



ISSN 0130-3082

Российская Академия наук

Дефектоскопия



Неразрушающий контроль

Техническая диагностика

Анализ материалов

№ 9

2023



ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Журнал ежемесячный
Основан в феврале 1965 года
Екатеринбург

№ 9
2023

СОДЕРЖАНИЕ

Акустические методы

- И.А. Растегаев, А.К. Хрусталева, А.В. Даниук, М.А. Афанасьев, Д.Л. Мерсон, Д.В. Севастьянов, С.В. Мелентьев, А.Д. Плюснин.** Применение метода акустической эмиссии для ранжирования цапф сушильных цилиндров картоно- и бумагоделательных машин по усталостной поврежденности их материала 3
- А.Ю. Марченков, И.Е. Васильев, Д.В. Чернов, Д.А. Жгут, А.А. Панькина, Т.Ю. Ковалева, Е.А. Куликова.** Разработка эмпирической модели расчета степени поврежденности стальных образцов по результатам статистической обработки потока импульсов акустической эмиссии 18
- Е.Г. Базулин.** Повышение качества ЦФА-изображения за счет коррекции «паразитных» задержек между элементами антенной решетки 27
- В.Г. Шевалдыкин, А.А. Самокрутов.** Особенности распространения боковой поперечной ультразвуковой волны в плоском слое материала 35

Тепловые методы

- С.Е. Черных, В.Н. Костин, Ю.И. Комоликов.** Тепловой контроль корундовых керамических пластин 46

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

- В.В. Малый, А.С. Костюхин, А.В. Федоров, И.Ю. Кинжагулов.** Разработка алгоритма движения измерительного модуля установки автоматизированного неразрушающего контроля сопел ЖРД 55
- О.В. Муравьева, П.Н. Пушин, К.А. Торхов.** Возможности электромагнитно-акустического метода многократной тени при контроле резьбы насосных штанг 58
- В.В. Мирошников, Н.В. Гречишкина.** Электромагнитный сканер структурно неоднородных сред 61
- О.А. Колганов, А.Е. Хошев, Р. А. Егоров, А.В. Фёдоров, Г.Н. Лукьянов, В.В. Коняшов.** Разработка макета датчика для прибора динамического индентирования 64
- Информация 67

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ РАНЖИРОВАНИЯ ЦАПФ СУШИЛЬНЫХ ЦИЛИНДРОВ КАРТОНО- И БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНЫХ МАШИН ПО УСТАЛОСТНОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТИ ИХ МАТЕРИАЛА

© 2023 г. И.А. Растегаев^{1,*}, А.К. Хрусталеv¹, А.В. Даныuk¹, М.А. Афанасьеv¹,
Д.Л. Мерсон¹, Д.В. Севастьянов², С.В. Мелентьеv², А.Д. Плюснин³

¹Тольяттинский государственный университет, Россия 445020 Тольятти, ул. Белорусская, 14

²Филиал АО «Группа «ИЛИМ», Россия 165651 Коряжма, ул. Дыбцына, 42

³ООО «Прикамский картон», Россия 614037 Пермь, ул. Бумажников, 1

E-mail: *RastlgAev@yandex.ru

Поступила в редакцию 16.06.2023; после доработки 18.07.2023

Принята к публикации 21.07.2023

На примере оценки технического состояния цапф сушильных цилиндров картоноделательных машин (КДМ) обсуждается вопрос возможности ранжирования циклически нагруженных элементов динамического оборудования по степени поврежденности их материала усталостными трещинами с применением данных акустико-эмиссионных (АЭ) измерений. В результате специальных лабораторных исследований с варьированием нагрузки в цикле нагружения и смазывания берегов трещины установлены особенности АЭ от трения берегов трещины и пластической деформации в вершине трещины при ее росте в вязком материале. Показано, что при циклическом нагружении материала сигналы АЭ от трения ее берегов обнаруживаются более устойчиво, чем сигналы АЭ от скачка трещины при приращении ее длины, и что отслеживание первых обеспечивает обнаружение усталостной поврежденности материала даже в условиях нагружения, недостаточных для прироста трещин. На основании полученных данных разработаны три признака АЭ наличия усталостной поврежденности материала элементов динамического оборудования при условии циклической активации движения берегов трещины. В результате промышленной апробации разработанных признаков АЭ подтверждена их работоспособность и уточнены их граничные значения на эксплуатирующихся цапфах сушильных цилиндров КДМ, а также предложена методика ранжирования цапф по уровню поврежденности усталостными трещинами. Путем сопоставления результатов измерений АЭ с ультразвуковым контролем оценена достоверность предложенного подхода, которая показала вероятность обнаружения усталостной трещины в цапфах сушильных цилиндров КДМ на уровне 71 %, при вероятности их пропуска и перебраковки изделия 12 и 17 % соответственно. Разработанная методика переносима и на другое массивное динамическое оборудование после уточнения граничных значений признаков АЭ усталостной поврежденности материала на данном типе объекта.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, усталость металла, третинообразование, цапфа сушильных цилиндров, картоноделательная машина, диагностирование.

APPLICATION OF THE ACOUSTIC EMISSION METHOD FOR RANKING BY FATIGUE DAMAGE OF THE MATERIAL OF TRUNNIONS OF DRYING CYLINDERS OF CARDBOARD AND PAPER-MAKING MACHINES

© 2023 I.A. Rastegaev^{1,*}, A.K. Khrustalev¹, A.V. Danyuk¹, M.A. Afanas'yev¹, D.L. Merson¹,
D.V. Sevast'yanov², S.V. Melent'ev², A.D. Plyusnin³

¹Togliatti State University, st. Belorusskaya, 14, Toliatti, 445020 Russia

²The Koryazhma branch of Ilim Group, st. Dybtsyna, 42, Koryazhma, 165651 Russia

³LLC «Prikamsky cardboard», st. Wallets, 1, Perm, 614037, Russia

E-mail: *RastlgAev@yandex.ru

Using the example of assessing the technical condition of the trunnions of drying cylinders of cardboard-making machines (CDM), the question of the possibility of ranking cyclically loaded elements of dynamic equipment according to the degree of damage to their material by fatigue cracks using acoustic emission (AE) measurements is discussed. As a result of special laboratory studies with varying loads in the cycle of loading and lubrication of the crack banks, the features of AE from the friction of the crack banks and plastic deformation at the crack tip during its growth in a viscous material have been established. It is shown that during cyclic loading of the material, AE signals from the friction of its shores are detected more steadily than AE signals from a crack jump with an increase in its length, and that tracking the former ensures the detection of fatigue damage of the material even under loading conditions insufficient for crack growth. Based on the data obtained, three AE signs of the presence of fatigue damage of the material of the elements of dynamic equipment were developed under the condition of cyclic activation of the movement of the crack banks. As a result of industrial testing of the developed AE features, their operability was confirmed and their boundary values on the operating trunnions of CDM drying cylinders were clarified, and a method for ranking trunnions by the level of damage by fatigue cracks was proposed. By comparing the results of AE measurements with ultrasound control, the reliability of the proposed approach was evaluated, which showed the

probability of detecting a fatigue crack in the trunnions of CDM drying cylinders at the level of 71 %, with the probability of their skipping and false rejection of the product 12 and 17 %, respectively. The developed technique is also transferable to other massive dynamic equipment after clarifying the boundary values of AE signs of fatigue damage of the material on this type of object.

Keywords: acoustic emission, metal fatigue, cracking, trunnion of drying cylinders, cardboard making machine, diagnostics.

DOI: 10.31857/S0130308223090014, **EDN:** EAKMQV

ВВЕДЕНИЕ

Картоно- и бумагоделательные машины (КДМ / БДМ) являются автоматическими поточными линиями непрерывного действия, в которых процесс сушки служит основным технологическим этапом, определяющим энергозатраты производства и итоговое качество продукции [1]. Сушильная часть КДМ / БДМ является самой металлоемкой, т.к. имеет наибольшую протяженность. Сушка выполняется с применением сушильных цилиндров, которые представляют собой вращающиеся сосуды давления, внутрь которых подается водяной пар (до 0,8 МПа, до +160 °С). Конструктивно сушильные цилиндры — сборочные единицы, состоящие из барабана, боковых крышек и двух цапф: лицевой и приводной (рис. 1). При этом цапфы могут быть выполнены заодно с крышками [2]. Обрыв цапф ведет к аварийной остановке производства и большим материальным затратам, т.к. сопровождается падением цилиндров с повреждением сушильного полотна и продукта (непрерывной ленты бумаги или картона большой ширины, например, 4,5 м, см. рис. 1). Однако, учитывая высокую скорость выпуска продукта (300 — 600 м/мин [3]), основной ущерб предприятия состоит не в стоимости замены сушильного цилиндра и полотна, а в потерях от простоя производства за время внепланового ремонта и необходимости остановки всей технологической цепочки, в которой наиболее острым вопросом является сохранение качества большого объема технологического запаса сырья в варочных котлах.

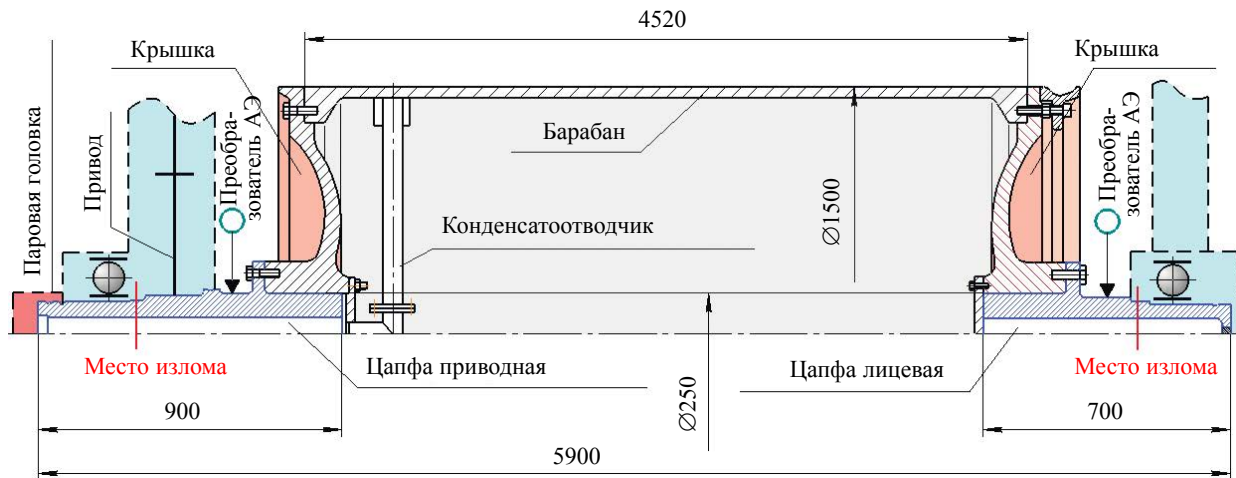


Рис. 1. Схема конструктивного исполнения сушильного цилиндра с указанием мест излома цапф и мест установки преобразователей акустической эмиссии.

Согласно статистике разрушений причиной обрыва лицевых и приводных цапф являются усталостные трещины, которые зарождаются на поверхности и развиваются вглубь цапф вблизи галтельных переходов в области подшипникового узла. Опасные места находятся внутри корпусов подшипникового узла и привода (см. рис. 1), что делает невозможным визуальный контроль, а также применение основных неразрушающих методов обнаружения трещин: ультразвукового, капиллярного, вихретокового и магнитного. В связи с этим, указанные методы применяются только после снятия сушильного цилиндра с КДМ / БДМ. Последнее проблематично, т.к. требует демонтажа привода и подшипниковых узлов, разборки многоярусной станины машины и поярусной выгрузки сушильных цилиндров. Количество сушильных цилиндров на КДМ / БДМ зависит от ассортимента вырабатываемой продукции, конструктивного исполнения, технологических параметров машин

и объема производства и на крупнотоннажных предприятиях достигает 100 штук на одной машине, т.е. 200 цапф. Между тем в рамках ежегодного планового капитального ремонта по временным и материальным затратам возможно поменять не более восьми сушильных цилиндров, т.е. 16 цапф. Следовательно, для проверки всех цапф основными методами только на одной машине с 100 сушильными цилиндрами потребуется 13 лет, что не может обеспечить выдвигаемое сегодня требование оперативной оценки технического состояния оборудования целлюлозно-бумажного производства для обоснования ремонтов по их техническому состоянию [4]. Таким образом, требуются методы, позволяющие организовать порядок вывода сушильных цилиндров для их дефектовки, а в случае цапф — методы оценки их поврежденности непосредственно на КДМ / БДМ. При этом указанная проблема актуальна не только для сушильных цилиндров КДМ / БДМ, но и для подобного вращающегося технологического оборудования [5, 6].

В процессе работы сушильных цилиндров непрерывно контролируется вибрация и нагрев подшипниковых узлов. Анализ вибрации и температуры, предшествующих произошедшим аварийным случаям с обрывом цапф не выявил диагностических признаков, по которым заблаговременно возможно было бы установить критическую поврежденность цапф, что обусловило необходимость в разработке новых методов для выявления поврежденности материала цапф. Высоко чувствительным к зарождению и распространению трещиноподобных дефектов является метод акустической эмиссии (АЭ), который не требует непосредственного доступа к опасному сечению, а эффективность и достоверность метода подтверждена теоретически [7, 8], лабораторно на широком спектре конструкционных материалов [7, 9, 10] и условий их нагружения [11, 12], а также при промышленном АЭ-контроле основных типов статического и динамического оборудования [13, 14]. При этом реализуется метод АЭ аналогично вибродиагностическому, но обладает гораздо большей чувствительностью к усталостным трещинам, что показано в [15—17].

Основным подходом оценки поврежденности элементов сушильных цилиндров сегодня является анализ АЭ при нагружении избыточным внутренним давлением (ASTM E2598). Однако данная методика не подходит для оценки АЭ поврежденности цапф, т.к. из-за толстостенности элемента испытательное давление в сушильном цилиндре не сможет спровоцировать развитие в цапфе усталостной трещины даже критического уровня. Другим негативным фактором является отсутствие при скачке усталостной трещины в вязких сталях явно различимых сигналов АЭ наблюдаемых при разрушении хрупких и квазихрупких материалов [7, 18, 19]. Обозначенное делает стандартный подход АЭ-контроля элементов сушильных цилиндров внутренним давлением не эффективным. Одним из альтернативных методов провоцирования генерации АЭ-трещиной в материале является его знакопеременное нагружение [7, 20, 21]. При этом контроль поврежденности материала цапфы по всему сечению может быть выполнен только путем вращения сушильного цилиндра, что практикуется при оценке поврежденности вращающихся силовых элементов машин и оборудования (опор вращающихся трубчатых печей [13], осей железнодорожной техники [22], подшипниковых узлов мотор-редукторов [23], валов зубчатых передач [24] и др.), но из-за разного соотношения «конструктивная особенность объекта контроля/местоположение опасного сечения» эффективность применения данного подхода различна. Последнее особенно важно в виду отсутствия возможности приложения дополнительной внешней силы к сушильным цилиндрам при их циклическом нагружении. Также к недостаткам обнаружения усталостных трещин АЭ-методом в условиях циклического нагружения объекта контроля относят высокий уровень сопутствующих шумов, что требует разработки и специальных мер для снижения ошибки АЭ-контроля [13, 25]. Таким образом, на сегодняшний день отсутствуют АЭ-методики и подходы для контроля поврежденности цапф вращающегося оборудования. Целью настоящей работы было исследование признаков АЭ наличия усталостных трещин в циклически нагруженном материале для разработки методики АЭ ранжирования элементов оборудования по поврежденности усталостными трещинами с последующей ее апробацией на реальном промышленном объекте.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследований являлась АЭ, возникающая в материалах сталь 20Л и 45Л при наличии в них усталостной трещины, зарождение и движение которой имитировали в лабораторных и промышленных условиях.

Лабораторные исследования приводились во время испытаний материала на рост усталостной трещины в соответствии с ASTM E647. Испытания проводились на сервогидравлической машине 8802 (Instron, Англия—США) по схеме одноосного растяжения в режиме контроля приложенной

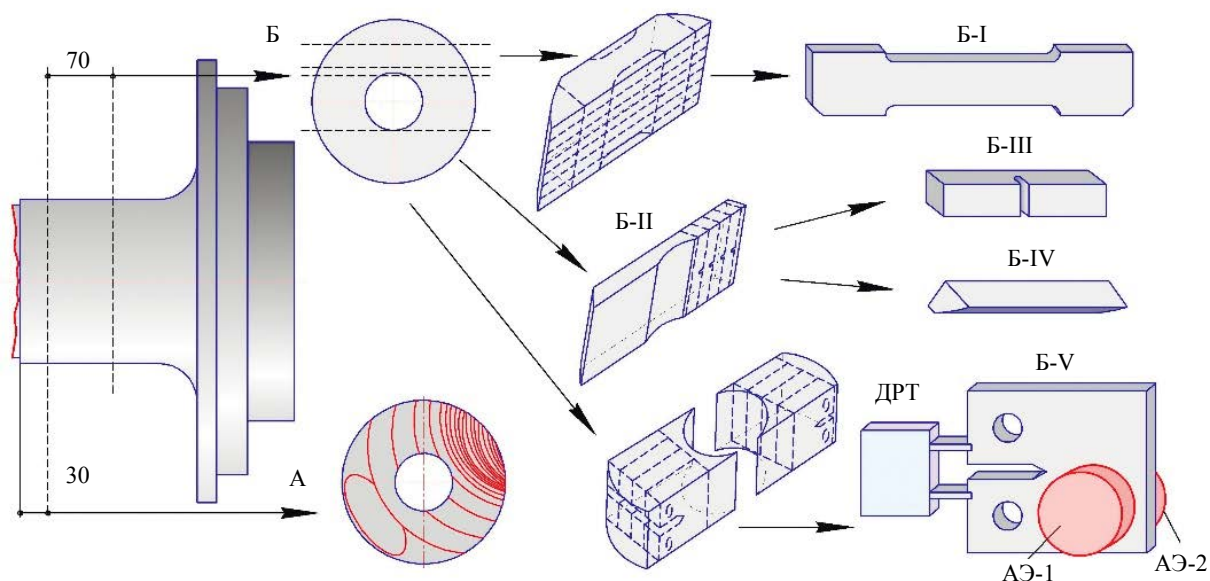


Рис. 2. Схема раскроя разрушенной цапфы на образцы, где: А — фрагмент для фактографического анализа излома; Б — фрагмент для роспуска на образцы для: механических испытаний на разрыв (Б-I); измерения твердости (Б-II); оценки ударной вязкости (Б-III); оценки химического состава и структуры металла (Б-IV); испытаний на рост усталостной трещины (Б-V). На рисунке обозначено: ДРТ — тензометрический датчик раскрытия трещины; АЭ-1 и АЭ-2 — преобразователи первой и второй АЭ системы соответственно.

силы, изменяющейся по синусоидальному закону с постоянной частотой 10 Гц в диапазоне нагрузок 1—10 кН (коэффициент асимметрии цикла $R = 0,1$). Приращения и остановки роста трещины при испытаниях отслеживались с помощью тензометрического датчика раскрытия трещины типа 3541-020M-025M-ST (Epsilon Technology, США) и тепловизора SC7700M (FLIR, США) с оптической системой Microscope lens G1 F/2x1. Тепловые измерения проводили в спектральном диапазоне MWB или MWIR (3,7 — 4,8 мкм, 5 — 150 °C) на поле наблюдения 9,6×7,7 мм (640×512 px) при скорости записи: 25, 50 и 115 кадров в секунду (fps). Для имитации АЭ от различных источников движения трещины использовались специальные режимы нагружения образца и изменения условий его работы, которые будут описаны далее.

Лабораторные исследования проведены на компактных образцах типа СТ (по ASTM E647) размером: 48×50×10 мм (Б-V на рис. 2). Концентратором напряжений в них являлся вырез 20×2 мм с клином с углом при вершине 30° и радиусом скругления 0,18 мм. СТ-образцы вырезались непосредственно из цапф сушильных цилиндров электроэрозионным способом с жидкостным охлаждением путем погружения в ванну. При этом направление выреза образцов и концентратора напряжений в них ориентировалось относительно направления роста трещин, приводивших к разрушению цапф на КДМ (см. рис. 2). Последнее выполнялось с целью учета анизотропии характеристик материала по сечению цапф, которые возникают при многоэтапной технологии их изготовления (литье с последующей ковкой, точением и поверхностной термообработкой).

Промышленные исследования проводились на учебном стенде и непосредственно на двух КДМ крупнотоннажного производства. Учебный стенд представляет собой один из сушильных цилиндров КДМ в сборе, установленный на ступенях с подшипниковыми узлами, но без приводной шестерни и паровой головки (рис. 1 и 3). Сами же КДМ имеют в общей сложности 196 сушильных цилиндров (392 цапфы) разного года выпуска и установки (новые и со сроком эксплуатации до 25 лет). Кроме этого, на предприятии имелось несколько цапф с трещинами и цапфы аварийно вышедшие из строя. Таким образом, в совокупности промышленные исследования обеспечили высокий уровень выборки объектов исследований.

В лабораторных исследованиях АЭ регистрировали в беспороговом режиме 2-х канальной исследовательской системой PCI-2 (РАС, США) и параллельно в пороговом режиме — 16-и канальной промышленной системой A-Line 32D (ООО «Интерюнис-ИТ», Россия). В промышленных исследованиях использовалась только АЭ система A-Line 32D. Беспороговая запись, которая на сегодня реализуется только в исследовательских комплексах и позволяет проводить регистрацию АЭ без

пропусков, была необходима для оценки степени искажения информации и работоспособности АЭ-критериев при переходе от лабораторной аппаратуры к промышленной, работающей в пороговом режиме, т.е. с пропуском части данных АЭ. В лабораторных исследованиях АЭ регистрировали в диапазоне частот 20—1000 кГц с помощью пьезопреобразователей MSAE-1300WB (ООО «Микросенсорс АЭ», Россия) и пьезопреобразователей П111-(0,05-0,8) (Россия), а при промышленных — последними преобразователями в диапазоне 30—500 кГц. Преобразователи АЭ к СТ-образцам крепили на противоположной вырезу стороне образца с помощью эпоксидной смолы (АЭ-1 и АЭ-2 на рис. 2), а на цапфах — в местах, показанных на рис. 1 и 3, с помощью магнитных держателей через консистентный смазочный материал Литол-24. Частота дискретизации при записи АЭ во всех исследованиях составляла 2 МГц. Перед исследованиями преобразователи АЭ калибровались на генераторе акустических импульсов MSAE-UCA01 (ООО «Микросенсорс АЭ», Россия) [26] по методике ASTM E976. Запись и анализ откликов пьезопреобразователей на калиброванное воздействие генератора выполнялось с помощью обозначенных систем АЭ и параллельно подключенным цифровым осциллографом Wave Runner 44Xi-A (LeCroy, США).

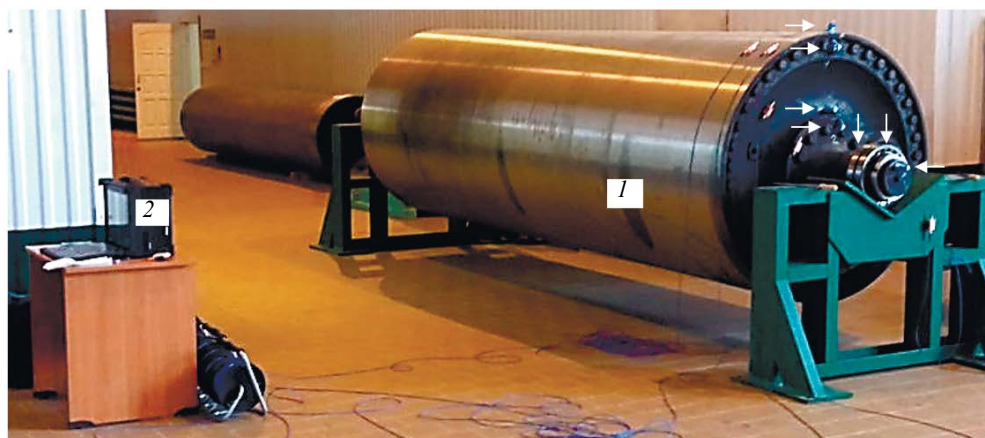


Рис. 3. Общий вид учебного стенда (1), АЭ-системы (2) и места установки преобразователей АЭ при проведении исследований на нем (указаны стрелками — на лицевой стороне, на приводной стороне устанавливались аналогично).

Фрактографическое исследование изломов цапф (см. образцы А на рис. 2) проводили с помощью металлографического микроскопа Stemi 2000 (Zeiss, Германия). При этом расстояние между бороздками (скачками) трещины в зоне линейной скорости ее роста измеряли с помощью сканирующего электронного микроскопа Sigma (Zeiss, Германия). Исследование структуры металла цапф (см. образцы Б-IV на рис. 2) проводили на микроскопе Axiovert 40 MAT (Zeiss, Германия) по ГОСТ 5640 с помощью программы количественного структурного и фазового анализа Thixomet PRO (Thixomet, Россия). Химический состава материала (см. образцы Б-IV на рис. 2) подтверждали на Q4 TASMAN (Bruker, Германия) по ГОСТ Р 54153, механические характеристики определяли с помощью твердомера HB-3000B (Time Group, Китай) по ГОСТ 9012, маятникового копра JB-W300 (Time Group, Китай) по ГОСТ 9454 и разрывной машины H50KT (Tinius Olsen, Англия) по ГОСТ 1497 (см. соответственно образцы Б-II, Б-III и Б-I на рис. 2). Проверка наличия трещин в цапфах проводилась ультразвуковым методом с помощью дефектоскопа Томографик УД-4Т (ООО «ВО-ТУМ», Россия) на контрольной частоте 2,5 МГц.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ рельефа изломов аварийных цапф позволил установить общую схему разрушения, которая применительно к одному из изломов показана на рис. 4. Из рис. 4а видно, что излом цапфы имеет сложную конфигурацию: 3/5 поверхности излома представляет сравнительно плоскую поверхность, практически нормальную к оси цапфы, а 2/5 поверхности излома имеют сильные перепады. Микротрещины зародились вблизи галтели перехода к меньшему диаметру цапфы, сыгравшего роль концентратора напряжений. Очаги зарождения микротрещин на схеме рис. 4б показаны красными кругами. Зоны роста микротрещин обозначены голубым цветом. Зародившись в разных,

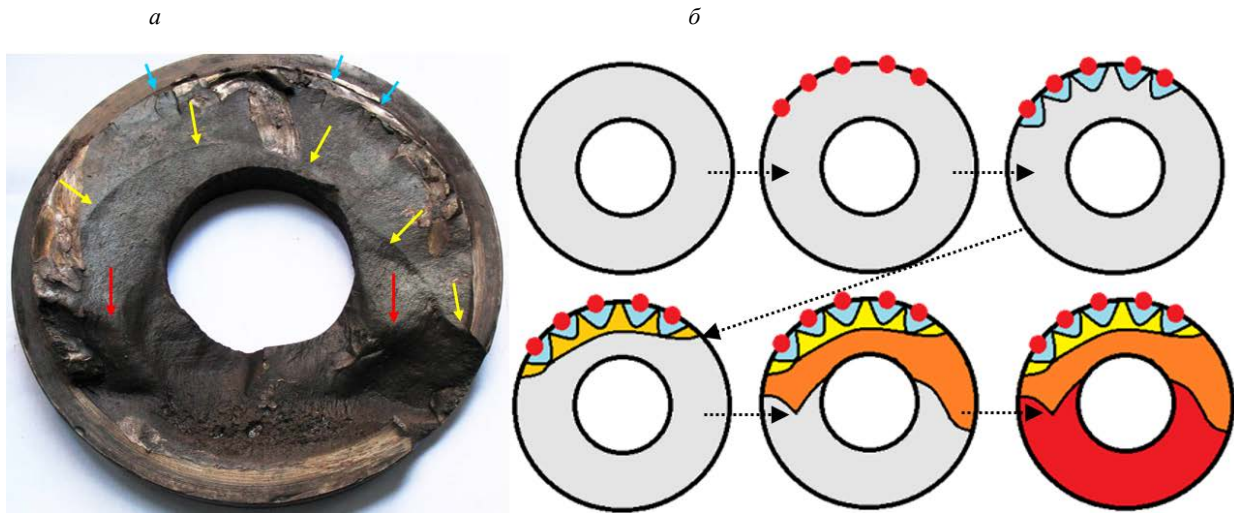


Рис. 4. Общий вид излома (а) и схема разрушения цапф (б) при движении трещин (стрелки) по соответствующим зонам (цвет стрелок и зон).

но близких друг к другу сечениях, микротрещины в процессе своего продвижения соединились в одну усталостную трещину (желтый цвет) и образовали ступени сдвига и гребни, параллельные направлению роста трещины. Усталостная трещина росла до излома цапфы в пределах оранжевой зоны. Красная — зона долома во время обрыва цапфы. Принимая во внимание тот факт, что протяженность зоны усталостного развития трещины составляет не менее 100 мм, а измеренное расстояние между бороздками (скачок) трещины в зоне линейной скорости ее роста составляло 0,5—1,0 мкм, можно сделать вывод, что разрушение произошло по механизму многоциклового усталости (более 1 млн циклов) и напряжение цикла было не очень высоким (близкое к пределу усталости). Исследование химического состава, структуры и механических характеристик (твердость, ударная вязкость, предел текучести, предел прочности, относительное удлинение) материала аварийных цапф показало его полное соответствие всем нормативным требованиям к материалу и изделию. Из вышесказанного сделан вывод о том, что эксплуатация материала в составе БДМ не приводит к существенной деградации свойств, охрупчиванию или разупрочнению стали, поэтому усталостный механизм разрушения цапфы принят в качестве основного. Таким образом, учет только присутствия усталостной трещины в материале можно считать корректным приближением для исследования и выработки диагностического АЭ-признаков дефектности материала.

По результатам лабораторных испытаний материала на рост усталостной трещины средний размах коэффициента интенсивности напряжения в начале и конце линейной части кинетической диаграммы усталостного разрушения материала составил $\Delta K_I = 22,9 \pm 2,9 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ и $\Delta K_{II} = 34,4 \pm 2,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$. Эти данные были использованы для установления границ стадий роста трещины на зависимости приращения ее длины от циклов нагружения, которые на рис. 5а обозначены n_I и n_{II} и разделяют на: I — стадию припорогового медленного роста трещины (по литературным данным скорость роста трещин на данном этапе порядка 10^{-7} — 10^{-8} мм/цикл); II — стадию стабильного роста трещины (на данном этапе скорость роста трещины подчиняется закону П.К. Пэриса); III — стадию ускоренного (неустойчивого) роста трещины (скорость роста трещины резко увеличивается).

Максимальный уровень внешнего акустического фонового шума на сушильных цилиндрах в составе БДМ во время проведения капитального ремонта составил 38 дБ, а средний коэффициент затухания волн АЭ в цапфах — 45,5 дБ/м. Расстояние между преобразователем АЭ (ПАЭ) и контролируемой зоной на лицевой цапфе порядка 45 мм, а на приводной — 315 мм (см. рис. 1), таким образом в месте регистрации АЭ следует ожидать уменьшение амплитуды сигналов на уровне 2,0 и 14,3 дБ соответственно. Учитывая фоновый шум и затухание источник АЭ на лицевой цапфе будет обнаружен если амплитуда его сигналов будет более 40 дБ (100 мкВ), а на приводной цапфе — более 52,3 дБ (412 мкВ). В работе [7] показано, что данным амплитудам сигналов АЭ соответствуют скачки трещин ~50 и ~200 мкм соответственно. По данным того же литературного источника при наблюдаемом на изломах аварийной цапфы расстоянии между бороздками (скачках) трещины в

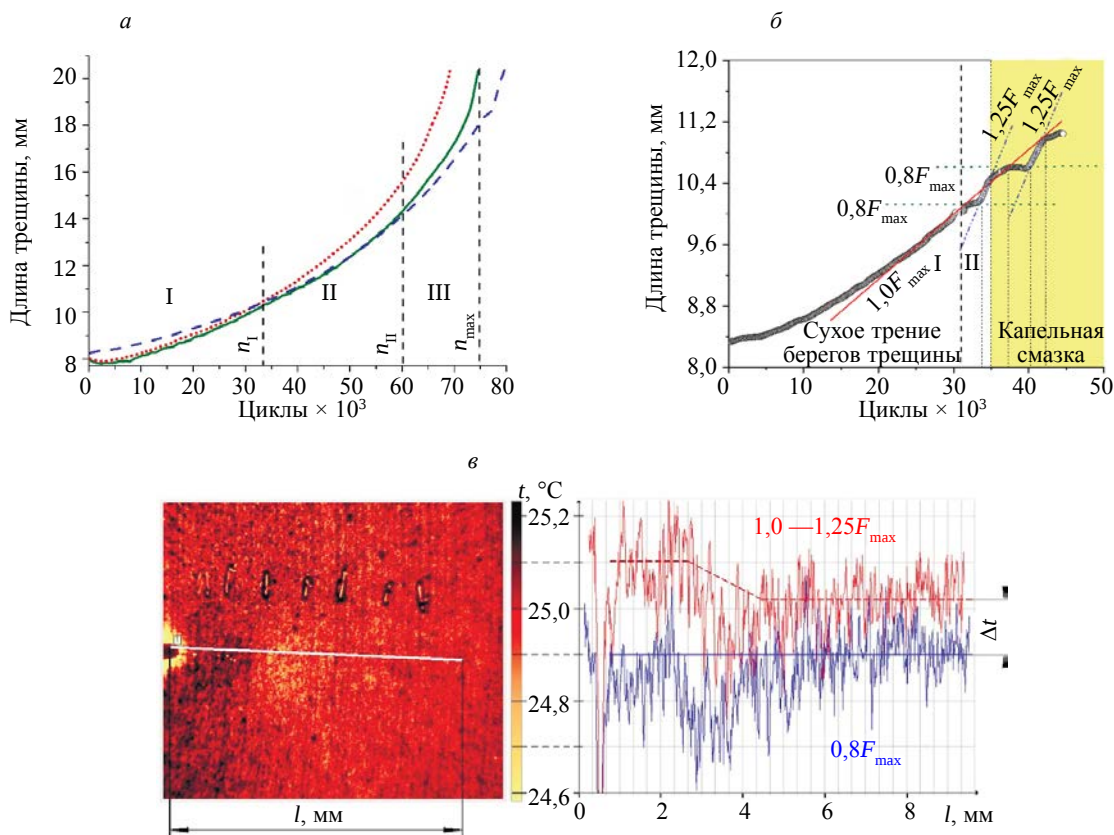


Рис. 5. Зависимость приращения длины усталостной трещины от числа циклов нагружения по стандартной методике ASTM E647 (а) и специальной — для имитации различных источников АЭ (б). На рисунке (в) при общей шкале температуры справа цветом показано тепловое поле, формируемое при росте трещины, а слева графически — повышение распределения температуры (Δt) по белой измерительной линии длиной l , проложенной по траектории роста трещины при нагрузках в циклах $1,0$ и $1,25F_{max}$ относительно режима $0,8F_{max}$. Все обозначения расшифрованы в тексте.

зоне линейной скорости ее роста $0,5$ — $1,0$ мкм амплитуда сигналов АЭ не должна превышать 2 мкВ (6 дБ). Таким образом, в реальных промышленных условиях АЭ-измерений даже при установке ПАЭ вблизи зоны развития трещины вероятность ее обнаружения с помощью метода АЭ маловероятна. Однако работа цапфы с трещинами в режиме изгиба с вращением обязательно сопряжена с поворотом берегов относительно вершины трещины, причем дважды за каждый рабочий цикл (полный оборот) при сменах знака напряжений от растяжения к сжатию и наоборот. Соответственно, следует ожидать АЭ от трения берегов трещины при каждой разгрузке после сжатия или растяжения волокон, что повышает вероятность обнаружения данного источника АЭ.

На основании вышеприведенных фактов возникла идея: в основу оценки усталостной поврежденности (обнаружения наличия трещины) цапф положить выявление признаков АЭ трения берегов трещины, а за способ активации источника АЭ (способ нагружения) — вращение сушильного цилиндра непосредственно на КДМ. Таким образом, потребовалось разделить сигналы АЭ не только по стадиям роста трещины, но и по основным источникам АЭ, которыми в вязком материале являются: пластическая деформация с разрывом в вершине трещины и трение берегов трещины [7].

Исследование АЭ от указанных основных источников проводили на другой партии СТ-образцов путем выращивания усталостной трещины до стадии стабильного роста II (рис. 5б), наличие которой устанавливалось по кинетической диаграмме усталостного разрушения материала. Затем нагрузка в цикле пропорционально снижалась до величины $0,8F_{max}$ (при всех неизменных других параметрах нагружения), где F_{max} — пиковая нагрузка в цикле (10 кН). При данной нагрузке трещина не росла, что подтверждалось по данным с датчика раскрытия трещины (рис. 5б) и тепловизора (рис. 5в), т.к. известно [27], что рост трещины сопровождается нагревом в ее вершине и материала вокруг (Δt на рис. 5в). Таким образом, на нагрузке $0,8F_{max}$ сигналы АЭ должны преимущественно

быть связаны с трением берегов трещины. Затем нагрузка увеличивалась до величины $1,25F_{\max}$. Такой режим нагружения приводил к увеличению скорости роста трещины (см. рис. 5б) и восстановлению температурного поля вокруг ее вершины до значения при нагрузке $1,0F_{\max}$ (см. рис. 5в). Этим режимом имитировалась АЭ от пластической деформацией материала в вершине трещины большей мощности, возникающей по причине большей величины приращения ее длины, чем на нагрузке $1,0F_{\max}$. Далее процедура изменения режима нагружения повторялась, но с капельным вводом жидкого минерального масла И-20А SN-150 (OilRight, Россия) в устье трещины с помощью шприца. Данный смазочный материал не имеет присадок и наполнителей, устойчив к окислению, отличается пониженным пенообразованием и имеет высокий класс вязкости, поэтому под действием вибрации и капиллярных сил смазка затягивалась вглубь трещины и уменьшала трение, т.е. снижала уровень АЭ от трения берегов трещины на всех режимах нагружения. Поскольку АЭ и температура образца регистрировалась непрерывно, то по фиксированным временным меткам начала и окончания выхода на режим или введения смазочного материала возможно выделить характеристики сигналов АЭ генерируемых исследуемыми источниками. Кроме этого, для понимания шума, сопровождающего работу гидравлической системы нагружения образца и трение в захватах, записывалась АЭ с компактного образца, в котором отсутствовал концентратор напряжения (вырез). Жесткости такого образца было достаточно, чтобы гарантировать невозможность зарождения в нем трещины за короткое время записи АЭ шума испытательной машины, которое проводилось при тех же нагрузках ($0,8$; $1,0$ и $1,25F_{\max}$) и два раза: до и после смазывания подвижных элементов захватов.

В результате анализа изменения АЭ за цикл нагружения (рис. 6) установлено, что на режиме $0,8F_{\max}$ до и после смазывания АЭ существенно не отличается и по уровню сопоставима с АЭ, снятой с образца без выреза. При этом в местах цикла нагружения (показаны стрелками на рис. 6), установленных в работах [18, 19], АЭ до смазывания берегов трещины превышает АЭ после смазывания. Таким образом, сигналы АЭ на режиме $0,8F_{\max}$ в пределах данных временных меток связаны с трением берегов трещины. Сопоставление АЭ на режиме $1,25F_{\max}$ до и после смазывания также показывает снижение АЭ на тех же временных метках (рис. 6б). Сопоставление режимов $1,25F_{\max}$ без смазывания берегов трещины и $0,8F_{\max}$ после смазывания (рис. 6в) наглядно показывает указанные отличия в АЭ в контрольных метках. Полученные данные также подтверждают выводы работ [18, 19], в которых расчетно и экспериментально показано, что уровень сигнала АЭ при росте трещины в вязких сталях (к которым относятся 20Л и 45Л) настолько мал, что при пороговом режиме регистрации слежение за развитием трещины возможно наблюдать только по двум энергичным сигналам АЭ, не совпадающих с пиком изменения нагрузки (см. рис. 6). При этом наличие двух пиков АЭ и их положение также совпадает с данными обозначенных работ, а именно с моментом раскрытия трещины при увеличении напряжения в цикле и моментом закрытия трещины на обратном ходе. Согласно тем же работам, трение берегов, хоть и в меньшей степени (не на всю длину трещины), происходит и в знакопостоянных циклах. Наличие «провала»

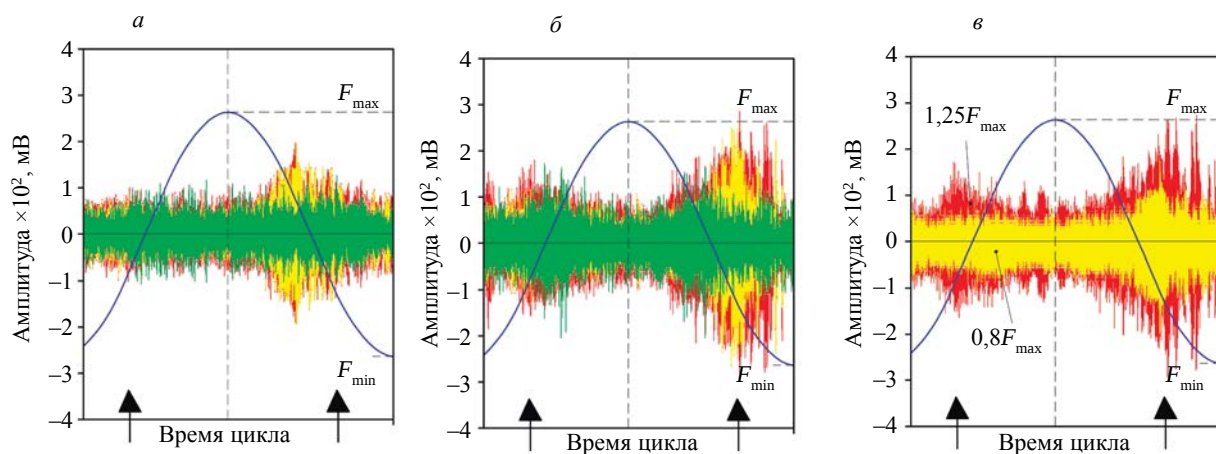


Рис. 6. Общий вид АЭ, сопровождающий циклы нагружения образца при нагрузке $0,8F_{\max}$ (а), $1,25F_{\max}$ (б) и обеих нагрузках (в) при разных условиях трения берегов трещины, которые показывает цвет графика: зеленый — трещины нет (образец без выреза); красный — сухое трение берегов трещины; желтый — трение берегов трещины со смазкой.

АЭ между высокоамплитудными пиками в цикле — не что иное, как возврат АЭ к общему уровню акустического шума цикла, который увеличивается и уменьшается синхронно с ним. Длительность трения берегов трещины в нашем случае задается режимом нагружения, но по данным [28, 29] время генерации АЭ сигналов до момента возвращения берегов трещины в исходное состояние может быть достаточно продолжительным (до 0,4 с) и фиксируется в широком диапазоне частот (до 600 кГц), что также подтверждает перспективность использования данного вида источника в качестве диагностического признака наличия трещины в материале.

Анализ всех результатов лабораторных исследований показал, что наиболее чувствительными к стадиям роста трещины и мало зависящими от уровня порога дискриминации являются параметры АЭ: амплитуда (А) и MARSE (Measured Area under Rectified Signal Envelope). Кроме этого, согласно работ [30, 31], данные параметры хорошо описывают лавинные процессы к которым, помимо деформационных процессов в вершине трещины можно отнести и коллективное контактирование микронеровностей ее берегов при их быстром сдвиге. Параметры А и MARSE позволяют выделить АЭ-трения берегов трещины (■) от остальных сигналов (○) с использованием всего двух условий, при этом сигналы ■ и ○ формируют хорошо различимые кластеры, которые имеют незначительную область пересечения (рис. 7б). При зарождении трещины (см. участок I на рис. 5) амплитуда сигналов АЭ и MARSE не превышает 60 дБ и $16 \cdot 10^7$ у.е. соответственно. На стадии линейного роста трещины (см. участок II на рис. 5) дополнительно к сигналам АЭ I участка регистрируются сигналы амплитудой 60—76 дБ и MARSE более $24 \cdot 10^7$ у.е. На стадии критического (ускоренного) роста трещины (см. участок III на рис. 5) скачки трещины гораздо больше, поэтому амплитуда сигналов АЭ выше и достигает порядка 90 дБ, MARSE 40×10^7 у.е. В связи с этим граничные значения параметров амплитуды и MARSE приняты за первый АЭ-признак поврежденности материала цапф сушильных цилиндров усталостными трещинами.

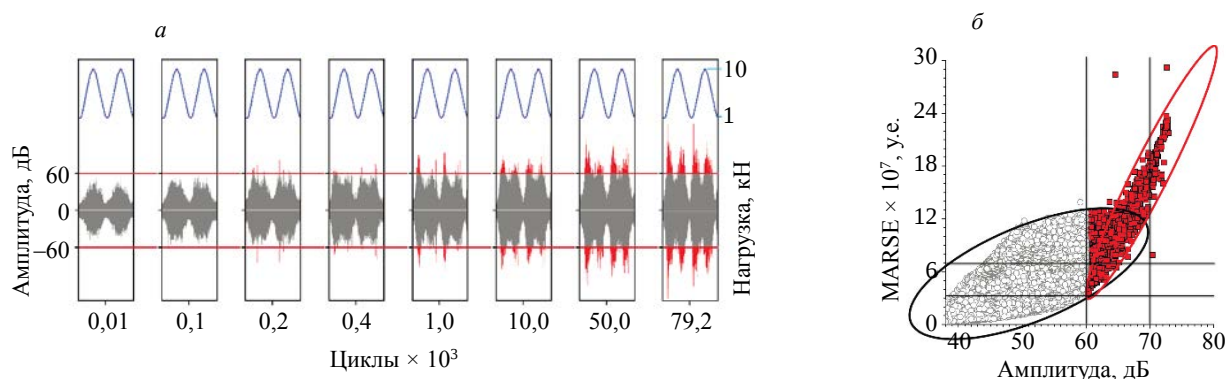


Рис. 7. Общий вид изменения АЭ в цикле нагружения за время испытания по стандартной методике ASTM E647 и выделение сигналов АЭ от трения берегов трещины (красный цвет) по амплитуде (а) и амплитуде + MARSE (б).

Также из рис. 7а видно, что по мере приближения к разрушению повышается количество регистрируемых сигналов (выделены красным цветом) и, следовательно, скорость их прихода, а также существенно изменяется вид кривой изменения АЭ за цикл нагружения по сравнению с начальным («бездефектным») состоянием образца. Поэтому за второй АЭ-признак поврежденности цапф принята повторяемость проявления АЭ за время нагружения и граничные значения количества зарегистрированных сигналов по контрольным участкам в сравнении с признаками «бездефектного» или «дефектного» объекта контроля полученных при той же скорости их нагружения в предварительных исследованиях.

Промышленные исследования позволили подтвердить работоспособность установленных АЭ-признаков и скорректировать их граничные значения для оценки усталостной поврежденности материала цапф в условиях проведения цехового контроля. Для этого исследования проводили на «бездефектных» и «дефектных» цапфах, а полученные на них АЭ-данные являлись опорными. При этом в качестве дефектных использовались четыре сушильных цилиндра, в цапфах которых при ультразвуковом контроле (УЗ) были обнаружены признаки трещиноподобных дефектов в контрольном сечении (см. табл. 3). В качестве «бездефектных» цапф использовались те же четыре сушильных цилиндра после замены дефектных цапф на новые в которых при УЗ контроле признаков

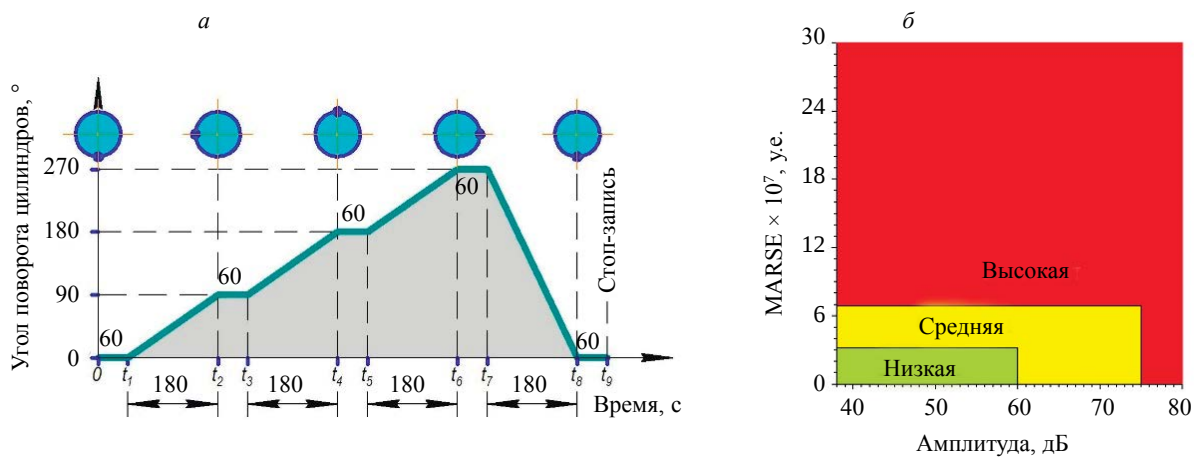


Рис. 8. График нагружения цапф сушильных цилиндров (один оборот) (а) и уточненное в промышленных исследованиях классификационное поле оценки поврежденности цапф по первому АЭ-признаку (рис. 7б).

дефекта в контрольном сечении не обнаружено. Кроме этого, УЗ методом была оценена дефектность 91 цапфы разной степени поврежденности, установленной по АЭ-данным. При промышленных исследованиях нагружение опасного сечения цапф с целью активации движения берегов трещины проводилось собственным весом сушильных цилиндров (6520 кг) путем их проворачивания по графику, представленному на рис. 8.

В результате промышленных исследований выявлено, что лабораторно установленные закономерности и АЭ-признаки позволяют выявить дефектные цапфы, но с учетом следующей корректировки. Классификационное поле параметров «амплитуда — MARSE» разделено на уровни по вероятности поврежденности цапф сушильных цилиндров: низкое, среднее и высокое (рис. 8б). На «бездефектных» цапфах регистрируемая АЭ по амплитуде и MARSE не превышала 60 дБ и $3,3 \cdot 10^7$ у.е. соответственно, поэтому при данных АЭ-признаках принимается низкая поврежденность цапф. При любой амплитуде АЭ при MARSE более $6,7 \cdot 10^7$ у.е. устанавливается высокая степень поврежденности, т.к. данный АЭ-признак наблюдался на дефектных цапфах. Однако нижняя граница зоны высокой поврежденности цапф по сравнению с лабораторными исследованиями снижена до 60 дБ, что имеет цель компенсировать затухание сигнала и погрешность установки преобразователя АЭ. Поскольку при этом MARSE уменьшается медленнее, то учет возможного смещения «полезных» сигналов в данную область компенсируется только по амплитуде. При значениях амплитуды и MARSE соответственно 60—70 дБ и $(3,3—6,7) \cdot 10^7$ у.е. присваивается средняя степень поврежденности цапфы, как наблюдаемая в лабораторных исследованиях на стадии зарождения трещины и занимающая промежуточное значение между данными АЭ, полученными на «дефектных» и «бездефектных» цапфах при промышленных исследованиях. Продление зоны средней дефектности вниз до 38 дБ (уровня цехового шума) также имело цель компенсировать затухание сигнала и погрешность установки преобразователя АЭ, что приводит к смещению «полезных» сигналов в данную область.

В качестве параметра оценки АЭ для второго признака был выбран параметр — активность АЭ ($\dot{N}(t)$) за цикл нагружения, т.к. ее изменение коррелирует с параметром MARSE и является более универсальным оценочным параметром. В исследованиях на «бездефектных» (новых) цапфах $\dot{N}$ не превышала 36 имп/с, но на цапфах, которые эксплуатировались и имели по первому АЭ-признаку низкую поврежденность $\dot{N}$, фиксировалось до 70 имп/с. На дефектных цапфах $\dot{N}$ составляла более 90 имп/с. Для получения кривой изменения $\dot{N}(t)$ применялась процедура сглаживания в виде вычисления среднего значения активности АЭ ($\bar{a}_N$) скользящим окном. В качестве алгоритма оценки степени подобия изменения $\bar{a}_N$ между циклами нагружения использовался коэффициент достоверности аппроксимации или R-квадрат, который предложен для поиска подобия в кривых спектральной плотности мощности АЭ-сигналов и подробно описан в работе [32]. Средняя кривая $\bar{a}_N$, полученная на «бездефектных» цапфах, принята за опорную кривую, с которой сравнивались все остальные. В результате сравнения получено, что при средней и высокой степени поврежденности цапф по первому АЭ-признаку и $\dot{N}$ степень подобия кривых $\bar{a}_N$ с опорной (обозначено далее как R_1^2) не более 15 %.

Апробация предлагаемого подхода в промышленных условиях в период капитального ремонта оборудования показала, что при АЭ-измерениях часто возникают случайные помехи и шумы высокой амплитуды и MARSE, что сопровождается повышением и активности регистрации сигналов АЭ. В связи с этим при массовом контроле (многоканальной системой АЭ) применение только первого и второго АЭ-признаков приводит к ошибке идентификации степени поврежденности цапф усталостными трещинами. Поэтому для повышения достоверности результатов АЭ-измерений был введен третий признак поврежденности цапф, который также основан на установленной закономерности проявления АЭ от трения берегов трещины в циклах нагружения без и с ее приращением (см. рис. 5—7). Из рис. 7а хорошо видно, что если трещина в теле объекта исследования отсутствует/присутствует, то в пределах нескольких циклов нагружения с одинаковой скоростью характер изменения АЭ имеет высокий уровень подобия, т.е. повторяться от цикла к циклу нагружения. Поэтому проверка закономерности проявления АЭ между выполненными подряд циклами нагружения положена в основу третьего АЭ-признака. Для этого также используется средняя кривая изменения активности АЭ $\bar{a}_N$ и критерий подобия R-квадрат (который в данном случае применения обозначен как R^2_2). При этом подобие АЭ оценивается последующего цикла нагружения к предыдущему внутри одного АЭ-измерения на одной и той же цапфе, а не с АЭ на другой «бездефектной» или «дефектной» цапфе, как во втором признаке АЭ. Здесь критерием поврежденности является условие: в каждом измерении АЭ по каждой цапфе $\bar{a}_N$ минимум в трех из пяти циклов нагружения должно иметь уровень подобия R^2_2 более 30 %. В противном случае средний и высокий класс поврежденности цапф считается вызванным внешней случайной помехой. Следует выделить, что добавление третьего признака позволил устранить этап фильтрации данных АЭ и тем самым повысить оперативность принятия решения, что важно, т.к. перепроверить результат измерений АЭ другими методами неразрушающего контроля возможно только в период капитального ремонта.

Обозначенные контрольные параметры трех признаков АЭ и их уточненные граничные значения сведены в классификационную табл. 1, а пример результатов АЭ-измерений, получаемых при промышленном контроле цапф БДМ, соответствующих установленным АЭ-признакам низкой, средней и высокой поврежденности, приведен в табл. 2. Отметим, что сделанные выводы и основанные на них АЭ-признаки в полной мере правомерны только в условиях циклического нагружения материала с трещиной.

Таблица 1

Контрольные параметры и их граничные значения

АЭ-признак	Контрольный параметр	Степень дефектности цапф		
		Низкая	Средняя	Высокая
I	Амплитуда, дБ MARSE, у.е.	< 60* < 3,3·10 ⁷	60—75** < 6,7·10 ^{7**}	> 75 < 6,7·10 ⁷
II	$\dot{N}$, имп/с R^2_1 , %	< 36 Не определяется	≥ 70 < 15	≥ 90 < 15
III	R^2_2 , % Количество повторов	Не определяется Не определяется	> 30 3 из 5 циклов нагружения (оборотов)	

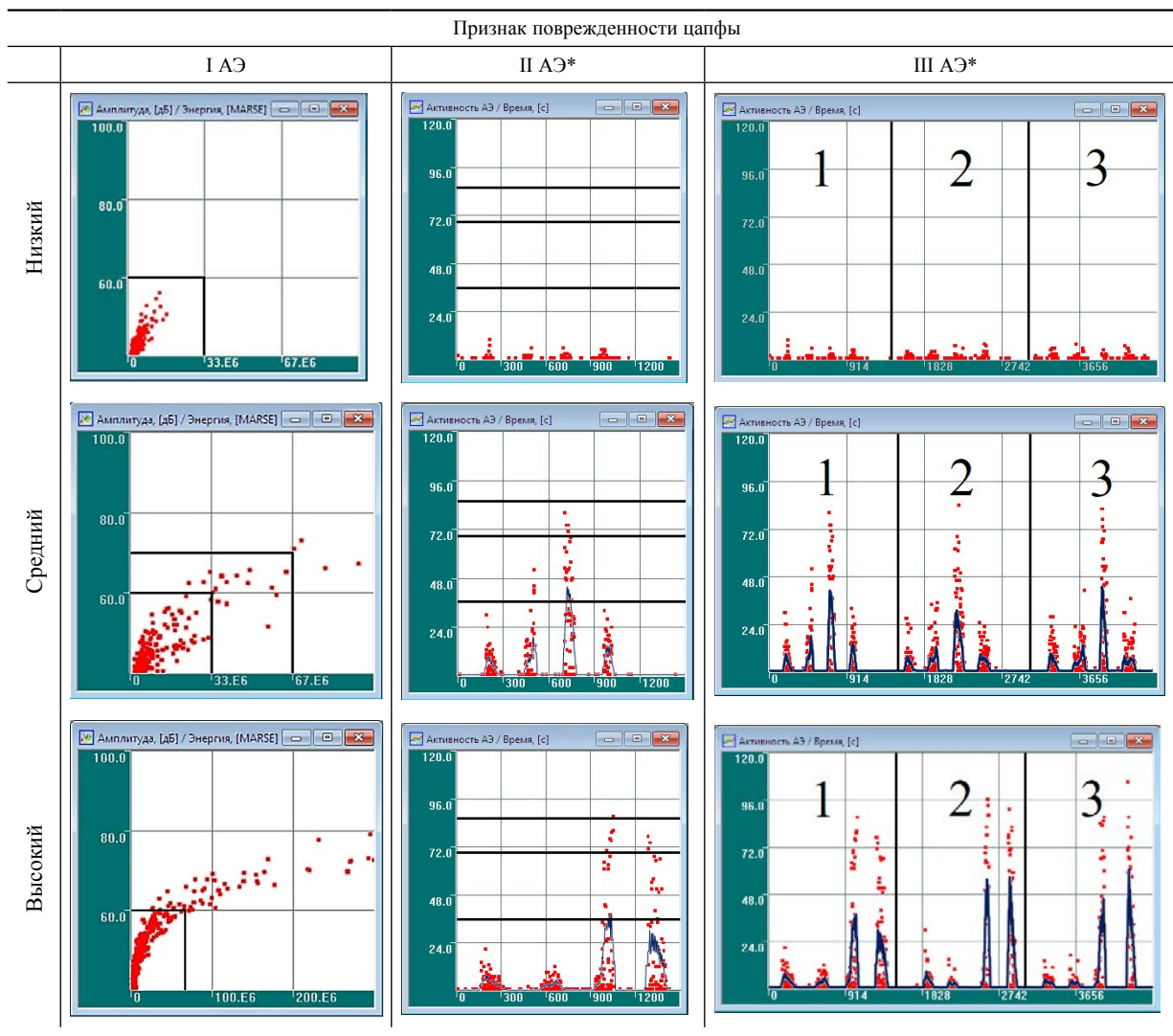
* — допускается не более 10 (десяти) импульсов, амплитудой выше 60 дБ, но не более 75 дБ;

** — допускается не более 5 (пяти) импульсов, амплитудой более 75 дБ, или MARSE более 6,7·10⁷ у.е.

На основании данных исследований разработана «Экспресс-методика оценки акустико-эмиссионной активности цапф сушильных цилиндров картоноделательных машин», зарегистрированная за № МАЭК-СЦКДМ-001-2019, которая при диагностике цапф сушильных цилиндров КДМ в капитальный ремонт 2018, 2019, 2021 и 2022 гг. показала следующие результаты. По методике в общей сложности за 56,4 ч затраченного времени на измерения АЭ в капитальный ремонт (8,3 ч в 2018 г.; 11,7 ч в 2019 г., 18,6 ч в 2021 г. и 17,8 ч в 2022 г.) было проконтролировано 264 цапфы (или 132 сушильных цилиндра) непосредственно на КДМ за 13 установок (1 установка = 1 развертывание / 1 контроль / 1 свертывание) системы АЭ (3 в 2018 г., 4 в 2019 г., 3 в 2021 г. и 3 в 2022 г.). Всего на КДМ 392 цапфы (196 цилиндров), т.е. за обозначенное время в прямом счете было обследовано 67,3 % цапф КДМ. Учитывая, что ежегодный плановый капитальный ремонт

Таблица 2

Пример результатов измерений, соответствующих низкой, средней и высокой поврежденности цапф на трех признаках оценки АЭ-данных



* — на рисунках черными горизонтальными линиями отделены предельные уровни АЭ-активности по табл. 1, а цифрами и вертикальными линиями — циклы нагружения (обороты цилиндра). Синие линии — вид кривых $\bar{a}_{\lambda}$, которые использовались для расчета R_1^2 и R_2^2 , и в данном случае имеют значения $R_1^2 < 0,06$, $R_2^2 > 0,49$ и $R_1^2 < 0,11$, $R_2^2 > 0,44$ соответственно для среднего и высокого уровня поврежденности. Нагружение осуществлялось по графику рис. 7.

КДМ составляет 7 дней (168 ч) то видно, что по данной методике реально провести контроль всех цапф КДМ за время останова. Однако это при прямом счете, а фактически за указанное время было проконтролировано 178 цапф, т.к. 86 из 264 цапф (43 сушильных цилиндра) контролировались каждый раз для сравнения и отслеживания динамики изменения технического состояния и признаков АЭ. Следует также выделить, что из-за необходимости разбора навесных элементов за это же время УЗ способом на прямом луче удалось проверить 112 цапф, из которых 107 лицевых (УЗ контроль возможен после снятия крышки подшипникового узла) и всего 5 приводных (доступных для УЗ контроля только после демонтажа паровой головки). Против 264 цапф (132 лицевых и приводных), проконтролированных методом АЭ. Таким образом, по производительности контроля предлагаемой АЭ-методикой относительно УЗ метода получаем двухкратное превосходство, из-за отсутствия необходимости демонтаж-монтажных работ и меньших трудозатрат на подготовку объекта к контролю. Многолетняя статистика позволила оценить достоверность предлагаемой АЭ-методики посредством сопоставления результатов измерений АЭ и УЗ, выпол-

Таблица 3

Матрица достоверности АЭ-методики оценки усталостной поврежденности материала цапф сушильных цилиндров

Метод контроля и оценка его результатов для всех объектов сравнения, $n_{\Sigma} = 91$ цапфа		Эталонный метод контроля дефекта в цапфах — ультразвуковой	
		Число эталонно годных цапф	Число эталонно негодных цапф
АЭ-контроль по МАЭК-СЦКДМ-001-2019	Число годных цапф	Дважды годные $n_{\Gamma} = 57$	Недобраковка $n_{\beta} = 11$
	Число негодных цапф	Перебраковка $n_{\alpha} = 15$	Дважды негодные $n_{\Pi} = 8$

ненных в одно и то же время. Оценка достоверности АЭ была проведена по рекомендациям [7]. Матрица достоверности методики АЭ представлена в табл. 3.

Из табл. 3 получаем: вероятность принятия безошибочного решения (достоверность АЭ-контроля): $D_{\text{АЭ}} = (n_{\Gamma} + n_{\Pi}) / n_{\Sigma} = 0,71$; вероятность пропуска дефекта $P_{\beta} = n_{\beta} / n_{\Sigma} = 0,12$ и вероятность перебраковки $P_{\alpha} = n_{\alpha} / n_{\Sigma} = 0,17$. Причиной достаточно высокого показателя перебраковки по нашему мнению является наличие у объекта контроля нескольких возможных параллельно действующих источников АЭ: повышенное трение и износ в подшипниковом узле, ослабление или обрыв болтов крепления цапф, заедание в зубчатой передаче, перекос установки сушильного цилиндра, наличие мусора в сушильном цилиндре и др. Однако их влияние на результат АЭ-измерений еще предстоит исследовать, как и вопрос возможности применения разработанной методики для параллельного выявления альтернативных причин (источников) выхода сушильных цилиндров из строя. Несмотря на вышесказанное, очевидно, что апробация реализованного в методике нового подхода подтвердила его работоспособность, а устранение или добавление в анализ АЭ-признаков вышеобозначенных дополнительных источников может быть осуществлено путем корректировки границ, установленных для параметров классификации. Поскольку, несмотря на трехуровневую процедуру формирования итогового вывода, сохраняется некоторая неопределенность АЭ-контроля, связанная с наличием других возможных акустических источников, в методике заложена обязательность подтверждения трещины УЗ контролем в случае установления высокой степени поврежденности цапфы, и рекомендуемым — при средней степени поврежденности.

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Экспериментально показано, что при циклическом законе нагружения вязкого материала с трещиной сигналы АЭ от трения ее берегов обнаруживаются более устойчиво, чем сигналы АЭ от скачка трещины при приращении ее длины, что определяет возможность обнаружения усталостных трещин даже в условиях нагружения, недостаточных для ее продвижения (роста).

2. Разработаны и апробированы три признака АЭ наличия усталостной поврежденности материала элементов динамического оборудования при условии циклической активации движения берегов трещины. Первый признак АЭ — классификационный, в двумерном пространстве «Амплитуда—MARSE», а второй и третий — логические, основанные на отслеживании повторяемости проявления АЭ в каждом цикле нагружения. Для цапф сушильных цилиндров картоноделательной машины установлены и уточнены граничные значения всех предложенных признаков АЭ.

3. Разработанная методика АЭ ранжирования цапф сушильных цилиндров картоноделательной машины по степени усталостной поврежденности их материала позволила повысить производительность оценки их технического состояния по сравнению с УЗ способом минимум в два раза при сокращении объема применения других методов неразрушающего контроля (контроль только забракованных методом АЭ цапф). Экспериментальная оценка достоверности предложенной методики АЭ относительно УЗ метода показала вероятность обнаружения усталостной трещины на уровне 71 %, при вероятности их пропуска и перебраковки изделия 12 и 17 % соответственно. Считаем, что полученные результаты и предложенная методика вполне могут быть применены для АЭ-контроля и ранжирования по усталостной поврежденности материала элементов массивного динамического оборудования другого типа: цапфы и роторы кристаллизаторов, роторы паровых турбин, шнеки, роторы перемешивающих устройств и т.д. Однако последнее подразумевает обязательность уточнения граничных значений, установленных признаков АЭ усталостной поврежденности материала по каждому типу оборудования.

Авторы благодарят к.ф.-м.н. Линдерова Михаила Николаевича за помощь в проведении испытаний на рост усталостной трещины и тепловые измерения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коряковская Н.В., Бедердинова О.И. Контроль и регулирование влажности бумажного полотна // Известия вузов. Лесной журнал. 2022. № 1. С. 188—204.
2. Ягуткин В.А., Илюшин В.В. Опыт восстановления цапф сушильных цилиндров методом наплавки // Леса России и хозяйство в них. 2013. № 1 (44). С. 195—198.
3. Сиваков В.П., Микушина В.Н. Диагностирование технического состояния сушильных цилиндров бумагоделательных машин по температуре // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 4. 8 с.
4. Сиваков В.П., Музыкантова В.И., Вихарев С.Н., Мишин С.А. Обоснование технического обслуживания оборудования целлюлозно-бумажного производства диагностированием // Известия вузов. Лесной журнал. 2009. № 3. С. 118—125.
5. Chen X., Wang S., Qiao B., Chen Q. Basic research on machinery fault diagnostics: Past, present, and future trends // Frontiers of Mechanical Engineering. 2018. No. 13. P. 264—291.
6. Kushwaha N., Patel V. N. Modelling and analysis of a cracked rotor: a review of the literature and its implications // Archive of Applied Mechanics. 2020. No. 90. P. 1215—1245.
7. Иванов В.И., Барат В.А. Акустико-эмиссионная диагностика. М.: Спектр, 2017. 368 с.
8. Буденков Г.А., Недзвецкая О.В. Динамические задачи теории упругости в приложении к проблемам акустического контроля и диагностики. М.: Издательство физико-математической литературы, 2004. 136 с.
9. Barat V., Marchenkov A., Ushanov S., Bardakov V., Elizarov S. Investigation of Acoustic Emission of Cracks in Rails under Loading Close to Operational // Applied Sciences. 2022. 12 (22). P.11670.
10. Carrasco A., Méndez F., Leaman F., Vicuña C. Short Review of the Use of Acoustic Emissions for Detection and Monitoring of Cracks // Acoustics Australia. 2021. No. 49. P. 273—280.
11. Keshtgar A., Sauerbrunn C. M., Modarres M. Structural Reliability Prediction Using Acoustic Emission-Based Modeling of Fatigue Crack Growth // Applied Sciences. 2018. No. 8. P. 1225.
12. Andreev K., Shetty N., Verstryng E. Acoustic emission based damage limits and their correlation with fatigue resistance of refractory masonry // Construction and Building Materials. 2018. No. 165. P. 639—646.
13. Elizarov S.V., Barat V.A., Terentyev D.A., Kostenko P.P., Bardakov V.V., Alyakritsky A.L., Koltsov V.G., Trofimov P.N. Acoustic Emission Monitoring of Industrial Facilities under Static and Cyclic Loading // Applied Sciences. 2018. No. 8. P. 1228.
14. Ono K. Structural Health Monitoring of Large Structures Using Acoustic Emission — Case Histories // Applied Sciences. 2019. 9 (21). 4602.
15. Sheriff K.A.I., Hariharan V., Kumar B.M. Review on condition monitoring of rotating machines // International journal of scientific and technology research. 2020. 9 (2). P. 2343—2346.
16. Sayar H., Azadi M., Alizadeh M. Detection of Crack Initiation and Propagation in Aluminum Alloy Under Tensile Loading, Comparing Signals Acquired by Acoustic Emission and Vibration Sensors // Journal of Nondestructive Evaluation. 2019. V. 38. P. 100.
17. Ibarra-Zarate D., Tamayo-Pazos O., Vallejo-Guevara A. Bearing fault diagnosis in rotating machinery based on cepstrum pre-whitening of vibration and acoustic emission // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019. 104. P. 4155—4168.
18. Дробот Ю.Б., Лазарев А.М. Неразрушающий контроль усталостных трещин акустико-эмиссионным методом. М.: Изд-во стандартов, 1987. 128 с.
19. Дробот Ю.Б., Лазарев А.М. Некоторые особенности сигналов акустической эмиссии от трения берегов трещин // Дефектоскопия. 1981. № 9. С. 6—10.
20. Lumb R., Wayne S., Qi G. Analysis of Fatigue Damage Information Obtained from Acoustic Emission Data // Data-Enabled Discovery and Applications. 2020. V. 4. P. 1.
21. Zhu X.-Y., Chen X.-D., Dai F. Mechanical Properties and Acoustic Emission Characteristics of the Bedrock of a Hydropower Station under Cyclic Triaxial Loading // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2020. No. 53. P. 5203—5221.
22. Carboni M., Crivelli D. An acoustic emission based structural health monitoring approach to damage development in solid railway axles // International Journal of Fatigue. 2020. V. 139. P. 105753.
23. Jiang P., Sun W., Li W., Wang H., Liu C. Extreme-Low-Speed Heavy Load Bearing Fault Diagnosis by Using Improved RepVGG and Acoustic Emission Signals // Sensors. 2023. V. 23. P. 3541.
24. Ma W., Shen H., Xu G. Study on cracks and process improvement for case hardened gear shaft straightening // Journal of Mechanical Science and Technology. 2022. V. 36 (6). P. 2861—2870.
25. Zhang X., Wang K., Wang Y., Shen Y., Hu H. Rail crack detection using acoustic emission technique by joint optimization noise clustering and time window feature detection // Applied Acoustics. 2020. V. 160. P. 107141.

26. Lazarev S., Mozgovoi A., Vinogradov A., Lazarev A., Shedov A. Electromagnetic method of elastic wave excitation for calibration of acoustic emission sensors and apparatus // *Journal of Acoustic Emission*. 2009. No. 27. P. 212—223.
27. Iziumova A.Y., Vshivkov A.N., Prokhorov A.E., Panteleev I.A., Mubassarova V.A., Plekhov O.A., Linderov M.L., Merson D.L., Vinogradov A.Yu. Heat dissipation and acoustic emission features of titanium alloys in cyclic deformation mode // *Acta Mechanica*. 2021. V. 232 (5). P. 1853—1861.
28. Bekher S.A., Popkov A.A. Applying impact loading for revealing cracks in glass by acoustic emission method // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2018. V. 54 (11). P. 741—747.
29. Бехер С.А., Попков А.А. Временные характеристики потока сигналов акустической эмиссии при развитии трещин в стекле при ударном нагружении // *Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова*. 2019. Т. 22 (1). С. 62—71.
30. Chen Y., Gou B., Yuan B., Ding X., Sun J., Salje E.K.H. Multiple Avalanche Processes in Acoustic Emission Spectroscopy: Multibranching of the Energy-Amplitude Scaling // *Physica Status Solidi*. B. 2022. V. 259 (3). P. 2100465.
31. Kamel S.M., Samy N.M., Tóth L.Z., Daróczy L., Beke D.L. Denouement of the Energy-Amplitude and Size-Amplitude Enigma for Acoustic-Emission Investigations of Materials // *Materials*. 2022. V. 15. P. 4556.
32. Rastegaev I.A., Merson D.L., Rastegaeva I.I., Vinogradov A.Yu. A time-frequency based approach for acoustic emission assessment of sliding wear // *Lubricants*. 2020. V. 8. No. 5. P. 52.
-

РАЗРАБОТКА ЭМПИРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСЧЕТА СТЕПЕНИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПОТОКА ИМПУЛЬСОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

© 2023 г. А.Ю. Марченков¹, И.Е. Васильев^{2,*}, Д.В. Чернов^{2,*}, Д.А. Жгут¹, А.А. Панькина¹,
Т.Ю. Ковалева¹, Е.А. Куликова¹

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Россия 111250 Москва, ул. Красноказарменная, 14

²Институт машиноведения имени А.А. Благонравова РАН (ИМАШ РАН),
Россия 101000 Москва, Малый Харитоньевский пер., 4
E-mail: *chernovdv@inbox.ru

Поступила в редакцию 05.06.2023; после доработки 08.07.2023
Принять к публикации 21.07.2023

Использование метода акустической эмиссии (АЭ) для мониторинга состояния повреждений изделий из конструкционных сталей и сплавов на стадиях неупругого и предельного деформирования является целью работы. Исследованы потенциальные возможности применения стандартных потоковых параметров акустических сигналов, регистрируемых на стадиях неупругого и предельного деформирования, для оценки состояния поврежденности стального образца. Показано, что такие параметры, как максимальная амплитуда регистрируемых импульсов и их активность АЭ, не имеют четкой взаимосвязи со степенью поврежденности конструкционного материала. Это затрудняет применение стандартных методик для оценки степени поврежденности конструкционных сталей. Показана возможность мониторинга состояния поврежденности структуры стали 30ХГСА на стадиях неупругого и предельного по изменению парциальной активности весового содержания высокоэнергетических импульсов АЭ. Для разделения процессов вязкого и хрупкого разрушения использован критерий Колмогорова—Смирнова.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, испытание на растяжение, конструкционная сталь, неразрушающий контроль, оценка поврежденности, распространение трещины, статистический критерий.

DEVELOPMENT OF AN EMPIRICAL MODEL FOR DAMAGE DEGREE ASSESSMENT OF STEEL SPECIMENS BASED ON THE RESULTS OF ACOUSTIC EMISSION SIGNAL FLOW STATISTICAL PROCESSING

© 2023 A.Yu. Marchenkov¹, I.E. Vasiliev^{2,*}, D.V. Chernov^{2,*}, D.A. Zhgut¹, A.A. Pankina¹,
T.Yu. Kovaleva¹, E.A. Kulikova¹

¹National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
Krasnokazarmennaya, st., 14, Moscow, 111250, Russia

²Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences
Maly Kharitonyevsky ave., 4, Moscow, 101990, Russia

The study is devoted to acoustic emission (AE) method application for monitoring the state of structural materials at the inelastic and ultimate deformation stages. The possibilities of using the standard AE signal parameters recorded at the inelastic and ultimate deformation stages to assess the damage degree of steel specimens were investigated. It was shown that such parameters as the maximum amplitude of the recorded AE signals and their AE activity did not have a clear correlation with the damage degree of products made of structural steel and alloys. This makes it difficult to apply standard methods for assessing the damage degree of structural steels. The feasibility of monitoring the state of damage of 30KhGSA alloyed steel at the inelastic and ultimate stages by the evaluation of partial activity of the high-energy AE signals weight content was presented. The Kolmogorov-Smirnov criterion was used to separate the processes of ductile and brittle fracture.

Keywords: acoustic emission, tensile testing, structural steel, non-destructive testing, damage assessment, crack propagation, statistical criterion.

DOI: 10.31857/S0130308223090026, EDN: EAYYUE

ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее актуальных задач технической диагностики является определение степени поврежденности конструкционного материала в процессе эксплуатации высоконагруженных элементов изделий и технических систем. Для оценки состояния поврежденности материала образцов

и конструкций используют как системы периодического контроля, включающие ультразвуковой, вихретоковый и магнитный контроль, так и системы мониторинга, в том числе вибродиагностику, корреляцию цифровых изображений, акустическую эмиссию.

Как показали многочисленные экспериментальные исследования [1—8], для выявления развивающихся дефектов и повреждений в диагностируемых объектах на стадиях неупругого и предельного состояния конструкционного материала наиболее информативным является метод АЭ, который основан на регистрации преобразователями акустической эмиссии (ПАЭ) импульсов необратимых смещений среды, возникающих в результате динамической перестройки структуры материала [1, 2]. Каждое нарушение структурных связей конструкционного материала генерирует импульсы АЭ, характеризующиеся их формой и спектром, которые отражают энергетические и темпоральные параметры произошедшего разрушения [3]. Экспериментально устанавливая соответствие между поверхностью микро-, мезо- и макроразрушений структурных связей и энергией генерируемых при этом импульсов на стадиях упругого, неупругого и предельного состояния, получаем возможность контролировать кинетику повреждений в структуре конструкционного материала на разных масштабных уровнях [4—6].

К первичным параметрам, регистрируемым системой АЭ и используемым для оценки повреждаемости конструкционного материала, относят накопление каналами АЭ-системы локационных импульсов (N_Σ), их активность ($\dot{N}$), распределение максимальной амплитуды (u_m), длительности (t_n), числа выбросов (N_n) локационных импульсов. На их основе были получены наиболее информативные комбинированные параметры, характеризующие распределение относительной энергии импульсов (E_n), усредненной частоты выбросов (N_n/t_n), крутизны затухания амплитуды (u_m/N_n), парциальной активности ($\dot{N}_i$) и весового содержания (W_i) локационных импульсов в энергетических кластерах нижнего, среднего и верхнего уровня, отражающие состояние микро-, мезо- и макроповреждений в структуре конструкционного материала [4—6]. Контролируя динамику изменения этих параметров для массивов, регистрируемых в процессе АЭ диагностики локационных импульсов, определяют текущее состояние конструкционного материала в зонах накопления повреждений.

Помимо указанного известны и другие способы, использующие при проведении АЭ-диагностики для оценки степени поврежденности материала изделий различные комбинации потоковых параметров регистрируемых импульсов [1—3, 6—12]. Согласно континуальной теории Качанова—Работнова [13] под степенью поврежденности конструкционного материала понимается соотношение площади разрушения эффективного сечения изделия к площади начального бездефектного состояния.

Хорошо известно [13—18], что при нагружении изделий из высокопрочных конструкционных сталей процесс разрушения прежде всего начинается в зонах концентрации напряжений, где уже на стадии упругого деформирования материала активизируются локальные и точечные структурные дефекты, зарождаются и развиваются усталостные трещины. При упругопластическом деформировании материала движение дислокаций вдоль кристаллографических плоскостей приводит к образованию полос скольжения. На стадии развитой пластической деформации при $\varepsilon \geq 3\text{—}5\%$, возникает фрагментация структуры, обусловленная исчерпанием возможности дальнейшей аккомодации системы перераспределять возрастающие напряжения в зернах и блоках за счет уплотнения концентрации дислокаций и образования деклинаций вдоль их границ [16—18]. При этом элементы образующейся субструктуры подвергаются трансляционным, сдвиговым и поворотным модам воздействия, определяющих их ориентацию в структуре металла. Все изменения их положения взаимосвязаны и направлены на снижение внутренней энергии в материале конструкции.

На рис. 1 показан процесс фрагментации структуры аустенитной стали 08X18H10T на стадиях упругопластического (а), пластического (б), вязкого (в) и предельного (г) деформирования материала.

Если на снимке рис. 1а отсутствует какие-либо дислокационные полосы и заметные признаки фрагментации структуры материала, то на следующих снимках рис. 1б—г они явно просматриваются. На снимке рис. 1б наряду с полосами скольжения четко различимы блоки и зерна начала процесса фрагментации структуры материала. Снимки рис. 1в, г отображают эволюцию структуры материала на стадии вязкого и предельного состояния, характеризующую дальнейшую ее фрагментацией, возникновением и развитием микротрещин по границам блоков и зерен, их слиянием и образованием мезо- и макромасштабных трещин.

Различные по своей природе механизмы фрагментации структуры материала генерируют заметно отличающиеся по своим энергетическим и темпоральным параметрам импульсы АЭ.

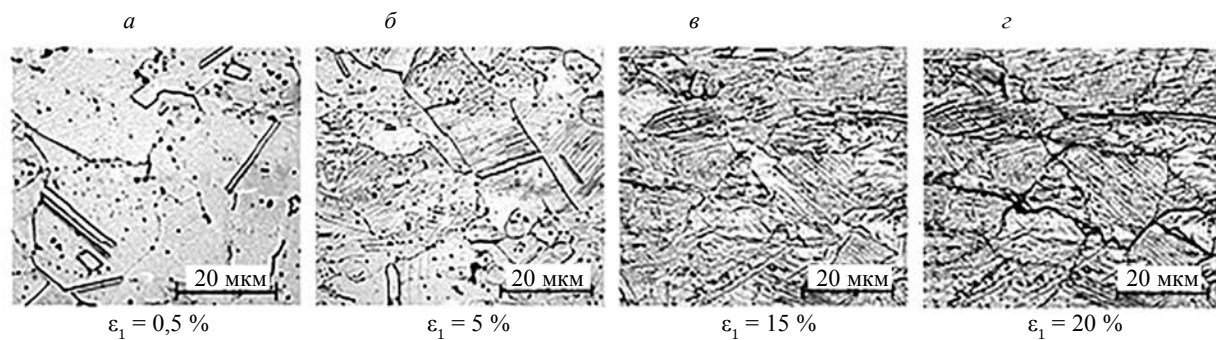


Рис. 1. Фрагментация структуры аустенитной стали 08X18H10T на стадиях: упругопластического (а), пластического (б), вязкого (в) и предельного (г) деформирования материала.

Причем, как правило, количество импульсов, генерируемых сдвиговыми процессами, сопровождаемых движением дислокаций или локальным изменением ориентации структурных элементов от действия приложенной нагрузки в разы больше, чем при разрыве или сколе кристаллической структуры, тогда как их энергия заметно ниже выделяемой в результате хрупкого разрушения. Настоящая работа посвящена выбору наиболее информативных потоковых параметров локационных импульсов, которые были бы наиболее эффективны для мониторинга состояния поврежденности высокопрочных конструкционных сталей на стадиях неупругих и предельных деформаций.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводили на образцах из мартенситной стали 30ХГСА с габаритными размерами 400×20×6 мм. В средней части образцов с боковой стороны выполнялся боковой надрез, форма и основные размеры которого показаны на рис. 2а.

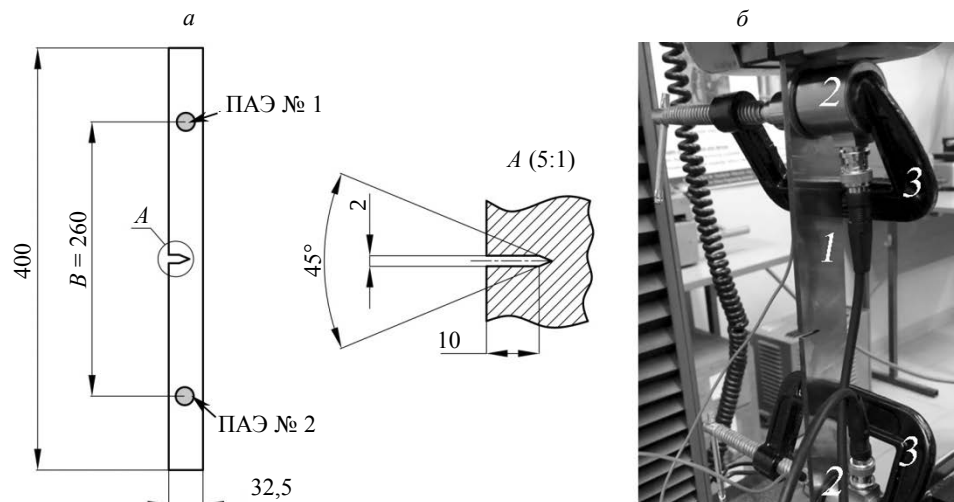


Рис. 2. Форма и основные размеры образцов с боковым надрезом, испытанных на разрыв (а) на стенде Instron 5982 (б): 1 — образец; 2 — преобразователи АЭ VS150-RIC; 3 — струбцины.

При испытаниях образцы закрепляли в захваты универсальной испытательной машины Instron 5982 (рис. 2б), на боковую поверхность которых через слой контактной смазки устанавливали ПАЭ на расстоянии 130 мм по обе стороны от надреза. В качестве ПАЭ использовали квазирезонансные интегральные датчики VS150-RIC производства фирмы Vallen (ФРГ) с встроенным преусилителем. Регистрация импульсов АЭ, возникающих в процессе растяжения стальных образцов, осуществлялась с помощью системы сбора и обработки данных АЭ Vallen AMSY-5 (ФРГ).

Перед проведением испытаний на тестовых образцах определялись оптимальные параметры настройки аппаратуры Vallen AMSY-5, включающие выбор порога дискриминации сигналов, составившего $u_{th} = 36$ дБ, и полосу пропускания цифровых фильтров, выбранной равной $\Delta f = 95\text{—}850$ кГц. Расчетная скорость распространения импульсов АЭ (V_g), определенная в ходе тестовых испытаний при размере зоны локации $B = 260$ мм, составила 3300 м/с. При испытаниях образцов скорость перемещения активной траверсы нагружающего стенда составляла 2 мм/мин.

После определения параметров измерительной аппаратуры проводили испытания основной партии образцов с регистрацией сигналов АЭ. Методология, используемая при обработке потоков импульсов АЭ, регистрируемых в процессе статического растяжения стального образца до разрушения, включала в себя совместное применение моделей механики разрушения, цифровой обработки сигналов и статистического анализа.

В настоящей работе с целью оценки степени поврежденности высокопрочной мартенситной стали 30ХГСА использована парциальная активность высокоэнергетических импульсов АЭ, отражающая процесс хрупкой фрагментации структуры материала, в зависимости от уровня соотношения $j = \varepsilon/\varepsilon_B$, характеризующего значение текущей деформации стального образца к предельной, регистрируемой при его разрушении.

ОПИСАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для демонстрации характера распределения параметров сигналов АЭ, регистрируемых в процессе растяжения образца, на рис. 3 показана динамика изменения максимальной амплитуды (u_m) и активности ($\dot{N}$) локационных импульсов в процессе повышения нагрузки (P).

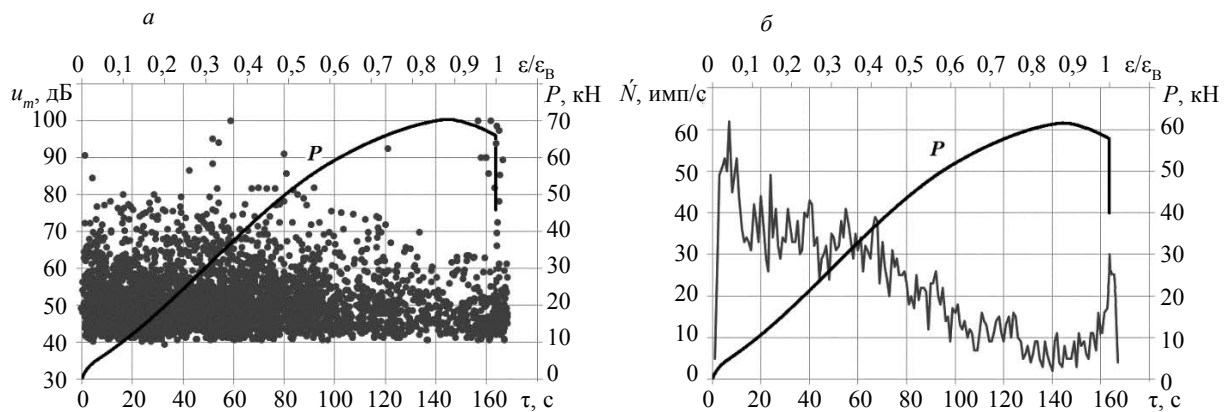


Рис. 3. Динамика изменения амплитуды u_m (а) и активности $\dot{N}$ (б) локационных импульсов, зарегистрированная при испытании образца из стали 30ХГСА на разрыв в ходе повышении уровня $j = \varepsilon/\varepsilon_B$ от 0 до 1.

Анализ приведенных на графиках рис. 3 потоковых АЭ-данных, зарегистрированных при испытаниях стального образца на разрыв, свидетельствует о сложности определения состояния поврежденности конструкционного материала на стадии неупругого деформирования материала. На начальном этапе нагружения стального образца ($\tau \leq 10$ с; $j \leq 0,06$) был зарегистрирован поток высокоамплитудных импульсов АЭ, активность которых достигала 62 имп/с, что характерно для процесса срабатывания рассеянных дефектов на стадии упругого деформирования материала. Дальнейшее повышение приложенной нагрузки в течение $\tau = 10\text{—}120$ с при $j = 0,06\text{—}0,70$ сопровождается «in situ» локализацией процесса неупругих деформаций, снижением амплитуды и активности импульсов АЭ соответственно до значений $u_m = 75$ дБ и $\dot{N} = 17$ имп/с. В период $\tau = 120\text{—}160$ с при $j = 0,7\text{—}0,93$ возникает состояние «акустического затишья» [19], при котором заметно снижается уровень максимальной амплитуды и активности регистрируемых импульсов: $u_m \leq 63$ дБ и $\dot{N} \leq 10$ имп/с. При достижении образцом предельного состояния в период $\tau = 160\text{—}172$ с при $j = 0,93\text{—}1,0$ регистрируют отдельные импульсы с уровнем амплитуды близким к $u_m = 100$ дБ. При этом активность АЭ в момент разрушения не превышала $\dot{N} \leq 25$ имп/с, что

в 2,5 раза было меньше, чем на стадии упругого деформирования образца. Как следует из проведенного анализа, потоковые параметры максимальной амплитуды $u_m(\tau)$ и активности $\dot{N}(\tau)$ регистрируемых импульсов не позволяют корректно оценить состояние поврежденности стали 30ХГСА в зоне концентратора на стадии неупругого деформирования образца.

Для решения поставленной задачи предлагается разделить поток регистрируемых импульсов на сигналы АЭ, свойственные природе вязкого и хрупкого механизмов разрушения структуры материала. Как показали проведенные исследования, такое разделение можно получить, анализируя статистические характеристики распределения энергетических параметров регистрируемых импульсов, в частности энергии переднего фронта, вычисляемой по формуле:

$$E_f = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{u_{\text{мкВ}} \cdot t_f}{1 \text{ мкВ} \cdot 1 \text{ мкс}} \right), \quad (1)$$

где $u_{\text{мкВ}}$ — амплитуда импульса АЭ в мкВ; t_f — время нарастания импульса АЭ.

Статистическая селекция потокового параметра (1) в регистрируемых выборках импульсов АЭ на кластеры нижнего и верхнего энергетического уровня, отражающие процессы вязкого и хрупкого разрушения структуры материала, осуществлялась с использованием критерия Колмогорова—Смирнова. Расчет эмпирической функции распределения (F_w^*) проводился для скользящего окна размером $W = 100$ импульсов [20] по формуле:

$$F_w^*(y) = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^W I(X_i < y), \quad (2)$$

W — размер выборки оконной функции; I — количество данных АЭ, отвечающих условию $X_i < y$; X_i — значение параметра из выборки $X = (X_1, \dots, X_p, \dots, X_W)$; y — пороговое значение параметра в диапазоне $y \in [X_{\min}, \dots, X_{\max}]$.

Для выявления момента разладки потока регистрируемых импульсов, генерируемых разными по своей природе источниками АЭ, применялся двухвыборочный критерий Колмогорова—Смирнова [20], основанный на сопоставлении двух эмпирических функций распределения:

$$D_w = \sup |F_w^i(y) - F_w^{i-1}(y)|, \quad (3)$$

D_w — максимальная разность между эмпирическими функциями распределения параметров АЭ, рассчитанными на $(i-1)$ и i шаге смещения скользящего окна размером W .

Значения вычисляемых статистик свидетельствуют о схожести или различии сопоставляемых эмпирических функций в скользящем окне W . В случае схожести распределения эмпирических функций, значение параметра D_w близко к нулю. Для определения степени схожести регистрируемых выборок вычисляется значение критерия λ_α :

$$\lambda_\alpha = D_w \cdot \sqrt{\frac{W}{2}} > \lambda_{\text{кр}}, \quad (4)$$

$\alpha = 0,1$ — уровень значимости критерия при анализе сравниваемых выборок; $\lambda_{\text{кр}}$ — критическое значение критерия для выбранного уровня значимости.

Если значение λ_α больше критического, то нулевая гипотеза отвергается, а сравниваемые выборки по рассмотренному признаку отличаются существенно. Вероятность того, что λ_α примет значение большее или равное $\lambda_{\text{кр}}$, определялось по вероятностному параметру K_α с использованием табличных данных [21].

При разладке параметров потока регистрируемых импульсов, возникающей при их генерации от разных по природе источников АЭ, уровень вероятностного критерия K_α возрастает. Это позволяет разделить поток импульсов АЭ на два характерных процесса, генерируемых в процессе динамической перестройки структуры материала на всех масштабных уровнях в результате вязкого разрушения с низкой энергией и хрупкого с более высоким уровнем энергии переднего фронта сигналов.

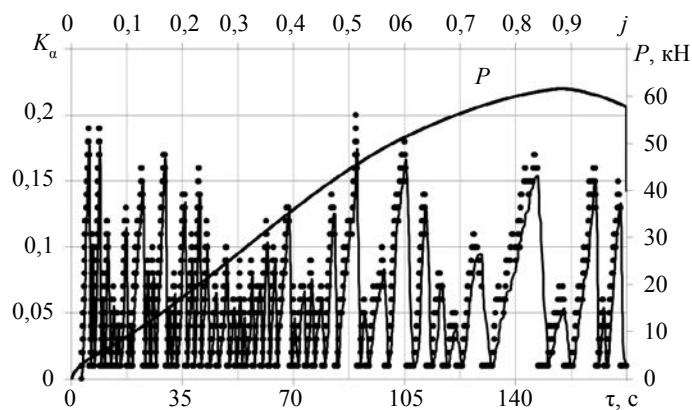


Рис. 4. Применением критерия Колмогорова—Смирнова для разделения импульсов АЭ, зарегистрированных при испытаниях образца на разрыв.

На рис. 4 приведены значения вероятностной статистики K_α , описывающей схожесть эмпирической функции распределения $F_w^{i+1}(y)$ и тестовой выборки $F_w^i(y)$ в скользящем окне W при повышении уровня $j = \varepsilon/\varepsilon_B$ от 0 до 1. Величина вероятностной статистики K_α , определяемая в диапазоне $j = 0—1$, изменялась от $K_\alpha = 0,01$ до $K_\alpha = 0,2$.

Как видно из графика рис. 4, активность регистрации выборок локальных импульсов после 80 с нагружения заметно падала с ростом нагрузки, что характерно для стадии предразрушения конструкционных материалов [19]. Максимальный уровень разладки потоковых параметров был зарегистрирован при $j = 0,51$, когда значение вероятностной статистики достигало $K_\alpha = 0,2$. При этом минимальный уровень разладки потока соответствовал значению вероятностной статистики $K_\alpha = 0,01$. Пилообразная форма функции $K_\alpha(\tau)$ обусловлена периодичностью возникновения стадий вязкого и хрупкого разрушения с низкой и высокой энергией переднего фронта импульсов.

Для пояснения предложенной методики на рис. 5 рассмотрены моменты времени $\tau_1 = 16,5$ с и $\tau_2 = 18,4$ с и свойственные им изменения значений нижнего ($p = 0,25$) и верхнего ($p = 0,75$) квартилей эмпирической функции распределения потокового параметра E_f .

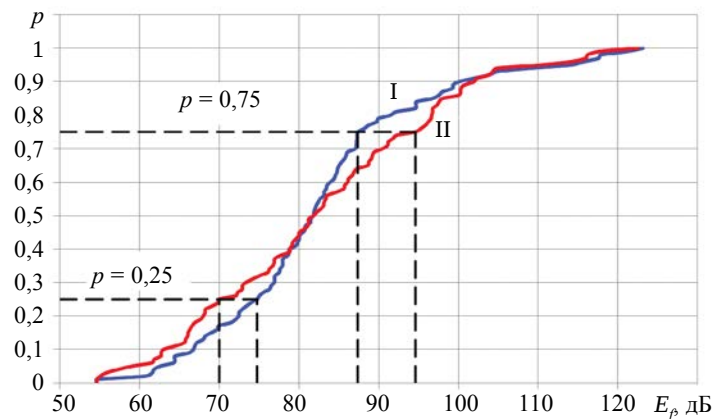


Рис. 5. Эмпирические функции распределения энергий переднего фронта импульсов АЭ, регистрируемые в моменты времени $\tau = 16,5$ с (I) и $\tau = 18,4$ с (II).

По мере повышения нагрузки значение потокового параметра E_f заметно возрастает. В выборке, регистрируемой на $\tau_2 = 18,4$ с испытания, отмечается заметное увеличение парциальной активности высокоэнергетических импульсов, значение параметра E_f верхнего квартиля которых возрастает до 95 дБ (график II на рис. 5), что отражает рост парциальной активности хрупкого раз-

рушения материала. Особенно это проявляется на стадиях вязкого и предельного деформирования материала, когда происходит активная фрагментация структуры, зарождение и подрастание доминантной трещины.

В качестве параметра, характеризующего степень повреждения конструкционного материала, было выбрано значение парциальной активности ($\dot{N}_W = N_{(Ef \geq 80 \text{ дБ})}/W$) высокоэнергетических импульсов АЭ регистрируемой выборки в размере скользящего окна W .

На рис. 6 представлена корреляционная зависимость парциальной активности ($\dot{N}_W$) высокоэнергетических импульсов АЭ, отражающая хрупкую составляющую разрушения стали 30ХГСА, в зависимости от уровня параметра $j = \varepsilon/\varepsilon_B$.

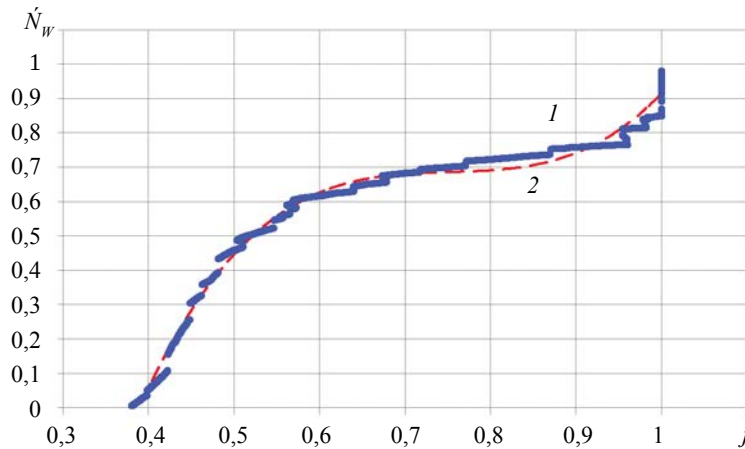


Рис. 6. Динамика изменения парциальной активности ($\dot{N}_W$) импульсов АЭ, отражающая хрупкую составляющую разрушения структуры стали 30ХГСА, в зависимости от уровня деформирования образца при растяжении $j = \varepsilon/\varepsilon_B$: 1 — экспериментальные данные; 2 — аппроксимация полиномом 3-й степени.

Как следует из рис. 6, в ходе нагружения образцов корректное разделение потока импульсов АЭ на два характерных процесса с использованием предложенной методики стало возможным только при уровне деформирования $j \geq 0,37$. На стадии упругопластического деформирования регистрировалась высокая активность локальных максимумов функции K_a , что затруднило разделение потока на импульсы, генерируемые процессами вязкой и хрупкого разрушения структуры мартенситной стали 30ХГСА.

Пунктирной линией на рис. 6 представлен результат аппроксимации экспериментальных данных с помощью дробно-рациональной функции:

$$\dot{N}_W(j) = \frac{0,37 \cdot j^3 - 0,11 \cdot j^2 - 0,39 \cdot j + 0,22}{j^2 - 1,48 \cdot j + 0,57}. \quad (5)$$

Высокая точность результатов аппроксимации подтверждается значением коэффициента детерминации $R^2 = 0,997$, близким к единице и уровнем приведенной погрешности, не превышаю-

щим: $\gamma = \frac{\left| j - \dot{N}_W \right|}{\max \left(\dot{N}_W \right)} = 6,72 \%$. Выявление корреляционной зависимости между парциальной

активностью высокоэнергетических импульсов, регистрируемых на стадиях неупругого и предельного состояния материала, и величиной параметра $j = \varepsilon/\varepsilon_B$, отражающей степень деформирования материала, позволило с высокой степенью достоверности контролировать уровень его поврежденности в зоне развивающейся трещины при испытаниях на разрыв образцов стали 30ХГСА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для решения рассмотренной в работе задачи выполнена серия экспериментальных исследований, включающих регистрацию и статистический анализ полученных массивов данных АЭ при испытаниях стальных образцов с боковым надрезом на разрыв.

1. По результатам анализа потоковых параметров амплитуды и активности регистрируемых импульсов АЭ были определены основные закономерности их распределения в процессе нагружения образцов. Установлено, что регистрируемые потоковые параметры $u_m(\tau)$ и $N(\tau)$ не позволяют корректно оценить состояние поврежденности материала.

2. Как показали результаты проведенного исследования, параметр энергии переднего фронта E_f импульсов АЭ может быть эффективным инструментом для разделения эволюции разрушения мартенситной стали 30ХГСА на периоды активизации вязкого и хрупкого процессов повреждения структуры материала. Для их разделения предложена методика выявления момента разладки потока импульсов АЭ, использующая статистический критерий Колмогорова—Смирнова (K_a). В результате расчета статистического критерия были определены локальные максимумы функции $K_a(\tau)$ в процессе деформирования образцов при повышении уровня $\varepsilon/\varepsilon_B \geq 0,37$.

3. Для количественной оценки степени поврежденности образцов из стали 30ХГСА использована корреляционная зависимость парциальной активности $\dot{N}_w$ высокоэнергетических импульсов от параметра $j = \varepsilon/\varepsilon_B$, отражающего уровень достижения предельного состояния материала. Как следует из рис. 6, статистический анализ экспериментальных данных достаточно точно отображает аналитическая зависимость $\dot{N}_w(j)$, о чем свидетельствует коэффициент детерминации $R^2 = 0,988$ при $j \geq 0,37$.

Дальнейшим шагом развития разработанной методики является расширение диапазона j с целью мониторинга состояния поврежденности материала на ранней стадии упругопластического деформирования. Для решения поставленной задачи планируется применение искусственных нейронных сетей, для обучения которых предлагается использовать не только энергетические, но и спектральные характеристики потока регистрируемых импульсов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-79-00232).

Результаты экспериментальных исследований получены с использованием оборудования, предоставленного центром коллективного пользования «Научные технологии создания машин будущего» Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pollock A. Acoustic emission testing. Metals handbook / Edited by. Adrian Pollock. 9 edition. AST International. 1989. V.17. P. 278—294.
2. Иванов В.И., Баран В.А. Акустико-эмиссионная диагностика. М.: «Спектр», 2017. 368 с.
3. Makhutov N.A., Ivanov V.I., Sokolova A.G., Vasil'ev I.E., Chernov D.V., Skvortsov D.F., Bubnov M.A. Monitoring composite fiber failure using acoustic emission system, vibration analyzer, and high-speed video recording // Russ. J. Nondestr. Test. 2020. V. 56. No. 12. P. 960—970.
4. Makhutov N.A., Matvienko Y.G., Vasil'ev I.E., Chernov D.V., Ivanov V.I. Rupture tests of reinforcing fibers and a unidirectional laminate using acoustic emissions // Instruments and Experimental Techniques. 2022. T. 65. № 2. C. 305—313.
5. Matvienko Y.G., Vasil'ev I.E., Chernov D.V. Damage and failure of unidirectional laminate by acoustic emission combined with video recording // Acta Mechanica. 2021.
6. Makhutov N.A., Vasiliev I.E., Chernov D.V., Ivanov V.I., Terent'ev E.V. Adaptation of Methodology for Monitoring Damage Kinetics and Assessing Load-Bearing Capacity in Relation to Steel Products // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2022. V. 58. No. 9. P. 800—813. DOI: 10.1134/S1061830922090078
7. Lukonge A., Cao X. Leak detection system for long-distance onshore and offshore gas pipeline using acoustic emission technology. A review // Trans. Indian Inst. Met. 2020. V. 73. P. 1715—1727.
8. Acoustic emission monitoring of corrosion in steel pipes using Lamb-type helical waves. <https://doi.org/10.1177/14759217221105644>
9. Shehadeh M., Osman A., Elbatran A.A., Steel J., Reuben R. Experimental Investigation Using Acoustic Emission Technique for Quasi-Static Cracks in Steel Pipes // Assessment. Machines. 2021. V. 9. P. 73. <https://doi.org/10.3390/machines9040073>
10. Louda P., Sharko A., Stepanchikov D. An Acoustic Emission Method for Assessing the Degree of Degradation of Mechanical Properties and Residual Life of Metal Structures under Complex Dynamic Deformation Stresses // Materials. 2021. V. 14. P. 2090.
11. Uhlmann E., Holznagel T., Clemens R. Practical Approaches for Acoustic Emission Attenuation Modelling to Enable the Process Monitoring of CFRP Machining // J. Manuf. Mater. Process. 2022. No. 6. P. 118. <https://doi.org/10.3390/jmmp6050118>

12. Li P., Zhang W., Ye Z., Wang Y., Yang S., Wang L. Analysis of Acoustic Emission Energy from Reinforced Concrete Sewage Pipeline under Full-Scale Loading Test // Appl. Sci. 2022. V. 12. P. 8624. <https://doi.org/10.3390/app12178624>
13. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 2014. 752 с.
14. Москвичев В.В., Махутов Н.А., Шокин Ю.И., Лепихин А.М., Анискович Е.В., Буров А.Е., Гадегинин М.М., Готовко С.А., Доронин С.В., Кашибский Н.И., Москвичев Е.В., Москвичева Л.Ф., Рейзмунт Е.М., Суходоева Н.В., Федорова Е.Н., Филиппова Ю.Ф., Чабан Е.А., Черняев А.П., Чернякова Н.А. Прикладные задачи конструкционной прочности и механики разрушения технических систем. Новосибирск: Наука, 2021. 796 с.
15. Заводчинская Э.Б. Общие закономерности и критерии разрушения твердых тел на разных масштабных уровнях при длительном нагружении (Обобщающая статья) // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. № 7. С. 48—62. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-7-48-62>
16. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. М.: Металлургия, 1986. 224с.
17. Панин В.Е., Лихачев В.А., Гриняев Ю.В. Субструктурные уровни деформации твердых тел. Новосибирск: Наука, 1985. 226 с.
18. Сарафанов Г.Ф., Перевезенцев В.Н. Закономерности деформационного измельчения структуры металлов и сплавов. Нижний Новгород: «Новые многофункциональные материалы и нанотехнологии», 2007. 96 с.
19. Tyutin M.R., Botvina L.R., Levin V.P., Beletskii E.N., Sinev I.O., Petersen T.B. Kinetics of damage accumulation in a D16CH alloy during static loading // Russian Metallurgy (Metally). 2022. V. 2022. No. 4. P. 444—451.
20. Лагутин М.Б. Наглядная математическая статистика. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2009. 472 с.
21. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. М.: Наука, 1983. 416 с.

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЦФА-ИЗОБРАЖЕНИЯ ЗА СЧЕТ КОРРЕКЦИИ «ПАЗАРИТНЫХ» ЗАДЕРЖЕК МЕЖДУ ЭЛЕМЕНТАМИ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

© 2023 г. Е.Г. Базулин^{1,*}

¹ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+»,
Россия 123458 Москва, ул. Твардовского, 8, Технопарк «Строгино»
E-mail: *bazulin@echoplus.ru

Поступила в редакцию 18.07.2023; после доработки 25.07.2023
Принята к публикации 25.07.2023

Если между элементами антенной решетки существует разброс «паразитных» задержек, больше одной четвертой периода несущей частоты, то качество изображения отражателей, восстановленного методом цифровой фокусировки антенной (ЦФА), из-за неоптимальной фокусировки ухудшится. В статье предложен способ учета влияния «паразитных» задержек между элементами антенной решетки при восстановлении ЦФА-изображения. Его применение позволило повысить фронтальную разрешающую способность ЦФА-изображения отражателей примерно в два раза при использовании некачественной антенной решетки с диапазоном разброса «паразитных» задержек в один период. Приведены ЦФА-изображения, восстановленные с учетом когерентного фактора.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль (УЗК), Full Matrix Capture (FMC), Total Focusing Method (TFM), Coherence Factor (CF), цифровая фокусировка антенной (ЦФА).

IMPROVEMENT OF TFM-IMAGE QUALITY DUE TO CORRECTION OF “PARASITIC” DELAYS BETWEEN ANTENNA ARRAY ELEMENTS

© 2023 E.G. Bazulin^{1,*}

¹LLC «ECHO+ Research and Production Center»
Strogino Technopark, Tvardovsky str., 8, Moscow, 123458, Russia
E-mail: *bazulin@echoplus.ru

If there is a spread of “parasitic” delays between the elements of the antenna array, more than one fourth of the carrier frequency period, the quality of the reflector image reconstructed by the digital antenna focusing (DAF) method will deteriorate due to non-optimal focusing. The paper proposes a method to take into account the influence of “parasitic” delays between antenna array elements during DFA image reconstruction. Its application allowed to increase the frontal resolving ability of the CFA-image of reflectors approximately twice when using a low-quality antenna array with a range of “parasitic” delays in one period. CFA-images reconstructed taking into account the coherent factor are presented.

Keywords: ultrasonic inspection (US NDT), Full Matrix Capture (FMC), Total Focusing Method (TFM), Coherence Factor (CF), digital antenna focusing (DFA).

DOI: 10.31857/S0130308223090038, EDN: EBAGAW

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при проведении ультразвукового контроля с применением пьезоэлектрических антенных решеток широко используются две технологии восстановления изображения отражателей: фазированные антенные решетки (ФАР) [1] и цифровая фокусировка антенной решетки (ЦФА) [2]. В работе [3] обе технологии сравниваются и делается вывод о том, что ЦФА-технология более перспективна в плане применения разнообразных алгоритмов восстановления изображения отражателей. Метод ЦФА позволяет восстановить изображения отражателей со сплошной фокусировкой во всех точках области восстановления изображения. На первом этапе регистрируются эхосигналы для всех комбинаций излучатель—приемник элементов антенной решетки (режим Full Matrix Capture [4]). На втором этапе по измеренным эхосигналам методом комбинационного SAFT (C-SAFT) [5—8] восстанавливается изображение отражателей с учетом эффекта трансформации типа волны при многократном отражении импульсов от границ объекта контроля. В дальнейшем под акустической схемой будем подразумевать описание лучевой траектории распространения импульса от излучателя до отражателя и до приемника при отражении импульса от неровных границ объекта контроля. Акустическая схема будет определяться последовательностью букв L (продольная волна), T (вертикально поляризованная поперечная волна) и буквы d (отражение от

несплошности). Для повышения качества изображения, уменьшения уровня шума и повышения разрешающей способности, метод ЦФА можно использовать совместно с расчетом когерентного фактора (Coherence Factor (CF)) [9, 10]. В зарубежной литературе используется термин Phase Coherence Imaging (PCI) [11].

Изготовление антенных решеток — это сложный технологический процесс, который предполагает изготовление из композитной пьезокерамики элементов решетки, на каждый элемент которой нужно подать зондирующий импульс и/или снять эхосигнал. Склейка протектора с антенной решеткой, который защищает ее поверхность от повреждений и согласует ее с заданной акустической средой, ее размещение в корпусе — очень важные технологические операции. Их недостаточная проработка или их нарушение может привести к тому, что чувствительность элементов решетки, форма эхосигналов и «паразитные» задержки между элементами будут иметь недопустимый разброс. Между тем, при восстановлении изображения отражателей методом ЦФА или ФАР требуется стабильность таких параметров элементов решетки, как чувствительность s_i , форма эхосигналов $p_i(t)$ и «паразитные» времена задержек δt_i .

Качество антенной решетки целесообразно проверить сразу после приобретения. Один из способов проверки заключается в размещении антенной решетки на рексолитовой пластине толщиной, например, 15 мм, излучении каждым элементом зондирующего сигнала и регистрации им же донного импульса $p_i(t)$, который можно представить как $p_i(t) = s_i p_i^{\text{norm}}(t - \delta t_i)$, где $p_i^{\text{norm}}(t - \delta t_i)$ — вид нормированного к единице донного импульса. Анализ донных импульсов позволяет сделать вывод об их идентичности, определить чувствительность s_i и «паразитные» времена задержек δt_i . Согласно требованиям ISO 18563-2:2017 [12], полагается, что антенной решеткой можно пользоваться, если разброс чувствительности s_i разных элементов лежит в пределах ± 3 дБ. Документов, регламентирующих разброс «паразитных» задержек антенной решетки, автору статьи найти не удалось, поэтому будем считать, что максимальный разброс «паразитных» задержек δt_i должен быть меньше одной восьмой или, в более мягком варианте, одной четвертой периода рабочей частоты решетки. Так, если рабочая частота антенной решетки равна 10 МГц, то допустимый разброс «паразитных» времен задержек равен 12 или 25 нс. Это достаточно жесткое требование к качеству изготовления решетки. При обнаружении нарушений требований к свойствам антенной решетки возникает дилемма: либо вернуть антенную решетку изготовителю для исправления брака, либо получить обратно денежные средства и заказать ее у другой фирмы. К сожалению, оба варианта могут привести к задержке получения качественной антенной решетки, и предприятие, ее заказавшее, рискует нарушить договорные обязательства перед своим партнером. Но, если форма импульсов $p_i(t)$ по заданному критерию примерно одинакова, то недопустимый разброс чувствительности s_i и разброс «паразитных» задержек δt_i можно легко учесть на этапе регистрации или восстановления изображения отражателей методом ЦФА.

Отметим, что такой подход к компенсации разной чувствительности s_i и «паразитных» задержек δt_i элементов антенной решетки может скомпенсировать не идентичность каналов ультразвукового дефектоскопа. Но в этом случае надо помнить, что определенные s_i и δt_i будут оптимальными только для конкретной пары «антенная решетка — дефектоскоп».

2. СПОСОБ КОМПЕНСАЦИИ РАЗБРОСА ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

На этапе входного контроля свойств антенной решетки регистрируются эхосигналы $p_i(t)$. На рис. 1а для примера показано 8 эхосигналов 128-антенной решетки с рабочей частотой 10 МГц. Видно, что из-за проблем изготовления протектора или склейки пьезоэлементов и протектора, меняется форма эхосигналов, разброс «паразитных» задержек δt_i недопустимо велик — практически период несущей частоты (рис. 1б) и чувствительность элементов s_i неравномерна.

Для компенсации «паразитных» задержек нужно рассчитать значение δt_{ij} для всех пар элементов антенной решетки (i — номер излучающего элемента; j — номер приемного элемента) по формуле (1):

$$\delta t_{ij} = \frac{\delta t_i + \delta t_j}{2}. \quad (1)$$

Сразу после регистрации эхосигналов нужно каждый из них сдвинуть во времени и далее считать, что эхосигналы $p_{ij}(t)$ измерены идеальной антенной решеткой. А можно на этапе расчета задержек времени прихода эхосигнала на приемный элемент j при излучении элементом i учесть значение δt_{ij} .

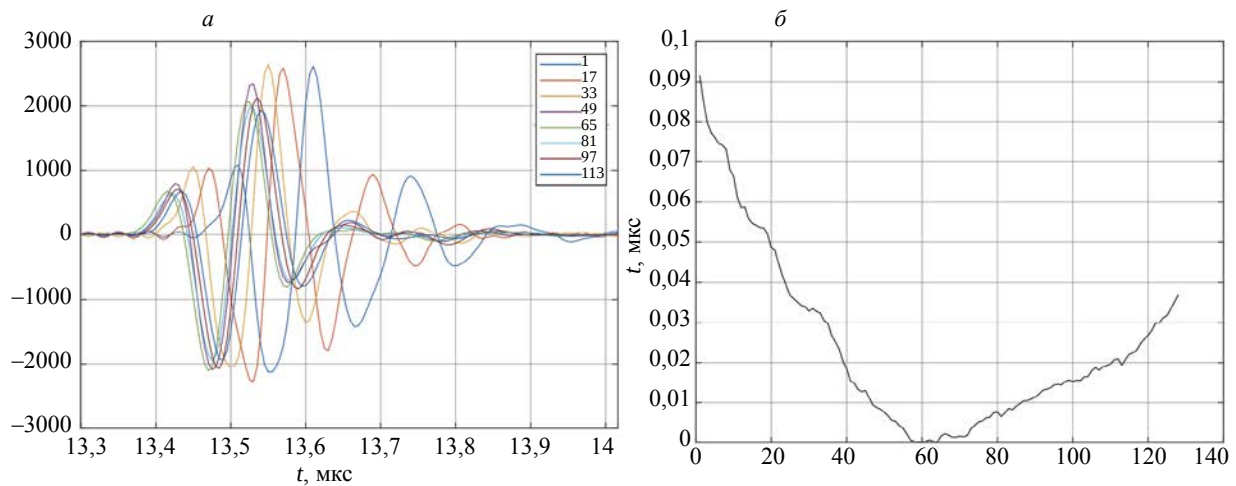


Рис. 1. Восемь эхосигналов $p_i(t)$ (а) и «паразитные» задержки δt_i в зависимости от номера элемента решетки (б).

Компенсировать разную чувствительность элементов можно, рассчитав s_{ij} по формуле (2), и умножить на нее измеренный эхосигнал $p_{ij}(t)$:

$$s_{ij} = \frac{1}{\sqrt{s_i s_j}}. \quad (2)$$

3. МОДЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Эффективность предложенного способа компенсации разброса чувствительности s_i и «паразитных» задержек δt_i была проверена в модельном эксперименте. Эхосигналы регистрировались 128-канальным дефектоскопом «АВГУР АРТ», разработанным и изготавливаемым в «Научно-производственном центре «ЭХО+» [13].

3.1. Параметры антенной решетки

Эхосигналы регистрировались антенной решеткой (10 МГц, 128 элементов, ширина пьезоэлемента $0,25 \times 10$ мм, зазор между краями пьезоэлементов 0,05 мм). К сожалению, при проверке качества антенной решетки выяснилось, что диапазон изменения «паразитных» задержек около 90 нс, что соизмеримо с периодом сигнала на частоте 10 МГц (см. рис. 1б). Между тем импульсы $p_i(t)$ достаточно близки друг к другу (см. рис. 1а), что оставляет надежду на использование дорогостоящей антенной решетки для получения качественного изображения отражателей.

3.2. Образец

В дюралюминиевом образце толщиной 90 мм было сделано двенадцать боковых отверстий (БЦО) диаметром 0,5 мм (рис. 2). Группа из четырех БЦО, наиболее близких к поверхности образца, были расположены в углах квадрата со стороной примерно 2 мм, левая группа — в углах квадрата со стороной примерно 6 мм, а правая — со стороной около 8 мм. Образец обладает слабой анизотропией кубического типа, которая описывается тремя коэффициентами упругости (112,3; 56,33; 26,68) ГПа.

3.3. Восстановленные изображения

На рис. 2 приведено схематическое изображение образца и антенной решетки, установленной на рексолитовую 35-градусную призму. При восстановлении изображения отражателей учитывались анизотропные свойства образца.

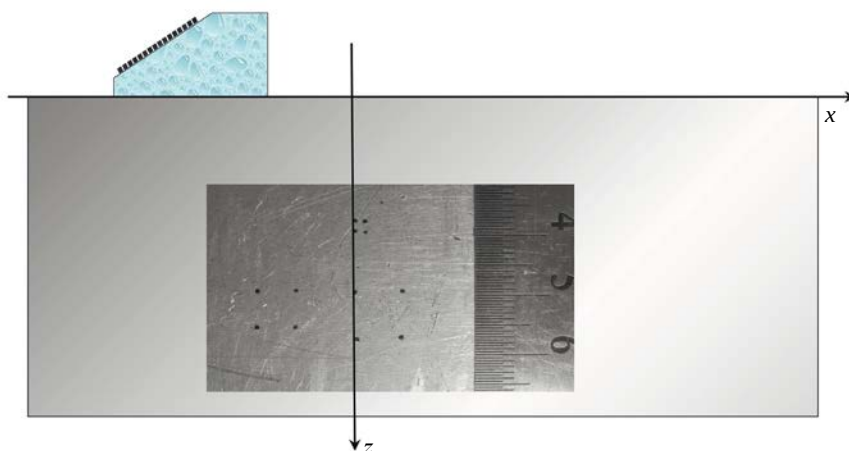


Рис. 2. Схематическое изображение образца «тест перерасеивания» из дюралюминия.

Для дальнейшего сравнения были восстановлены ЦФА-изображения, полученные с использованием антенной решетки (5 МГц, 32 элемента, ширина пьезоэлемента $0,75 \times 10$ мм, зазор между краями пьезоэлементов 0,25 мм), установленной на 35-градусную рексолитовую призму, как показано на рис. 2. Эта решетка имела разброс чувствительности элементов и «паразитных» задержек в пределах нормы и при приемке была признана годной. Размеры активной апертуры этой антенной решетки близки к размеру активной апертуры решетки на 10 МГц, описанной в разделе 3.1. На рис. 3а показано ЦФА-изображение, восстановленное по акустической схеме TdT, а на рис. 3б — с учетом когерентного фактора, что уменьшило уровень шума примерно на 8 дБ и увеличило лучевую и фронтальную разрешающие способности примерно в два раза.

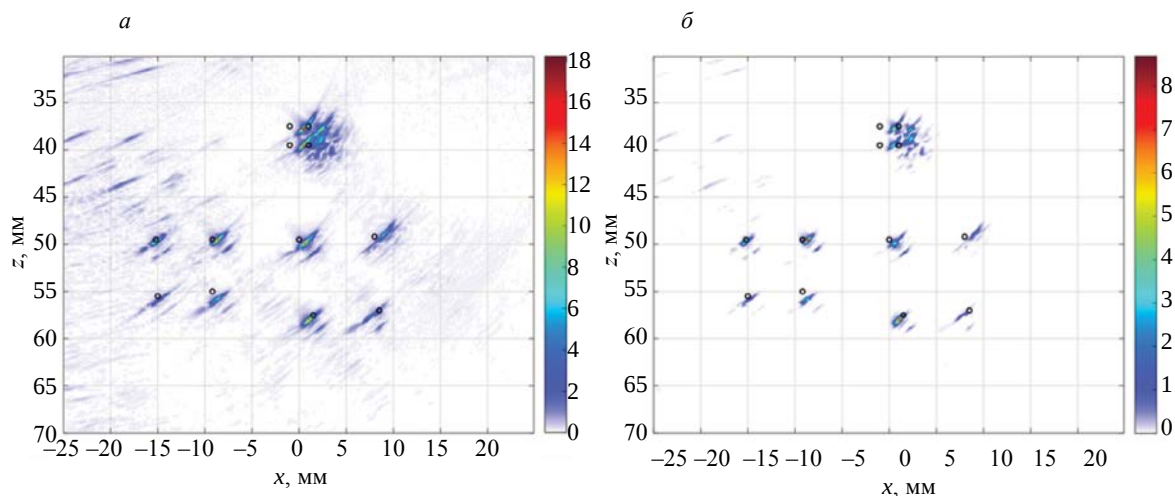


Рис. 3. Изображения, восстановленные по акустической схеме TdT антенной решеткой на 5 МГц: методом ЦФА (а); методом ЦФА с учетом когерентного фактора (б).

Далее показаны изображения отражателей с использованием некондиционной антенной решетки на 10 МГц, описанной в разделе 3.1. На рис. 4а показано ЦФА-изображение, восстановленное по акустической схеме TdT, без коррекции «паразитных» задержек, а на рис. 4б — с коррекцией. Сравнивая изображения на рис. 4а и на рис. 3а сложно найти преимущества использования 128-элементной решетки на 10 МГц перед решеткой из 32 элементов на 5 МГц. После коррекции амплитуда бликов возросла примерно на 4 дБ, их форма стала компактнее, а фронтальная разрешающая способность возросла более чем в 1,5 раза. Диагональные блики группы БЦО, наи-

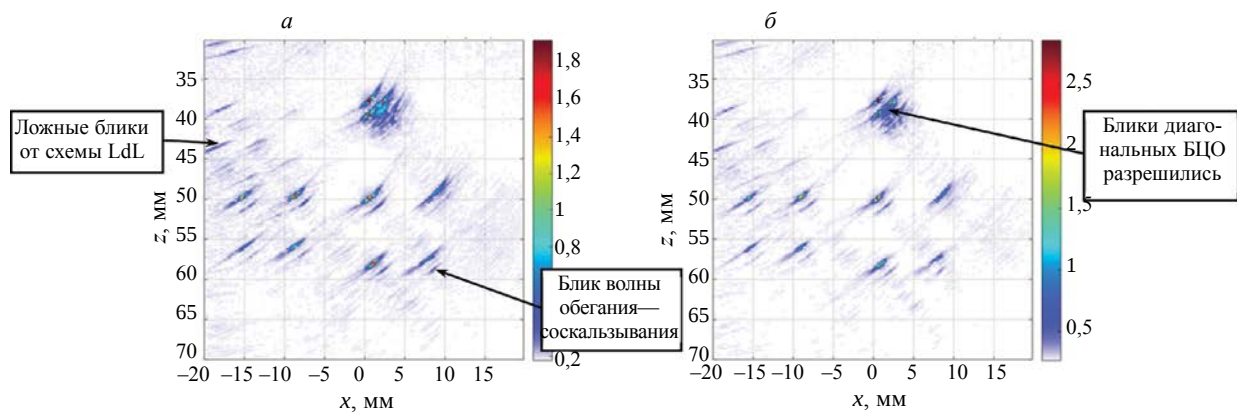


Рис. 4. ЦФА-изображение, восстановленное по акустической схеме TdT: без коррекции «паразитных» задержек (а); с коррекцией (б).

более близкой к поверхности, уверенно разрешились после коррекции. За каждым бликом границы БЦО на глубине больше 45 мм хорошо заметны ложные блики, сформированные волной обегания—соскальзывания. Качество изображения на рис. 4б стало выше, чем на рис. 3а.

На рис. 5а показано ЦФА-изображение, восстановленное по акустической схеме TdT, с учетом когерентного фактора без коррекции «паразитных» задержек, а на рис. 5б — с коррекцией. По сравнению с рис. 4а уровень шума изображения на рис. 5а уменьшился примерно на 12 дБ, а фронтальная разрешающая способность возросла более чем в 2 раза. Диагональные блики группы БЦО, наиболее близкой к поверхности, уверенно разрешились в отличие от рис. 4а. ЦФА-изображение, восстановленное с учетом когерентного фактора и с коррекцией «паразитных» задержек (см. рис. 5б), обладает самыми компактными бликами, так как фронтальная разрешающая способность возросла примерно в 3 раза, а лучевая — примерно в 1,5 раза по сравнению с исходным изображением на рис. 4а. Уровень ложных бликов изображения на рис. 5б минимален. Сравнивая изображения на рис. 5б и на рис. 3б, легко обнаружить преимущества использования 128-элементной решетки на 10 МГц перед решеткой из 32 элементов на 5 МГц: лучевая и фронтальная разрешающие способности возросли примерно в 1,5 раза.

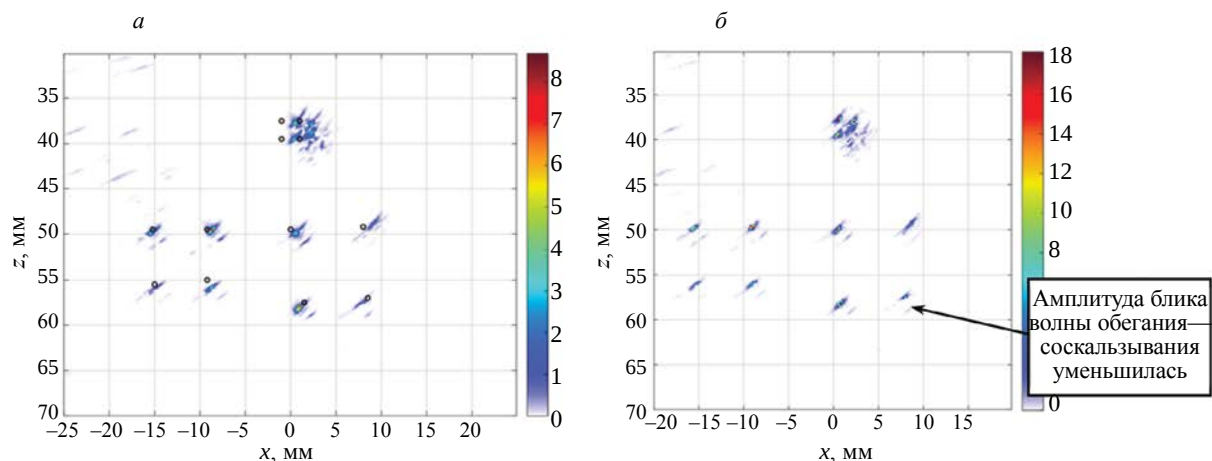


Рис. 5. ЦФА-изображение, восстановленное по акустической схеме TdT, с учетом когерентного фактора: без коррекции «паразитных» задержек (а); с коррекцией (б).

На рис. 6а показано ЦФА-изображение, восстановленное по акустической схеме LdL, без коррекции «паразитных» задержек, а на рис. 6б — с коррекцией. После коррекции амплитуда бликов возросла примерно на 3 дБ, форма бликов стала компактнее, а фронтальная разрешающая способность возросла более чем в 1,5 раза. Диагональные блики группы БЦО, наиболее близкой к поверхности, разрешились после коррекции. Следует отметить, что для восстановления изображения по

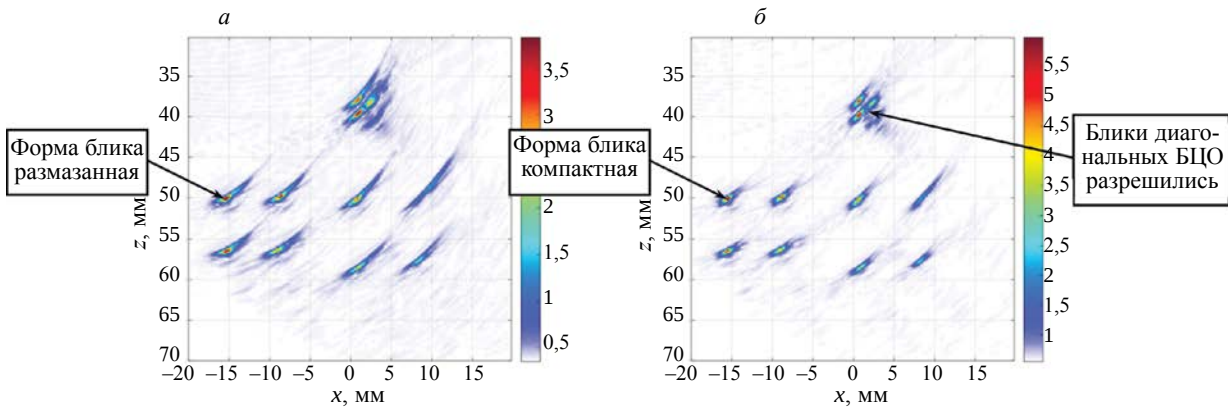


Рис. 6. ЦФА-изображение, восстановленное по акустической схеме LdL: без коррекции «паразитных» задержек (а); с коррекцией (б).

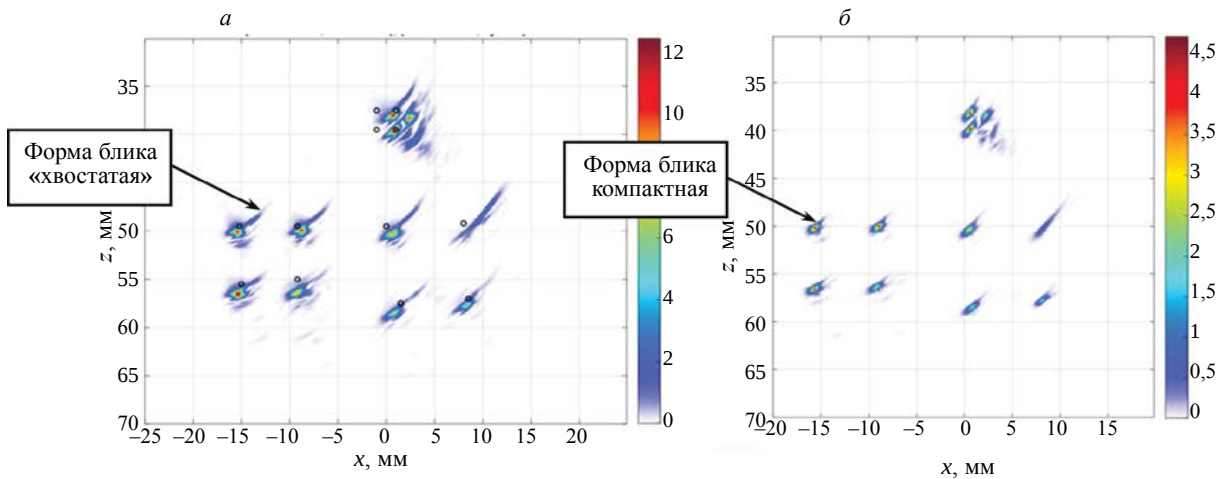


Рис. 7. ЦФА-изображение, восстановленное по акустической схеме LdL, с учетом когерентного фактора: без коррекции «паразитных» задержек (а); с коррекцией (б).

акустической схеме LdL использовались те же эхосигналы, по которым было восстановлено изображение по акустической схеме TdT. Несмотря на то, что призма имела угол наклона 35 град и предназначалась для работы на поперечной волне, изображения, восстановленные по акустической схеме LdL, имеют хорошую фокусировку и амплитуды бликов, соизмеримые с рис. 4б.

На рис. 7а показано ЦФА-изображение, восстановленное по акустической схеме LdL, с учетом когерентного фактора без коррекции «паразитных» задержек, а на рис. 7б — с коррекцией. По сравнению с рис. 6а уровень шума изображения на рис. 7а уменьшился примерно на 10 дБ, а фронтальная разрешающая способность возросла примерно в 2 раза. Однако форма бликов оставляет желать лучшего — у них по-прежнему заметные «хвосты». ЦФА-изображение, восстановленное с учетом когерентного фактора и с коррекцией «паразитных» задержек (см. рис. 7б), обладает самыми компактными бликами, что позволило повысить фронтальную разрешающую способность примерно в 3 раза, а лучевую — примерно в 1,5 раза по сравнению с исходным изображением на рис. 6а. Уровень ложных бликов изображения на рис. 7б минимален, а формы бликов практически для всех БЦО очень близки друг к другу.

На рис. 8 для более детальной оценки повышения качества изображения показан фрагмент рис. 4 с изображениям группы БЦО, наиболее близкой к поверхности: без коррекции «паразитных» задержек (а) и с коррекцией (б). Видно, что после коррекции амплитуда бликов возросла примерно на 3 дБ, они стали более компактными, что привело к примерно двукратному повышению фронтальной разрешающей способности, а отношение сигнал/шум возросло примерно на 4 дБ. На изображении видно множество ложных бликов, сформированных импульсами обе-

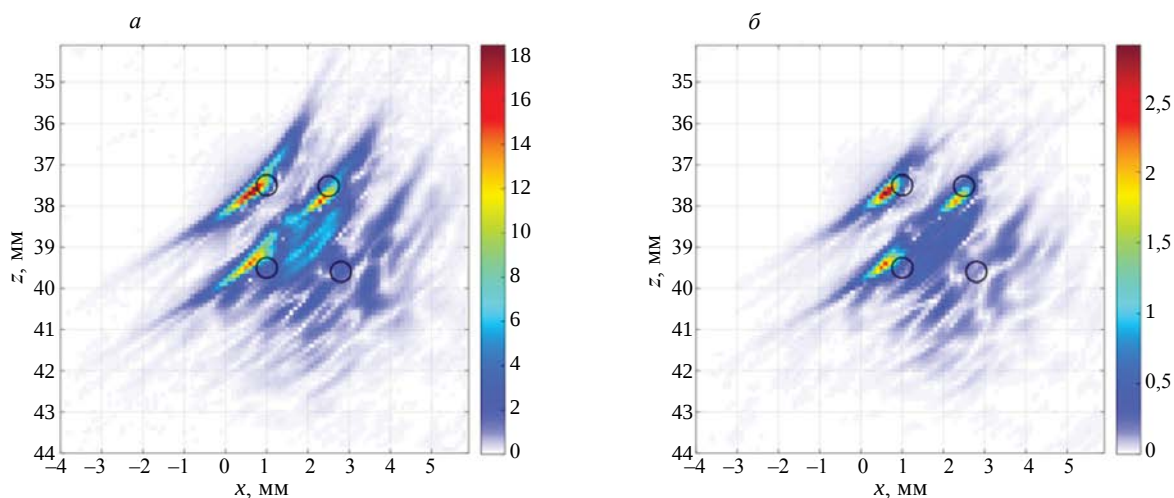


Рис. 8. Фрагмент ЦФА-изображения на рис. 4: без коррекции «паразитных» задержек (а); с коррекцией (б).

гания—соскальзывания и импульсами, перерассеянными на БЦО с учетом эффекта трансформации. Правое нижнее БЦО не удастся обнаружить из-за того, что оно затенено тремя БЦО слева и выше.

На рис. 9 показан фрагмент ЦФА-изображения на рис. 5, восстановленного с учетом когерентного фактора: без коррекции «паразитных» задержек (а) и с коррекцией (б). По сравнению с исходным изображением на рис. 8а, на рис. 9б отношение сигнал/шум возросло примерно на 11 дБ, а фронтальная разрешающая способность увеличилась примерно в три раза. Структура ложных бликов стала более разборчива из-за возросшей разрешающей способности.

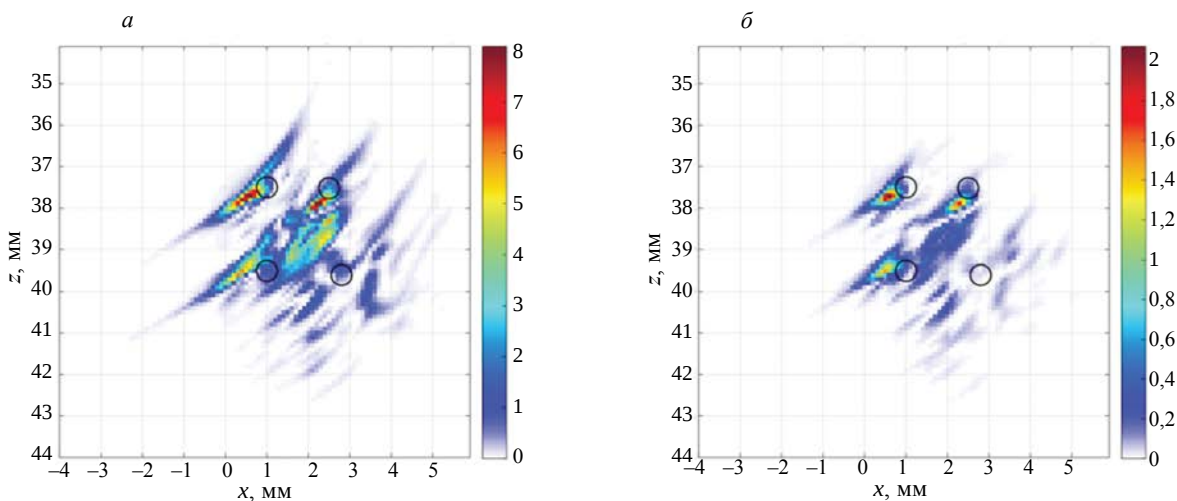


Рис. 9. Фрагмент ЦФА-изображения на рис. 5, восстановленного с учетом когерентного фактора: без коррекции «паразитных» задержек (а); с коррекцией (б).

4. ВЫВОДЫ

Таким образом, по результатам исследований, изложенных в данной статье, можно сделать следующие выводы.

Предложен метод коррекции «паразитных» задержек, что позволяет получать ЦФА-изображение с оптимальной фокусировкой, используя антенную решетку с недопустимо большим разбросом «паразитных» задержек.

Применение когерентного фактора повысило качество изображения: уровень шума уменьшился более чем на 6 дБ, а фронтальная разрешающая способность возросла более чем в два раза.

Подобный подход можно применять для повышения качества изображения и при работе с ФАР-технологией, внося дополнительные корректирующие задержки, согласно формуле (1), на этапе излучения и суммирования принятых эхосигналов.

Автор выражает благодарность главному конструктору «Научно-производственного центра «ЭХО+» Базулину А.Е. за ценные замечания и рекомендации высказанные в процессе обсуждения статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications*. Publisher: Waltham, MA: Olympus NDT, 2007. URL: <https://www.olympus-ims.com/en/books/pa/pa-advances/> (дата обращения: 07.07.2023).
2. Воронков В.А., Воронков И.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. О применимости технологии антенных решеток в решении задач ультразвукового контроля опасных производственных объектов // В мире неразрушающего контроля. 2011. № 1. С. 64—70.
3. Базулин Е.Г. Сравнение систем для ультразвукового неразрушающего контроля, использующих антенные решетки или фазированные антенные решетки // Дефектоскопия. 2013. № 7. С. 51—75.
4. Chatillon S., Fidahoussen A., Iakovleva E., Calmon P. Time of flight inverse matching reconstruction of ultrasonic array data exploiting forwards models / NDT in Canada. 2009. National Conference. Aug. 25—27. 2009.
5. Ковалев А.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г., Яковлев Н.Н. Импульсный эхометод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция // Дефектоскопия. 1990. № 2. С. 29—41.
6. Дефектоскоп A1550 IntroVisor, URL: <http://www.introvisor.ru/> (дата обращения: 07.07.2023).
7. Bulavinov A., Dalichow M., Kröning M., Kurz J. H., Walte F., Reddy K. Quantitative Ultrasonic Testing of Pressurized Components Using Sampling Phased Array / Proc. National Seminar on Non-Destructive Evaluation. Dec. 7 — 9. 2006. Hyderabad. P. 437—448.
8. Ковалев А.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г., Яковлев Н.Н. Импульсный эхометод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция // Дефектоскопия. 1990. № 2. С. 29—41.
9. Kang S., Lee J., Chang J.H. Effectiveness of synthetic aperture focusing and coherence factor weighting for intravascular ultrasound imaging // Ultrasonics. 2021. V. 113. P. 106364. DOI:10.1016/j.ultras.2021.106364
10. Базулин Е.Г. Использование коэффициента когерентности для повышения качества изображения отражателей при проведении ультразвукового контроля // Дефектоскопия. 2017. № 6. С. 5—17.
11. What is Phase Coherence Imaging and How Does it Work? URL: <https://inspectioneering.com/blog/2022-10-14/10281/5-advantages-of-phase-coherence-imaging-pci> (дата обращения: 07.07.2023).
12. SO 18563-2:2017 Non-destructive testing—Characterization and verification of ultrasonic phased array equipment—Part 2: Probes URL: <https://www.iso.org/standard/69427.html> (дата обращения: 07.07.2023).
13. Официальный сайт фирмы «ЭХО+». URL: <https://echoplus.ru/> (дата обращения: 07.07.2023).

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ БОКОВОЙ ПОПЕРЕЧНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ В ПЛОСКОМ СЛОЕ МАТЕРИАЛА

© 2023 г. В. Г. Шевалдыкин^{1,*}, А. А. Самокрутов^{1,2}

¹ООО «Акустические Контрольные Системы», Россия 142712 Московская область,
Ленинский район, пос. Горки Ленинские, промзона «Технопарк», ул. Восточная, вл. 12, стр. 1

²Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Россия 111250 Москва, ул. Красноказарменная, 14
E-mail: *shev@acsys.ru

Поступила в редакцию 08.06.2023; после доработки 18.07.2023

Принята к публикации 27.07.2023

Рассмотрены особенности распространения ультразвуковых импульсов боковой поперечной волны от точечного источника колебаний на поверхности слоя. Описан механизм трансформации этой волны при отражениях от границ слоя в пучок поперечной волны, направленный к поверхности слоя под углом, близким к 45°. Представлено экспериментальное подтверждение превышения амплитуд сигналов боковых волн над сигналами других волн, распространяющихся в слое.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, антенная решетка, точечный источник волн, головная волна, боковая поперечная волна, эхосигнал.

FEATURES OF PROPAGATION OF LATERAL TRANSVERSE ULTRASONIC WAVE IN A FLAT LAYER OF MATERIAL

© 2023 V.G. Shevaldykin^{1,*}, A. A. Samokrutov^{1,2}

¹Acoustic Control Systems Ltd, Russia 142712, Moscow region, Leninsky district, village Gorki Leninskie,
industrial zone "Technopark", Vostochnaya str., vl. 12, p. 1.

²National Research University "MEI",
Russia 111250 Moscow, Krasnokazarmennaya str., 14

The features of propagation of ultrasonic pulses of a lateral transverse wave from a point source of vibrations on the surface of the layer are considered. The mechanism of transformation of this wave during reflections from the boundaries of the layer into a transverse wave beam directed to the surface of the layer at an angle close to 45° is described. Experimental confirmation of the excess of the amplitudes of the lateral wave signals over the signals of other waves propagating in the layer is presented.

Keywords: ultrasonic testing, antenna array, point source of waves, creeping wave, lateral transverse wave, echo signal.

DOI: 10.31857/S013030822309004X, **EDN:** EBSITS

ВВЕДЕНИЕ

При ультразвуковом (УЗ) контроле различных объектов более достоверные и точные результаты обеспечивает эхотомография, по сравнению с традиционной дефектоскопией. Изображения внутренней структуры объекта контроля (ОК) значительно упрощают оценку размеров и типа несплошностей материала и общую степень дефектности объекта.

Значительное количество практических задач составляют случаи контроля пластин или плит. Это, например, контроль стыковых сварных соединений, поиск дефектов в стенках труб, в сварных швах труб и трубных изделиях. Особенно преимущество эхотомографии проявляется, когда зона контроля удалена от области ввода ультразвука на расстояние, в несколько раз большее толщины объекта. В этом случае зондирующие сигналы претерпевают несколько отражений от границ объекта, прежде чем достигнут зоны контроля, например, сварного шва. Траектории отраженных сигналов так же содержат несколько отражений. Невозможность приблизить область ввода и приема ультразвука к зоне контроля обычно вызвана конструкцией ОК, препятствующей такому приближению, или необходимостью одновременно визуализировать как близлежащие к зондирующему устройству зоны ОК, так и удаленные от него, например, при контроле сварных соединений трубопроводов [1].

Для получения наилучшего качества изображения используют максимальное количество акустических схем (траекторий) распространения УЗ сигналов. Эти схемы состоят не только из объемных волн обоих типов, но и содержат траектории с трансформацией одного типа волны в другой [2, 3].

Рассчитать любую траекторию распространения УЗ импульса можно на основе лучевой схемы прохождения сигналов с отражениями и трансформациями типов волн. Для этого должны быть известны скорости продольной и поперечной волн в материале ОК и его толщина. Учитывая коэффициенты отражения и трансформации от углов падения волн на границы ОК, можно заранее исключить траектории с малой амплитудой эхосигналов. И наоборот, можно выделить наиболее значимые траектории, дающие наибольший вклад в реконструируемое изображение. Так, например, при углах падения продольной волны $65\text{--}70^\circ$ коэффициент ее отражения минимальный, а при углах падения от 40 до 50° коэффициент трансформации продольной волны в поперечную наибольший.

Однако наряду с сигналами обычных объемных волн в ОК всегда присутствуют сигналы боковой поперечной волны, возникающей из-за излучения элементами антенной решетки неоднородной продольной волны, распространяющейся по поверхности ОК. Эту волну, названную в работах [4, 5] продольно-поверхностной, а в [6—9] — поверхностно-продольной, будем здесь для краткости называть головной волной [10]. Причина излучения головной волны в том, что элементы решетки являются малоапертурными, почти точечными источниками УЗ колебаний.

Точечный источник возбуждает в твердом полупространстве все типы УЗ волн. В зависимости от ориентации колебательной силы источника относительно нормали к поверхности полупространства изменяются только количественные соотношения амплитуд излучаемых волн, но не их состав [6, 11]. В плоскости, содержащей вектор колебательных смещений источника, в объем полупространства излучаются продольная и две поперечные волны с вертикальной поляризацией. Одна из поперечных волн возбуждается непосредственно источником, другая возникает от головной волны, исходящей от источника. Эту вторую волну называют боковой [4—9, 12]. При распространении боковой волны в слое твердого материала она при падении на донную поверхность генерирует вторичную головную волну, которая в свою очередь порождает вторичную боковую волну. И это повторяется на обеих поверхностях слоя.

В экспериментах на плитах с малоапертурными ЭМА преобразователями [13] импульсы поперечной волны, излученной непосредственно преобразователем и боковой волны, возникшей от головной волны, всегда присутствуют в реализации, принятой с противоположной или той же поверхности плоской плиты, где расположен излучатель. Но амплитуды их при разных базах между преобразователями сильно отличаются: у боковой волны амплитуда на один-два порядка больше, что кажется странным. Возможная причина этого качественно рассмотрена в данной статье.

«АПЕРТУРНЫЙ ЭФФЕКТ» ИЗЛУЧЕНИЯ БОКОВОЙ ВОЛНЫ

Особенность возникновения боковой волны в том, то она излучается не из точки расположения излучателя, а последовательно из множества точек поверхности материала, через которые проходит фронт головной волны [6, 9, 14]. На рис. 1 представлена условная схема хода лучей боковой волны, поясняющая механизм образования ее фронта. Излучатель УЗ колебаний находится в точке O на поверхности плоского слоя материала толщиной H . В плоскости рисунка считаем излучатель точечным. В перпендикулярном направлении излучатель может быть протяженным, что является обычным на практике. От излучателя симметрично в обе стороны уходят в объем материала УЗ волны. Для простоты на рис. 1 показана только правая часть лучей боковой волны.

Предположим, что источник генерирует короткий УЗ импульс, длительностью, много меньшей времени пролета продольной волной толщины H . В начальный момент от точки O по поверхности материала начинает распространяться импульс головной волны. Этот импульс в каждой точке поверхности непрерывно генерирует боковую поперечную волну, уходящую в объем материала под третьим критическим углом γ . В направлении первого луча OD вместе с боковой волной распространяется часть обычной поперечной волны, излученной источником под тем же углом γ . По сути это одна и та же волна. Но уже из следующих точек поверхности правее точки O начинают излучаться боковые волны по мере того как до этих точек поверхности доходит фронт головной волны. Этот фронт, удаляясь от источника, формирует непрерывно увеличивающийся фронт боковой волны.

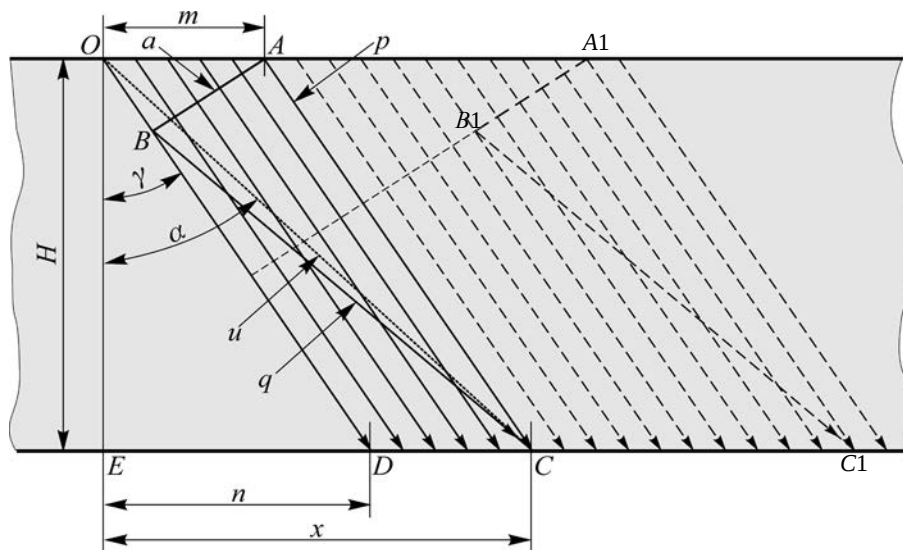


Рис. 1. Схема образования фронта боковой волны.

В некоторый момент времени головная волна доходит до точки A , и из нее в направлении луча AC начинает распространяться боковая волна. К этому моменту фронт боковой волны достигнет ширины AB . Колебания во всех точках этого фронта синфазны. Времена распространения УЗ сигналов от точки O до любой точки фронта по траекториям головная волна — боковая волна одинаковы. Это следует из закона Снеллиуса. Далее головная волна распространяется и дальше, порождая в каждой точке поверхности материала возбуждение боковых волн. Когда она дойдет до точки A_1 , фронт боковой волны будет уже простирается от точки A_1 до луча OD .

При падении фронта боковой волны на донную поверхность, он сначала достигает точки D , затем след фронта последовательно проходит все точки до и после точки C . При движении следа падающего фронта от точки D к точке C он возбуждает колебания вторичной головной волны в каждой точке донной поверхности. Амплитуда этих колебаний от точки D к точке C непрерывно увеличивается, т.к. они возбуждаются не только от точек поверхности слоя, из которых под углом γ приходят импульсы боковой волны, но и от всех точек непрерывно увеличивавшегося фронта боковой волны, когда фронт головной волны распространялся от источника к точке A .

Точки фронта — это точечные источники сферических УЗ волн, распространяющихся во все стороны. Так, в момент прохода следа падающего фронта через точку C колебания в ней возбуждаются не только от точки A фронта боковой волны, прошедшей по лучу AC , но и от всех точек фронта AB . Только из-за разных путей от этих точек до точки C синфазность колебаний от них нарушается. Сигнал от точки B по лучу BC приходит с наибольшей задержкой по сравнению с сигналом по лучу AC . При этой достаточно малой задержке сумма сигналов от точек фронта должна достигать некоторого максимума. И этот максимум, однозначно связанный с шириной фронта, равного AB , будет сохраняться при распространении следа фронта боковой волны далее точки C .

Амплитуда колебаний во всех точках фронта AB почти одинаковая. Затуханием головной волны на коротком пути от точки O к точке A можно пренебречь. Амплитуда сигнала в точке C , очевидно, зависит от ширины фронта AB и от разности путей по лучам AC и BC . С увеличением ширины фронта возрастает и разность путей. Поэтому амплитуда суммарного сигнала, как показывает численный расчет суммы большого количества одинаковых импульсов, достигает максимума при разности путей, равной $\lambda/2$, где λ — длина поперечной волны.

Как видно из рис. 1, время распространения УЗ сигнала от источника в точке O до точки C по траекториям ODC , OAC и по любой, расположенной между ними и состоящей из пути головной и пути боковой волн, одно и то же, поскольку длины этих траекторий равны. Т.е. импульс от источника делится на все эти траектории и снова собирается в точке C . Если пренебречь затуханием, то импульс источника единичной амплитуды приходит в точку C с такой же амплитудой, равной единице. Но вместе с ним в тот же момент времени в точку C начинают приходить импульсы от фронта AB , каждый с единичной амплитудой. И все эти импульсы, включая самый поздний импульс от точки B фронта, задержан не более, чем на полпериода УЗ колебаний относительно

самого раннего, т.е. амплитуда суммарного сигнала в точке C получается много больше единицы.

Обозначим длины отрезков и лучей на рис. 1 следующим образом: $OA = m$; $AB = a$; $AC = p$; $BC = q$; $ED = n$; $EC = x$, а скорости продольных и поперечных УЗ волн в материале — c_L , c_S соответственно. Выразим эти длины через параметры слоя материала:

$$m = c_L \cdot t_m;$$

$$a = m \cdot \cos \gamma;$$

$$p = H / \cos \gamma;$$

$$q = \sqrt{a^2 + p^2};$$

$$n = H \cdot \operatorname{tg} \gamma;$$

$$x = n + m,$$

где t_m — время, за которое головная волна от источника доходит до точки A ; $\gamma = \arcsin(c_S/c_L)$ — третий критический угол.

Приравняем разность путей $(q - p) = \lambda/2$:

$$\sqrt{(c_L \cdot t_m \cdot \cos \gamma)^2 + \left(\frac{H}{\cos \gamma}\right)^2} - \frac{H}{\cos \gamma} = \frac{\lambda}{2}, \quad (1)$$

откуда

$$t_m = \frac{1}{c_L \cdot \cos \gamma} \cdot \sqrt{\frac{H \cdot \lambda}{\cos \gamma} + \left(\frac{\lambda}{2}\right)^2}. \quad (2)$$

Например, для плиты из стали 40X13 толщиной $H = 25$ мм при средней частоте сигналов 2,5 МГц время $t_m = 1,26$ мкс. Скорости УЗ волн в этой стали $c_L = 6085$ м/с, $c_S = 3370$ м/с, угол $\gamma = 33,63^\circ$. За это время головная волна проходит расстояние $m = 7,68$ мм. В точке C формируется значительный по амплитуде импульс, который можно считать вторичным источником УЗ волн. Точка C отстоит от нормали к поверхности слоя, проходящей через точку расположения первичного источника волн, на расстояние $x = 24$ мм. Направление на вторичный источник волн из точки O отклонено от нормали на угол $\alpha = \operatorname{arctg}(x/H) = 44,2^\circ$, т.е. можно условно считать, что в этой плите из стали 40X13 УЗ сигнал от источника приходит в точку C под углом $44,2^\circ$, пройдя расстояние $u = H/\cos \alpha = 35$ мм со скоростью $v = 3440$ м/с. Это кажущаяся скорость распространения сигнала от источника по прямому пути u , деленному на сумму реальных времен прохождения головной волной пути m и боковой волной пути p :

$$v = \frac{u}{t_m + \frac{H}{c_S \cdot \cos \gamma}}. \quad (3)$$

Фронт боковой волны перемещается вместе с головной волной вдоль поверхности слоя материала. При удалении фронта головной волны за точку A от источника ширина фронта боковой волны увеличивается. Но часть фронта шириной a , удовлетворяющая условию $q - p \leq \lambda/2$, остается неизменной. Поэтому амплитуда суммарного сигнала от этой части фронта на донной поверхности слоя остается почти неизменно такой же, как в точке C . При движении следа падающего фронта далее точки C амплитуда уменьшается в основном из-за затухания головной волны с расстоянием, которое при гладкой поверхности стали примерно составляет 0,15 дБ/мм [13, 15]. В сравнении с ним затухание поперечных волн минимум на порядок меньше.

Следует заметить, что часть фронта боковой волны, уходящая от поверхности слоя правее (см. рис. 1) от точки A , на колебания в точке C влиять не может в момент прохода мимо нее следа падающего фронта. Только в более поздние моменты времени в точку C приходят разные коле-

бания от точек фронта, точек поверхности слоя, правее точки A , и от точек донной поверхности в виде импульсов обратной головной волны, возбуждаемой следом фронта боковой волны.

Из сказанного следует, что сигнал боковой волны, который можно принять на донной поверхности и который генерирует вторичную головную волну, во-первых, имеет большую амплитуду в сравнении с сигналами обычных объемных волн, и, во-вторых, его можно обнаружить не в точке D , где он только появляется, а ближе к точке C на рис. 1, где его амплитуда существенно больше. Обнаружение этого сигнала под углом, большим третьего критического, затрудняет его интерпретацию, поскольку его время задержки не соответствует расчетным временам прихода каких-либо сигналов объемных волн в окрестность точки C .

РАСПРОСТРАНЕНИЕ БОКОВОЙ ВОЛНЫ ВДОЛЬ СЛОЯ МАТЕРИАЛА

После падения боковой волны в точку D на донной поверхности слоя сразу возникает вторичная головная волна. И она в свою очередь тоже генерирует боковую волну, направленную к внешней поверхности слоя. По мере приближения фронта вторичной головной волны к точке C увеличивается ширина фронта вторичной боковой волны аналогично тому, как это происходит у внешней поверхности слоя. И когда вторичная головная волна дойдет до точки C фронт ее боковой волны достигнет размера, равного апертуре a .

Но эти одинаковые процессы формирования апертур излучения боковых волн у внешней и донной поверхностей слоя материала и геометрическое равенство их размеров не означают равенства распределений амплитуд колебаний вдоль этих апертур. Если пренебречь затуханиями головной и боковой волн на расстояниях порядка m (см. рис. 1), то распределение амплитуд вдоль фронта AB можно считать равномерным, т.е. все амплитуды равны. При падении боковой волны на донную поверхность в каждую ее точку между точками D и C приходят все нарастающие по амплитуде колебания, поскольку ширина фронта AB непрерывно возрастает от 0 до a и амплитуда колебаний достигает максимума, при ширине фронта, равной a и падении боковой волны в точку C .

Нарастающая амплитуда колебаний донной поверхности от точки D к точке C вызывает такое же нарастание амплитуды вторичной головной волны между этими точками. Поэтому распределение амплитуд колебаний в апертуре вторичной боковой волны получается не равномерным, а непрерывно увеличивающимся в направлении к донной поверхности.

Поскольку затухание головной волны на пути в пределах нескольких m невелико, то в положении апертуры $A1B1$, показанном на рис. 1, амплитуда колебаний в точке $C1$ будет почти равна амплитуде колебаний в точке C . Это означает, что колебания на донной поверхности далее от точки C , достигнув в ней максимума, поддерживают амплитуду вторичной головной волны на этом высоком уровне, а точку C , как сказано выше, можно считать вторичным источником головной и боковой волн на донной поверхности. Время задержки фронта сигнала в точке C относительно сигнала источника равно сумме времен прохождения головной волной пути m и боковой волной пути p .

Если поместить некий точечный приемник УЗ колебаний на донную поверхность, например, в точку $C1$, то время прихода сигнала на этот приемник по траектории, состоящей из путей головной и боковой волн, будет равно времени задержки сигнала в точке C плюс время распространения головной волны между точками C и $C1$. Это же самое время прихода сигнала на приемник получится, если сложить время распространения головной волны по пути от точки O до точки $A1$ с временем распространения боковой волны от точки $A1$ до точки $C1$, т.е. когда сигнал боковой волны надежно обнаружен после однократного прохождения от одной поверхности слоя до другой, время его задержки в разных точках поверхности точно соответствует расчету с использованием третьего критического угла и известных координат источника и приемника УЗ колебаний.

Рассмотрим случаи, когда сигнал с траекторией, включающей головную и боковую волны, проходит дважды или большее количество раз сквозь плоскопараллельный слой материала. На рис. 2 приведена схема хода лучей УЗ волн для случая возврата вторичной боковой волны к внешней поверхности слоя.

Амплитуда колебаний в точках фронта падающей и вторичной боковых волн изображена оттенками серого тона: чем больше амплитуда, тем тон более темный. Фронт AB с равномерным распределением амплитуд представлен светло-серым тоном. Фронт вторичной боковой волны, касающийся донной поверхности в точке C , с неравномерным распределением амплитуд колебаний изображен более темным вблизи донной поверхности. У фронтов, касающихся донной поверхности в точках $C2$ и $C3$, практически равномерное распределение амплитуд, т.к. вправо

источнику, и точкой приема сигнала. На рис. 2 эта траектория — ODG ... точка приема, например, $G2$ или более далекая.

Этот же способ расчета справедлив и для любой траектории, в которой часть пути сигнал проходит по поверхностям слоя материала в виде головной волны, а часть пути в виде боковой поперечной волны, несколько раз пронизывая слой. Например, для случая тройного прохождения боковых волн сквозь слой материала время прихода сигнала равно:

$$T_{csss} = \frac{X - 3 \cdot H \cdot \operatorname{tg} \gamma}{c_L} + \frac{3 \cdot H}{c_s \cdot \cos \gamma}, \quad (4)$$

где X — расстояние между нормальными к поверхностям слоя, проходящими через точки излучения и приема УЗ сигнала. Формула (4) верна при $X \geq 3 \cdot H \cdot \operatorname{tg} \gamma$. При меньших X боковые волны, практически, отсутствуют, т.к. их направляющий угол меньше γ . Аналогичная формула верна для любого количества k проходов боковой волны сквозь слой материала, если заменить коэффициенты 3 перед H на k .

Но вследствие апертурного излучения боковых волн минимальное расстояние $X_{\min}$, на котором можно обнаружить сигнал боковой волны, следует оценивать, используя угол α направления на вторичный источник УЗ колебаний (см. рис. 1 и рис. 2). Для тройного прохождения боковых волн сквозь слой материала $X_{\min} = 3 \cdot H \cdot \operatorname{tg} \alpha$. Для другого количества прохождений $X_{\min} = k \cdot H \cdot \operatorname{tg} \alpha$.

Угол α для конкретного материала зависит от частоты УЗ колебаний (от λ) и от толщины слоя H :

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left(\frac{x}{H} \right) = \operatorname{arctg} \left[\operatorname{tg} \gamma + \frac{1}{H \cdot \cos \gamma} \cdot \sqrt{\frac{H \cdot \lambda}{\cos \gamma} + \left(\frac{\lambda}{2} \right)^2} \right]. \quad (5)$$

На рис. 3 приведены зависимости угла α от толщины слоя из стали 20 для трех частот УЗ сигналов, обычно используемых при контроле. Зависимости рассчитаны по формуле (5). Видно, что в достаточно широком диапазоне толщин H угол α меняется мало, оставаясь, в основном, в пределах от 40 до 50°. Поэтому для оценок $X_{\min}$ при контроле стальных изделий с толщинами порядка 10—20 мм можно уверенно использовать $\alpha = 45^\circ$.

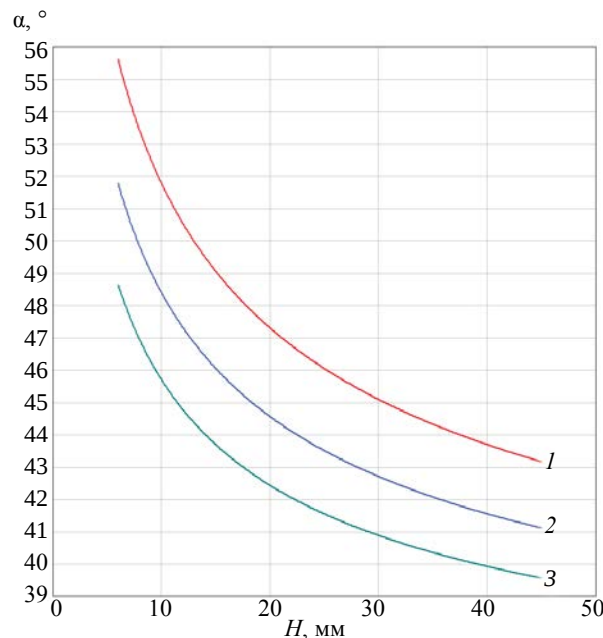


Рис. 3. Зависимости угла α от толщины слоя из стали 20 для средней частоты спектра УЗ сигнала 1,5 (1), 2,5 (2) и 4 МГц (3).

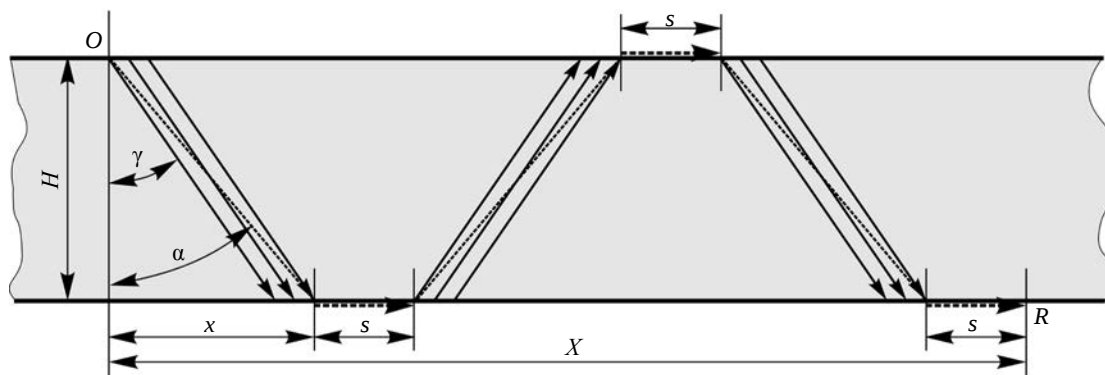


Рис. 4. Схема кажущейся траектории распространения сигнала с тремя проходами боковых волн сквозь слой материала.

При расстояниях $X > X_{\min}$ в траекторию распространения сигнала от источника к приемнику в точке R добавляются пути s распространения головных волн. Эту траекторию можно назвать кажущейся, поскольку реально сигнал проходит сквозь слой под углами γ . Схема такой траектории для тройного прохождения сигнала через слой показана на рис. 4. Пути головной волны s показаны на рис. 4 условно. Все они равноправно могут быть соединены в один путь, равный их сумме.

Кажущаяся траектория представляет траекторию распространения сигнала большой амплитуды, который с высокой вероятностью можно обнаружить на значительном удалении от источника после нескольких проходов боковой волны сквозь слой материала. При поиске сигнала по реальному времени его прихода в точку приема, на расстояниях, меньших $X_{\min}$, сигнал обнаружить очень трудно из-за еще малой его амплитуды.

Апертурное излучение боковой волны, направленное под углом α , по-видимому, является причиной известного из практики УЗ контроля эффекта т.н. незеркального отражения пучка поперечных волн от свободной границы твердого тела [6, 16]. При распространении пучка «смещается» его акустическая ось, т.е. луч, где амплитуда колебаний в пучке максимальна. Происходит перераспределение амплитуд лучей в поперечном сечении отраженного пучка [17]. Но как следует из приведенного здесь анализа и работы [17], отдельные лучи никакого смещения не испытывают. Это справедливо и для любых углов падения лучей на границу материала, что подтверждается совпадением с результатами измерений расчетных времен прихода сигналов по разным траекториям, не только с головными волнами [13].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ИМПУЛЬСОВ БОКОВЫХ ВОЛН

Исследования сигналов, распространяющихся в плоскопараллельном слое твердого материала, проводили на плите из стали 40X13 толщиной 25 мм. Использовали ЭМА-преобразователи с индукторами в виде узких (порядка 1 мм) пучков провода, приложенных к поверхности плиты [13]. Эти пучки — половина катушки, намотанной на диэлектрическую пластинку толщиной около 1 мм. Длина активной части витков пучка 19 мм. Излучающий индуктор содержал 5 витков провода диаметром 0,19 мм, приемный — 22 витка диаметром 0,08 мм. Вдоль плиты было создано магнитное поле с помощью постоянных магнитов. Направление силовых линий поля (касательного к поверхности металла) совпадало с направлением распространения УЗ сигналов и было перпендикулярно виткам индукторов ЭМА преобразователей.

Излучающий преобразователь был закреплен неподвижно на одной стороне плиты. Приемный преобразователь перемещали по противоположной поверхности плиты по разметке с шагом 10 мм, начиная с положения, при котором преобразователи располагались точно один против другого. Всего записали 21 реализацию сигналов при изменении расстояния (базы) X между преобразователями от 0 до 200 мм.

На рис. 5 представлены осциллограммы 7 реализаций, полученных при базах от 20 до 140 мм. Для расположения реализаций одна под другой к ним искусственно были добавлены постоянные смещения, кратные 25 мВ. Средняя частота спектра принятых сигналов приблизительно равна 2 МГц.

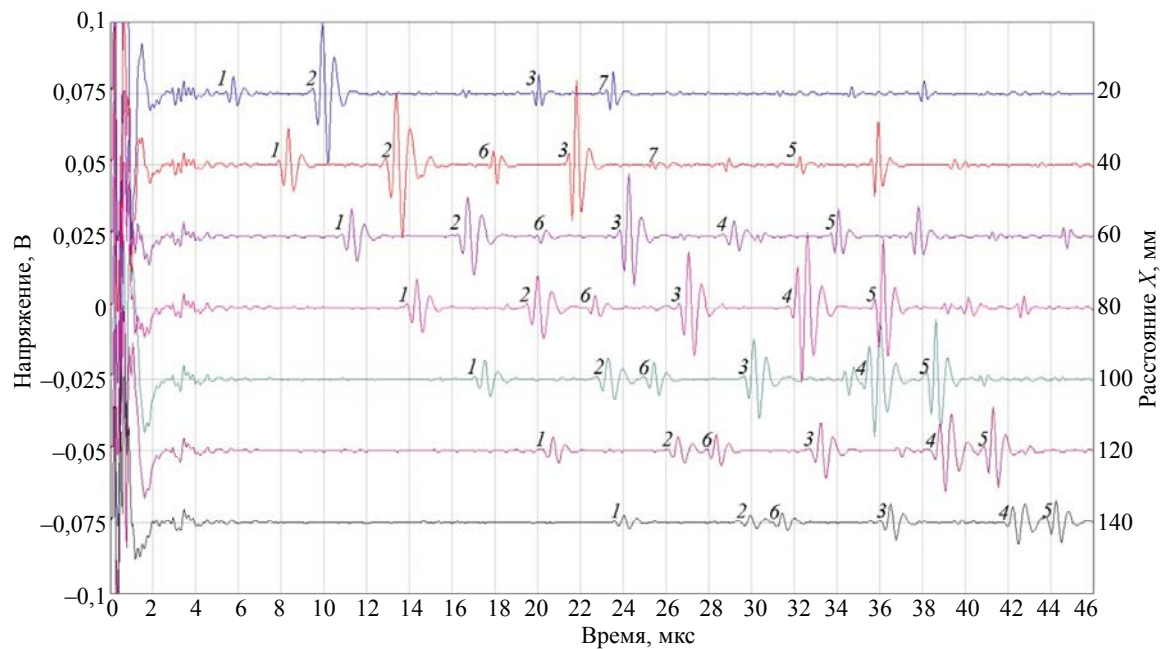


Рис. 5. Осциллограммы реализаций с импульсами разных типов УЗ волн, однократно или многократно прошедших сквозь стальную плиту. Реализации записаны при разных расстояниях X между излучателем и приемником УЗ колебаний.

Одинаковыми цифрами у импульсов на рис. 5 обозначены УЗ сигналы, прошедшие сквозь плиту по одинаковым акустическим схемам при разных базах X . Обозначим типы УЗ волн следующим образом: L — продольная, S — поперечная, С — головная, $S\gamma$ — поперечная боковая. Простые однолучевые схемы будем представлять одной буквой, обозначающей тип волны на пути от излучателя к приемнику. Сложные схемы, состоящие из нескольких лучей волн, представим последовательным рядом букв.

Импульсы 1 — сигналы продольной волны от излучателя к приемнику, т.е. схема L. Импульсы 2 — сигналы головной и боковой волн — схема $CS\gamma$. Импульсы 3 — сигналы по схеме SLS, т.е. поперечная волна от излучателя трансформируется на донной поверхности плиты в продольную, а затем на внешней поверхности снова трансформируется в поперечную. Импульсы 4 — сигналы по схеме $CS\gamma S\gamma S\gamma$. Импульсы 5 — сигналы SLALS. Импульсы 6 — сигналы SLL. Импульсы 7 — сигналы SSS.

На представленных осциллограммах не видно импульсов по схеме S. Причина в том, что их амплитуда мала, и при базах 20 и 40 мм их времена прихода на приемник почти не отличаются от времен сигнала по схеме $CS\gamma$, т.е. они совпадают с импульсами 2. При базах 60 и 80 мм времена прихода сигнала S равны 19,29 и 24,87 мкс соответственно. На осциллограммах в эти моменты времени сигнал S обнаружить не удастся. Возможно, что при базе 60 мм импульс сигнала S из-за близкого расположения во времени с импульсом 6 (его время 19,66 мкс) ослабил импульс 6, оказавшись с ним в противофазе. При еще больших базах сигнал S также не виден. Импульсы 7 видны только на осциллограммах при базах 20 и 40 мм. При больших базах они «покрыты» импульсами 4.

Характерно, что импульс 4 (схема $CS\gamma S\gamma S\gamma$) присутствует на осциллограммах только при $X \geq 60$ мм. Причем при базе $X = 80$ мм его амплитуда почти в 5 раз больше, чем при $X = 60$ мм. Это из-за того, что минимальная база $X\gamma$ при тройном прохождении боковой волны сквозь плиту равна $X\gamma = 3 \cdot H \cdot \operatorname{tg} \gamma = 49,9$ мм. Начиная с нее, сигнал боковой волны должен только появляться. А при базе $X_{\min} = 3 \cdot H \cdot \operatorname{tg} \alpha = 76$ мм амплитуда боковой волны должна подходить к максимуму и далее с увеличением X медленно уменьшаться.

На рис. 6 приведены графики зависимостей амплитуд импульсов боковых волн $CS\gamma$ и $CS\gamma S\gamma S\gamma$ от расстояния X . Точка кривой 1 при $X = 10$ мм представляет амплитуду сигнала только прямой поперечной волны (схема S), т.к. этот сигнал приходит на приемник под углом $21,8^\circ < \gamma$, и боковая волна

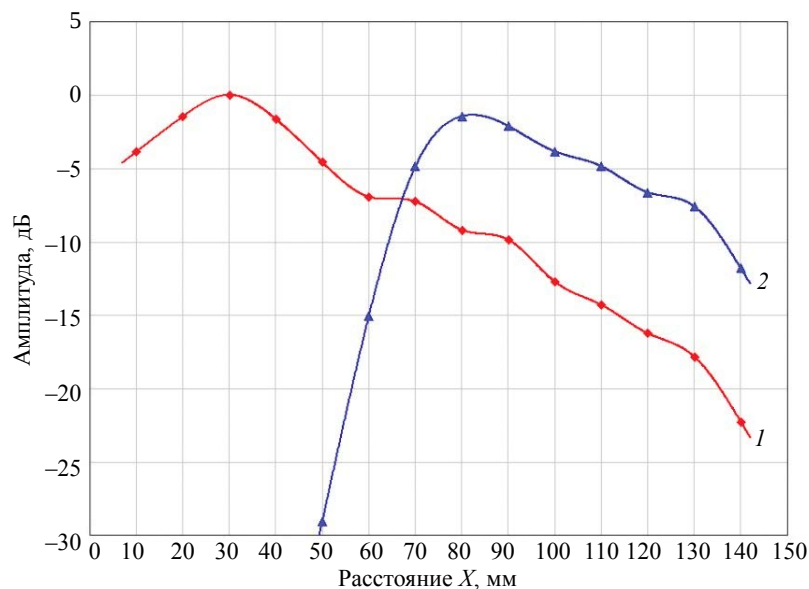


Рис. 6. Зависимости амплитуд сигналов боковых волн, принятых на донной поверхности плиты из стали 40Х13, от расстояния X : 1 – волна $CS\gamma$; 2 – $CS\gamma S\gamma S\gamma$.

здесь отсутствует. При $X = 20$ мм к приемнику приходит уже сумма сигналов прямой поперечной (S) и боковой ($CS\gamma$) волн. Угол наклона луча волны S здесь равен $38,7^\circ$. Времена задержки этих сигналов отличаются всего на 40 нс, поэтому на осциллограмме рис. 5 виден один импульс (2). На расстоянии $x = 24$ мм от излучателя на донной поверхности плиты находится точка C , в которую приходит сигнал боковой волны от апертуры AB (см. рис. 1). Амплитуда сигнала $CS\gamma$ в этой точке при $X = 25$ мм на рис. 6 близка к максимальной согласно принятого ранее полуволнового критерия наибольшей разности хода лучей от краев апертуры. Амплитуда сигнала $CS\gamma S\gamma S\gamma$ при $X = 76$ мм так же близка к максимальной (см. рис. 6, кривая 2). Не точное совпадение амплитуд этих сигналов с максимумами кривых рис. 6 можно объяснить не абсолютной идеальностью точечных источника и приемника УЗ колебаний, а также отсутствием записанных сигналов при этих базах.

В работе [14] исследованы аналогичные зависимости амплитуд боковых поперечных волн от расстояния между излучателем и приемником УЗ колебаний. По максимуму зависимости амплитуды первой боковой волны на донной поверхности образца из стали 3 толщиной 86 мм можно оценить, что угол α там был порядка $38\text{—}39^\circ$, что согласуется с формулой (5).

Следует обратить также внимание на форму импульсов боковых волн (импульсы 2 и 4 на рис. 5). Они более затянутые в сравнении с другими импульсами, поскольку сформировались из суммы импульсов апертуры боковой волны, распределенных на интервале времени порядка периода их колебаний. Как отмечается в [17], это характерная особенность формы сигналов боковых волн.

Из анализа осциллограмм рис. 5 и графиков на рис. 6 можно заключить, что из всех УЗ сигналов, распространяющихся вдоль плиты с отражениями от ее границ, наибольшие амплитуды у сигналов поперечных волн, трансформирующихся в продольные и снова в поперечные (схемы SLS, SLSLS и т.д.), а также у сигналов боковых поперечных волн (схемы $CS\gamma$, $CS\gamma S\gamma S\gamma$ и т.д.). Сигналы боковых волн даже превосходят другие сигналы на достаточно больших расстояниях от излучателя (см. рис. 5, базы 80—120 мм).

ВЫВОДЫ

1. Эффект апертурного излучения боковой поперечной волны создает в плоском слое материала пучок поперечных волн повышенной амплитуды, направленный под углом, близким к 45° .
2. Этот эффект вызывает аномальный по амплитуде лепесток в диаграммах направленности малоапертурных излучателей поперечных волн с вертикальной поляризацией с максимумом при углах $35\text{—}40^\circ$ [18, 19]. Он же вносит значительную добавку к амплитуде сигнала поперечной волны, отраженной от двугранного угла [20].
3. При распространении головной волны по поверхности плоскопараллельного слоя твердого материала сигнал боковой поперечной волны при первом падении на донную поверхность слоя

создает вторичную апертуру излучения боковой волны с неравномерным распределением амплитуд, что дополнительно увеличивает амплитуду вторичной головной волны и вторичной боковой волны, направленной к внешней поверхности слоя.

4. Время задержки фронта импульса, распространяющегося в плоскопараллельном слое по траекториям с головной и боковой волнами, рассчитывается с использованием третьего критического угла (не 45°) и координат точек излучения и приема УЗ колебаний.

5. Наиболее значимыми акустическими схемами при ультразвуковом контроле объектов типа плиты или пластины методом эхотомографии являются схемы с головной и боковой поперечной волной, а также схемы с поперечной волной, трансформируемой в продольную и затем снова в поперечную волну.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самокрутов А.А., Ворончихин С.Ю., Седелев Ю.А. Внутритрубная дефектоскопия газотранспортной сети // Территория NDT. 2021. № 3. С. 36—44.
2. Базулин Е.Г. Восстановление изображения отражателей методом C-SAFT при многократном отражении эхосигналов от границ цилиндрического объекта контроля // Дефектоскопия. 2013. № 2. С. 23—42.
3. Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. Ультразвуковая томография металлоконструкций методом цифровой фокусировки антенной решетки // Дефектоскопия. 2011. № 1. С. 21—38.
4. Разыграев Н.П. Ультразвуковая дефектоскопия головными волнами — физические предпосылки и практическое применение // Дефектоскопия. 2004. № 9. С. 27—37.
5. Разыграев Н.П. Физика, терминология и технология в ультразвуковой дефектоскопии головными волнами // Дефектоскопия. 2020. № 9. С. 3—19.
6. Ермолов И.Н. Достижения в теоретических вопросах ультразвуковой дефектоскопии, задачи и перспективы // Дефектоскопия. 2004. № 10. С. 13—48.
7. Данилов В.Н. К вопросу о расчете параметров поверхностно-продольных волн на свободной плоской границе изделия // Дефектоскопия. 2001. № 10. С. 27—35.
8. Щербинский В.Г. Технология ультразвукового контроля сварных соединений. Санкт-Петербург: Издательство «СВЕН», 2014. 495 с.
9. Данилов В.Н. О головных и подповерхностных продольных волнах, излучаемых прямым преобразователем, находящимся на свободной плоской поверхности упругой среды // Контроль. Диагностика. 2021. Т. 24. № 4. С. 4—19.
10. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Ультразвуковой контроль. В кн.: Неразрушающий контроль. Справочник / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 3. М.: Машиностроение, 2004. 864 с.
11. Буденков Г.А., Недзвецкая О.В. Динамические задачи теории упругости в приложении к проблемам акустического контроля и диагностики. М.: Издательство физико-математической литературы, 2004. 136 с.
12. Ермолов И.Н., Разыграев Н.П., Щербинский В.Г. Использование акустических волн головного типа для ультразвукового контроля // Дефектоскопия. 1978. № 1. С. 33—40.
13. Шевалдыкин В.Г. Головная поверхностная продольная акустическая волна: основные свойства и возможности применения // Контроль. Диагностика. 2021. Т. 24. № 7. С. 4—12.
14. Басацкая Л.В., Вopilкин А.Х., Ермолов И.Н., Иванов В.И., Шишов А.П. К вопросу о распространении ультразвуковых продольных волн вблизи поверхности твердого тела // Акустический журнал. 1978. Т. 24. Вып. 1. С. 15—20.
15. Ермолов И.Н., Разыграев Н.П., Щербинский В.Г. Исследование ослабления ультразвуковых головных волн с расстоянием // Дефектоскопия. 1979. № 1. С. 37—40.
16. Базулин Е.Г. Когерентное восстановление изображений дефектов с учетом эффекта незеркального отражения ультразвуковых импульсов от границ объекта контроля // Дефектоскопия. 2010. № 7. С. 18—29.
17. Бреховских Л.М., Годин О.А. Акустика слоистых сред. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. 416 с.
18. Люткевич А.М., Жуков А.В., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. Акустические поля малоапертурных преобразователей. Поперечные волны, излучаемые прямоугольным источником нормальной силы // Контроль. Диагностика. 2004. № 4. С. 3—8.
19. Шевалдыкин В.Г., Самокрутов А.А. Экспериментальные диаграммы направленности малоапертурных ЭМА преобразователей при вертикальном и горизонтальном магнитном поле / Сборник тезисов докладов XXIV Петербургской научно-технической конференции «Инновационные средства и технологии ультразвукового контроля и диагностики». 24—27 мая 2022 г. Санкт-Петербург. С. 15—17.
20. Перевалов С.П., Райхман А.З. Акустический тракт наклонного искателя для отражателя углового типа. I // Дефектоскопия. 1979. № 11. С. 5—15.

ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ КОРУНДОВЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ПЛАСТИН

© 2023 г. С.Е. Черных^{1,*}, В.Н. Костин^{1,**}, Ю.И. Комоликов^{1,***}

¹Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН,
Россия 620108 Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18
E-mail: *suo@mail.ru; **kostin@imp.uran.ru; ***yikom@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.07.2023; после доработки 21.07.2023
Принята к публикации 25.07.2023

Проведен обзор способов производства корундовой керамики с заданными характеристиками и указаны возможные причины появления скрытых дефектов. Методом шликерного литья получены образцы керамики для исследований и определены их физические свойства. Методом активного теплового неразрушающего контроля исследована возможность диагностики целостности пластин из корундовой керамики. Применены различные схемы контроля и источники тепловой стимуляции исследуемых образцов. В качестве эталонного метода использован рентгенографический контроль, подтвердивший характеристики обнаруженного тепловым методом дефекта в контрольном образце.

Ключевые слова: керамика, композит, дефектоскопия, термография, тепловой контроль.

THERMAL TESTING OF CORUNDUM CERAMIC PLATES

© 2023 г. S.E. Chernykh^{1,*}, V.N. Kostin^{1,**}, Yu.I. Komolikov^{1,***}

¹M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences,
Sof'i Kovalevskoy str., 18, Yekaterinburg 620108 Russia,
E-mail: *suo@mail.ru; **kostin@imp.uran.ru; ***yikom@yandex.ru

A review of the methods of production of corundum ceramics with specified characteristics is carried out and possible causes of hidden defects are indicated. Ceramic samples for research were obtained by the method of slip casting and their physical properties were determined. The possibility of diagnosing the integrity of corundum ceramic plates was investigated by the method of active thermal non-destructive testing. Various testing schemes and sources of thermal stimulation of the studied samples were applied. As a reference method, X-ray inspection was used, which confirmed the characteristics of the defect detected by the thermal method in the control sample.

Keywords: ceramics, composite, flaw detection, thermography, thermal testing.

DOI: 10.31857/S0130308223090051, **EDN:** ECBBIK

ВВЕДЕНИЕ

Изделия из керамики востребованы и находят широкое применение в различных областях науки, техники и технологии. Очень часто керамические изделия незаменимы для работы в экстремальных условиях. Примером могут быть электронные ускорители, состоящие из двух секций: в первой из которых происходит ускорение электронов и в ней создается высокий вакуум, а во второй находится мощный источник электромагнитной энергии сверхвысокой частоты (СВЧ). Необходимая для ускорения электронов СВЧ мощность (десятки МВт) из второй секции в первую поступает через керамическое окно, разделяющее обе секции. В этом случае керамика окна должна обладать вакуумной, механической и электрической прочностью, выдерживать термические удары и в минимальной степени поглощать проходящее через нее СВЧ излучение. Неоднородность структуры, присутствие пор, раковин и трещин, скопления примесных дефектов в такой керамике приводит к тяжелым авариям. Обнаружение таких дефектов методами неразрушающего контроля является актуальной научно-технической задачей.

Современное производство функциональной керамики и керамических композитов основано на применении непластичных кристаллических искусственных материалов в виде тонкодисперсных порошков оксидов, нитридов и карбидов [1, 2]. В смеси с водой эти порошки не проявляют пластичных свойств и пользуясь традиционным методом пластичного формования из них нельзя изготовить готовое изделие. Для производства изделий из непластичных кристаллических материалов разработаны особые методы формования. Основными из них являются литье из водных суспензий в пористые формы; литье горячих шликеров под давлением; экструзия пластифицированных масс; прессование порошкообразных масс в различных вариантах; прессование при высо-

ких температурах (горячее прессование); пленочное литье [1, 3]. Выбор того или иного метода зависит главным образом от формы, требуемой точности размеров изделий, их свойств, а также масштаба производства. Для изготовления конкретного изделия наиболее рационален и экономичен будет какой-либо один метод из вышеперечисленных.

Усложнение технологических процессов увеличивает потребность в материалах для защиты оборудования и технических средств от ударного, абразивного и механического разрушения. И одним из перспективных направлений защиты от таких воздействий является использование керамических материалов, которые обладают комплексом уникальных свойств: низкой плотностью, высокой твердостью и достаточной прочностью, высоким модулем упругости [4]. Среди широкого спектра керамических материалов наибольшее применение находят керамики на основе оксида алюминия. Популярность алюмооксидной керамики обеспечивается такими функциональными характеристиками, как огнеупорность, твердость, прочность, биоинертность, износостойкость и химическая стойкость, устойчивость к ударным нагрузкам и радиационному воздействию. Кроме того, если рассматривать техникоэкономические показатели различных керамических материалов по соотношению «цена—качество», то у керамики на основе Al_2O_3 они являются оптимальными. Этим обусловлен значительный объем применения этой керамики [5, 6]. Изделия из корундовой керамики востребованы в различных отраслях: металлургии, станкостроении, аэрокосмической, электротехнической, оборонной, автомобильной, химической, медицинской, атомной энергетике и др. [5—8]. Применение корундовой керамики играет важную роль в развитии высокотехнологичных областей современной техники.

Керамика на основе Al_2O_3 достаточно хорошо изучена. Плотность алюмооксидной керамики изменяется в диапазоне 3,75—3,95 г/см³, механическая прочность на изгиб в диапазоне 300—600 МПа, предел прочности при сжатии находится в диапазоне 2000—4000 МПа, твердость 16—21 ГПа. Керамика на основе Al_2O_3 имеет сравнительно малую теплопроводность. При комнатной температуре коэффициент теплопроводности находится в диапазоне 20—30 Вт/(м·К). Алюмооксидная керамика характеризуется высоким электрическим сопротивлением, изменяющимся при комнатной температуре в пределах $1 \cdot 10^{14}$ — $1 \cdot 10^{15}$ Ом·см. Температура плавления Al_2O_3 составляет 2097 °С. Керамика на основе Al_2O_3 , обладая высокой химической устойчивостью к коррозии и механическому износу, имеет высокий предел рабочей температуры, который может изменяться в зависимости от величины механической нагрузки в диапазоне 1000—1500 °С [5, 7]. Благодаря сравнительно малой стоимости, широкой доступности и высоким диэлектрическим свойствам изделия из алюмооксидной керамики широко используются в гражданских видах продукции, а также в радиоэлектронной промышленности в качестве диэлектрических подложек для СВЧ-транзисторов и микросхем средней мощности. В последнее время керамика на основе Al_2O_3 нашла применение в качестве ударостойкого элемента в композиционной броне, используемой для защиты личного состава и военной техники от средств поражения [9]. Процесс производства этого вида керамики и обеспечение свойств получаемой продукции требует особого контроля.

При получении функциональной корундовой керамики основными считаются следующие два способа формования: холодное статическое прессование с одно- или двухсторонним приложением давления и шликерное литье [4—6]. В более широком смысле термин «шликер» следует понимать как «литейная керамическая композиция», которая предназначена для формования керамических заготовок из порошков суспензированных в жидкости (шликером).

Метод шликерного литья позволяет получать наиболее плотные заготовки в сравнении с холодным статическим прессованием [3, 4]. Основными способами шликерного литья являются: литье из водных шликеров, литье термопластичных шликеров и горячее литье под давлением.

При формовании методом литья из водных суспензий шликер заливают в пористую, чаще всего гипсовую форму. Вода из шликера под действием капиллярных сил проникает в поры формы, а твердые частицы остаются внутри формы, таким образом, происходит набирание тела заготовки. После набора массы до требуемой толщины избыток шликера удаляют, заготовку извлекают из формы, сушат и обжигают [5, 6]. Пригодный для литья шликер должен характеризоваться небольшими напряжениями сдвига и незначительной вязкостью и не содержать растворенных газов. Поэтому шликер перед литьем вакуумируют и добавляют в него антивспениватель. Если эта процедура выполнена некачественно, то могут образоваться такие внутренние дефекты, как закрытые поры и раковины, которые часто остаются визуально незаметными, однако их наличие приводит к серьезным нарушениям работы оборудования и впоследствии может стать причиной аварий [8, 9]. Поэтому к применяемым керамическим изделиям предъявляют высокие требования по контролю однородности структуры, отсутствию пор, раковин и трещин.

Основными методами неразрушающего контроля керамики являются: контроль проникающими веществами, ультразвуковой контроль, рентгенография, инфракрасная термография, акустическая эмиссия, лазерная ультразвуковая диагностика, машинное зрение и др. [10]. Хотя к настоящему времени высокопроизводительная инфракрасная термография неметаллов получила достаточно интенсивное развитие [11], тем не менее работ по тепловому контролю изделий из корундовой керамики практически нет.

Целью настоящего исследования являлось изучение возможности обнаружения внутренних дефектов в керамических пластинах с использованием методик теплового контроля [12]. В данной работе представлены результаты исследования готовых изделий из корундовой керамики различными способами активного теплового контроля [13].

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Плитки размером 50×50×9 мм для проведения исследований были приготовлены методом шликерного литья. Для производства литейного шликера порошок Al_2O_3 , содержащий 4 масс. % эвтектической добавки $MgO - Al_2O_3 - SiO_2$, подвергали помолу в корундовой мельнице с шарами из диоксида циркония в течение 15 ч в весовом соотношении материал/вода/шары 1/1,5/3 соответственно. После помола суспензию оставляли отстаиваться на 48 ч. Затем сливали избыточный водный раствор так, чтобы концентрация твердой фазы в шликере составляла 50—60 масс. %. Истинную концентрацию твердой фазы определяли после сушки шликера при температуре 450 °С. Приготовленный шликер заливали в гипсовые формы и получали заготовки пластин и образцов-свидетелей размером 7×7×35 мм. Сформованные образцы и пластины сушили, затем спекали на воздухе при температуре 1550 °С, выдержка при максимальной температуре составляла 120 мин.

Спеченные образцы-свидетели после обжига подвергли исследованиям механических свойств. Предел прочности на изгиб определяли на установке «Instron-1185». Значения микротвердости измеряли на установке «Nanotest 600» с использованием алмазной пирамидки Виккерса. Для обработки результатов измерений использовали показатель среднего арифметического из 5 измерений.

Плотность обожженных керамических образцов определяли методом гидростатического взвешивания в спирте на весах «Shumadzu AUW-220 D», оснащенных специальной приставкой. Теплопроводность спеченной корундовой керамики определяли методом лазерной вспышки на приборе LFA 457 MicroFlash фирмы NETZSCH, Германия.

После обжига все плитки имели высокую плотность от 3,78 до 3,91 г/см³, твердость 16—19 ГПа, прочность на изгиб 280—300 МПа и коэффициент теплопроводности 25 Вт/(м·К). Свойства пластин приведены в табл. 1.

Таблица 1

Свойства образцов для испытаний

Свойства	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3
Плотность, г/см ³	3,78	3,91	3,89
Модуль упругости, ГПа	340	350	345
Твердость, HV	16	18	16
Прочность при изгибе, МПа	280	300	290
Вязкость разрушения, МПа·м ^{1/2}	4,2	4,4	4,0

Строение спеченных плиток характеризовалось мелкозернистой равномерной структурой с размером зерен в пределах 1—5 мкм (рис. 1).

Для проведения теплового контроля были выбраны три пластины — одна дефектная и две бездефектных (рис. 2). Дефект в образце № 1 представлял собой внутреннюю воздушную полость высотой около 3 мм с остаточной толщиной стенки примерно по 3 мм с обеих поверхностей образца, занимающую около 30 % площади пластины.

Термографирование образцов проводили при различных способах тепловой стимуляции [14]. В первой части испытаний при одностороннем и двустороннем тепловом контроле в качестве источника тепловой стимуляции применяли поток горячего воздуха, создаваемый феном [15].

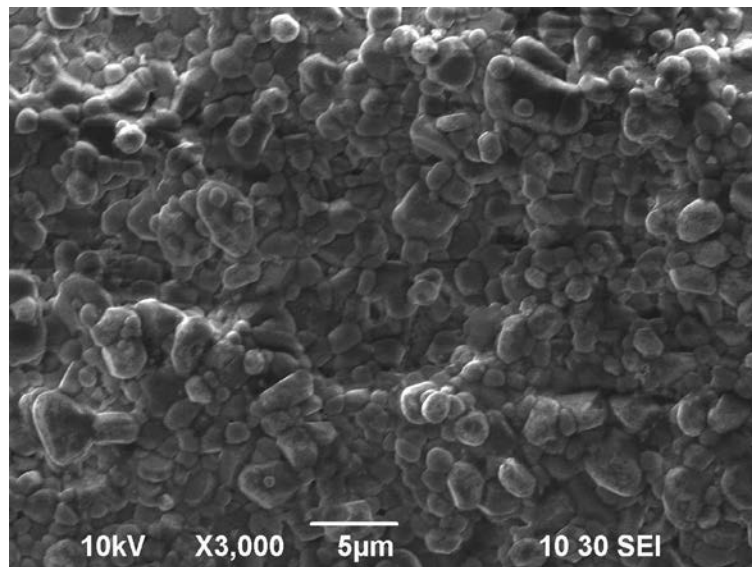


Рис. 1. Характерная микроструктура плиток (поверхность излома образца-свидетеля).

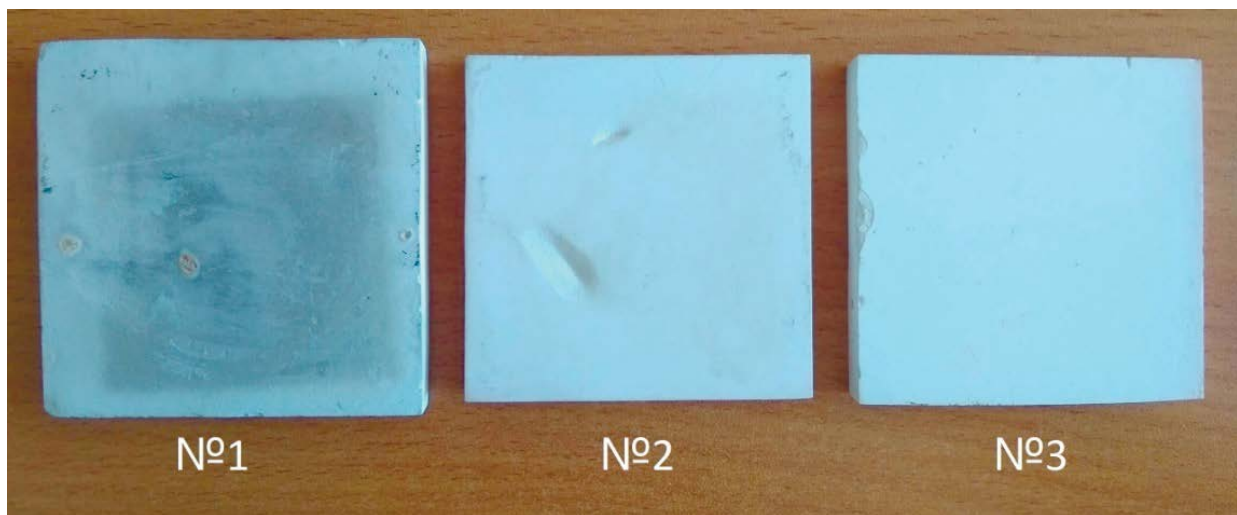


Рис. 2. Внешний вид образцов для теплового контроля.

Во второй части испытаний для тепловой стимуляции керамических образцов применяли соленоид с переменным магнитным полем, в который помещали металлическую пластину, обеспечивая, таким образом, двусторонний тепловой контроль (рис. 3).

Распределение тепловых полей на наружной поверхности образцов фиксировали с помощью инфракрасной камеры NEC TH7800 компании NEC, Япония. Основные характеристики прибора: формат термограмм 320×240, пространственное разрешение 1,5 мрад, температурная чувствительность 50 мК при 30 °С, спектральный диапазон 8—14 мкм. Были выбраны как оптимальные углы и расстояния съемки, так и оптимальные временные промежутки тепловой стимуляции образцов [16].

На заключительном этапе исследований для подтверждения результатов теплового контроля с помощью рентгеновского аппарата «РПД-200С» были получены снимки образцов № 1 (с дефектом) и № 2 (без дефекта). Рентгеновское изображение оптимального качества было получено при режиме: напряжение — 70 кВ, ток — 3 мА, время экспозиции — 50 с.

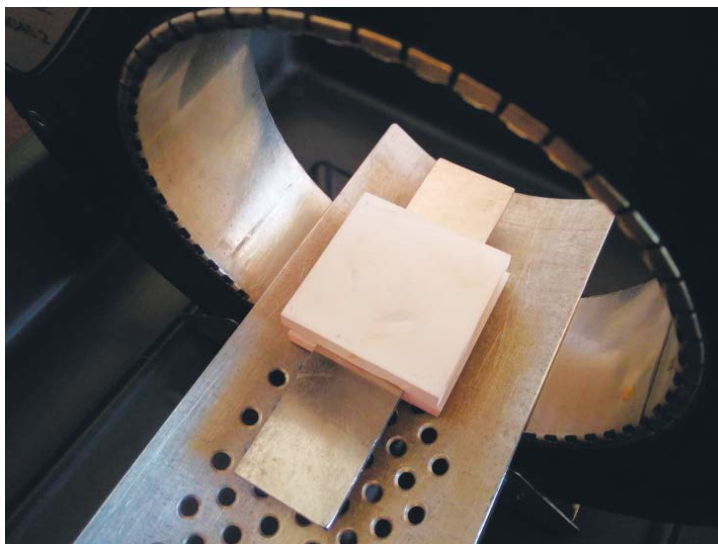


Рис. 3. Внешний вид соленоида и керамического образца на металлической пластине (130×30×5 мм, 30ХГСА).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 4—9 представлены термограммы исследуемых образцов, полученные активным тепловым методом с использованием одностороннего и двустороннего способов контроля.

На рис. 4 наблюдается инфракрасное изображение образцов до тепловых испытаний. Образцы имеют радиационную температуру, близкую к температуре окружающего воздуха, при этом незначительная видимая разница температур обусловлена различным коэффициентом излучения поверхностей пластин, а также наличием отраженного излучения среды.

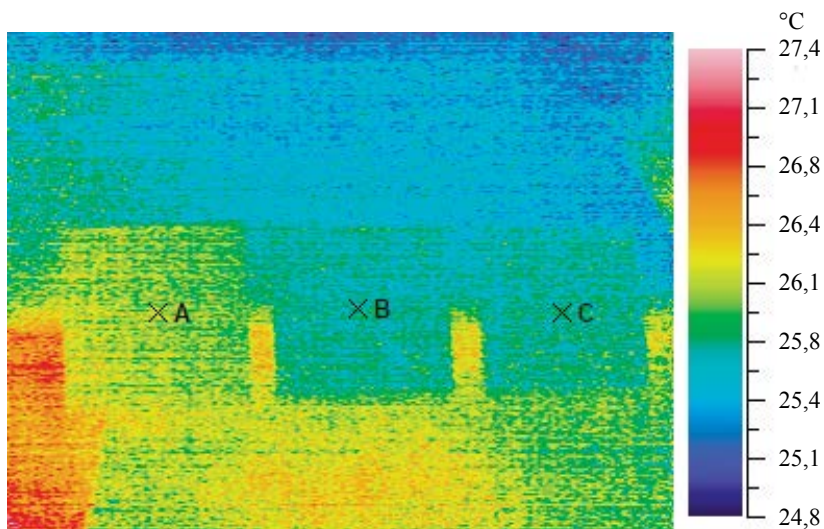


Рис. 4. Образцы до теплового воздействия ($T_A = 26,2$ °C; $T_B = 25,8$ °C; $T_C = 25,8$ °C).

Термограмма на рис. 5 получена через 30 с после воздействия потока горячего воздуха на лицевую поверхность образца. В левой части образца (т. В) отчетливо видна область повышенной (красный цвет) температуры, характеризующейся сигналом $\Delta T \approx 1,3$ °C, что соответствует проекции расположения внутренней несплошности. Повышение температуры в этой области произошло вследствие малой теплопроводности воздуха (0,03 Вт/(м·К)) в полости по сравнению с керамикой (25 Вт/(м·К)), что приводит к накоплению тепловой энергии перед дефектом.

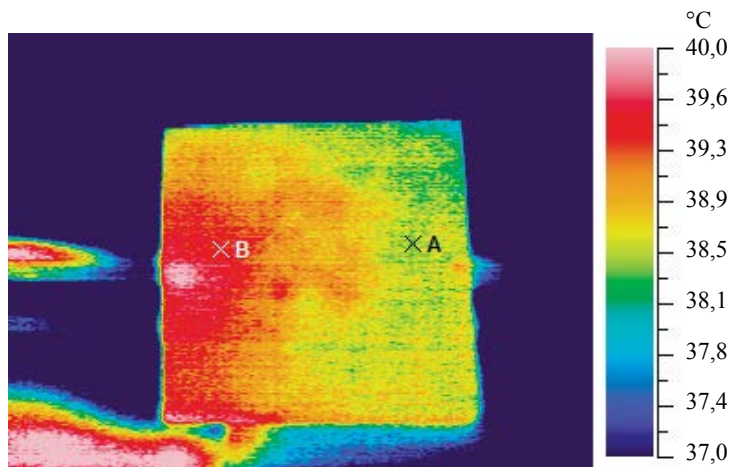


Рис. 5. Образец № 1 с внутренним дефектом в виде воздушной полости при одностороннем тепловом контроле ($T_A = 38,2$ °C; $T_B = 39,5$ °C; время нагрева — 30 с; время регистрации — непосредственно после окончания нагрева).

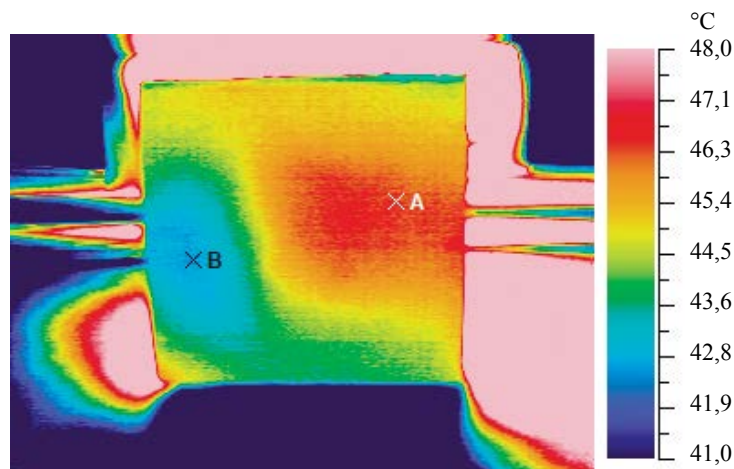


Рис. 6. Образец № 1 с внутренним дефектом в виде воздушной полости при двустороннем тепловом контроле ($T_A = 46,4$ °C; $T_B = 42,5$ °C; время нагрева — 1 мин; время регистрации — непосредственно после окончания нагрева).

Термограмма на рис. 6 получена через 1 мин после воздействия потока горячего воздуха на обратную поверхность образца. В левой части образца видна область пониженной (синий цвет) температуры (т. В), характеризующаяся сигналом $\Delta T \approx 4,0$ °C и соответствующая проекции дефекта.

Для сравнения на рис. 7 представлена термограмма бездефектного образца № 3. Поверхность образца имеет относительно равномерное температурное поле.

На рис. 8 представлена термограмма образца № 2, полученная путем нагрева его задней поверхности с помощью металлической пластины, помещенной в переменное магнитное поле соленоида (50 Гц, 25000 А/м). Время работы установки ≈ 30 с. Вдоль проекции металлической пластины видна полоса нагрева керамики с $\Delta T \approx 1,3$ °C (разница температур в точках А и В). В т. С на термограмме просматривается тепловая аномалия от видимого поверхностного артефакта типа незначительного углубления (до 15 % толщины образца).

При помещении в соленоид на металлическую пластину дефектного образца № 1 получена термограмма, представленная на рис. 9. Время работы установки ≈ 1 мин. В зоне т. В на термограмме просматривается проекция дефекта, соответствующая внутренней несплошности – зона пониженной температуры $\Delta T \approx 2,0$ °C. Область проекции внутреннего дефекта имеет пониженную температуру (синий цвет) вследствие того, что тепловой поток источника нагрева не достигает контролируемой поверхности вследствие низкой теплопроводности воздуха в дефекте.

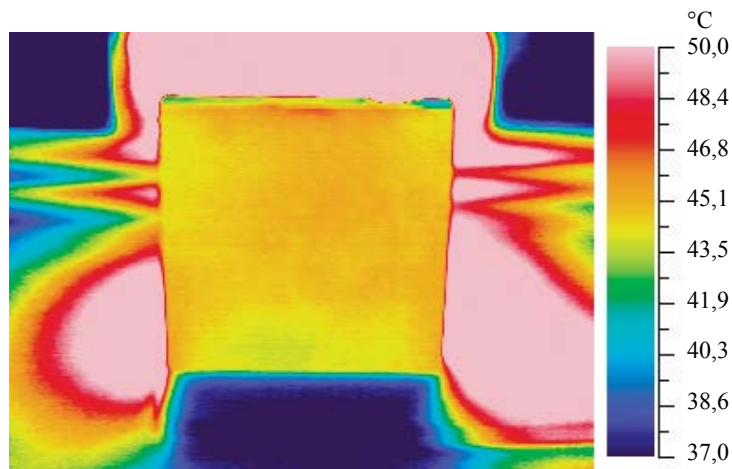


Рис. 7. Образец № 3 без дефектов при двустороннем тепловом контроле.

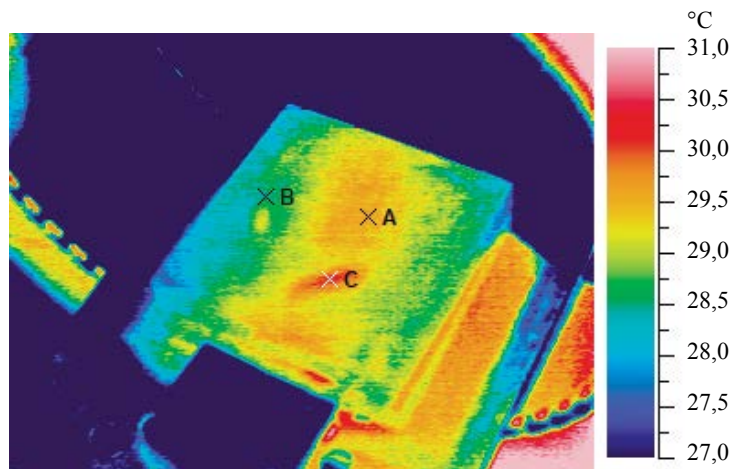


Рис. 8. Образец № 2 при расположении на металлической пластине, находящейся в переменном магнитном поле соленоида ($T_A = 29,6$ °C; $T_B = 28,3$ °C; $T_C = 30,2$ °C; время нагрева — 30 с; время регистрации — непосредственно после окончания нагрева).

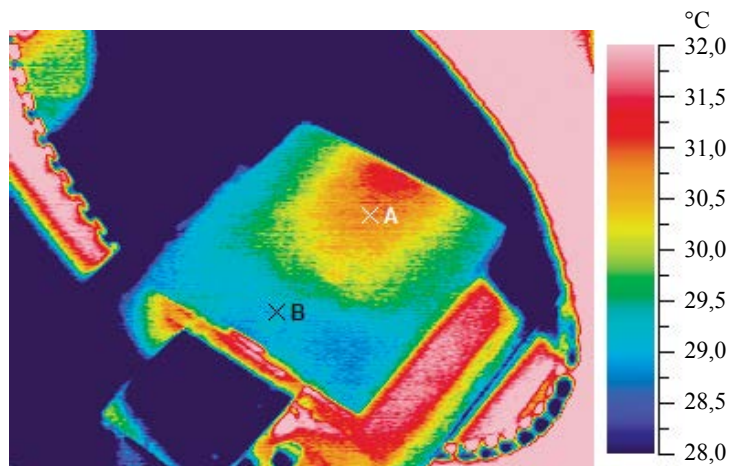


Рис. 9. Образец № 1 с внутренним дефектом в виде воздушной полости при расположении на металлической пластине, находящейся в переменном магнитном поле соленоида ($T_A = 31,0$ °C; $T_B = 29,0$ °C; время нагрева — 1 мин; время регистрации — непосредственно после окончания нагрева).

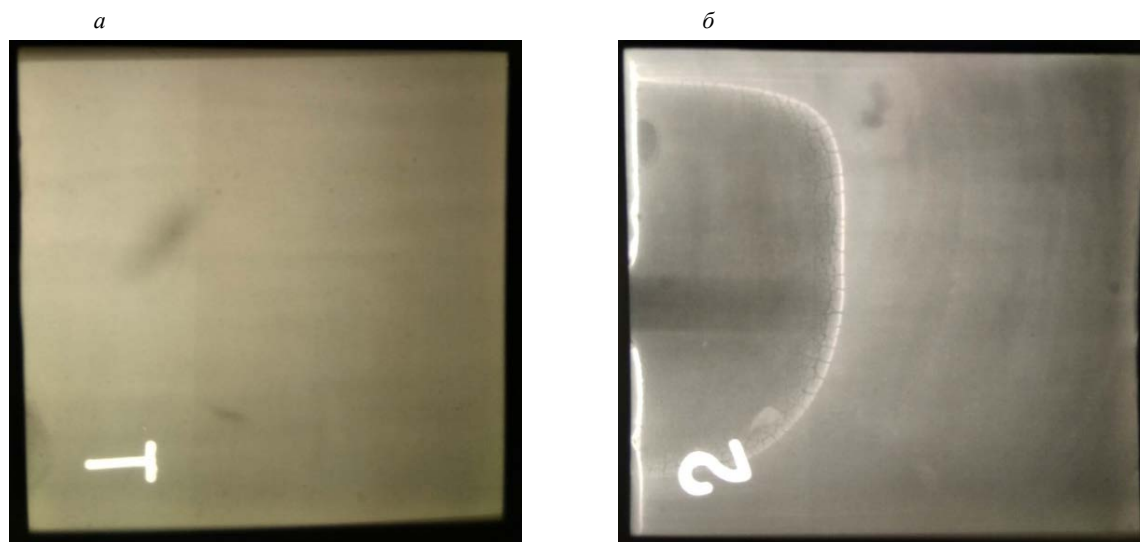


Рис. 10. Рентгеновские снимки керамических образцов: образец № 2 (а); образец № 1 (б).

При анализе рентгеновского снимка образца № 1 с дефектом отчетливо видна проекция воздушной полости в левой части снимка (рис. 10б). Недостаток материала по толщине в полости составляет при этом около 3 мм. Расположение, размер и форма дефекта соответствуют характеристикам тепловых аномалий, полученных по термограммам при различных способах теплового контроля (см. рис. 5, рис. 6 и рис. 9). Резкую границу в виде светлой линии между бездефектным материалом и воздушной полостью, вероятно, можно объяснить выпадением по этой границе более рентгеноконтрастной фазы из исходного водного раствора при затвердевании.

В левой верхней части снимка образца № 2 (рис. 10а) виден артефакт темного цвета, соответствующий поверхностному углублению в образце, т.е. утонению на 15 %. Этот участок также соответствует тепловой аномалии в т. С на рис. 8, что говорит о возможности применения теплового контроля для обнаружения поверхностных дефектов в керамике.

Исследований керамических пластин целесообразно продолжить с помощью процедур одно- и двустороннего теплового контроля при различных источниках тепловой стимуляции [17].

ВЫВОДЫ

Установлено, что как при одностороннем, так и при двустороннем тепловом контроле, при использовании в качестве тепловой стимуляции потока горячего воздуха в керамических пластинах возможно обнаружение внутренних дефектов типа воздушной полости. Для контроля таких дефектов возможно также использовать двухсторонний тепловой контроль с применением в качестве источника тепловой стимуляции металлической пластины, находящейся в зоне действия соленоида с переменным магнитным полем.

Результаты исследований показывают, что активный тепловой метод неразрушающего контроля может быть использован для диагностики целостности пластин из корундовой керамики и обнаружения внутренних несплошностей, которые могут возникать в процессе производства. Предложенный подход может рассматриваться как более технологичная и безопасная альтернатива, например, рентгеновскому контролю при массовом производстве ответственных изделий из корундовой керамики.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», № 122021000030-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Carter C.B., Norton M.G.* Ceramic materials: science and engineering. New York: Springer, 2007. 716 p.
2. *Basu B., Balani K.* Advanced Structural Ceramics. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2011. 512 p.
3. *Okada A.* Ceramic technologies for automotive industry: current status and perspectives // *Mater. Sci. Eng. B.* 2009. V. 161. P. 182—187.

4. Лукин Е. С., Макаров Н.А., Козлов А.И., Попова Н.А., Ануфриева Е.В., Вартанян М.А., Козлов И.А., Сафина М.Н., Лемешев Д.О., Горелик Е.И. Оксидная керамика нового поколения и области ее применения // *Стекло и керамика*. 2008. № 10. С. 27—31.
5. Aluminum oxide. Production, properties, applications / Translation: Horst H. Pohland. Ludwig Auer: Donaueschingen, 1999. 70 p.
6. Кайнарский И.С., Дегтярева Э.В., Орлова И.Г. Корундовые огнеупоры и керамика. М.: Металлургия, 1981. 267 с.
7. Sequeira S., Fernandes M.H., Neves N., Almeida M.M. Development and characterization of zirconia-alumina composites for orthopedic implants // *Ceram. Int.* 2017. V. 43. P. 693—703.
8. Жолудев Д.С., Григорьев С.С., Панфилов П.Е., Зайцев Д.В. Обоснование использования керамики на основе оксида алюминия с помощью изучения ее механических свойств // *Современные проблемы науки и образования*. 2014. № 3. С. 520.
9. Garshin A.P., Kulik V.I., Nilov A.S. Shock-resistant materials based on commercial grade ceramic: achievements and prospects for improving their ballistic efficiency // *Refract. Ind. Ceram.* 2016. V. 57. No. 2. P. 207—219.
10. Zhike Z. Review of non-destructive testing methods for defect detection of ceramics // *Ceramics International*. 2021. V. 47. No. 4. P. 4389—4397.
11. Вавилов В.П. Тепловой неразрушающий контроль: развитие традиционных направлений и новые тенденции (обзор) // *Дефектоскопия*. 2023. № 6. С. 38—58.
12. Вавилов В.П. Неразрушающий контроль / Справочник. В 7 т. Т. 5. В 2 кн. Кн. 1. Под общ. ред. В. В. Клюева. М.: Машиностроение, 2004. 418 с.
13. Vavilov V.P. Thermal nondestructive testing of materials and products: a review // *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2017. V. 53. No. 10. P. 707—730.
14. Вавилов В.П., Чулков А.О., Дерусова Д.А., Пань Я. Новые идеи в активном тепловом контроле // *В мире неразрушающего контроля*. 2016. № 1. С. 5—7.
15. Вандельт М., Креггер Т., Йоханнес М. Активная термография — эффективный метод неразрушающего контроля крупногабаритных изделий из композиционных материалов // *В мире неразрушающего контроля*. 2016. № 1. С. 8—12.
16. Silva A.R., Vaz M., Leite S.R., Mendes J. Analyzing the Influence of Thermal NDT Parameters on Test Performance // *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2021. V. 57. P. 727—737.
17. Chulkov A.O., Vavilov V.P., Kladov D.Y., Yurkina V.A. Thermal Nondestructive Testing of Composite and Metal Parts Manufactured by Additive Technologies // *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2022. V. 58. P. 1035—1040.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ДВИЖЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ УСТАНОВКИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СОПЕЛ ЖРД

© 2023 г. В.В. Малый^{1,*}, А. С. Костюхин^{1,**}, А. В. Федоров^{1,***}, И. Ю. Кинжагулов^{1,****}

¹Университет ИТМО, Россия 197101 Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49
E-mail: *banqvalera@mail.ru; **noxx9999@yandex.ru; ***afedor62@yandex.ru; ****kinzhiki@mail.ru

Поступила в редакцию 30.05.2023; после доработки 09.06.2023
Принята к публикации 09.06.2023

Рассматриваются вопросы разработки алгоритма движения измерительного модуля установки автоматизированного неразрушающего контроля качества паяных соединений сопла жидкостного ракетного двигателя (ЖРД). Описан объект контроля, возникающие в процессе изготовления дефекты паяных соединений, а также проблемы производства и испытаний сборочных единиц. Определены основные факторы, снижающие вероятность выявления дефектов, предложены пути решения. Обоснована необходимость использования алгоритмов построения маршрута в разработанном алгоритме движения. Определен алгоритм получения пути перемещения преобразователя для измерительного модуля установки автоматизированного неразрушающего контроля паяных соединений для выявления таких дефектов, как «неспай», «непропай» и «частичный непропай».

Ключевые слова: неразрушающий контроль, ультразвуковой контроль, контроль паяных соединений, контроль сопла двигателя, автоматизированный неразрушающий контроль.

DEVELOPMENT OF THE ALGORITHM FOR THE MOVEMENT OF THE MEASURING MODULE OF THE SYSTEM OF AUTOMATED NON-DESTRUCTIVE TESTING OF THE NOZZLE OF A LPRE

© 2023 г. V.V. Malyy^{1,*}, A.S. Kostyukhin^{1,**}, A.V. Fedorov^{1,***}, I.Y. Kinzhagulov^{1,****}

¹ITMO University, Kronverksky Prospect, 4, Saint-Petersburg, 197101 Russia
E-mail: *banqvalera@mail.ru; **noxx9999@yandex.ru; ***afedor62@yandex.ru; ****kinzhiki@mail.ru

The paper considers the development of the algorithm for the movement of the measuring module of the system of automated non-destructive testing of solder joints of the nozzle of a liquid propellant rocket engine (LPRE). The object of control, the flaws in soldered joints that arise during the manufacturing process, as well as the problems of production and testing of assembly units, are described. The main factors that reduce the probability of detecting defects are determined, and solutions are proposed. The necessity of using route construction algorithms in the developed traffic algorithm is substantiated. An algorithm for obtaining the path of the transducer movement for the measuring module of the system of automated non-destructive testing of solder joints is defined to detect such defects as "dry joint", "cold lap" and "partial dry joint".

Keywords: non-destructive testing, ultrasonic testing, solder joint testing, engine nozzle testing, automated non-destructive testing.

DOI: 10.31857/S0130308223090063, EDN: ECRARN

ВВЕДЕНИЕ

Сопло ЖРД представляет собой сложную геометрическую конструкцию с множеством внутренних полостей, что усложняет технологию пайки, связанную со сложностями нанесения припоя, и требует обеспечения стабильности зазора между элементами. Качество паяных соединений (ПС) является критически важным, так как из-за высоких эксплуатационных нагрузок и характера режимов работы сопла дефекты могут привести к выходу изделия из строя.

Объект контроля (ОК) представляет собой соединение двух деталей из разнородных металлов (бронза БрХ08 и никелевый сплав ЭК61) с фрезерованными канавками на одной из них, которые соединяются при помощи вакуумно-компрессионной пайки (рис. 1).

АКТУАЛЬНОСТЬ

В настоящее время оценку качества паяных соединений определяют путем огневых, гидравлических и пневматических испытаний, которые являются разрушающими. Использование вышечисленных методов оценки качества в большинстве случаев приводит к повреждению изделия.

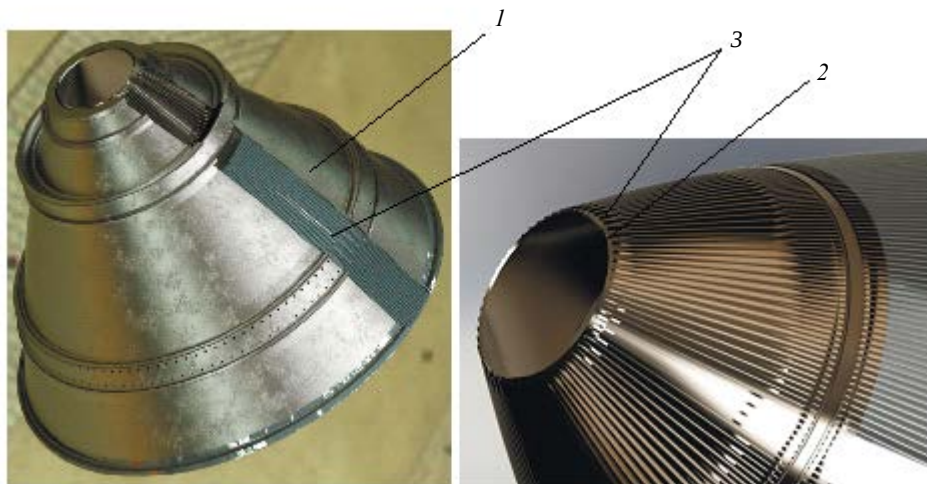


Рис.1. Внутренняя структура объекта контроля: 1 — наружная прочностная оболочка; 2 — внутренняя огневая оболочка; 3 — ребра.

Исходя из этого, использование неразрушающего контроля (НК) в данной области является актуальным.

Существующие методики НК, которые направлены на выявление дефектов типа «непропай» (полное незаполнение зазора припоем) и «частичный непропай» (частичное незаполнение зазора припоем), представляют собой ручную реализацию методов ультразвукового НК и представлены в работах [1, 2].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Ручной ультразвуковой контроль сопла двигателя трудоемок и приводит к ошибкам при сканировании и анализе результатов. Для повышения оперативности и точности контроля необходимо автоматизировать процесс сканирования поверхности ОК, что заключается в перемещении преобразователя по заданной траектории с постоянной скоростью.

Ультразвуковой контроль накладывает ряд ограничений на разрабатываемый алгоритм, такие как: точность позиционирования относительно ОК, плавность перемещения (отсутствие вибраций), скорость перемещения, минимальный шаг сканирования (равный ширине пятна контакта датчика) и т.д.

Источником исходных данных о геометрическом профиле ОК является ограниченный набор точек радиуса кривизны сопла ЖРД, удаленных от критического сечения. Для сканирования всей поверхности ОК этих данных недостаточно, поэтому необходимо вычислить значения координат точек в промежутках между известными точками путем аппроксимации.

Планирование маршрута

Планирование маршрута позволяет оптимизировать процесс сканирования, уменьшить время и повысить точность контроля. Решение задачи планирования маршрута является необходимым условием для автоматизации процесса НК. Она состоит из трех основных аспектов: определения пути от начальной до конечной точки, учета возможных препятствий на пути и выбора оптимального пути среди всех возможных вариантов [3, 4].

Использование планирования маршрута для аппроксимации геометрии объекта контроля, реализуется на базе известных точек профиля из конструкторской документации, через которые проходит маршрут. Затем используется метод интерполяции, такой как кубический сплайн, для аппроксимации пути через эти точки. Кубический сплайн позволяет создать кусочно-кубический полином, который будет проходить через все заданные точки и обладать свойствами гладкости и непрерывности производных.

Далее рассчитываются промежуточные значения обобщенных координат, скоростей и ускорений для каждого звена между заданными конфигурациями, используя полиномы вида:

$$q_i(t) = a_{l,i}t^l + a_{l-1,i}t^{l-1} + \dots + a_{2,i}t^2 + a_{1,i}t + a_{0,i}; \quad (1)$$

$$\dot{q}_i(t) = la_{l,i}t^{l-1} + (l-1)a_{l-1,i}t^{l-2} + \dots + 2a_{2,i}t + a_{1,i}; \quad (2)$$

$$\ddot{q}_i(t) = l(l-1)a_{l,i}t^{l-2} + (l-1)(l-2)a_{l-1,i}t^{l-3} + \dots + 2a_{2,i}, \quad (3)$$

где степень l и коэффициенты $a_{j,i}, j = \{1, 2, \dots, l\}$ определяются в зависимости от граничных условий и наложенных требований на непрерывность траектории. При планировании траектории исходными данными выступают набор конфигураций и моменты времени их прохождения [5].

При разработке базовых принципов планирования маршрута были выполнены следующие шаги: определено количество сегментов траектории, нормировано время, определены граничные условия и требования на непрерывность траектории между смежными сегментами, а также определены степени полиномов для каждого звена и сегмента траектории. Затем составлено матричное уравнение и решено относительно неизвестных коэффициентов полиномов. Полученная траектория используется для перемещения преобразователя.

ВЫВОДЫ

Разработанный алгоритм движения на базе планирования маршрута позволяет учитывать геометрические особенности ОК и повысить эффективность контроля. Планирование движения в данном алгоритме позволяет обеспечить требования к ультразвуковому контролю. Таким образом, автоматизированный ультразвуковой контроль на базе разработанного алгоритма позволяет повысить точность контроля, снизить влияние человеческого фактора, а также уменьшить время, затрачиваемое на процесс контроля, что позволяет сократить издержки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кинжагулов И.Ю. Модель термооптического возбуждения ультразвуковых волн в паяных тонкостенных изделиях // Изв. ВУЗов. Приборостроение. 2011. Т. 54. № 7. С. 39—44.
2. Сергеев Д.С., Астрединова Н.В. Методика контроля качества паяных соединений камер ЖРД с применением метода лазерно-ультразвуковой диагностики // Сборник трудов II Всероссийский конгресс молодых ученых. СПб.: НИУ ИТМО, 2013. С. 67.
3. Choset H., Lynch K., Seth H., Kantor G., Burgard W., Kavraki L.E., Thrun S. Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms, and Implementation. MIT Press, 2005. 603 p.
4. Казаков К.А., Семенов В.А. Обзор современных методов планирования движения // Труды ИСП РАН. 2016. Т. 28. № 4. С. 241—294.
5. Борисов О.И., Громов В.С., Пыркин А.А. Методы управления робототехническими приложениями: Учебное пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2016. 108 с.

ВОЗМОЖНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА МНОГОКРАТНОЙ ТЕНИ ПРИ КОНТРОЛЕ РЕЗЬБЫ НАСОСНЫХ ШТАНГ

© 2023 г. О.В. Муравьева^{1,2,*}, П.Н. Пушин¹, К.А. Торхов¹

¹ *Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова,
Россия 426069 Ижевск, ул. Студенческая, 7*

² *Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,
Россия 426067 Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34
E-mail: *pmkk@istu.ru*

Поступила в редакцию 25.05.2023; после доработки 02.06.2023

Принята к публикации 02.06.2023

Исследована возможность обнаружения дефектов в резьбе насосных штанг методом многократной тени. Для реализации метода использован специализированный электромагнитно-акустический преобразователь, навинчиваемый на исследуемую резьбу. Предложенный подход основан на спектральном методе обработки сигналов и анализе влияния дефекта на формирование отдельных составляющих в спектре сигнала, обусловленных наличием резонансных свойств резьбы.

Ключевые слова: резьба насосных штанг, электромагнитно-акустический преобразователь, метод многократной тени, спектр.

THE POSSIBILITIES OF THE ELECTROMAGNETIC-ACOUSTIC MULTIPLE SHADOW METHOD WHEN TESTING THE THREADS OF PUMP RODS

© 2023 O.V. Muraveva^{1,2,*}, P.N. Pushin¹, K.A. Torkhov¹

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

² *Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
T. Baramzina. str., 34, Izhevsk, 426067, Russia*

**E-mail: olgak166@mail.ru*

The possibility of detecting defects in the threads of pump rods by the multiple shadow method has been investigated. A specialized electromagnetic-acoustic transducer screwed onto the tested thread was used to implement the method. The proposed approach is based on the spectral method of signal processing and the analysis of the defect influence on the formation of the separate components in the signal spectrum caused by the presence of resonance properties of the thread.

Keywords: pump rod threads, electromagnetic-acoustic transducer, multiple shadow method, spectrum.

DOI: 10.31857/S0130308223090075, EDN: ECRKER

ВВЕДЕНИЕ

Резьбовые соединения являются одним из самых уязвимых мест при высоких эксплуатационных нагрузках насосных штанг, что требует применения методов неразрушающего контроля. Большинство нормативных документов предписывают применение магнитопорошкового и ультразвукового методов неразрушающего контроля (НК) резьбы [1]. Известно успешное использование при контроле резьбы методов и средств вихретокового контроля [2]. Большинство указанных методов сложно реализуемо для контроля резьбы на деталях малого диаметра ввиду необходимости создания малогабаритных преобразователей и наличия мешающих факторов. Разработанный зеркально-теневой метод на многократных отражениях (метод многократной тени), реализованный с использованием проходных электромагнитно-акустических (ЭМА) преобразователей, обеспечивающих излучение—прием поперечных волн во всех радиальных направлениях в поперечном сечении объекта, успешно используется при дефектоскопии, структуроскопии, оценке напряженно-деформированного состояния цилиндрических объектов [3].

Цель работы: исследование возможностей обнаружения дефектов в резьбе насосных штанг методом многократной тени с использованием спектрального метода обработки сигналов.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проведены с помощью экспериментальной установки, представленной в [3]. Специализированный ЭМА преобразователь навинчивается на исследуемую резьбу и содержит систему подмагничивания и высокочастотный индуктор, витки которого позиционированы строго над зубьями резьбы с целью формирования акустического поля каждым зубом. Исследования проведены на насосной штанге диаметром рабочей части 22 мм с метрической резьбой диаметром 30 мм, шагом резьбы 2,25 мм, длиной резьбы 38 мм. В качестве моделей трещин по внутреннему витку резьбы нанесены поперечные пропилы глубиной 1 мм с различной угловой мерой (с шагом 90 град) с использованием токарного станка с абразивным диском диаметром 22 мм, толщиной 0,25 мм. Для спектральной обработки использован пакет постэкспериментальной обработки измерительной информации «WinПОС».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Акустическое поле, формируемое витками резьбы (рис. 1а), приводит к возникновению фронта волны с фокусировкой по центру [4]. Волна, многократно прошедшая по диаметральному направлениям области с резьбой, формирует серию импульсов (рис. 1б).

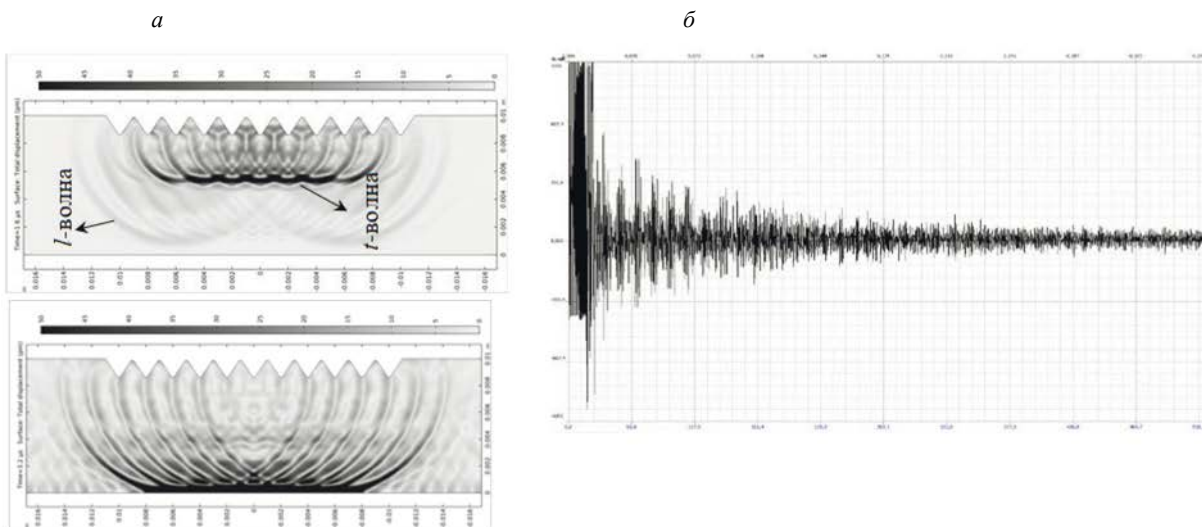


Рис.1. Результат моделирования акустического поля в плоскости поперечного сечения образца с резьбой в различные моменты времени (0,18 мкс и 0,71 мкс) (а), осциллограмма при контроле резьбы (б).

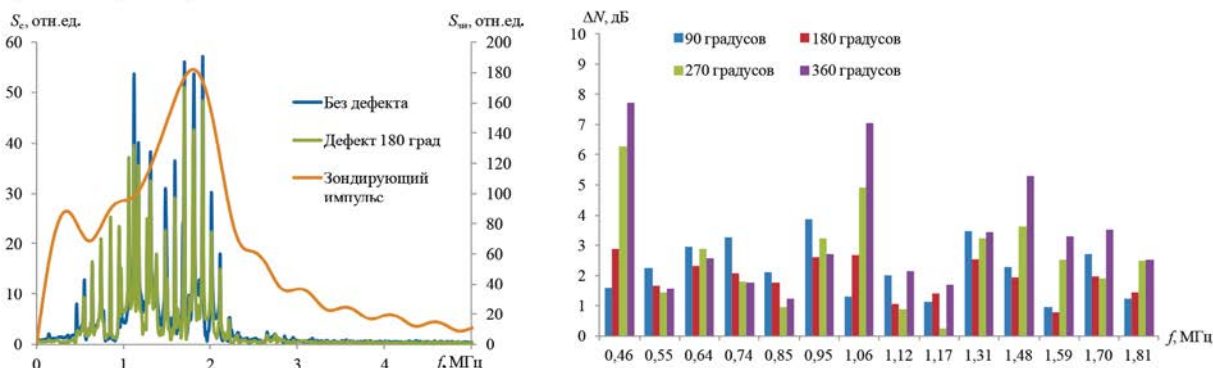


Рис. 2. Спектральные плотности зондирующего импульса и серии переотражений для бездефектной и дефектной резьбы.

Спектр зондирующего импульса и спектр зарегистрированного сигнала представляет рис. 2. Отметим, что спектр зондирующего импульса с выраженной резонансной частотой (1,8 МГц) радикально отличается от частотного спектра сигнала, многократно прошедшего через участок резьбы с множеством гармонических составляющих, что обусловлено влиянием на частотный спектр резонансных свойств резьбы, геометрия которой соизмерима с длинами волн в спектре колебания. Наличие в резьбе дефекта (поперечного пропила) изменяет резонансные свойства резьбы, что приводит к снижению амплитуд отдельных составляющих в спектре сигнала.

Введем понятие чувствительности отдельных спектральных составляющих к дефекту $\Delta N(f_i)$, как разницу в амплитуде спектральной составляющей i -й гармоники при отсутствии дефекта $S_C(f_i)$ и при его наличии дефекта $S_{CD}(f_i)$ (рис. 2б):

$$\Delta N(f_i) = S_C(f_i) - S_{CD}(f_i).$$

Из рис. 2б следует, что наилучшей чувствительностью к дефектам обладают спектральные составляющие на 0,46 и 1,06 МГц, где наблюдается достаточно крутая зависимость от угловой меры дефекта. Следует отметить, что чувствительность к дефектам отличается в зависимости от частоты зондирующего импульса.

ВЫВОДЫ

Предложенный в статье подход к контролю резьбы ЭМА-методом многократной тени, основанный на анализе отдельных составляющих в спектре сигнала, позволяет обосновать выбор оптимальной частоты зондирующего импульса и спектральных составляющих сигнала для резьбы данной геометрии для достижения наибольшей чувствительности к дефектам. К преимуществам предлагаемого метода следует отнести возможность выявления не только дефектов резьбы, но и внутренних дефектов (под резьбой), а также возможность реализации контроля без иммерсионной жидкости и дополнительной подготовки поверхности.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00252, <https://rscf.ru/project/22-19-00252/> с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер: 586308).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобров А.Л., Бехер С.А., Шляхтенков С.П. Анализ эффективности методов неразрушающего контроля резьбовой части бурильных труб // Южно-Сибирский научный вестник. 2022. № 3 (43). С. 10—15. DOI 10.25699/SSSB.2022.43.3.012
2. Сясько В.А., Соломенчук П.В., Коротеев М.Ю. Вихретоковый неразрушающий контроль резьбы насосно-компрессорных труб // Контроль. Диагностика. 2012. № 10. С. 17—22.
3. Муравьева О.В., Муравьев В.В., Петров К.В. Неразрушающий контроль цилиндрических изделий с использованием проходных электромагнитно-акустических преобразователей. Ижевск: Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, 2022. 220 с. ISBN 978-5-7526-0956-5.
4. Муравьева О.В., Соков М.Ю., Мышкин Ю.В. Формирование акустического поля проходного преобразователя в деталях с резьбой // Интеллектуальные системы в производстве. 2018. Т. 16. № 4. С. 45—56. DOI 10.22213/2410-9304-2018-4-45-56

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ СКАНЕР СТРУКТУРНО НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД

© 2023 г. В.В. Мирошников^{1,*}, Н.В. Гречишкина^{2,**}

¹ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля»,
Россия 291034 Луганск, кв. Молодежный, 20А
E-mail: *prorectormvv@mail.ru; **natalisha.grech@mail.ru

Поступила в редакцию 01.06.2023; после доработки 09.06.2023
Принята к публикации 09.06.2023

Предложен принцип построения электромагнитного сканера для непрерывного контроля действующего промышленного объекта, позволяющего в режиме реального времени контролировать динамику развития дефекта, что позволяет определить остаточный ресурс работы контролируемого объекта.

Ключевые слова: синтез магнитного поля, феррозонд, обмотка намагничивания, многоэлементный преобразователь, однородность магнитного поля, зона контроля, дефект.

ELECTROMAGNETIC SCANNER OF STRUCTURALLY HETEROGENEOUS MEDIA

© 2023 V.V. Miroshnikov^{1,*}, N.V. Grechishkina^{2,**}

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Lugansk Vladimir Dahl State University»,
Molodezhny sq., 20A, Lugansk, 291034, Luhansk People's Republic,
E-mail: *prorectormvv@mail.ru; **natalisha.grech@mail.ru

The principle of constructing an electromagnetic scanner for continuous monitoring of an operating industrial object is proposed, the principle monitoring the dynamics of defect development in real time, that allows determining the residual operating life of the monitored object.

Keywords: magnetic field synthesis, ferrosonde, magnetization winding, multi-element converter, magnetic field uniformity, control zone, defect.

DOI: 10.31857/S0130308223090087, EDN: FOOAIU

Контроль конструктивных элементов промышленных объектов, находящихся в эксплуатации, как правило, проводится при остановке их работы. Выявленный в процессе обследования дефект может быть не критичным для последующей эксплуатации объекта. Однако для точного понимания критичности выявленного дефекта на данную область устанавливается электромагнитный сканер, который в реальном времени сканирует контролируемую область с дефектом и передает информацию о топографии поля дефекта. Динамика изменения топографии поля рассеяния дефекта позволяет оценить скорость развития дефекта при действии рабочих нагрузок на область контроля, что и дает возможность определить время до критического изменения дефекта, после которого эксплуатация объекта не безопасна.

Конструктивно электромагнитный сканер содержит источник зондирующего электромагнитного поля, в качестве которого используется многосекционная катушка, в плоскости которой расположены феррозонды. С помощью катушки, поделенной на секции с отдельными источниками тока, синтезируется магнитное поле с заданной напряженностью и однородностью [1]. Задачу синтеза магнитного поля сформулируем так: в плоскости перпендикулярной оси катушки необходимо создать поле, вектор индукции которого $\vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H}_0$ будет перпендикулярен этой плоскости.

К топографии зондирующего поля предъявляются следующие требования:

- поле концентрируется в зоне области контроля;
- вектор напряженности магнитного поля, совпадающий с плоскостью сердечника феррозонда, должен иметь минимальное значение в области расположения матрицы феррозондов.

Принцип построения сканера электромагнитного контроля показан на рис. 1.

В точке (a), где расположена матрица феррозондов, напряженность магнитного поля должна равняться нулю, а в точке (b) — иметь максимальное значение, так как точка (b) соответствует середине зоны контроля объекта. Синтез зондирующего поля проводим по методике предложенной в [2] с адаптацией, которая заключается в том, что размеры секций катушек изменяются в процессе синтеза.

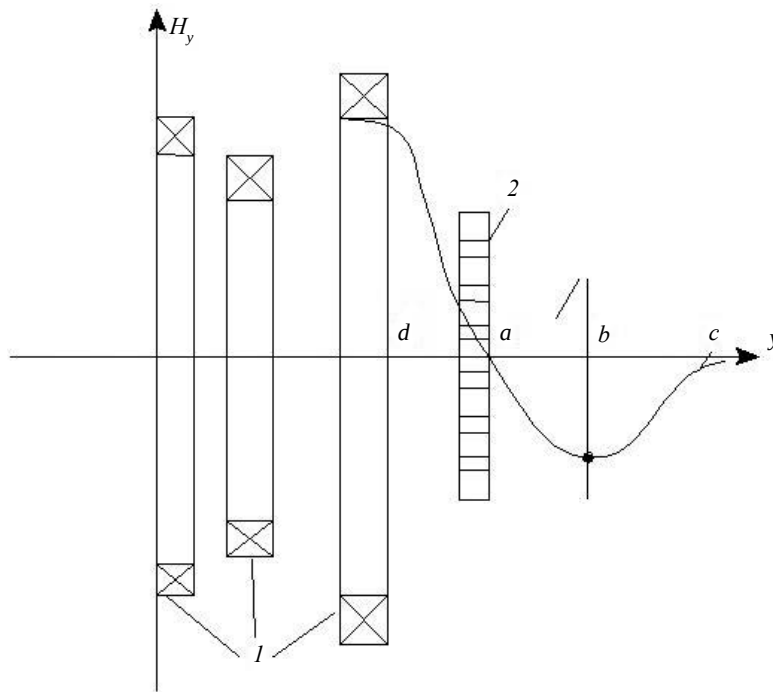


Рис. 1. Распределение y -составляющей вектора напряженности магнитного поля электромагнитного сканера: 1 — секции зондирующих катушек; 2 — матрица феррозондов.

Катушки зондирующей магнитной системы представляют собой N тонких секций. Катушки прямоугольной формы. Толщина секций и расстояние между ними могут быть неодинаковыми в ходе проведения синтеза магнитного поля, искомым является число витков в тонких секциях, направления и плотность тока в этих секциях. Используя формулу Био—Савара—Лапласа, находим напряженность поля при заданном токе.

Феррозонд является магниточувствительным элементом, позволяющим регистрировать постоянные и переменные магнитные поля, теория которых в настоящее время достаточно полно разработана. Однако некоторые вопросы требуют дополнительного решения из-за матричного принципа их расположения. Одной из проблем является близкое расположение полуэлементов, которое приводит к их взаимному влиянию и, в результате, к снижению чувствительности феррозондов.

Максимальное расстояние между полуэлементами в сканере определяется теоремой Котельникова [3]. При ширине спектра $\Delta\alpha$ намагниченного участка расстояние, при котором не происходит потеря информации, будет равно:

$$\Delta X_m = \frac{\pi}{2\alpha_B},$$

где α_B — высшая частота спектра функции $H(x)$.

Спектральная функция Фурье для нормальной составляющей напряженности поля будет равна

$$X(\alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} H_y(x) e^{-j\alpha x} dx, \text{ а с учетом ее четности: } X(\alpha) = 2 \int_0^{\infty} H_y(x) \cos(\alpha x) dx.$$

Приближенно зависимость для $X(\alpha)$ имеет вид:

$$X(\alpha) = H_m \frac{\pi/a}{(\pi/a)^2 - \alpha^2} \cos \alpha a,$$

где $2a$ — длина положительного значения вертикальной составляющей напряженности поля.

Для электромагнитного сканера расстояние между полуэлементами феррозонда не должно превышать 8,7 мм, что приемлемо для конструкции стержневого феррозонда.

В первом приближении порог чувствительности феррозонда, работающего в режиме градиентометра, определяется, исходя из описания составляющей вектора напряженности поля рассеяния [4]:

$$H(x) \frac{H_0}{1 + \beta^2 x^2},$$

где H_0 — максимальное значение напряженности поля; β — определяется из условия, что на расстоянии ΔX_m напряженность равна αH_0 при $0 < \alpha < 1$.

Тогда $\beta = \frac{1}{x_0} \sqrt{\frac{1-\alpha}{\alpha}}$, при этом измеряемое феррозондом поле:

$$H_n(x, \Delta x) = H_0 \beta^2 \frac{2x\Delta x + \Delta x^2}{(1 + \beta^2 x^2)(1 + \beta^2 (x + \Delta x)^2)}.$$

Наибольшее значение $H_n(x)$ находится в области, где скорость изменения функции $H(x)$ максимальна [5]:

$$\frac{dH(x)}{dx} = -\frac{2x\beta^2}{(1 + \beta^2 x^2)^2}.$$

На расстоянии Δx напряженность поля уменьшится на коэффициент $k = \frac{H_m(\Delta x)}{H_0}$, что позволяет определить порог чувствительности феррозонда, который находится в пределах 1—3 А/м. Такой порог чувствительности обеспечивается синусоидальным током возбуждения при длине сердечника 4—7 мм и при наличии обмотки компенсации низкочастотных магнитных помех.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *By M. Edwards*. Detecting Foreign Bodies in Food. Published 2004 Woodhead Publishing. 306 p. SBN 1855737299.
2. *Стадник И.П.* Метод последовательных приближений для линейных интегральных уравнений первого рода и его применения к решению задач синтеза магнитных полей. Ч.2 // *Электромеханика*. 1981. № 7. С. 721—728.
3. *Поливанов К.М.* Теоретические основы электротехники. Часть 3. М.: Энергия, 1974. 282 с.
4. *Розенблат М.А.* Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники. М.: Наука, 1966. 542 с.
5. *Романенко А.В., Яковенко В.В., Мирошников В.В.* Розрахунок магнітної проникності осередь ферозондів при їх взаємному впливі // *Методи та прилади контролю якості*. 2000. № 6. С. 6—8.

РАЗРАБОТКА МАКЕТА ДАТЧИКА ДЛЯ ПРИБОРА ДИНАМИЧЕСКОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ

© 2023 г. О.А. Колганов^{1,*}, А.Е. Хошев^{1,**}, Р. А. Егоров^{1,***}, А.В. Фёдоров^{1,****},
Г.Н. Лукьянов^{1,*****}, В.В. Коняшов^{1,*****}

¹Университет ИТМО, Россия 197101 Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49
E-mail: *kolganoff2014@yandex.ru; **severenarwhal@gmail.com; ***roman1465@yandex.ru;
****afedor62@yandex.ru; *****gen-lukjanow@yandex.ru; *****konyashovslavaa@mail.ru

Поступила в редакцию 31.05.2023; после доработки 11.06.2023

Принята к публикации 13.06.2023

Представлены вопросы, связанные с конструированием датчика динамического индентирования, предложено использование магнитоиндукционного метода регистрации параметров движения ударника с дифференциальной схемой катушек индуктивности, а также разработан прототип первичного преобразователя и макет датчика с новым механизмом системы сброса ударника.

Ключевые слова: динамическое индентирование, контактное ударное взаимодействие, первичный преобразователь, датчик, приборная реализация, катушка индуктивности, магнит, ударник.

DEVELOPMENT OF A SENSOR LAYOUT FOR A DYNAMIC INDENTATION DEVICE

© 2023 г. О.А. Kolganov^{1,*}, A.E. Khoshev^{1,**}, R.A. Egorov^{1,***}, A.V. Fedorov^{1,****},
G.N. Lukyanov^{1,*****}, V.V. Konyashov^{1,*****}

¹ITMO University, Kronverksky pr., 49, St. Petersburg, 197101 Russia
E-mail: *kolganoff2014@yandex.ru; **severenarwhal@gmail.com, ***roman1465@yandex.ru,
****afedor62@yandex.ru; *****gen-lukjanow@yandex.ru, *****konyashovslavaa@mail.ru

Issues related to the design of a dynamic indentation sensor are presented in this paper. The use of a magnetic induction method for recording the motion parameters of a striker with a differential circuit of inductors is proposed. A prototype of the primary transducer and a sensor model with a new mechanism for the striker reset system are developed.

Keywords: dynamic indentation, contact impact interaction, primary transducer, sensor, device implementation, inductor, magnet, striker.

DOI: 10.31857/S0130308223090099, EDN: FOTQJK

ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных методов безобразцового контроля механических свойств материалов является метод динамического индентирования (МДИ). Данный метод позволяет проводить безобразцовый контроль не только твердости материала, но и других его свойств. На сегодняшний день большинство исследований в области МДИ сосредоточено на решении вопросов перехода от значений характеристик контактно ударного взаимодействия (КУВ) индентора с испытываемым материалом к значениям конкретных механических характеристик. Применение МДИ в настоящее время регламентируется стандартом ГОСТ Р 56474—2015, в котором значения параметров первичного преобразователя и устройства его разгона не нормированы. Приборы реализующие МДИ имеют в своем составе первичный преобразователь (ПП) на основе магнитоиндукционного метода регистрации параметров движения ударника.

Цель работы заключалась в разработке макета датчика для прибора динамического индентирования с применением первичного преобразователя на основе магнитоиндукционного метода с дифференциальной катушкой индуктивности. Для достижения представленной цели были решены следующие задачи: разработан первичный преобразователь датчика динамического индентирования; разработан новый механизм системы сброса ударника; разработан макета датчика для прибора динамического индентирования.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Датчик динамического индентирования состоит из: первичного преобразователя, ударника, системы сброса ударника и блока обработки информации. Одним из основных элементов является первичный преобразователь, который выполняет функцию преобразования движения ударника в электрический сигнал. Основным требованием для получаемого первичного сигнала является линейность участков активной и пассивной фазы этапов КУВ, а именно линейного изменения скорости движения ударника от амплитуды сигнала. В настоящее время обеспечение вышеуказанных требований достигается путем подбора оптимальных конструктивных параметров ПП эмпирическим путем. Данный вопрос не получил должной проработки и конструктивной оптимизации. Применяемый магнитоиндукционный метод с одной катушкой индуктивности имеет существенный недостаток, который заключается в обеспечении оптимального расстояния между магнитом и верхней частью катушки индуктивности [1]. В настоящее время для повышения информативности получаемого сигнала при КУВ проводилась оптимизация только величины зазора.

Для повышения точности регистрации параметров движения ударника предлагается использовать магнитоиндукционный метод с дифференциальной схемой включения катушек индуктивности. Отличительной особенностью данного метода является наличие двух последовательно соединенных катушек индуктивности с одинаковыми параметрами, но разнонаправленными витками намотки. На выходе регистрируется возникающее напряжение при внедрении магнита. Обоснование применимости и апробация прототипа первичного преобразователя для датчика на основе дифференциальных катушек индуктивности описана в работах [2, 3].

Для выполнения сброса и разгона ударника используют специальные механизмы, которые обеспечивают необходимую кинетическую энергию удара при КУВ. Выполнив анализ существующих систем сброса и разгона ударника, было выявлено что данный механизм основан на магнитоотрывном принципе. Особенность данного механизма заключается в том, что сброс производится выталкиванием ударника. Использование такого механизма сброса влечет за собой отсутствие постоянного значения скорости ударника при КУВ. Для минимизации потери энергии и повышения повторяемости скорости движения ударника был разработан механизм сброса, принцип работы которого заключается в следующем: в начальном положении ударник примагничен к стержню. При нажатии на рычаг сброса происходит увеличение расстояния между стержнем и ударника, тем самым уменьшая магнитную силу между этими элементами. Однако отличительной особенностью является то, что для уменьшения магнитной силы между ударником и стержнем происходит движение стержня в обратном направлении относительно предполагаемого движения ударника. В момент времени, когда сила, которая действует на ударник, превысит магнитную силу, произойдет падение ударника. Использование такого механизма сброса позволяет нам обеспечить высокую повторяемость значений энергии при КУВ. Иллюстрация работы спускового механизма датчика приведена на рис. 1в.

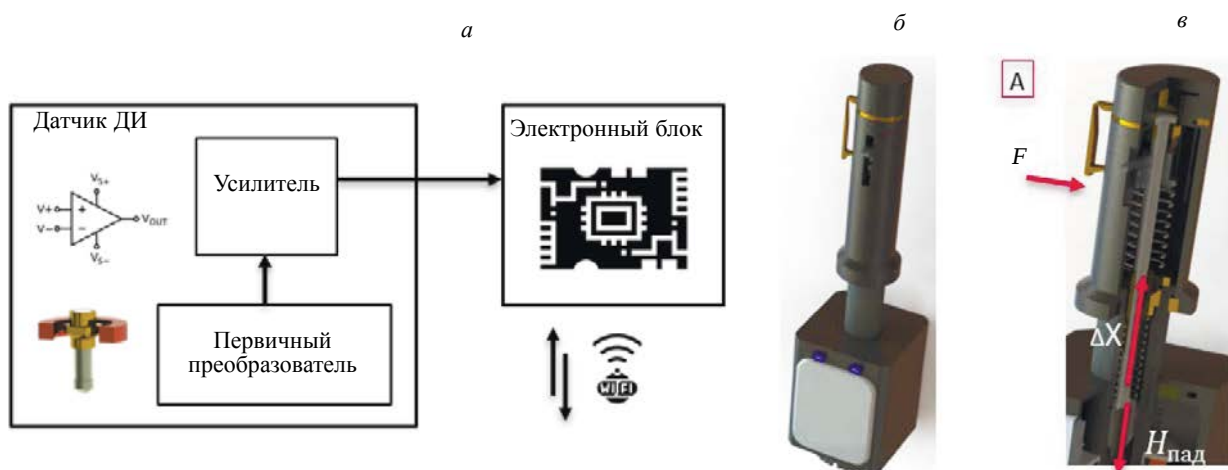


Рис. 1. Приборная реализация макета датчика для прибора ДИ: схема макета прибора ДИ (а); конструкция датчика для прибора ДИ (б); система сброса ударника (в).

На основе полученных результатов был разработан макет датчика динамического индентирования (рис. 1а). На рис. 1б представлена 3D-модель датчика ДИ. После КУВ ударника с испытываемым материалом с помощью блока обработки информации выполняется регистрация параметров движения ударника (скорости движения). Полученная информация обрабатывается, значение твердости материала и другие его свойства выводятся на дисплей датчика.

ВЫВОД

Таким образом, предложено использование магнитоиндукционного метода с дифференциальным включением катушки индуктивности для регистрации параметров движения ударника при КУВ. Показана актуальность и применимость решения задачи оптимизации системы регистрации параметров движения ударника. А также был разработан макет датчика для прибора динамического индентирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колганов О.А., Лукьянов Г.Н., Федоров А.В. Обоснование выбора метода регистрации параметров движения ударника при динамическом индентировании // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. 2022. Т. 2. С. 54—57.
2. Kolganov O., Egorov R., Ilyinsky A., Khoshev A., Kinzhagulov I., Fedorov A. Development of the Design of the Sensor and the Elements of Software Data Processing of the Dynamic Indentation Device / 2022 International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT) — 2022. P. 1—5.
3. Колганов О.А., Ильинский А.В., Егоров Р.А., Хошев А.Е., Федоров А.В. Дифференциальное включение катушек индуктивности для регистрации параметров движения ударника при динамическом индентировании // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2023. Т. 66. № 1. С. 74—80.



Уважаемые Коллеги!

С 23 по 25 октября пройдет очередная **XXIII Всероссийская конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике**. Раз в три года Мы можем представить широкой научной и технической общественности наши новые научные идеи и разработки, выслушать положительную оценку и возможные критические замечания. Сформированный из ведущих российских специалистов программный комитет начал свою работу и выполнил рецензирование поступивших тезисов докладов.

Однако большая часть ученых и специалистов, представляющих академическую, ВУЗовскую и отраслевую науку, до сих пор не представили тезисы, которые бы продемонстрировали Ваши достижения в теории и практике неразрушающего контроля, умных технологиях и методиках, их практической реализации.

В связи с этим я хочу напомнить Вам, что **прием тезисов для рассмотрения и рецензирования заканчивается в день знаний — первого сентября 2023 г.**, после чего начнется формирование секций конференции.

С полной информацией о конференции, условиях участия, регистрации и представления тезисов можно ознакомиться на странице **XXIII ВНТК**.

С уважением,
Президент РОНКТД
Владимир Сясько





Уважаемые коллеги!

**Российское общество по неразрушающему контролю
и технической диагностике**

приглашает принять участие в

**X Международном промышленном Форуме «Территория NDT 2023.
Неразрушающий контроль. Испытания. Диагностика»**

Даты: 23—25 октября 2023 года

Место: ЦВК «Экспоцентр» на Красной Пресне

УЧАСТНИКИ ФОРУМА

Вы получите уникальную возможность одновременно посетить выставки **ТЕРРИТОРИЯ NDT, ТЕХНОФОРУМ, RUSWELD.**

В рамках Форума «Территория NDT. Неразрушающий контроль. Испытания. Диагностика» состоятся:

Финальный этап Всероссийского Конкурса РОНКТД по неразрушающему контролю «Дефектоскопист 2023»

Всероссийский Конкурс РОНКТД выпускных квалификационных работ «Новая генерация 2023»

Заседания Технического комитета по стандартизации ТК 371 «Неразрушающий контроль» и его 12 подкомитетов

Награждение лауреатов Национальной премии в области неразрушающего контроля и технической и диагностики

Молодежная Научная Конференция

II Международный салон инноваций в области неразрушающего контроля, технической диагностики и мониторинга состояния промышленных объектов

**ОФИЦИАЛЬНЫЙ СПОНСОР
ФОРУМА «ТЕРРИТОРИЯ NDT»**



info@ronktd.ru
+7 499 245 56 56
+7 916 619 00 17
expo.ronktd.ru

В Швейцарии состоялся 17-й Международный симпозиум по неразрушающему контролю материалов (ISNDCM 2023) **17 INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE CHARACTERIZATION OF MATERIALS**.

Мероприятие проходило 14—17 августа 2023 в Дюбендорфе, на базе Федеральной лаборатории материаловедения и технологии EMPA.

На симпозиуме были подняты актуальные вопросы и перспективные направления методов НК, оценки и анализа, а также представлены новейшие разработки и современные решения в развитии технологий НК и ТД.

Ученые и специалисты со всего мира представили друг другу результаты теоретических и прикладных исследований по следующим направлениям:

- ◆ Space NDE
- ◆ Radiography
- ◆ Composites
- ◆ Concrete
- ◆ Laser Ultrasound
- ◆ Emerging & Nonconventional Technology
- ◆ Additive Manufacturing Modeling

В работе конференции принял участие президент РОНКТД, д.т.н. Владимир Александрович Сясько с докладом «Review of the current development status of intelligent electromagnetic sensors (ies) for automatically measuring the thickness of all types of coatings in production. Analyses of construction principles, standardization and metrological support».

Интерес научных кругов вызвали 3 пленарных доклада специалистов NASA и Aerospace Corporation: «NASA's current efforts and applications of NDE to improve Space Flight Safety», «Manual NDT or R2-D2: In the AI age, who will be the better Level II inspector?», «NDE and Deep Learning: Fashion Trend or the Future?». Также специалисты NASA рассказали, что планируют производство деталей (например, для ремонта) прямо на орбите с использованием аддитивных технологий.

Примечательно, что мероприятие проходило в Федеральной лаборатории материаловедения и технологии, междисциплинарном исследовательском институте, связанным с ETH, Швейцарским федеральным технологическим институтом в Цюрихе, где Альберт Эйнштейн был профессором физики с 1912 по 1914 год.

17-й Международный симпозиум по неразрушающему контролю материалов (ISNDCM 2023) проходил при поддержке Американского общества НК.

СОЗДАНА РОССИЙСКО-КИТАЙСКАЯ ПЛАТФОРМА НК

Международный проект был разработан РОНКТД в сотрудничестве с китайским бизнес-инкубатором «ПУЭ» (Шанхай), прошел тестовый период и готов к запуску на полную мощность.

Главная цель российско-китайской платформы НК — способствовать выходу отечественных компаний на рынки Китая, а китайским предприятиям — на российский рынок. Платформа позволяет найти надежного партнера, который на первом этапе сотрудничества готов оказать административную и юридическую поддержку.

ПУЭ работает с государственными фондами, специализирующимися на привлечение в Китай современных технологий, среди них крупнейший китайский фонд развития JITRI (научно-исследовательский институт промышленных технологий провинции Цзянсу). На протяжении 15 лет «ПУЭ» специализируется на развитии российско-китайских проектов в различных отраслях экономики и имеет за спиной большой практический опыт и успешно реализованные проекты.

Например, «ПУЭ» вывел на рынок Поднебесной целый ряд российских производителей медицинского оборудования с прохождением всех необходимых сертификационных процедур, реализует проект по локализации производства инновационных наноматериалов, разработанных российскими учеными, включающий трансфер технологий и инвестирование проекта.

Для полноценной работы Платформы созданы надежные инструменты, позволяющие эффективно выйти на зарубежный рынок с минимальными инвестициями:

1. Проведение экспертной оценки потенциала предложений российского оборудования и методик неразрушающего контроля для китайского рынка с участием специалистов национального Института Материаловедения, Пекинского Института Технологий, Китайского общества НК, специалистов из китайских органов технадзора.

2. Подготовка и проведение онлайн презентации компании, оборудования и технологий неразрушающего контроля для потенциальных заказчиков из согласованных отраслей промышленности для установления первых контактов.

3. Возможность организовать рабочее место или представительство на площадях бизнес-инкубатора в Шанхае на первый период оценки рынка и поиска первых заказчиков. На период от 1 дня. С предоставлением русскоговорящего сотрудника для подготовки и проведения переговоров, последующего сопровождения контактов, продвижения на китайских маркетинговых площадках.

4. Юридическое и бухгалтерское сопровождение для заключения договоров и организации работы, проведения платежей.

5. Поиск дилеров и дистрибуторов.

6. Поиск поставщиков китайского оборудования НК в Россию.

7. Поиск китайских поставщиков электронных компонентов и комплектующих по запросам российских компаний. Закупка и поставка в РФ.

8. Подбор производственных площадок для организации производства оборудования и компонентов в Китае.

9. Сопровождение проекта с целью получения финансирования от государственных фондов и крупных корпораций для разработки совместных технологий и оборудования НК.

Российскими компаниями уже были успешно протестированы некоторые из представленных инструментов, а члены Гильдии российских предприятий-производителей оборудования и технологий НК уже начали пользоваться этими возможностями на полную мощность.

Приглашаем всех посетить стенд российско-китайской платформы НК, который будет представлен на X международном Форуме «Территория NDT» 23—25 октября 2023 в Экспоцентре на Красной Пресне.

<https://expo.ronktd.ru/>