуса силового прибора и радиатора охлаждения от времени, полученные с помощью термопар (а) и с помощью пересчета термоЭДС (б): 1 — без термоинтерфейса; 2 — с частично нанесенным термоинтерфейсом (50 %); 3 — с нанесенным термоинтерфейсом.

эксперименте измерялась термоЭДС между алюминиевым радиатором охлаждения в форме цилиндра и закрепленным на нем корпусом ТО-220 силового прибора с термоинтерфейсом в промежуточном слое между ними. Материал корпуса — медь, материал покрытия корпуса — олово. Зависимости разницы температур корпуса силового прибора и радиатора, полученные с помощью термопар и с помощью пересчета термоЭДС приведены на рис. 14.

Результаты экспериментальных исследований зависимости термоЭДС от площади покрытия корпуса силового элемента термоинтерфейсом приведены на рис. 15. Авторы выявили практически линейную зависимость.

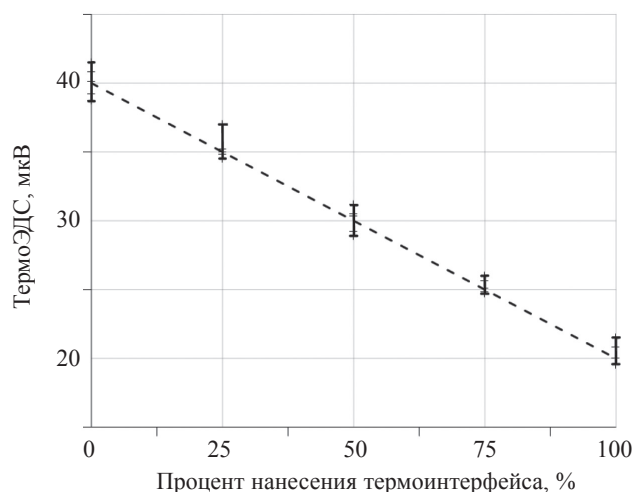


Рис. 15. Зависимость термоЭДС от относительной площади покрытия корпуса силового элемента термоинтерфейсом.

Результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод о перспективности использования термоэлектрического метода для контроля теплофизических характеристик термоинтерфейса в промежуточном слое между корпусом силового элемента и радиатором охлаждения. Следует заметить, что термоэлектрический метод контроля можно использовать непосредственно в процессе эксплуатации электронного оборудования.

МОНИТОРИНГ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В СЕТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Термоэлектрический метод можно успешно применить для мониторинга переходного сопротивления контактов в сети электроснабжения без отключения потребителей в режиме реального времени. Из-за неисправностей в электропроводке часто возникают пожары, которые приводят как к материальным потерям, так и человеческим жертвам [52, 53]. Одной из причин возникновения пожара является большое переходное сопротивление (БПС) контактов, которое возникает в местах плохих контактов [54—56]. Наличие контактного сопротивления отмечается многими исследователями, в том числе предлагаются различные методы его уменьшения [57—59]. Обнаруживают БПС обычно уже тогда, когда оно стало причиной отказа. При протекании тока через переходное сопротивление контакта его температура повышается и может достичь значения близкого к температуре плавления изоляции и последующему возгоранию. Например, температура самовоспламенения полиэтиленовой изоляции составляет 350 °С. Изоляция из ПВХ обугливается при длительном воздействии температурой до 110 °С [60].

Контактное соединение в сети электроснабжения, состоящие из двух разнородных проводников, представляет собой термопару. При протекании тока через соединение с большим переходным сопротивлением оно нагревается. Величина нагрева зависит от величины контактного сопротивления и силы тока, а величина термоЭДС будет определяться разностью температур холодного и горячего спаев и коэффициентами Зеебека материала соединителя и проводника.

Для исследования температуры нагрева контактного соединения была разработана модель, учитывающая параметры контактного соединения, свойства материалов контактирующих проводов и силу тока через контактное соединение. По результатам моделирования получены зависимости изменения температуры контактной пары от времени, при различных значениях массы при сопротивлении равном (рис. 16). Параметры контактной пары: масса контакта — 1, 2 и 3 г; переходное сопротивление контакта — 0,1 Ом; ток через контакт — 10 А; удельная теплоемкость меди $\alpha = 385 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

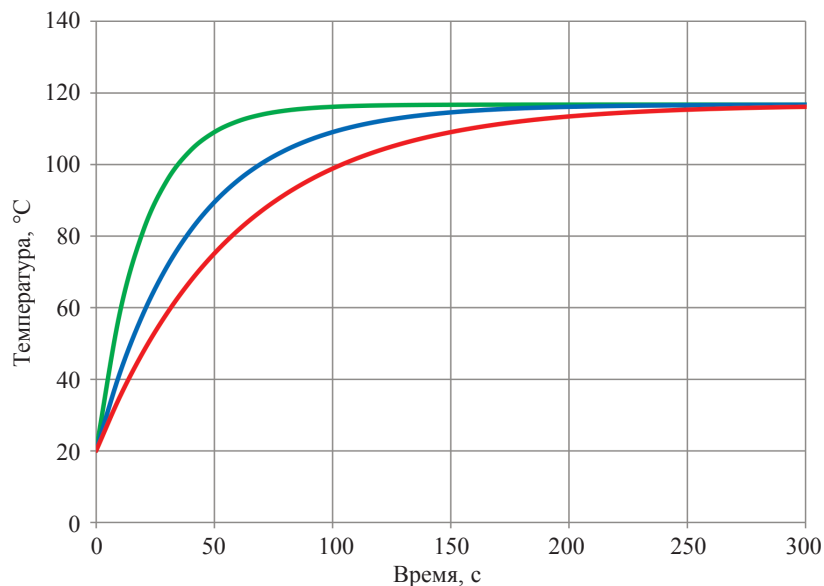


Рис. 16. Зависимость температуры контактной пары от времени, при различных значениях массы при сопротивлении равном 0,1 Ом: — 1 г, 0,2 пикс. — 2 г, — 3 г.

Как видно из рис. 16, температура контактной пары увеличивается при протекании тока, следовательно, будет изменяться термоЭДС, которую можно детектировать.

Экспериментальное подтверждение результатов моделирования было проведено на установке, состоящей из развязывающего трансформатора, к вторичной обмотке которого была подключена нагрузка через контактное соединение пары: алюминий—медь. Коэффициент Зеебека этой пары по разным источникам составляет (3,6...4,5) мкВ/град [47, 48]. Результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 17. Доверительный интервал не превышает 8 %.

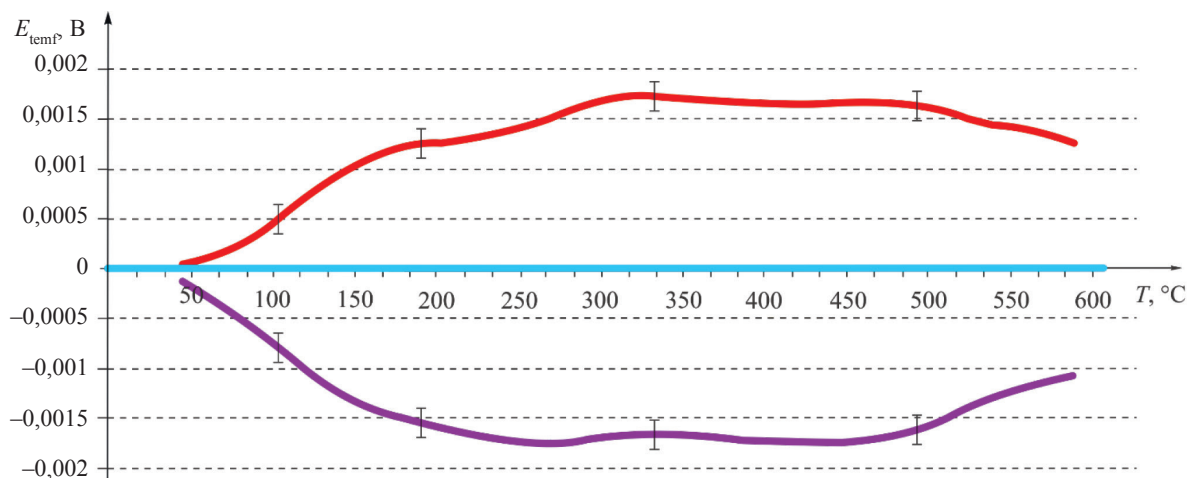


Рис. 17. Динамика изменения термоЭДС на контактном соединении алюминий—медь при нагреве (среднее значение по 10 измерениям).

Из рис. 17 видно, что величина термоЭДС при 300 °C составила 1,7 мВ. Расчетное значение составляет 1,42 мВ. Отличие обусловлено возможным наличием примесей в используемых материалах контактного соединения медь—алюминий и соответственно другим коэффициентом Зеебека. Флуктуации термоЭДС обусловлены нестабильностью температуры холодного спая, которая не стабилизировалась. Измерение термоЭДС проводилось мультиметром Rigol DM3068. Изменение полярности включения термопары, которая образована контактным соединением двух проводников: медь—алюминий, привело к смене полярности термоЭДС. Можно сделать вывод, что появление постоянной составляющей в цепи переменного тока обусловлено только наличием термоЭДС нагретого контактного соединения (термопары) медь—алюминий.

КОНТРОЛЬ СТЕПЕНИ НАВОДОРАЖИВАНИЯ МЕТАЛЛОВ

Еще одно направление использования термоЭДС — это контроль степени наводороживания титанового сплава [61, 62]. При увеличении концентрации водорода увеличивается термоЭДС. Как можно видеть из рис. 18, исходное значение термоЭДС составило 0,14 мВ (кривая 4), после наводороживания термоЭДС увеличилась до 0,185 мВ (кривая 1). Было установлено, что значение максимума величины термоЭДС постепенно уменьшается с течением времени и составило 0,175 мВ через 30 ч после наводороживания и 0,17 мВ через 75 ч.

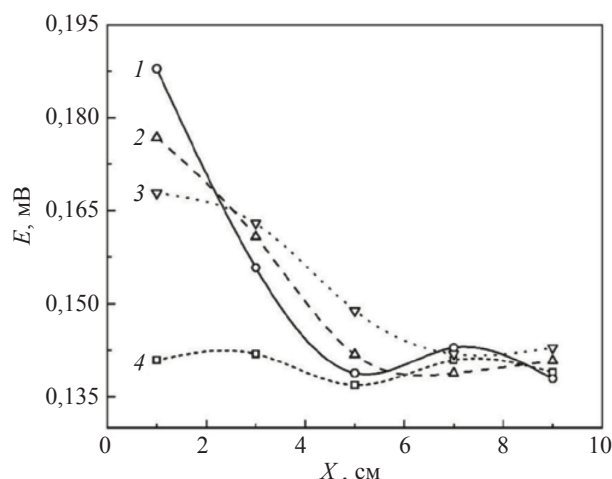


Рис. 18. Зависимость величины термоЭДС от координаты положения зонда: 1 — после наводороживания через 5 ч; 2 — 30 ч; 3 — 75 ч; 4 — до наводороживания. Температура зонда равна 62 °C [61].

Из рис. 18 видно, что термоЭДС уменьшается во времени. Так, через 5 ч после наводораживания термоЭДС в координате «1» составила 187 мВ, через 30 ч — уменьшилась до 175 мВ и через 75 ч — уменьшилась до 168 мВ. По этим данным можно судить о миграционных процессах водорода в титановых сплавах и использовать для целей неразрушающего контроля материалов. Кроме того, наблюдается неравномерное распределение термоЭДС по длине образца, что говорит о неравномерном наводораживании исследуемого образца.

МЕДИЦИНСКАЯ ДИАГНОСТИКА

Применение термоэлектрического метода не ограничивается областью промышленности. Развитие технологии Lab-on-a-chip привело к возможности использования термоэлектрических датчиков в медицине. Термоэлектрический биосенсор ДНК для безметочного обнаружения последовательностей нуклеиновых кислот был предложен в работе [63]. Области применения ДНК-биосенсора включают обнаружение специфических последовательностей нуклеиновых кислот для идентификации генов и обнаружения патогенов.

На основе измерения тепла, выделяющегося во время реакции гибридизации ДНК, термоэлектрическим сенсором авторы продемонстрировали возможность обнаружения последовательностей нуклеиновых кислот. Термоэлемент прикрепляли к внешней поверхности нижней стенки канала и измеряли динамическое изменение температуры, вызванное реакцией. Термоэлектрический сенсор состоит из 60 последовательно соединенных термопар, изготовленных из соединения сурьма—висмут (Sb/Bi). Такая конструкция сенсора позволяет измерять изменения температуры порядка 10^{-4} К без контроля температуры окружающей среды. Описанное авторами термоэлектрическое лабораторное устройство на чипе позволяло точно определять комплементарные и некомплементарные последовательности ДНК.

Для определения состояния пульпы широко используется реакция зуба на температурное воздействие, которое может быть как выше ($51 \pm 2^\circ\text{C}$), так и ниже ($19 \pm 2^\circ\text{C}$) температуры тела человека. Адекватная реакция (если нагревание и охлаждение вызывают соответствующее ощущение) свидетельствует о нормальном состоянии пульпы. При воспалительных процессах в пульпе ответная реакция в виде продолжительных интенсивных или ноющих болей возникает при температуре выше и ниже тела человека на $5\text{—}7^\circ\text{C}$. Зубы с некротизированной пульпой на температурные раздражители не реагируют. В работах [64, 65] авторы предложили использовать термоэлектрический метод для температурной диагностики состояния зубов человека.

Термоэлектрический метод также применяется для диагностики воспалительных процессов в организме человека [66—69]. В основе прибора заложен принцип одновременного измерения температуры и плотности тепловых потоков поверхности тела человека. Конструкция датчика показана на рис. 19 [64]. Для исключения влияния температуры окружающей среды на показа-

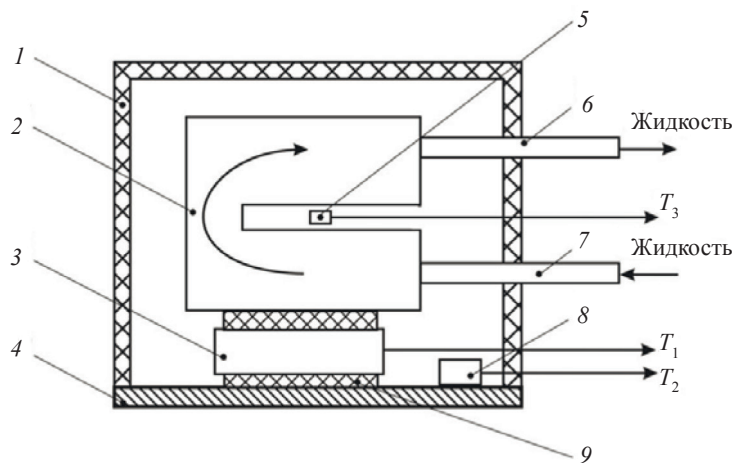


Рис. 19. Конструкция термоэлектрического датчика температуры и теплового потока:

1 — эбонитовая изоляционная оболочка; 2 — медный жидкостный радиатор ($15 \times 15 \times 6$ мм); 3 — термоэлектрический сенсор ($10 \times 10 \times 2,4$ мм); 4 — медное основание датчика (толщина 0,3 мм); 5 — датчик температуры медного радиатора T_3 ; 6, 7 — впускной и выпускной патрубки ($\varnothing 4$ мм); 8 — датчик температуры медной основы T_2 ; 9 — слой теплопроводящей пасты [64].

ния прибора поверхность датчика термостатируется. Для этого значения показаний датчика температуры δ сравниваются с показаниями заданной (опорной) температуры. Сигнал рассогласования управляет величиной и направлением тока электронного переключателя элемента Пельтье таким образом, чтобы стабилизировать температуру жидкости с точностью $\pm 0,01^\circ\text{C}$. Жидкость протекает через медный радиатор 2, и ее температура также стабилизируется с точностью $\pm 0,01^\circ\text{C}$ в течение всего периода работы термостата. При такой температурной стабильности тепловой поток также будет стабильным и будет определяться только величиной теплового потока от исследуемого объекта.

Для отображения результатов диагностики используется монитор персонального компьютера, данные в который поступают в режиме реального времени, что имеет жизненно важное значение для диагностики воспалительных процессов и различных заболеваний на ранних стадиях.

Последние исследования подтверждают эффективность использования терагерцового диапазона (ТГц) в сфере медицинской диагностики. Поскольку жидкости хорошо поглощают ТГц-излучение, возможно его применение в медицинской диагностике: по количеству жидкости в тканях возможна диагностика онкологических и прочих заболеваний. Само излучение не является ионизирующим. Оно не является абсолютно безопасным для человека, но оно безопаснее рентгеновского исследования. Данный метод превосходит магнитно-резонансную томографию (МРТ), так как благодаря более подходящей глубине проникновения возможно более точное обнаружение кожных новообразований. Для систем визуализации данный подход хорош тем, что использует иную часть спектра, что позволяет получить информацию, дополняющую сведения, полученные при помощи систем на основе микроволн, ультрафиолета, рентгеновского излучения. Кроме того, терагерцовая визуализация имеет преимущество перед более низкочастотными системами в виде большего пространственного разрешения благодаря меньшей длине волны. Для функционирования ТГц-систем требуется источник терагерцового излучения и детектирующее устройство. Несмотря на то, что существует масса материалов, поглощающих терагерцовое излучение, основная проблема заключается в нехватке достаточно точных компактных устройств, обладающих требуемым уровнем быстродействия, и функционирующих при комнатной температуре. Термоэлектрические материалы на основе висмута и сурьмы (Bi—Sb) способны справиться с решением данной проблемы. Сенсоры на основе Bi—Sb имеют высокий коэффициент Зеебека (порядка 100 мкВ/К). Еще одним преимуществом термоэлектрических сенсоров на основе Bi—Sb является возможность их применения при комнатной температуре без необходимости дополнительного охлаждения [70].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Термоэлектрический метод прочно вошел в практику неразрушающего контроля как в России, так и за рубежом. Активно проводятся исследования по улучшению характеристик приборов термоэлектрического контроля. В некоторых приложениях он является единственно возможным методом контроля. В последнее время сфера применения термоэлектрического метода постоянно расширяется. Это связано с бурным развитием электроники и, в частности, вычислительной техники, что позволяет создавать портативные приборы, применять новые методы обработки исходных данных и получать новые качественные результаты, недостижимые ранее. На основе этого сфера применения термоэлектрического метода контроля будет только расширяться.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Carreon H.* Thermoelectric detection of spherical tin inclusions in copper by magnetic sensing // *Journal of Applied Physics*. 2000. V. 88. Is. 11. P. 6495. DOI: 10.1063/1.1322591
2. *Carreon H.* Thermoelectric Nondestructive Evaluation of Residual Stress in Shot-Peened Metals // *Research in Nondestructive Evaluation*. 2002. V. 14. Is. 2. P. 59. DOI: 10.1080/09349840209409705
3. *Nagy P.B.* Non-destructive methods for materials' state awareness monitoring // *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2010. V. 52. Is. 2. P. 61. DOI: 10.1784/insi.2010.52.2.61
4. *Soldatov A.A., Seleznev A.I., Fiks I.I., Soldatov A.I., Kröning Kh.M.* Nondestructive proximate testing of plastic deformations by differential thermal EMF measurements // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2012. V. 48. Is. 3. P. 184—186. DOI: 10.1134/S1061830912030060
5. *Li J.F., Liu W.S., Zhao L.D., Zhou M.* High-performance nanostructured thermoelectric materials // *Npg Asia Mater.* 2010. V. 2. Is. 4. P. 152. DOI: 10.1038/asiamat.2010.138
6. *Kikuchi M.* Dental alloy sorting by the thermoelectric method // *European Journal of Dentistry*. 2010. V. 4. No. 1. P. 66—70.

7. *Cooper R.F.* Sorting mixed metals by the thermoelectric effect // *Physics Education*. 1976. V. 11. Is. 4. P. 290—292. doi.org/10.1088/0031-9120/11/4/004
8. *Stuart C.M.* The Seebeck effect as used for the nondestructive evaluation of metals // *Int. Adv. Nondestruct. Test.* 1983. V. 9.
9. *Stuart C.* Thermoelectric Differences Used for Metal Sorting // *Journal of Testing and Evaluation*. 1987. V. 15. No. 4. P. 224—230. doi.org/10.1520/JTE11013J. ISSN 0090-3973
10. *Dragunov V.K., Goncharov A.L.* New approaches to the rational manufacturing of combined constructions by EBW // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019. V. 681. P. 012010. DOI: 10.1088/1757-899X/681/1/012010
11. *Goncharov A., Sliva A., Kharitonov I., Chulkova A., Terentyev E.* Research of thermoelectric effects and their influence on electron beam in the process of welding of dissimilar steels // *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. February 2020. V. 759 (1). P. 012008. DOI: 10.1088/1757-899X/759/1/012008
12. *Kharitonov I.A., Rodyakina R.V., Goncharov A.L.* Investigation of magnetic properties of various structural classes steels in weak magnetic fields characteristic for generation of thermoelectric currents in electron beam welding // *Solid State Phenomena*. 2020. V. 299. P. 1201—1207.
13. *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 Engineering Materials*. 2016. V. 685. P. 310—314.
14. *Soldatov A.I., Soldatov A.A., Sorokin P.V., Abouellail A.A., Obach I.I., Bortalevich V.Y., Shinyakov Y.A., Sukhorukov M.P.* An experimental setup for studying electric characteristics of thermocouples // *SIBCON 2017 — Proceedings*. 2017. P. 79985342017.
15. *Fulton J.P., Wincheski B., Namkung M.* Automated weld characterization using the thermoelectric method // *Materials Science*. August 1993. ID: 262902.
16. *Carreon H., Medina A.* Nondestructive characterization of the level of plastic deformation by thermoelectric power measurements in cold-rolled Ti-6Al-4V samples // *Materials Science, Nondestructive Testing and Evaluation*. 2007. Corpus ID: 136854526. DOI:10.1080/10589750701546960
17. *Carreon H.* Detection of fretting damage in aerospace materials by thermoelectric means // *Smart Structures, Engineering, Physics*. 16 April 2013. Corpus ID: 123131770. DOI:10.1117/12.2009448
18. *Lakshminarayan B., Carreon H., Nagy P.* Monitoring of the Level of Residual Stress in Surface Treated Specimens by a Noncontacting Thermoelectric Technique // *Materials Science*. 9 April 2003. Corpus ID: 135856050. DOI:10.1063/1.1570311
19. *Carreon H.* Thermoelectric detection of fretting damage in aerospace materials // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2014. V. 11. Corpus ID: 137248032. DOI:10.1134/S1061830914110102
20. *Carreon H.* Evaluation of Thermoelectric Methods for the Detection of Fretting Damage in 7075-T6 and Ti-6Al-4V Alloys // *Materials Science*. 2015. V. 2. Corpus ID: 137547354. DOI: 10.1007/978-3-319-48191-3_53
21. *Hu J., Nagy P.B.* On the Thermoelectric Effect of Interface Imperfections // *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. 1999. V. 188. P. 1487—1494. doi.org/10.1007/978-1-4615-4791-4_191
22. *Goncharov A.L.* Investigation of the thermal electromotive force of steels and alloys of different structural grades in electron beam welding // *Welding International*. 2011. V. 25. Is. 9. P. 703—709.
23. *Goncharov A.L., Chulkova A.V., Rodyakina R.V., Dragunov V.K., Chulkov I.S.* Investigation of thermoelectric temperature dependences for construction materials of various structural classes // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019. V. 681. P. 012017. DOI: 10.1088/1757-899X/681/1/012017
24. *Корндорф С.Ф., Мельник Е.Е.* Термоэлектрический метод диагностики режущего инструмента // *Контроль. Диагностика*. 2003. № 1. С. 44—46.
25. *Magalhães Ana, De Backer Jeroen, Bolmsjö Gunnar.* Thermal Dissipation Effect on Temperature-controlled Friction Stir Welding // *Soldagem & Inspeção*. 2019. V. 24. P. e2428. https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI24.28
26. *Silva Ana C.F., De Backer J., Bolmsjö G.* TWT method for temperature measurement during FSW process / The 4th international conference on scientific and technical advances on friction stir welding & processing — FSWP16” in San Sebastian, Spain, 1-2 October 2015. P. 95—98.
27. *De Backer J., Bolmsjö G., Christiansson A.-K.* Temperature control of robotic friction stir welding using the thermoelectric effect // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014. V. 70. P. 375—383.
28. *Silva Ana C.F., De Backer J., Bolmsjö G.* Cooling rate effect on temperature controlled FSW process / *IIW International Conference High-Strength Materials — Challenges and Applications*, Helsinki, Finland, 2-3 July 2015.
29. *Silva Ana C.F., De Backer J., Bolmsjö G.* Analysis of plunge and dwell parameters of robotic FSW using TWT temperature feedback control // *11th International Symposium on FSW — 11ISFSW*, Cambridge, UK, 17-19 May 2016.
30. *De Backer J., Bolmsjö G.* Thermoelectric method for temperature measurement in friction stir welding // *Science and Technology of Welding and Joining*. 2013. V. 18.

31. *Silva Ana C.F., De Backer J., Bolmsjö G.* Temperature measurements during friction stir welding // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2017. V. 88. P. 2899—2908. DOI 10.1007/s00170-016-9007-4
32. *Beguiristain Aldanondo, Mendizabal Arruti, Zubiria Echeverría.* System for measuring temperatures generated during the friction stir welding process / Patent EP 3 725 451 A1. Application number: 17842322.4. 21.10.2020. Bulletin 2020/43.
33. *Плотников А.Л., Тихонова Ж.С., Еплов П.Е., Павлов А.С.* Физические основы использования величины термоэ.д.с. естественной термопары для оперативной оценки свойств контактных пар «быстрорежущий инструмент — стальная заготовка» // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2017. № 12 (207). С. 79—83.
34. *Плотников А.Л., Кристаль М.Г., Сергеев А.С., Тихонова Ж.С., Уварова Т.В.* Устройство для измерения температуры резца естественной термопарой / Патент на изобретение RU 2650827 C1. 17.04.2018.
35. *Chigirinskiy Y., Tikhonova Z., Kraynev D.* Method for assessing the thermophysical properties of the contact pair «tool — steel workpiece» // Journal of Physics: Conference Series. "Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021, ITMM 2021— Mathematical Modeling and Computational Methods in Problems of Electromagnetism, Electronics and Physics of Welding". 2021. С. 052012.
36. *Tikhonova Z., Kraynev D., Frolov E., Bondarev A., Kozhevnikova A.* The ThermoEMF as a Tool for Increasing the Autonomy of Technological Machines // Communications in Computer and Information Science. 2023. 1909 CCIS. P. 143—154.
37. *Tikhonova Z., Kraynev D., Frolov E.* Thermo-Emf as Method for Testing Properties of Replaceable Contact Pairs // Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2020. P. 1097—1105.
38. *Tikhonova Z., Kraynev D., Frolov E.* Efficiency improvement for assigning of cutting conditions on the basis of the thermo-EMF signal // MATEC Web of Conferences. 2018. V. 224. P. 0106.
39. *Sergeev A.S., Tikhonova Z.S., Uvarova T.V.* Method for measuring thermo-emf of a «tool-workpiece» natural thermocouple in chip forming machining // MATEC Web of Conferences. 2017. P. 01044.
40. *Плотников А.Л., Сергеев А.С., Тихонова Ж.С.* Особенности использования сигнала эдс резания в условиях автоматизированного станочного производства // Научные технологии в машиностроении. 2016. № 6 (60). С. 21—28.
41. *Абоуеллаиль А., Чан Ц., Солдатов А.И., Солдатов А.А., Костина М.А., Борталевич С.И., Солдатов Д.А.* Characterization of the influence of destabilizing factors on test results of thermoelectric inspection // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2022. V. 58. Is. 3. P. 607—616.
42. *Soldatov A.I., Soldatov A.A., Sorokin P.V., Abouellail A.A., Kozhemyak O.A., Loginov E.L., Bortalevich S.I.* Control system for device thermotest / В сб. 2016 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2016 — Proceedings. 2016. P. 7491869.
43. *Сорокин П.В., Солдатов А.А., Солдатов М.А.* Программно-аппаратный комплекс для исследования переходного процесса при экспресс-контроле методом термоэдс // Контроль. Диагностика. 2013. № 13. С. 22—25.
44. *Абуеллаиль А.А., Солдатов Д.А., Солдатов А.А.* Анализ электрических характеристик датчика термоэлектрического дефектоскопа / Сборник материалов Всероссийской научно-методической конференции Современные технологии, экономика и образование. 2019. С. 17—19.
45. *Miličević I., Popović M., Dučić N., Slavković R., Dragičević S., Maričić A.* Experimental Identification of the Degree of Deformation of a Wire Subjected to Bending // Science of Sintering. 2018. V. 50. P. 183—191. DOI: <https://doi.org/10.2298/SOS1802183M>
46. *Soldatov A.I., Soldatov A.A., Sorokin P.V., Abouellail A.A., Kostina M.A.* Thermoelectric method of plastic deformation detection // Materials Science Forum. 2018. V. 938. P. 112—118.
47. *Vasiliev I., Soldatov A., Abouellail A., Soldatov D., Bortalevich S.* Thermoelectric Quality Control of the Application of Heat-Conducting Compound // Studies in Systems, Decision and Control. 2021. V. 351. P. 59—68.
48. *Солдатов А.А., Дементьев А.А., Солдатов А.И., Васильев И.М.* Контроль качества нанесения теплопроводящего компаунда // Дефектоскопия. 2020. № 3. С. 65—71.
49. *Васильев И.М., Дементьев А.А., Солдатов А.А., Солдатов А.И.* Термоэлектрический метод контроля качества нанесения теплопроводящего компаунда // Дефектоскопия. 2020. № 5. С. 28—34.
50. *Солдатов А.И., Солдатов А.А., Васильев И.М., Шульгина Ю.В., Костина М.А., Сорокин П.В.* Способ измерения теплового сопротивления между корпусом полупроводникового прибора и радиатором охлаждения / Патент на изобретение RU 2686859 C1. 06.05.2019.
51. *Vasiliev I.M., Soldatov A.I., Dementiev A.A., Soldatov A.A., Abouellail A.* Automatic device for testing thermal resistance with thermoelectric effect / В сб. Journal of Physics: Conference Series. International Conference "Actual Trends in Radiophysics". 2020. P. 012047.
52. U.S. Fire Statistics. Available at: <https://www.usfa.fema.gov/data/statistics/#causesR/>, free. (Accessed: December 16, 2021).
53. *Чечетина Т.А., Гончаренко В.С., Сибирко В.И., Загуменнова М.В.* Обстановка с пожарами в российской федерации в 2021 году // Пожарная безопасность. 2022. № 1 (106). С. 98—115.

54. *Тутков В.В., Бекбаев А.Б., Сарсенбаев Е.А.* О возможностях мониторинга нестационарных тепловых процессов в контактах силовых электроустановок // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 23. № 1. С. 168—178.
55. *Чалый А.М., Дмитриев В.А., Павлейно М.А., Павлейно О.М.* Нагрев сильноточных электрических контактов ударными токами короткого замыкания // Электронная обработка материалов. 2013. № 49 (5). С. 81—88.
56. *Троицкий О.А., Сташенко В.И., Скворцов О.Б.* Вибрации проводников при пропускании импульсного электрического тока и неразрушающий контроль // Инженерный журнал: наука и инновации. Электронное научно-техническое издание. 2018. № 3. DOI: 10.18698/2308-6033-2018-3-174
57. *Чупрова Л.В., Еришова О.В., Муллина Э.Р.* Химико-технологические аспекты проблемы окисления медных контактов электрооборудования, эксплуатируемого в цехах очистки воды // Молодой ученый. 2013. № 9 (56). С. 77—80.
58. *Apostolakis G., Kazarians M., Bley D.C.* Methodology for assessing the risk from cable fires // Nucl. Saf. 1982. V. 23. Is. 4. ID 5329326.
59. *Delplace M., Vos E.* Electric short circuits help the investigator determine where the fire started // Fire Technology. 1983. V. 19. Is. 3. P. 185—191.
60. *Wang Zhi, Wang Jian.* Comparative thermal decomposition characteristics and fire behaviors of commercial cables // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2020. V. 144. No. 7. P. 1—3. DOI: 10.1007/s10973-020-10051-z
61. *Lider A.M., Larionov V.V., Syrtanov M.S.* Hydrogen concentration measurements at titanium layers by means of thermo-EMF // Key Engineering Materials. 2016. V. 683.
62. *Kudiyarov V.N., Lider A.M., Harchenko S.Y.* Hydrogen accumulation in technically pure titanium alloy at saturation from gas atmosphere // Adv. Mater. Res. 2014. V. 880. P. 68—74.
63. *Nestorova Gergana G., Adapa Bindu S., Koppaarthi Varun L., Guilbeau Eric J.* Lab-on-a-chip thermoelectric DNA biosensor for label-free detection of nucleic acid sequences // Sensors and Actuators B: Chemical. 31 March 2016. V. 225. P. 174—180.
64. *Исмаилов Т.А., Евдюлов О.В., Рагимова Т.А., Меджидов М.Н., Рагимова Т.А.* Термоэлектрическое полупроводниковое устройство для контрастной термоодонтометрии / Патент RU №2 624 804, от 03.07.2017.
65. *Исмаилов Т.А., Аминов Г.И., Юсуфов Ш.А., Меджидов М.Н., Казумов Р.Ш.* Термоэлектрическое устройство для температурной диагностики и электроодонтометрии состояния зубов / Заявка на изобретение РФ RU №2006 106 008, от 11.09.2006.
66. *Anatychuk L.I., Kobylanskyi R.R., Cherkez R.G., Konstantynovych I.A., Hoshovskyi V.I., Tiumentsev V.A.* Thermoelectric device with electronic control unit for diagnostics of inflammatory processes in the human organism // BIOMEDICAL ELECTRONICS, Tekhnologiya i Konstruirovanie v Elektronnoi Apparature. 2017. № 6. P. 44—48. DOI: 10.15222/TKEA2017.6.44
67. *Исмаилов Т.А., Гафуров К.А.* Прецизионное измерение температурных параметров тканей и полостей человеческого организма / Восьмая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика»: Сб. научн. тр. Москва. 2002. Т. 1. С. 228.
68. *Исмаилов Т.А., Гафуров К.А.* Применение термоэлектрических устройств для измерения теплопроводности тканей человеческого организма / Третья Российская национальная конференция по теплообмену: Сб. научн. тр. Москва. 2002. С. 225—227.
69. *Гафуров К.А.* Термоэлектрические цифровые преобразователи для исследования локальных температурных полей человеческого организма / Дисс. ... на соискание ученой степени к.т.н. Махачкала, 2005. 159 с.
70. *Тукмакова А.С., Асач А.В., Макарова Е.С., Тхоржевский И.Л., Демченко П.С., Сединин А.Д., Новотельнова А.В., Каблукова Н.С., Ходзицкий М.К.* Перспективы использования наноразмерных слоев термоэлектриков для детектирования излучения терагерцового диапазона элементов / Материалы VII всероссийской НТК Состояние и перспективы развития термоэлектрического приборостроения. Махачкала, 2020. С. 7—8.

REFERENCES

1. *Carreon H.* Thermoelectric detection of spherical tin inclusions in copper by magnetic sensing // Journal of Applied Physics. 2000. V. 88. Is. 11. P. 6495. DOI: 10.1063/1.1322591
2. *Carreon H.* Thermoelectric Nondestructive Evaluation of Residual Stress in Shot-Peened Metals // Research in Nondestructive Evaluation. 2002. V. 14. Is. 2. P. 59. DOI: 10.1080/09349840209409705
3. *Nagy P.B.* Non-destructive methods for materials' state awareness monitoring // Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring. 2010. V. 52. Is. 2. P. 61. DOI: 10.1784/insi.2010.52.2.61
4. *Soldatov A.A., Seleznev A.I., Fiks I.I., Soldatov A.I., Kröning Kh.M.* Nondestructive proximate testing of plastic deformations by differential thermal EMF measurements // Russian Journal of Nondestructive

Testing. 2012. V. 48. Is. 3. P. 184—186. DOI: 10.1134/S1061830912030060

5. *Li J.F., Liu W.S., Zhao L.D., Zhou M.* High-performance nanostructured thermoelectric materials // *Npg Asia Mater.* 2010. V. 2. Is. 4. P. 152. DOI: 10.1038/asiamat.2010.138

6. *Kikuchi M.* Dental alloy sorting by the thermoelectric method // *European Journal of Dentistry.* 2010. V. 4. No. 1. P. 66—70.

7. *Cooper R.F.* Sorting mixed metals by the thermoelectric effect // *Physics Education.* 1976. V. 11. Is. 4. P. 290—292. doi.org/10.1088/0031-9120/11/4/004

8. *Stuart C.M.* The Seebeck effect as used for the nondestructive evaluation of metals // *Int. Adv. Nondestr. Test.* 1983. V. 9.

9. *Stuart C.* Thermoelectric Differences Used for Metal Sorting // *Journal of Testing and Evaluation.* 1987. V. 15. No. 4. P. 224—230. doi.org/10.1520/JTE11013J. ISSN 0090-3973

10. *Dragunov V.K., Goncharov A.L.* New approaches to the rational manufacturing of combined constructions by EBW // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.* 2019. V. 681. P. 012010. DOI: 10.1088/1757-899X/681/1/012010

11. *Goncharov A., Sliva A., Kharitonov I., Chulkova A., Terentyev E.* Research of thermoelectric effects and their influence on electron beam in the process of welding of dissimilar steels // *IOP Conference Series Materials Science and Engineering.* February 2020. V. 759 (1). P. 012008. DOI: 10.1088/1757-899X/759/1/012008

12. *Kharitonov I.A., Rodyakina R.V., Goncharov A.L.* Investigation of magnetic properties of various structural classes steels in weak magnetic fields characteristic for generation of thermoelectric currents in electron beam welding // *Solid State Phenomena.* 2020. V. 299. P. 1201—1207.

13. *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 Engineering Materials.* 2016. V. 685. P. 310—314.

14. *Soldatov A.I., Soldatov A.A., Sorokin P.V., Abouellail A.A., Obach I.I., Bortalevich V.Y., Shinyakov Y.A., Sukhorukov M.P.* An experimental setup for studying electric characteristics of thermocouples // *SIBCON 2017 — Proceedings.* 2017. P. 79985342017.

15. *Fulton J.P., Wincheski B., Namkung M.* Automated weld characterization using the thermoelectric method // *Materials Science.* August 1993. ID: 262902.

16. *Carreon H., Medina A.* Nondestructive characterization of the level of plastic deformation by thermoelectric power measurements in cold-rolled Ti–6Al–4V samples // *Materials Science, Nondestructive Testing and Evaluation.* 2007. Corpus ID: 136854526. DOI:10.1080/10589750701546960

17. *Carreon H.* Detection of fretting damage in aerospace materials by thermoelectric means // *Smart Structures, Engineering, Physics.* 16 April 2013. Corpus ID: 123131770. DOI:10.1117/12.2009448

18. *Lakshminarayan B., Carreon H., Nagy P.* Monitoring of the Level of Residual Stress in Surface Treated Specimens by a Noncontacting Thermoelectric Technique // *Materials Science.* 9 April 2003. Corpus ID: 135856050, DOI:10.1063/1.1570311

19. *Carreon H.* Thermoelectric detection of fretting damage in aerospace materials // *Russian Journal of Nondestructive Testing.* 2014. V. 11. Corpus ID: 137248032. DOI:10.1134/S1061830914110102

20. *Carreon H.* Evaluation of Thermoelectric Methods for the Detection of Fretting Damage in 7075–T6 and Ti–6Al–4V Alloys // *Materials Science.* 2015. V. 2. Corpus ID: 137547354. DOI: 10.1007/978-3-319-48191-3_53

21. *Hu J., Nagy P.B.* On the Thermoelectric Effect of Interface Imperfections // *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation.* 1999. V. 188. P. 1487—1494. doi.org/10.1007/978-1-4615-4791-4_191

22. *Goncharov A.L.* Investigation of the thermal electromotive force of steels and alloys of different structural grades in electron beam welding // *Welding International.* 2011. V. 25. Is. 9. P. 703—709.

23. *Goncharov A.L., Chulkova A.V., Rodyakina R.V., Dragunov V.K., Chulkov I.S.* Investigation of thermoelectric temperature dependences for construction materials of various structural classes // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.* 2019. V. 681. P. 012017. DOI: 10.1088/1757-899X/681/1/012017

24. *Korndorf S.F., Melnik E.E.* Thermoelectric diagnostic method of cutting tools // *Control. Diagnostics.* 2003. V. 1. P. 44—46.

25. *Magalhães Ana, De Backer Jeroen, Bolmsjö Gunnar.* Thermal Dissipation Effect on Temperature-controlled Friction Stir Welding // *Soldagem & Inspeção.* 2019. V. 24. P. e2428. https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI24.28

26. *Silva Ana C.F., De Backer J., Bolmsjö G.* TWT method for temperature measurement during FSW process // *The 4th international conference on scientific and technical advances on friction stir welding & processing — FSWP16* in San Sebastian, Spain, 1-2 October 2015. P. 95—98

27. *De Backer J., Bolmsjö G., Christiansson A.-K.* Temperature control of robotic friction stir welding using the thermoelectric effect // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 2014. V. 70. P. 375—383.

28. *Silva Ana C.F., De Backer J., Bolmsjö G.* Cooling rate effect on temperature controlled FSW process // *IIV International Conference High-Strength Materials — Challenges and Applications,* Helsinki, Finland, 2-3 July 2015.

29. Silva Ana C.F., De Backer J., Bolmsjö G. Analysis of plunge and dwell parameters of robotic FSW using TWT temperature feedback control // 11th International Symposium on FSW — 11ISFSW, Cambridge, UK, 17-19 May 2016.
30. De Backer J., Bolmsjö G. Thermoelectric method for temperature measurement in friction stir welding // Science and Technology of Welding and Joining. 2013. V. 18.
31. Silva Ana C.F., De Backer J., Bolmsjö G. Temperature measurements during friction stir welding // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2017. V. 88. P. 2899—2908. DOI 10.1007/s00170-016-9007-4
32. Beguiristain Aldanondo, Mendizabal Arruti, Zubiria Echeverria. System for measuring temperatures generated during the friction stir welding process / Patent EP 3 725 451 A1. Application number: 17842322.4. 21.10.2020. Bulletin 2020/43.
33. Plotnikov A.L., Tikhonova Zh.S., Eplov P.E., Pavlov A.S. The physical basis of using the value of a thermoelectric d.s. natural thermocouple for an operational assessment of the properties of contact pairs «high-speed tool - steel billet» // Izvestiya Volgograd State Technical University. 2017. V. 12 (207). P. 79—83.
34. Plotnikov A.L., Kristal M.G., Sergeev A.S., Tikhonova Zh.S., Uvarova T.V. Device for measuring the temperature of a cutter with a natural thermocouple / Patent for invention RU 2650827 C1. 17.04.2018.
35. Chigirinskiy Y., Tikhonova Z., Kraynev D. Method for assessing the thermophysical properties of the contact pair «tool — steel workpiece» // Journal of Physics: Conference Series. "Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021, IITMM 2021— Mathematical Modeling and Computational Methods in Problems of Electromagnetism, Electronics and Physics of Welding". 2021. C. 052012.
36. Tikhonova Z., Kraynev D., Frolov E., Bondarev A., Kozhevnikova A. The ThermoEMF as a Tool for Increasing the Autonomy of Technological Machines // Communications in Computer and Information Science. 2023. 1909 CCIS. C. 143—154.
37. Tikhonova Z., Kraynev D., Frolov E. Thermo-Emf as Method for Testing Properties of Replaceable Contact Pairs // Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2020. C. 1097—1105.
38. Tikhonova Z., Kraynev D., Frolov E. Efficiency improvement for assigning of cutting conditions on the basis of the thermo-EMF signal // MATEC Web of Conferences. 2018. V. 224. P. 0106.
39. Sergeev A.S., Tikhonova Z.S., Uvarova T.V. Method for measuring thermo-emf of a «tool-workpiece» natural thermocouple in chip forming machining // MATEC Web of Conferences. 2017. C. 01044.
40. Plotnikov A.L., Sergeev A.S., Tikhonova J.S. Features of using the EMF cutting signal in conditions of automated machine tool production // High-tech technologies in mechanical engineering. 2016. V. 6 (60). P. 21—28.
41. Abouellail A.A., Chang J., Soldatov A.I., Soldatov A.A., Kostina M.A., Bortalevich S.I., Soldatov D.A. Characterization of the influence of destabilizing factors on test results of thermoelectric inspection // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2022. V. 58. No. 3, P. 607—616.
42. Soldatov A.I., Soldatov A.A., Sorokin P.V., Abouellail A.A., Kozhemyak O.A., Loginov E.L., Bortalevich S.I. Control system for device thermotest / B c6. 2016 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2016 — Proceedings. 2016. P. 7491869.
43. Sorokin P.V., Soldatov A.A., Soldatova M.A. A software and hardware complex for the study of the transient process during express control by the thermopower method // Control. Diagnostics. 2013. V. 13. P. 22—25.
44. Abouellail A.A., Soldatov D.A., Soldatov A.A. Analysis of the electrical characteristics of the thermoelectric flaw detector sensor // Collection of materials of the All-Russian scientific and methodological conference Modern technologies, economics and education. 2019. P. 17—19.
45. Miličević I., Popović M., Dučić N., Slavković R., Dragičević S., Maričić A. Experimental Identification of the Degree of Deformation of a Wire Subjected to Bending // Science of Sintering. 2018. V. 50. P. 183—191. DOI: <https://doi.org/10.2298/SOS1802183M>
46. Soldatov A.I., Soldatov A.A., Sorokin P.V., Abouellail A.A., Kostina M.A. Thermoelectric method of plastic deformation detection // Materials Science Forum. 2018. V. 938. P. 112—118.
47. Vasiliev I., Soldatov A., Abouellail A., Soldatov D., Bortalevich S. Thermoelectric Quality Control of the Application of Heat-Conducting Compound // Studies in Systems, Decision and Control. 2021. V. 351. P. 59—68.
48. Soldatov A.A., Dementiev A.A., Soldatov A.I., Vasiliev I.M. Quality control of the application of a heat-conducting compound // Flaw detection. 2020. V. 3. P. 65—71.
49. Vasiliev I.M., Dementiev A.A., Soldatov A.A., Soldatov A.I. Thermoelectric quality control method for applying a heat-conducting compound // Flaw detection. 2020. V. 5. P. 28—34.
50. Soldatov A.I., Soldatov A.A., Vasiliev I.M., Shulgina Yu.V., Kostina M.A., Sorokin P.V. Method of measuring thermal resistance between the body of a semiconductor device and a cooling radiator / Patent for the invention RU 2686859 C1. 05/06/2019.
51. Vasiliev I.M., Soldatov A.I., Dementiev A.A., Soldatov A.A., Abouellail A. Automatic device for testing thermal resistance with thermoelectric effect / B c6. Journal of Physics: Conference Series. International Conference "Actual Trends in Radiophysics". 2020. P. 012047.

52. U.S. Fire Statistics. Available at: <https://www.usfa.fema.gov/data/statistics/#causesR/>, free. (Accessed: December 16, 2021).
53. *Chechetkina T.A., Goncharenko V.S., Sibirko V.I., Zagumennova M.V.* The situation with fires in the Russian Federation in 2021 // *Fire safety*. 2022. V. 1 (106). P. 98—115.
54. *Titkov V.V., Bekbaev A.B., Sarsenbaev E.A.* On the possibilities of monitoring non-stationary thermal processes in the contacts of power electrical installations // *Scientific and Technical Bulletin of SPbPU. Natural and engineering sciences*. 2017. V. 23. No. 1. P. 168—178.
55. *Chaly A.M., Dmitriev V.A., Pavlenko M.A., Pavleino O.M.* Heating of high-current electrical contacts by short-circuit shock currents // *Electronic processing of materials*. 2013. No. 49 (5). P. 81—88.
56. *Troitskiy O.A., Stashenko V.I., Skvortsov O.B.* Vibrations of conductors during transmission of pulsed electric current and non-destructive testing // *Engineering Journal: Science and Innovation. Electronic scientific and technical publication*. 2018. No. 3. DOI: 10.18698/2308-6033-2018-3-174
57. *Chuprova L.V., Ershova O.V., Mullina E.R.* Chemical and technological aspects of the problem of oxidation of copper contacts of electrical equipment operated in water purification workshops // *Young Scientist*. 2013. No. 9 (56). P. 77—80.
58. *Apostolakis G., Kazarians M., Bley D.C.* Methodology for assessing the risk from cable fires // *Nucl. Saf.* 1982. V. 23. Is. 4. ID 5329326.
59. *Delplace M., Vos E.* Electric short circuits help the investigator determine where the fire started // *Fire Technology*. 1983. V. 19. Is. 3. P. 185—191.
60. *Wang Zhi, Wang Jian.* Comparative thermal decomposition characteristics and fire behaviors of commercial cables // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020. V. 144. No. 7. P. 1—3. DOI: 10.1007/s10973-020-10051-z
61. *Lider A.M., Larionov V.V., Syrtanov M.S.* Hydrogen concentration measurements at titanium layers by means of thermo-EMF // *Key Engineering Materials*. 2016. V. 683.
62. *Kudiyarov V.N., Lider A.M., Harchenko S.Y.* Hydrogen accumulation in technically pure titanium alloy at saturation from gas atmosphere // *Adv. Mater. Res.* 2014. V. 880. P. 68—74.
63. *Nestorova Gergana G., Adapa Bindu S., Koppa Parthy Varun L., Guilbeau Eric J.* Lab-on-a-chip thermoelectric DNA biosensor for label-free detection of nucleic acid sequences // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 31 March 2016. V. 225. P. 174—180.
64. *Ismailov T.A., Evdulov O.V., Ragimova T.A., Medzhidov M.N., Ragimova T.A.* Thermoelectric semiconductor device for contrast thermodontometry / Patent RU No.2624804, dated 07.03.2017.
65. *Ismailov T.A., Aminov G.I., Yusufov Sh.A., Medzhidov M.N., Kazumov R.S.* Thermoelectric device for temperature diagnostics and electroodontometry of dental condition / Application for invention of the Russian Federation RU No. 2006 106 008, dated 09.11.2006.
66. *Anatychuk L.I., Kobylanskyi R.R., Cherkez R.G., Konstantynovych I.A., Hoshovskyi V.I., Tiumentsev V.A.* Thermoelectric device with electronic control unit for diagnostics of inflammatory processes in the human organism // *BIOMEDICAL ELECTRONICS, Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*. 2017. № 6. P. 44—48. DOI: 10.15222/TKEA2017.6.44
67. *Ismailov T.A., Gafurov K.A.* Precision measurement of temperature parameters of tissues and cavities of the human body // *The eighth International Scientific and technical Conference of students and postgraduates «Radioelectronics, electrical engineering and power engineering» : Collection of scientific tr. Moscow*, 2002. V. 1. P. 228.
68. *Ismailov T.A., Gafurov K.A.* Application of thermoelectric devices for measuring the thermal conductivity of human body tissues // *The Third Russian National Conference on heat exchange: Collection of scientific tr. Moscow*, 2002. P. 225—227.
69. *Gafurov K.A.* Thermoelectric digital converters for the study of local temperature fields of the human body // *Diss. for the degree of Candidate of Technical Sciences. Makhachkala*. 2005. 159 P.
70. *Tukmakova A. S., Asach A.V., Makarova E.S., Tkhorzhevsky I.L., Demchenko P. S., Sedinin A.D., Novotelnova A.V., Kablukova N.S., Khodzitsky M.K.* Prospects of using nanoscale layers of thermoelectrics for detecting radiation of the terahertz range of elements // *Materials of the VII All-Russian Scientific and Technical Committee State and prospects of development thermoelectric instrumentation. Makhachkala*. 2020. P. 7—8.



Уважаемые коллеги!

**Приглашаем Вас на XI Международный промышленный Форум
Территория NDT 2024. Неразрушающий контроль. Испытания. Диагностика**

В 2024 году Форум будет проходить весной, **15—17 апреля!**

Даты проведения Форума меняются, а место остается прежним — ЦВК «Экспоцентр» на Красной Пресне.

В соседних павильонах в эти же даты пройдет выставка **«Нефтегаз — 2024»**.

Традиционно, на Форуме Вам будет подготовлена обширная деловая программа, будут представлены новейшие разработки в области неразрушающего контроля, технической диагностики, мониторинга состояния и оценки ресурса.

По вопросам сотрудничества просим Вас обращаться к Наталии Санковой.

Тел.: +7 (499) 245-56-56, e-mail: sankova@ronktd.ru

Мы создадим для каждого самые комфортные условия и, конечно, будем рады видеть Вас на Форуме!

