

# Контроль. Диагностика

Научно-технический журнал

2025. Том 28. №1  
(январь)

**КРОПУС**  
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЦЕНТР

Ультразвуковой дефектоскоп на ФР + TFM

## УСД-60ФР

ВЫСОКАЯ ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ  
УДОБСТВО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
ЛЕГКОСТЬ И ЭРГОНОМИЧНОСТЬ

Универсальный дефектоскоп для решения широкого спектра задач ультразвукового контроля.

Простота использования делает его доступным даже для специалистов с небольшим опытом в УЗК, что позволяет беспрепятственно интегрировать передовые технологии в повседневную практику.



реклама

8 (495) 229 42 96 8 (800) 500 62 98

www.kropus.com sales@kropus.com



УДК 620.179.16:534.1  
DOI: 10.14489/td.2025.01.pp.004-012

## ГЛУБИНА ПРОНИКНОВЕНИЯ В МЕТАЛЛ ПРОДОЛЬНО-ПОВЕРХНОСТНОЙ (ГОЛОВНОЙ) АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ



**В. Г. Шевалдыкин,**  
д-р техн. наук,  
ООО «Акустические  
Контрольные Системы»,  
Московская область,  
Ленинский район,  
пос. Горки Ленинские,  
Россия.  
E-mail: shev@acsys.ru

Экспериментально исследовано распределение по глубине амплитуды продольных компонент смещений в неоднородной продольно-поверхностной акустической волне. Использован стальной образец с защитой исследуемого сигнала от посторонних типов волн.

Распределение, построенное для глубин от нуля до 10 мм, в сглаженном виде представляет собой плавную кривую с максимумом на глубине 6,5 мм, что соответствует углу  $12,3^\circ$  к поверхности металла. Отклонения от сглаженной кривой не превышают 1,8 дБ.

Продольно-поверхностная волна возбуждает продольную подповерхностную волну. Из-за их общего цилиндрического фронта сигналы в вертикальном сечении отстают от сигнала на поверхности на время, возрастающее с глубиной. Глубину, при которой это время равно 0,1 периода колебаний сигнала, можно считать глубиной проникновения продольно-поверхностной волны.

**Ключевые слова:** ультразвуковой контроль, головная волна, неоднородная продольно-поверхностная волна, боковая поперечная волна, ползучая волна, продольная подповерхностная волна, критический угол.

V. G. Shevaldykin (Acoustic Control Systems Ltd, Moscow region, Leninsky district, village Gorki Leninskie, Russia)

### THE DEPTH OF PENETRATION INTO THE METAL LONGITUDINAL-SURFACE (HEAD) ACOUSTIC WAVE

The depth distribution of the amplitude of the longitudinal displacement components in an inhomogeneous longitudinal-surface acoustic wave has been experimentally studied. A steel sample was used to protect the studied signal from extraneous types of waves.

The distribution, plotted for depths from zero to 10 mm, in a smoothed form represents a smooth curve with a maximum at a depth of 6.5 mm, which corresponds to an angle of  $12.3^\circ$  to the metal surface. Deviations from the smoothed curve do not exceed 1.8 dB.

A longitudinal-surface wave excites a longitudinal subsurface wave. Due to their common cylindrical front, the signals in the vertical section lag behind the signal on the surface for a time increasing with depth. The depth at which this time is equal to 0.1 of the oscillation period of the signal can be considered the penetration depth of the longitudinal-surface wave.

**Keywords:** ultrasonic testing, head wave, inhomogeneous longitudinal-surface wave, lateral transverse wave, creeping wave, longitudinal subsurface wave, critical angle.

Статья поступила в редакцию 26.08.2024

Received 26.08.2024

#### Введение

Неоднородная продольно-поверхностная акустическая волна уже много лет применяется в ультразвуковом (УЗ) контроле материалов и изделий. Ранее эту волну обычно называли головной волной. Ее свойства изучали многие авторы [1 – 9]. В некоторых работах она названа поверхностно-продольной. В работе [8] выполнены расчеты ее акустического поля. Показано, что смещения в волне сосре-

доточены в основном на глубинах, меньших длины продольной волны. Причем кроме продольных компонент смещений, ориентированных вдоль поверхности среды, в непосредственной близости к поверхности присутствуют значительные по амплитуде смещения, ориентированные к поверхности нормально. У смещений, направленных вдоль поверхности, амплитуда выше и периодически меняется с глубиной.

Обычно головные волны (смесь неоднородной продольно-поверхностной и объемной продольной волн) получают с помощью наклонного падения УЗ-пучка продольной волны под первым критическим углом на поверхность металла. Из-за того что в падающем пучке всегда присутствуют лучи как с меньшим, чем критический, углом падения, так и с большим, то в исследуемой среде (объекте контроля) кроме неоднородной продольно-поверхностной неизбежно возникает и объемная продольная волна, называемая подповерхностной, лучи которой направлены под небольшими скользящими углами к поверхности среды. Экспериментальными исследованиями зависимости амплитуды продольных смещений смеси неоднородной продольно-поверхностной и продольной подповерхностной волн от глубины установлено, что максимум амплитуды смеси этих волн отклонен от нормали к поверхности металла на угол  $75...80^\circ$ . Этот угол зависит от размера преобразователя и его рабочей частоты [3, 4, 10]. Амплитуда смещений в продольной подповерхностной волне, как показано в работе [11], превалирует над амплитудой неоднородной продольно-поверхностной волны.

Поскольку область применения продольно-поверхностной волны постоянно расширяется (дифракционные методы, эхотомография), то для полноты физических представлений о ней важно изучить ее свойства в чистом виде, т.е. в отсутствие посторонних типов УЗ-волн. В частности, *цели данной статьи* – снять распределение продольных смещений в волне по глубине и определить эффективную глубину проникновения волны в металл при ее распространении вдоль поверхности. Оценка этого распределения для импульсного режима зондирования дополнит расчетные данные работ [8, 11].

## Оборудование и условия эксперимента

Измерения проводили на образце из стали 20 в форме параллелепипеда с размерами  $239,0 \times 64,4 \times 30$  мм. Для устранения помех от посторонних типов волн в образце с помощью электроэрозии выполнены щели шириной 0,2 мм. Их расположение и общий вид образца представлены на рис. 1. Скорости  $c_l$  продольных волн в образце в трех направлениях отличаются от среднего их значения менее чем на 0,2 %. Скорости  $c_s$  поперечных волн еще ближе друг к другу. Поэтому для расчетов ожидаемого времени прихода импульсов использовали средние значения скоростей:  $c_l = 5925$  м/с,  $c_s = 3250$  м/с. Третий критический угол  $\gamma = 33,27^\circ$ .

Возбуждали продольно-поверхностную волну через левое верхнее по рис. 1 ребро образца. Для этого использовали прямой совмещенный пьезопреобразователь с номинальной частотой 2,5 МГц и относительной полосой пропускания около 100 %. Его протектор, смазанный очень тонким слоем масла, был приведен в контакт с ребром образца. Положение преобразователя показано на рис. 2.

Зона приема продольно-поверхностной волны располагалась на торцевой грани образца вблизи его правого верхнего по рис. 1 ребра. Приемником волны служила пластина пьезокерамики ЦТС-19 размерами примерно  $1 \times 1$  мм и толщиной 0,5 мм. Пластина акустически контактировала с поверхностью образца заземленным электродом через выпуклую поверхность припаянного проволочного вывода. Контакт был практически точечным. Дополнительно на поверхность образца была нанесена тонкая масляная пленка, улучшающая передачу колебательных смещений, нормальных к поверхности металла. Положение приемника продольно-поверхностной волны на образце показано на рис. 3.

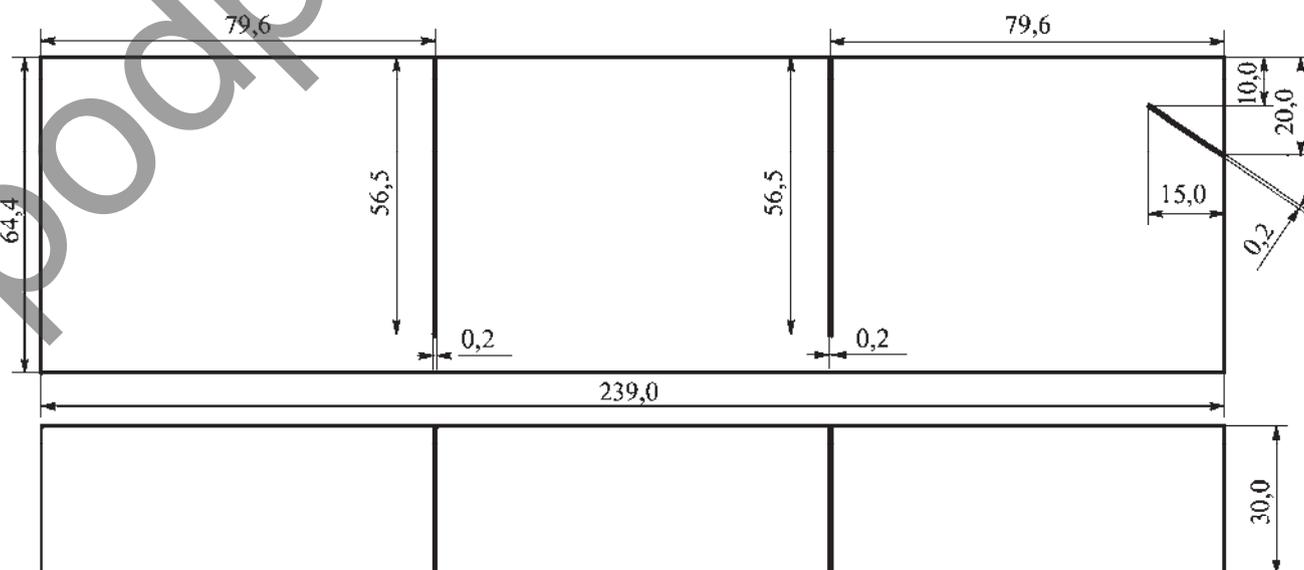


Рис. 1. Чертеж образца, использованного в эксперименте



Рис. 2. Излучающий преобразователь в контакте с ребром образца



Рис. 3. Приемный преобразователь на торцевой грани образца

Расположение и ориентация электроэрозионных щелей в образце позволили сформировать траекторию распространения УЗ-сигнала (рис. 4), при которой в зону приема может прийти импульс только продольно-поверхностной волны в определенный момент времени. Излучающий преобразова-

тель, воздействуя на ребро образца колебательной силой  $F$ , возбуждает продольно-поверхностную волну, распространяющуюся вдоль верхней по рис. 4 грани образца. Эта волна в каждой точке поверхности создает боковую поперечную волну, направленную под третьим критическим углом  $\gamma$  к нижней грани образца. На нижней грани от боковой волны возникает «вторичная» продольно-поверхностная волна [2, 12, 13], распространяющаяся вдоль грани от точки  $B$  вплоть до правого по рис. 4 торца образца. Вторичная продольно-поверхностная волна во всех точках нижней грани правее точки  $B$  генерирует «вторичную» боковую поперечную волну в сторону верхней грани образца. Стрелками красного цвета на рис. 4 показаны отдельные лучи обеих боковых поперечных волн.

Вторичная боковая волна, падая на верхнюю грань образца под углом  $\gamma$ , порождает в ее частях, разделенных щелями 1 и 2, «третичные» продольно-поверхностные волны. «Третичная» волна, распространяющаяся от щели 2 к правому по рис. 4 торцу образца, является исследуемым УЗ-сигналом. Она возникает в точке  $D$  поверхности образца и правее ее. В точку  $D$  падает сигнал поперечной волны из точки  $C$ . Левее точки  $D$  продольно-поверхностная волна возникнуть не может, так как угол падения поперечной волны на поверхность верхней грани образца здесь меньше третьего критического.

Серым фоном на рис. 4 выделены пути распространения боковых поперечных волн, которые являются частью траекторий передачи УЗ-сигнала от источника (силы  $F$ ) к приемнику продольно-поверхностной волны. Эти траектории состоят из двух путей боковых поперечных волн от верхней грани образца к нижней и обратно и еще трех путей продольно-поверхностной волны по поверхностям обеих граней. Единственная траектория  $ABCDE$  включает в себя два пути продольно-поверхностной волны, так как из точки  $A$  исходит сразу поперечная волна в точку  $B$ . Все траектории с путями, обозначенными серым фоном, содержат одинаковое суммарное расстояние распространения продольно-поверхностных волн, состоящее из отрезков на верхней и нижней гранях образца. Поскольку в этих траекториях присутствуют еще два одинаковых пути боковых поперечных волн под углом  $\gamma$ , то УЗ-сигналы по этим траекториям (в частности, по  $AMNCDE$  и  $AMNKLE$ ) приходят в точку  $E$  в одно и то же время [14, 15]:

$$T = \frac{X - 2Htg\gamma}{c_l} + \frac{2H}{c_s \cos\gamma}, \quad (1)$$

где  $X$  – длина образца (239 мм);  $H$  – высота образца (64,4 мм).

УДК 620.179.16:539.3:539.422.5  
DOI: 10.14489/td.2025.01.pp.013-025

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ КОМПЛЕКСНОГО ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ, ТЕНЗОМЕТРИИ И ЭФФЕКТА АКУСТОУПРУГОСТИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ УГЛЕПЛАСТИКОВ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ



**Л. Н. Степанова,**  
д-р техн. наук,  
ФАУ «Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С. А. Чаплыгина»,  
Новосибирск, Россия.  
E-mail: akustika2063@yandex.ru



**А. Н. Курбатов,**  
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»,  
Новосибирск, Россия.  
E-mail: akustika2063@yandex.ru



**С. И. Кабанов,**  
канд. техн. наук,  
ФАУ «Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С. А. Чаплыгина»,  
Новосибирск, Россия.  
E-mail: akustika2063@yandex.ru



**С. А. Бехер,**  
д-р техн. наук,  
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»,  
Новосибирск, Россия.  
E-mail: akustika2063@yandex.ru



**В. В. Чернова,**  
канд. техн. наук,  
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»,  
Новосибирск, Россия.  
E-mail: akustika2063@yandex.ru



**Е. С. Терехова,**  
ФАУ «Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С. А. Чаплыгина»,  
Новосибирск, Россия.  
E-mail: terekhvae@sibnia.ru

Представлены результаты исследования процесса разрушения образцов из углепластика АСМ при статическом растяжении. Для контроля дефектов использовали тензометрию, эффект акустоупругости и метод акустической эмиссии. Показана возможность применения и преимущества метода акустоупругости для определения деформаций в композиционном материале. Установлена зависимость между деформацией углепластика и временными параметрами волн Лэмба, измеряемыми ультразвуковой системой «Акуст-1». Достоверность локации дефектов обеспечена методом акустической эмиссии. Кроме того, деформации измеряли сертифицированной тензометрической быстродействующей системой «Динамика-3». При проведении испытаний сравнивали результаты измерения деформаций, полученные с использованием тензометрии и метода акустоупругости, в которых деформации определяли через времена задержки упругой волны Лэмба. Установлено, что приведенные погрешности, полученные при измерении деформаций через время задержки упругой волны Лэмба, были менее 5 %. Приведенные погрешности, полученные при определении деформаций образцов с использованием тензометрии, не превышали 3 %. При использовании эффекта акустоупругости упрощается контроль, сокращается время диагностики дефектов композиционной конструкции и исключается операция наклейки тензодатчиков на конструкцию.

**Ключевые слова:** образец, углепластик, акустоупругость, тензометрия, акустическая эмиссия, тензодатчик, пьезоэлектрический преобразователь, статика, время, скорость, ультразвук.

L. N. Stepanova<sup>1</sup>, A. N. Kurbatov<sup>2</sup>, S. I. Kabanov<sup>1</sup>, S. A. Beher<sup>2</sup>,  
V. V. Chernova<sup>2</sup>, E. S. Terekhova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>FAI "Siberian Aeronautical Research Institute named after S. A. Chaplygin",  
Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup>The Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

## RESEARCH OF THE POSSIBILITY OF COMPLEX APPLICATION OF ACOUSTIC EMISSION METHODS, TENSOMETRY AND EFFECT OF ACOUSTOELASTICITY FOR CONTROL OF CARBON PLASTIC RESTRICTS UNDER STATIC LOADING

The article presents results of studying the process of destruction of carbon fiber reinforced plastic samples under static tension. To control defects, strain gauge, acoustoelasticity effect and acoustic emission method were used. The possibility and advantages of using the acoustoelasticity method for determining deformations in a composite material are shown. The relationship between the deformation of carbon fiber and the time parameters of Lamb waves measured by the ultrasonic system "Acoustic-1" is established. The reliability of defect location is ensured by the acoustic emission method. In addition, the deformations were measured by the certified high-speed



Статья поступила в редакцию 29.08.2024

### Введение

При контроле конструкций из углепластика необходимо учитывать влияние анизотропии на скорость распространения упругих волн от дефектов, что отражается на точности их локации. Наличие шумов от нагружающих устройств, сложность получения оперативной информации об основных информативных параметрах сигналов акустической эмиссии (АЭ), функционально связанных с процессами развития дефектов и разрушением конструкции, – все это требует анализа и разработки методов неразрушающего контроля (НК) [1, 2].

Разрушению композиционных конструкций предшествует накопление повреждений на уровне структуры (волокна, слоя, включения). Их причинами могут быть растрескивания матрицы, разрыв упрочняющих волокон, расслоения, являющиеся следствием ударов, перегрузок, резко снижающих их прочностные характеристики. Эта деградация свойств композиционных материалов (КМ) снижает прочностные характеристики конструкции и приводит к развитию дефектов [3]. При разработке технологии изготовления различных деталей из КМ происходит подготовка методов НК, позволяющих осуществлять их мониторинг и оценку технического состояния с использованием тензометрии, АЭ, эффекта акустоупругости, волоконно-оптической технологии и т.д. [4, 5].

При прочностных испытаниях материалов и конструкций из КМ отношение сигнал/шум меньше, чем при испытании металлов. Поэтому при разработке методики контроля требуется обеспечить необходимую чувствительность и разрешающую способность методов НК, так как у композитов эти значения ниже, чем у металлов. Композиты обладают малым запасом пластичности и характеризуются отсутствием перераспределения нагрузок, как у металлов.

Метод АЭ позволяет «прослушивать» конструкцию, которая находится в напряженном состоянии из-за приложенной к ней нагрузки. С использованием метода АЭ осуществляется локация дефектов в режиме реального времени, достигая высокой

strain gauge system "Dynamics-3". During the tests, the results of deformation measurements obtained using strain gauge and the acoustoelasticity method were compared. Deformations were determined through the delay times of the elastic Lamb wave. It was found that the reduced errors obtained when measuring deformations through the delay times of the elastic Lamb wave were less than 5 %. The reduced errors obtained in determining the deformations of carbon fiber samples using strain gauges did not exceed 3 %. Using the effect of acoustoelasticity simplifies control, reduces the time for diagnosing defects in composite structures, and eliminates the operation of gluing strain.

**Keywords:** sample, carbon fiber, acoustoelasticity, strain measurement, acoustic emission, strain gauge, piezoelectric transducer, statics, time, speed, ultrasound.

Received 29.08.2024

чувствительности. Поэтому данный метод эффективен на ранней стадии развития разрушения. Дефекты излучают звуковые волны, которые распространяются внутри конструкции и регистрируются преобразователями акустической эмиссии (ПАЭ), сигналы с которых передаются в АЭ-систему. Основные достоинства метода АЭ состоят в возможности накапливать информацию о динамике возникновения и развития повреждений при дистанционном контроле, выявлении наиболее опасных развивающихся дефектов, диагностировании конструкций без полной разборки. При работе с данным методом необходима разработка методических вопросов по устранению побочных сигналов, не имеющих отношения к процессам, протекающим в нагруженном материале конструкции [6, 7].

При контроле конструкции из КМ получает распространение метод, позволяющий регистрировать деформации и температуры с помощью волоконно-оптических датчиков (ВОД). Их основными техническими характеристиками являются точность, чувствительность и динамический диапазон [4, 8]. Они относятся к распределенным широкополосным датчикам, обладающим небольшими массогабаритными характеристиками и имеющими по сравнению с ПАЭ более равномерную амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) [9, 10]. Среди основных преимуществ ВОД следует отметить: малые габариты и массу, нечувствительность к электромагнитным шумам и помехам, незначительную чувствительность к вибрациям, линейность АЧХ, возможность при многоточечных измерениях использовать одно оптическое волокно, организацию на волокне различных типов датчиков, предназначенных не только для работы с акустическими сигналами, но и для измерения температуры и деформации. Эти характеристики делают их привлекательными для разработчиков бортовой авиационной аппаратуры. Однако чувствительность ВОД, выраженная через соотношение сигнал/шум, много меньше, чем у ПАЭ. Это приводит к уменьшению их амплитуды сигналов, к снижению чувствительности и точности локации дефектов [1].

Натурная тензометрия проводит контроль напряжений в наиболее нагруженных зонах конструкции, и по ним рассчитывается их прочность. При статическом тензометрировании определяется общее напряженное состояние, осуществляется измерение относительных деформаций в отдельных точках конструкции. Статическое растяжение относится к самым распространенным видам механических испытаний и определяет прочность и пластичность материала. Тензодатчики, применяемые при таких испытаниях, могут использоваться при массовых измерениях. Этому требованию отвечают наклеиваемые на конструкцию проволочные тензодатчики, которые нашли широкое применение при исследованиях напряженного состояния металлических и композиционных конструкций.

При реализации мониторинга состояния конструкций из КМ используются контроль и анализ кинетики местного *напряженно-деформированного состояния* (НДС) с помощью проволочных тензодатчиков и ВОД. Оптимальные места установки данных датчиков определяются при расчете НДС поврежденных конструкций *методом конечного элемента* (МКЭ) [3].

На ранних этапах разрушения композиционных конструкций происходит накопление повреждений, связанных с ростом дефектов на микроуровне. Важной задачей при исследовании процессов накопления повреждений в КМ является анализ их начального этапа деформирования и разрушения. В некоторый момент времени повреждения матрицы и армирующих волокон композита может достигать критического уровня и характер процесса разрушения может изменяться. Перспективным методом контроля НДС композиционной конструкции является метод, основанный на эффекте акустоупругости. Однако в настоящее время в основном известны работы [11, 12], связанные с контролем данным методом напряжений и деформаций в металлических конструкциях, а его использование при работе с КМ практически не известно.

Одна из важных задач метода акустоупругости связана с исследованием дефектов, пластических деформаций и внутренних напряжений в неоднородных по своим механическим свойствам конструкциях. Распространяясь в тонких пластинах, волны Лэмба обладают сложным механизмом прохождения [13 – 15]. Для работы с ними необходимо обеспечить точность базовых измерений конструкции, что ограничивает их практическое использование в основном лабораторными исследованиями [16, 17].

Принцип контроля конструкции методом акустоупругости основан на зависимости основных параметров упругих *ультразвуковых* (УЗ) волн

(скорости, амплитуды, частоты) от механических напряжений. Этот метод применяется в основном в области машиностроения и железнодорожного транспорта. Его использование для определения напряжений в металлических объектах осложняется из-за малого акустоупругого эффекта, в результате чего не всегда удается получать устойчивые результаты. Вопросы практического применения метода акустоупругости для контроля процессов разрушения в углепластике недостаточно разработаны.

При исследовании напряжений основным измеряемым параметром является время распространения УЗ-сигнала от датчика, работающего в режиме излучения, до датчика, работающего в режиме приема. Точность расчета скорости распространения волн определяется точностью измерения длины акустического пути, а время распространения упругих волн вычисляется на порядок точнее, чем их скорость [12, 13]. Следовательно, эффективность метода акустоупругости тем выше, чем точнее определяется время распространения УЗ-волн.

Одновременное применение данных методов НК при статическом испытании образцов из углепластика позволило проводить локацию дефектов с помощью метода АЭ. Контроль деформаций конструкций из КМ осуществляется с использованием тензометрии и эффекта акустоупругости и позволяет определять временные параметры УЗ-волн Лэмба [14, 15].

*Цель работы* – применение комплексного подхода для контроля дефектов и процесса разрушения образцов из углепластика с использованием методов акустической эмиссии, тензометрии и эффекта акустоупругости при статическом нагружении образцов из углепластика.

### Методика исследования

При статическом нагружении использовались плоские образцы из углепластика АСМ 102 С130UD (АСМ) с геометрическими размерами 600×100×2,3 мм со сквозным отверстием диаметром 12 мм и укладкой из 20 монослоев [±45/0/90/0/+45/0/-45/0/+45<sub>2</sub>/0/-45/0/+45/0/90/0/±45]. Обозначение 45<sub>2</sub> соответствует наличию двух монослоев с углом укладки 45°. Данные образцы были изготовлены методом вакуумного формования. В табл. 1 приведены паспортные данные монослоев препрега АСМ, состоящего из углеродного волокна Umatex UMT 45-12K и эпоксидного связующего марки АСМ 102.

Статическое нагружение выполнялось гидравлической машиной МТС-50 с выдержкой на каждой ступени в течение  $\Delta t = 1,5 \dots 2$  мин. До нагрузки  $F_1 = 70$  кН ее увеличение осуществлялось через интер-

УДК 620.179.16  
DOI: 10.14489/td.2025.01.pp.026-034

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛА ОБОРУДОВАНИЯ И ТРУБОПРОВОДОВ АЭС



**В. М. Ушаков,**  
д-р техн. наук,  
АО «НПО «ЦНИИТМАШ»,  
Москва, Россия.  
E-mail: VMUshakov@cniitmash.com

Рассмотрены отдельные пункты некоторых нормативно-методических документов по ультразвуковому контролю, вызывающие неоднозначную интерпретацию или спорное толкование. Даны соответствующие комментарии. Описаны особенности ультразвукового контроля, в частности металла листового проката и прутков, используемых в качестве заготовок при изготовлении элементов атомных энергетических установок, а также сварных соединений элементов атомных энергетических установок с описанием настройки дефектоскопа: глубиномера, длительности развертки и чувствительности с помощью DAC-кривой, а также схем прозвучивания с учетом особенностей конструкции сварных соединений. Описана оценка объектов контроля по результатам ультразвукового контроля.

**Ключевые слова:** листовой прокат, прутки, ультразвуковой контроль, дефектоскоп, преобразователи, чувствительность контроля, оценка качества.

V. M. Ushakov (JSC "RPA "CNIITMASH", Moscow, Russia)

### SOME FEATURES OF ULTRASONIC TASTING OF METAL EQUIPMENT AND PIPELINES OF NUCLEAR POWER PLANTS

The article reviews individual points of some normative and methodological documents that cause ambiguous or controversial interpretation. The corresponding comments are given. The article describes the features of ultrasonic testing, in particular, of sheet metal, rods used as blanks in the manufacture of elements of nuclear power plants, as well as welded joints of elements of nuclear power plants with a description of the flaw detector settings: depth gauge, sweep duration and sensitivity using a DAC curve, as well as sounding schemes taking into account the design features of welded joints. The article describes the assessment of test objects based on the results of ultrasonic testing.

**Keywords:** sheet metal, rods, ultrasonic testing, flaw detector, transducers, testing sensitivity, quality assessment.



Статья поступила в редакцию 23.09.2024

Received 23.09.2024

Согласно нормативным и методическим документам по неразрушающему контролю (НК) в атомной энергетике применение *ультразвукового контроля* (УЗК) обязательно.

Рассмотрим некоторые частные случаи УЗК, вызывающие трудности, неоднозначность понимания и дадим рекомендации по подготовке и проведению УЗК. По документу [1] проводят контроль листового проката, который используется для изготовления крышек, днищ и обечаек корпуса реактора, парогенератора *атомных энергетических установок* (АЭУ).

Возьмем в качестве примера УЗК листов толщиной от 80 до 120 мм из стали 09Г2С, 10ГН2МФА до и после термообработки. Класс сплошности по

ГОСТ 22727 – 01 или 1, объем контроля – 100 %. Указанный стандарт «устанавливает: эхометод, теневой, эхосквозной и многократно-теневой в сочетании с теневым, эхометод в сочетании с зеркально-теневым», см. с. 1 документа [1].

В источнике [2, с. 418] читаем: «При контроле эхометодом регистрируют один или несколько сигналов от несплошностей, амплитуда одного из которых равна или превышает уровень, соответствующий заданной чувствительности». При этом оценивают эквивалентный диаметр (площадь), мм (мм<sup>2</sup>). При контроле *зеркально-теневым* (ЗТ) методом «...фиксируют уменьшение донного сигнала до или ниже уровня, соответствующего заданной чувствительности» [2, с. 418]. При этом оценивают

условную площадь несплошности в  $\text{см}^2$ . При эхометодом настраивают глубиномер, чувствительность и другие параметры дефектоскопа. По существу ЗТ-метод основан на ослаблении несплошностями УЗ-сигнала при его прохождении от излучателя до донной поверхности и обратно – до приемника. Сочетание эхо- и ЗТ-метода предусматривает настройку глубиномера прибора. По классификации д-ра техн. наук, проф. И. Н. Ермолова [3] ЗТ-метод является комбинированным, т.е. включает эхометод (метод отражения) и теневой (метод прохождения).

Согласно п. 4.2. ГОСТ 22727: «Сплошность листового проката сталей, выплавленных в вакуумных дуговых, индукционных электропечах или с применением специальных переплавов (ЭШП, ВДП и др.) в случае контроля их эхометодом при ручном сканировании (по договоренности изготовителя с потребителем), т.е. для класса сплошности 01, см. табл. 3 ГОСТ 22727, может характеризоваться по результатам контроля:

- минимальным учитываемым эквивалентным размером  $D_0$ , мм, несплошностей [уровнем фиксации];
- максимальным допустимым эквивалентным размером  $D_1$ , мм, несплошностей [браковочным уровнем];
- числом  $N$  непротяженных несплошностей размером  $D_0$  до  $D_1$  ... Величины  $D_0$  и  $D_1$  выбирают из ряда 2,0; 2,5; 3,0; 5,0; 6,0; 8,0 мм».

Итак, при УЗК листового проката для класса сплошности 01 используют эхометод; класс сплошности 1 – «эхометод в сочетании с зеркально-тене-

вым» (хотя, как показано выше, ЗТ-метод включает эхометод).

Для эхометода чувствительность настраиваем по плоскодонному отражателю диаметром 5 мм (условное обозначение Д5Э, см. табл. 2, ГОСТ 22727) с помощью АРД-диаграмм или ВРЧ (*временная регулировка чувствительности*). Схема прозвучивания для эхо- и ЗТ-метода показана на рис. 1.

Схема рис. 1, а соответствует табл. 1, п. 6.5 ПНАЭ Г-7-014–89. Используются прямой совмещенный преобразователь В2S и раздельно-совмещенный SEB2 на частоту 2 МГц, а также наклонный совмещенный WB 45-2 с углом ввода  $45^\circ$  на частоту 2 МГц. Для настройки прибора используется ступенчатый образец для прямых ПЭП с плоскодонным отражателем (ПО – Д5Э) диаметром 5 мм, глубиной 30, 50, 70, 90 и 110 мм, для наклонного – настроечный образец с той же глубиной залегания ПО. Образцы применяют для настройки чувствительности и оценки обнаруженных несплошностей с помощью ВРЧ (TGC – Time Gain Correction) в соответствии с инструкцией по эксплуатации применяемого прибора USM 35 XC. Допускается настройка по АРД (AVG) диаграммам.

Настройку глубиномера и длительности развертки дефектоскопа USM 35XS проводят по эхосигналам от донной поверхности и ПО. Рабочую зону контроля обозначают стробом: для преобразователя В2S – 10 ... (80...120 мм), SEB2 – 4 ... 40 мм, WB 45-2 – 10 ... (80...120 мм). Мертвая зона контроля составляет 4 мм, поверхностный слой металла указанной толщины удаляется в процессе обработки листов.

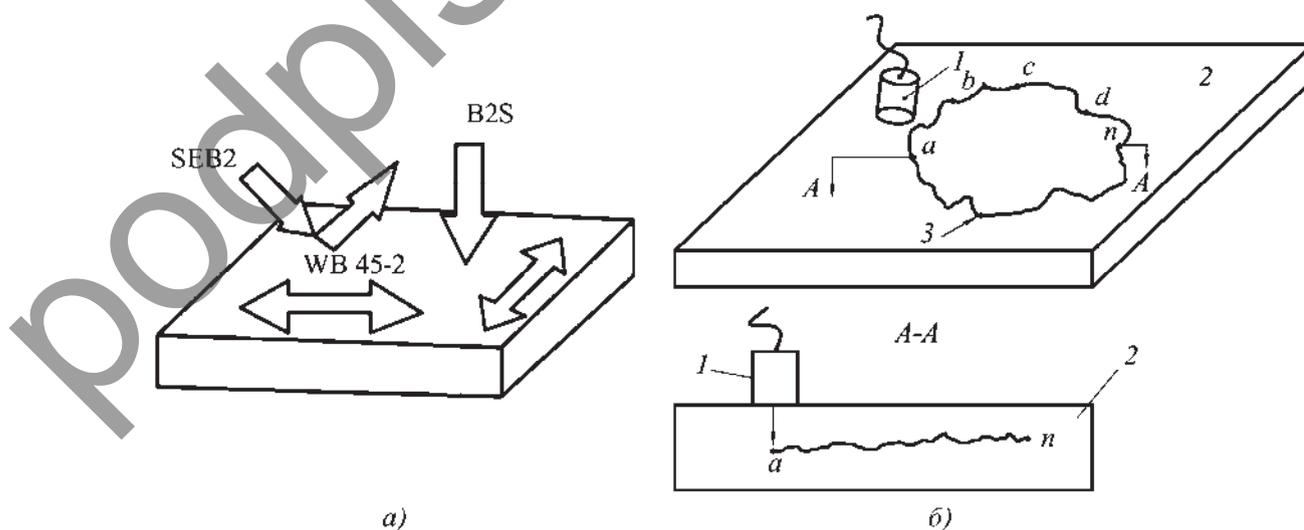


Рис. 1. Схема прозвучивания (а, прозвучивание согласно табл. 1, п. 6.5 ПНАЭ Г-7-014–89 [6]) и оконтуривания расслоения в листе (б):

1 – ПЭП; 2 – лист; 3 – условная граница расслоения; B2S – П111 (преобразователь контактный прямой совмещенный на частоту 2 МГц); SEB2 – П112 (контактный прямой раздельно-совмещенный на частоту 2 МГц); WB45-2 – П121 (контактный наклонный совмещенный, угол ввода  $45^\circ$ , частота 2 МГц)

УДК 514.8:620.179.152:004.942  
DOI: 10.14489/td.2025.01.pp.035-048

# СИМУЛЯЦИЯ ЭФФЕКТА ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ НЕРЕЗКОСТИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ РАДИОГРАФИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ОБЪЕКТОВ



**В. С. Кувшинников,**  
канд. техн. наук,  
АО «Научно-исследовательский и конструкторский институт монтажной технологии – Атомстрой»,  
Москва, Россия.  
E-mail: KuvshinnikovVS@atomrus.ru



**Е. Е. Ковшов,**  
д-р техн. наук,  
АО «Научно-исследовательский и конструкторский институт монтажной технологии – Атомстрой»,  
Москва Россия.  
E-mail: KovshovEE@atomrus.ru

Основными задачами при применении технологий виртуальной реальности в рамках программ подготовки квалифицированных специалистов по неразрушающему контролю являются развитие их профессиональных навыков, формирование устойчивых паттернов поведения, обеспечивающих неукоснительное соблюдение правил и требований промышленной безопасности, ясное целеполагание и уверенные действия в ходе активной практической деятельности. К важным факторам, учитываемым при проведении радиационного контроля, относится геометрическая нерезкость. Рассмотрено несколько подходов к симуляции эффекта нерезкости при получении результатов радиографического контроля цифровых двойников объектов. Предложен способ реализации на основе обработки вершин моделей с применением декомпозиции источника на концентрические контуры. Рассмотрены ограничения и допущения, позволяющие сократить объем видеопамати, необходимый для обработки. Разработанный алгоритм формирования границ проекции позволяет добиться их характерной формы с учетом ориентации фокусного пятна источника излучения. Пользователю симулятора промышленного радиографического контроля предоставлен интерактивный инструмент для изучения связи его действий при настройке экспозиции с качеством полученных радиографических изображений.

**Ключевые слова:** виртуальная реальность, симулятор промышленной радиологии, компьютерные технологии, геометрическая нерезкость, гибкий детектор, математическое моделирование, неразрушающий контроль.

V. S. Kuvshinnikov, E. E. Kovshov (Joint-Stock Company “Research and Development Institute of Construction Technology – Atomstroy”, Moscow, Russia)

## GEOMETRICAL UNSHARPNESS EFFECT SIMULATION FOR DIGITAL TWINS OF OBJECTS' RADIOGRAPHIC IMAGING

The main objective in virtual reality technology application within the scope of training programs for qualified nondestructive testing (NDT) specialists is the development of their professional skills, formation of stable behaviour patterns that ensure strict compliance with the industrial safety rules and requirements, clear goal-setting and confident actions in the course of intensive practical activity. One of the important factors to consider when performing radiographic inspection is geometric unsharpness. The method of geometric unsharpness effect simulation in the interactive simulator of industrial radiographic inspection for the NDT specialists' professional skills development is proposed. Several approaches are considered for simulation of unsharpness effect for obtaining the results of radiographic inspection of objects' digital twins. A method of implementation based on model vertex processing using source decomposition into concentric contours is proposed. Restrictions and assumptions which allow to reduce the amount of video memory required for processing are considered. The developed algorithm of projection boundaries formation allows to achieve their specific shape with regard to the orientation of the radiation source focal spot. The user of the simulator of industrial radiographic inspection is provided with an interactive tool for studying the relationship between his actions during exposure setting and the quality of the acquired radiographic images.



**Keywords:** virtual reality, radiography simulator, computer technology, geometric unsharpness, flexible detector, mathematical modelling, nondestructive testing.

Статья поступила в редакцию 16.09.2024

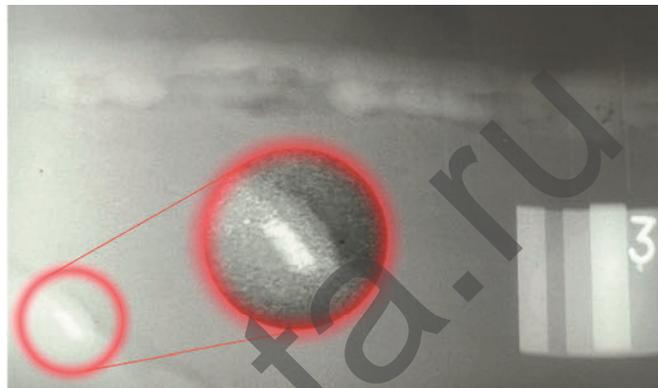
Received 16.09.2024

## Введение

Перед виртуальным симулятором радиографического контроля как инструментом в профессиональной подготовке специалистов по неразрушающему контролю [1] стоит целый ряд задач. К наиболее важным из них относятся задачи, эффективно решаемые с применением средств виртуализации. Например, с помощью VR-технологий возможна наглядная демонстрация связи между устанавливаемыми входными параметрами *неразрушающего контроля* (НК) и соответствующими качественными характеристиками результатов экспонирования используемого детектора. Другими словами, происходит демонстрация связи действий специалиста по промышленной радиографии при настройке экспонирования с конечным качеством полученных изображений. Таким образом, у обучаемого формируется подкрепленное опытом понимание, какими правилами и закономерностями руководствоваться при выборе параметров экспонирования. При этом нормативная документация допускает свободу выбора из широкого диапазона значений. Упомянутый выбор, как правило, обусловлен, с одной стороны, стремлением сэкономить временные и материальные ресурсы, а с другой – необходимостью получить изображение максимально высокого качества. В процессе работы с симулятором промышленной радиографии формируется навык определения наиболее существенных факторов, влияющих на качество получаемого изображения.

Среди факторов, негативно влияющих на качество изображения и препятствующих расшифровке, можно выделить явление *геометрической нерезкости* (ГН). Согласно ГОСТ Р 55776–2013 «геометрическая нерезкость – нерезкость радиационного изображения, обусловленная конечными размерами эффективного фокусного пятна источника ионизирующего излучения или геометрическими параметрами устройства, формирующего радиационное изображение» [2]. Проявлению ГН способствует ряд причин, среди которых: требование минимизации фокусного расстояния ГОСТ 7512–82 [3]; технические и технологические ограничения анодного напряжения и тока; соотношение геометрических параметров контролируемого объекта, выявляемых дефектов и фокусного пятна источника излучения (далее источника); стремление сократить время экспонирования.

Соответствующий уровень качества получаемого изображения призваны обеспечить требования



**Рис. 1.** Пример геометрической нерезкости изображения включения вольфрама на радиографическом снимке, выполненном по схеме 5г ГОСТ 7512–82

к ГН и ограничения на выбор фокусного расстояния, приведенные в ГОСТ 7512–82 и ГОСТ ISO 17636-1 [4]. При соблюдении требований нормативной документации дефектоскопист может столкнуться с проявлением ГН на изображении. Например, при экспонировании стыкового сварного соединения  $\varnothing 104 \times 4$  мм по схеме 5г, согласно ГОСТ 7512–82 [3], влияние ГН сказывается на качестве изображения дефектов шва на неконтролируемом участке снимка, как представлено на рис. 1. На выделенном фрагменте участка радиографического снимка находится изображение включения вольфрама с нерезкостью. Общая нерезкость складывается из совокупности факторов, где ГН вызвана расположением включения на удалении от поверхности детектора.

Симуляция изображения с ГН является одним из этапов обучения специалистов по неразрушающему контролю с использованием симулятора промышленной радиографии. Задача создания модели симуляции эффекта ГН не является принципиально новой. Явление ГН представляет собой предмет изучения и моделирования многих исследователей, решающих прикладные задачи повышения четкости лучевых изображений различными методами [5 – 7]. При этом рассмотрены не все вопросы и проблемы симуляции, включая применимость модели в контексте последовательной обработки графического изображения.

## Симуляционная модель геометрической нерезкости при обработке изображения

Существуют различные модификации алгоритма последовательной обработки изображения. Конкретная реализация зависит от технологий,

УДК 620.179.1  
DOI: 10.14489/td.2024.07.pp.004-014

## КРИТЕРИИ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ МЕТОДОМ ЦИФРОВОЙ РАДИОГРАФИИ



**А. В. Смирнов,**  
НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ,  
Москва, Россия.  
E-mail: admin@viam.ru



**Е. И. Косарина,**  
д-р техн. наук,  
НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ,  
Москва, Россия.  
E-mail: admin@viam.ru



**А. А. Демидов,**  
НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ,  
Москва, Россия.  
E-mail: admin@viam.ru



**П. В. Суворов,**  
НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ,  
Москва, Россия.  
E-mail: admin@viam.ru

Теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены критерии выбора режимов и параметров контроля методом цифровой радиографии. Анализ качества цифрового изображения показал его зависимость от параметров и режимов контроля, а также отношения сигнал/шум. Получена аналитическая зависимость, связывающая размер дефекта в плоскости, перпендикулярной оси пучка излучения, размер фокусного пятна источника излучения, параметры схемы контроля и размер пикселя детекторной системы. Справедливость аналитического выражения подтверждена экспериментально.

**Ключевые слова:** радиационный неразрушающий контроль, цифровые детекторные системы, отношение сигнал/шум, радиационное изображение, схема контроля, цифровое изображение.

A. V. Smirnov, E. I. Kosarina, A. A. Demidov, P. V. Suvorov  
(NRC “Kurchatov Institute” – VIAM, Moscow, Russia)

### CRITERIA FOR THE OPTIMAL MODE OF NON-DESTRUCTIVE TESTING BY DIGITAL RADIOGRAPHY

Theoretically justified and experimentally confirmed criteria for the selection of modes and parameters of digital radiography control. The analysis of the digital image quality showed its dependence on the parameters and control modes, on the value of the signal-to-noise ratio. Analytical information was obtained a relationship linking the size of the defect in the plane perpendicular to the axis of the radiation beam, the size of the focal spot of the radiation source, the parameters of the control circuit and the pixel size of the detector system. The validity of the analytical expression has been confirmed experimentally.

**Keywords:** radiation non-destructive testing, digital detector systems, signal-to-noise ratio, radiation image, control circuit, digital image.



Статья поступила в редакцию 14.03.2024

Received 14.03.2024

#### Введение

Многолетняя проблема радиационного неразрушающего контроля – замена радиографической пленки другим детектором, не столь дорогим и не столь трудоемким, казалось бы, решена в пользу плоскопанельных детекторов. Плоскопанельный детектор – это матричная *цифровая детекторная система* (ЦДС) для промышленного радиографического контроля, предназначенная для получения и передачи рентгеновских снимков на персональный компьютер оператора для последующей обработки и

расшифровки [1, 2]. По сравнению с пленочной радиографией контроль с применением цифровых плоскопанельных детекторов сильно упрощает процесс контроля: во-первых, отпадает необходимость в расходном серебросодержащем материале и связанных с ним затратах на обработку, во-вторых, повышается производительность контроля за счет сокращения продолжительности экспонирования.

Все же существуют препятствия к широкому распространению ЦДС в массовом рентгеновском контроле. И это происходит вовсе не оттого, что

системы стоят недешево, не оттого, что их разрешающая способность ниже, чем у пленочных систем, и даже не оттого, что работа с ЦДС требует высокой квалификации дефектоскопистов [3]. Основная причина заключается в отсутствии четких критериев выбора параметров контроля и нормативных документов [4]. При применении пленочных систем основным критерием выбора анодного напряжения при контроле является условие:  $\mu d \geq 2$ , где  $\mu$  – линейный коэффициент ослабления излучения,  $\text{см}^{-1}$ ;  $d$  – толщина объекта контроля в направлении оси пучка излучения. На основании этого условия был разработан ГОСТ 20426–82 «Контроль неразрушающий. Методы дефектоскопии радиационные. Область применения». Собственные шумы радиографической пленки, связанные с ее гранулярностью, ничтожно малы, основной проблемой является получение высокого контраста радиационного изображения, который падает с ростом анодного напряжения [5].

ЦДС является источником собственных шумов, и, в отличие от традиционной радиографии, качество цифрового изображения определяется не столько контрастом, сколько величиной отношения сигнал/шум, поэтому выполнение критерия  $\mu d \geq 2$  для ЦДС не совсем эффективно. Успешное внедрение ЦДС в неразрушающий контроль на производстве заключается в том, чтобы их адаптация на те или иные *объекты контроля* (ОК) проходила не эмпирически, путем проб и ошибок, а априори.

Если говорить о разрешающей способности, то у радиографической пленки она, безусловно, выше, чем у цифровых детекторов. Радиографический снимок, выполненный на мелкозернистой

пленке класса С3, С4, позволяет получить более детализированное изображение, чем с помощью ЦДС. Для сварных соединений, в большинстве случаев представляющих собой детерминированный объект, контроль в соответствии с рекомендациями ГОСТ ISO 17636-2–2017 дает удовлетворительные результаты [4]. При контроле методом цифровой радиографии ответственных литых деталей небольших толщин, изделий из неметаллических и композиционных материалов, авиационной техники к цифровым изображениям предъявляются жесткие требования по чувствительности и разрешающей способности. Необходимо установление критериев выбора режимов и параметров контроля методом цифровой радиографии [6 – 8].

### Анализ качества цифрового изображения

Результатом цифрового радиографического контроля является *цифровое изображение* (ЦИ). Качество любого изображения, в том числе цифрового, определяется такими параметрами, как: контраст, четкость, *отношение сигнал/шум* (ОСШ) (рис. 1).

В свою очередь контраст зависит от следующих факторов:

- контрастных свойств ОК (его материала и материала и размеров дефектов, подлежащих обнаружению);
- ОСШ;
- энергии излучения.

Четкость изображения зависит от:

- геометрической нерезкости;
- коэффициента увеличения;
- пространственного разрешения детектора.



Рис. 1. Факторы, определяющие качество цифрового изображения

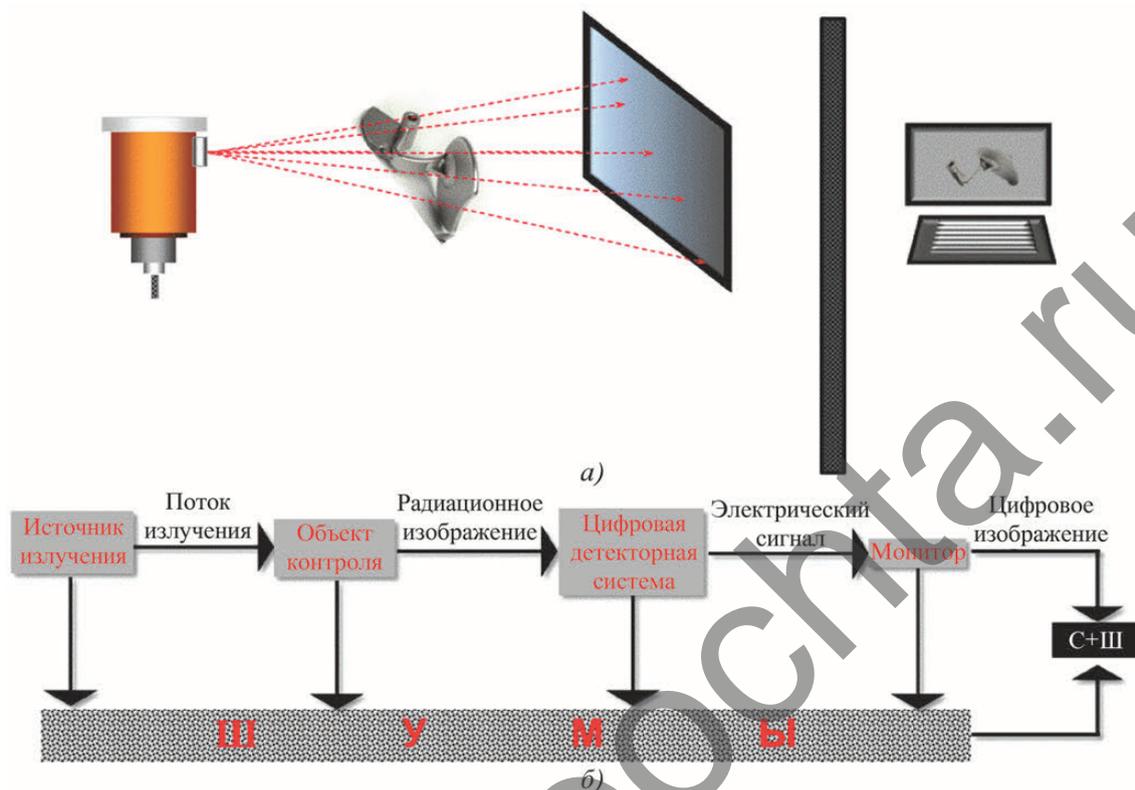


Рис. 2. Схема контроля стальной отливки методом цифровой радиографии (а); эквивалентная схема формирования и преобразования сигнала при контроле методом цифровой радиографии (б)

Отношение сигнал/шум – это:

- шум ОК (определяется чистотой обработки поверхности, кристаллической структурой сплава);
- шум источника излучения, связанный с флуктуациями излучения;
- собственный шум детектора: шум электронных устройств и шум квантования.

Рассмотрим, каковы условия обнаружения поры  $wl = 0,25 \times 0,25$  мм в стальном объекте толщиной 6 мм при контроле методом цифровой радиографии. Схема контроля показана на рис. 2.

**Шумы, возникающие при формировании радиационного изображения.** На этапе формирования радиационного изображения, помимо полезной информации, мерой которой является контраст радиационного изображения дефекта, возникают шумы, связанные с квантово-статистическими процессами генерации фотонов в рентгеновской трубке, а также колебаниями толщины объекта из-за обработки его поверхности [5].

Таким образом, помимо радиационного изображения дефекта, формируется радиационное изображение шума, который в сумме с полезным сигналом, т.е. с радиационным изображением собственно дефекта, ухудшает качество радиационного изображения. В результате проведенных исследований, описание которых приведено в источниках

[5, 9], установлена аналитическая зависимость контраста радиационного изображения  $K_{\text{рад.из}}$  и аддитивного ОСШ $_{\text{рад.из}}$ , возникающего на этапе формирования радиационного изображения:

$$K_{\text{рад.из}} = K_{\text{рад.деф}} \frac{\text{ОСШ}_{\text{рад.из}}}{1 + \text{ОСШ}_{\text{рад.из}}},$$

где  $K_{\text{рад.деф}} = \mu w$  – радиационный контраст изображения дефекта;  $\mu$  – линейный коэффициент ослабления излучения материалом ОК,  $\text{см}^{-1}$ ;  $w$  – размер дефекта в направлении оси пучка излучения, см.

В результате теоретических расчетов, приведенных в работе [9], показано, что для стального объекта толщиной 6 мм контраст радиационного изображения и ОСШ $_{\text{рад.из}}$  принимают следующие значения (см. таблицу, рис. 3).

Шум радиационного изображения ОСШ $_{\text{рад.из}}$  вызван случайным характером рождения фотонов в рентгеновской трубке, комптоновским рассеянием, колебаниями толщины и плотности объекта контроля, не являющимися дефектами. Удовлетворительные значения ОСШ $_{\text{рад.из}}$  и контраста радиационного изображения  $K_{\text{рад.из}}$  лежат в диапазоне анодных напряжений от 175 до 200 кВ, которые выше значения анодного напряжения 120 кВ, рекомендованного ГОСТ 20426. Таким образом, снижение шума

УДК 53.082.4:621.791.011  
DOI: 10.14489/td.2025.01.pp.049-055

# НЕРАЗРУШАЮЩИЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ ПОРИСТОСТИ АЛЮМИНИЕВЫХ ПОКРЫТИЙ ЛАЗЕРНЫМ ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ



**Н. Б. Подымова,**  
канд. физ.-мат. наук,  
Физический факультет,  
Московский  
государственный  
университет  
им. М. В. Ломоносова,  
Институт физики Земли  
им. О. Ю. Шмидта РАН,  
Москва, Россия.  
E-mail: npodymova@mail.ru



**Ю. Г. Соколовская,**  
канд. физ.-мат. наук,  
Физический факультет,  
Московский  
государственный  
университет  
им. М. В. Ломоносова,  
Москва, Россия.  
E-mail: yu.sokolovskaya@  
mail.ru



Предложен метод неразрушающего ультразвукового контроля объемной пористости покрытий, полученных методом электродуговой наплавки алюминиевого сплава на стальную подложку. Метод использует лазерное термооптическое возбуждение зондирующих ультразвуковых импульсов и измерение спектральной мощности импульсов, рассеянных на порах в покрытии, и позволяет проводить контроль при одностороннем доступе к плоской поверхности покрытия.

**Ключевые слова:** наплавленные покрытия, пористость, лазерный оптико-акустический эффект, рассеяние ультразвуковых волн.

N. B. Podymova<sup>1,2</sup>, Yu. G. Sokolovskaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Physics, Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

## NONDESTRUCTIVE ULTRASONIC TESTING OF POROSITY IN ALUMINUM COATINGS USING A LASER OPTOACOUSTIC METHOD

A method of nondestructive ultrasonic testing of the volumetric porosity of coatings obtained by arc surfacing of an aluminum alloy onto a steel substrate has been proposed. The method utilizes the laser thermo-optical excitation of probe ultrasonic pulses and the measurement of the spectral power of pulses scattered by pores in a coating, and makes it possible to perform testing with one-sided access to the flat surface of a coating.

**Keywords:** surfaced coatings, porosity, laser optoacoustic effect, scattering of ultrasonic waves.

Статья поступила в редакцию 29.07.2024

Received 29.07.2024

### Введение

В настоящее время для получения покрытий с высокими триботехническими характеристиками на деталях ответственного назначения широко применяются различные методы газодинамического напыления и электродуговой наплавки различных сплавов цветных металлов [1, 2]. Метод электродуговой наплавки обеспечивает высокую прочность сцепления покрытия с подложкой, а также сохранение исходной структуры металла подложки и химического состава, микроструктуры и фазового состава присадочного материала в нанесенном слое. Наплавка позволяет обеспечить высокую эффективность и относительно низкую себестоимость нанесения покрытий из алюминиевых сплавов на детали и изделия сложной формы без потенциальных ограничений по их размеру.

Основной проблемой при формировании наплавленных покрытий из алюминиевых сплавов

является образование пористости, которая формируется за счет захвата водорода и защитного газа в процессе наплавки и за счет усадки расплава при отверждении (см., например, [3, 4] и имеющиеся там ссылки). Неравномерно распределенные поры в покрытии приводят к ухудшению его триботехнических характеристик и уменьшению адгезионной прочности. Поэтому разработка методов неразрушающего контроля объемной пористости в наплавленных покрытиях из алюминиевых сплавов является важной научно-технической задачей.

Для неразрушающего контроля структуры, фазового состава и толщины покрытий широко используются ультразвуковые методы благодаря их относительной простоте, безопасности, оперативности и надежности. Высокая чувствительность ультразвуковых методов к пористости обусловлена высокой эффективностью рассеяния акустических волн на газовых порах, которая существенно зави-

сит от соотношения размеров пор и длины (частоты) зондирующей волны [5]. Поэтому достоверный контроль пористости в наплавленных покрытиях, которая может формироваться порами разного размера, требует измерения характеристик рассеянных ультразвуковых сигналов в достаточно широком частотном диапазоне.

Для возбуждения широкополосных ультразвуковых импульсов целесообразно использование лазерного термооптического механизма возбуждения ультразвука (оптико-акустический эффект) [6]. Высокая амплитуда и малая длительность лазерно-возбуждаемых ультразвуковых импульсов позволяют существенно повысить точность измерений и разрешающую способность метода контроля структуры сильно поглощающих и рассеивающих ультразвуков неоднородных конструкционных материалов (см., например, работы [7 – 10]).

Целями настоящей работы являются разработка и реализация лазерного оптико-акустического метода для неразрушающего контроля распределения локальной пористости в покрытиях из алюминиевых сплавов, полученных методом электродуговой наплавки на стальную подложку. Предлагаемый метод позволит осуществлять контроль при одностороннем доступе к поверхности исследуемого покрытия.

### Образец покрытия из алюминиевого сплава

В качестве объекта исследований был взят образец наплавленного покрытия на стальной подложке, получение которого детально описано в работе [11]. Подложка размером 300×150×15 мм была изготовлена из низкоуглеродистой стали 20 (ГОСТ 1050). Перед получением собственно исследуемого покрытия на поверхности подложки методом сварки взрывом был сформирован промежуточный слой толщиной 3 мм из деформируемого алюминия марки АД1 (ГОСТ 4784). Процесс сварки взрывом осуществлялся по параллельной схеме, которая обеспечивает постоянство кинематических параметров в пределах всей площади заготовки [12]. Для получения собственно наплавленного покрытия использовался процесс электродуговой наплавки в защитной атмосфере аргона прутков из алюминиевого сплава марки ОК Tigrod 4047 (AWSA5.10) [11]. Данный сплав был выбран как наиболее близкий по химическому составу матричным алюминиевым сплавам антифрикционных композиционных материалов. Процесс аргонодуговой наплавки прутка осуществлялся по схеме, представленной на рис. 1 [11] при сварочном токе 190...200 А, напряжении на дуге 19...21 В и скорости наплавки  $v_n = 11...13$  м/ч. Такие параметры обеспечивают полное проплавление промежуточно-

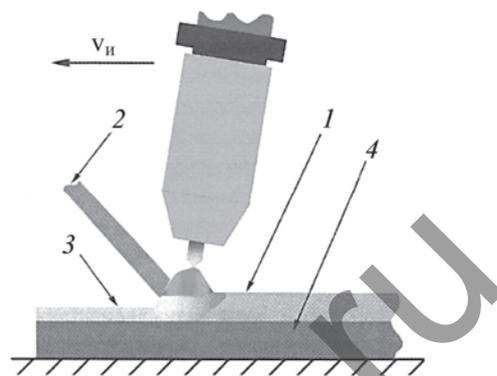


Рис. 1. Схема электродуговой наплавки покрытия из алюминиевого сплава на стальную подложку [11]: 1 – наплавленный слой; 2 – наплавочный пруток; 3 – промежуточный алюминиевый слой; 4 – подложка

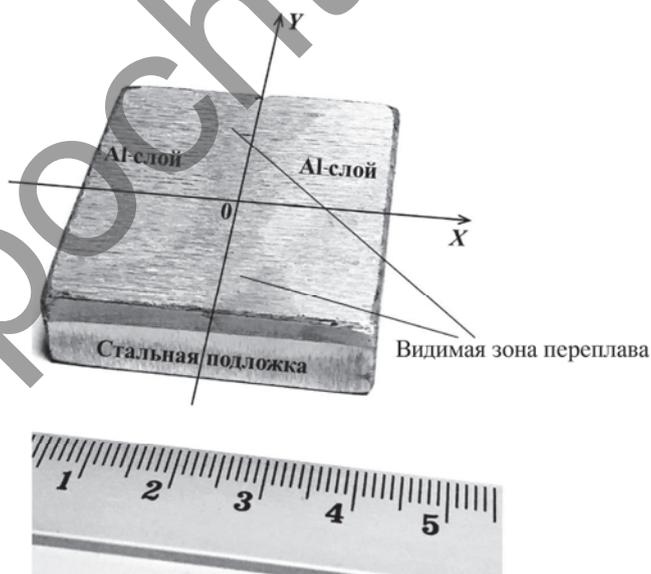


Рис. 2. Фотография исследуемого образца наплавленного покрытия из алюминиевого сплава 4047 на подложке из стали 20:

Al-слой – промежуточный слой из алюминия, нанесенный на подложку методом сварки взрывом. Вдоль осей координат (X, Y) выполняется ультразвуковое сканирование

го алюминиевого слоя для обеспечения контакта расплава наплавочного прутка с твердой стальной подложкой. Это позволяет предотвратить образование на границе раздела алюминиевый сплав – стальная подложка хрупкого интерметаллидного слоя системы железо–алюминий, уменьшающего адгезионную прочность покрытия.

На рис. 2 представлена фотография готового образца наплавленного и затем отшлифованного покрытия толщиной 3...4 мм на стальной подложке размером 40×40×15 мм. Перед проведением ультразвуковых исследований поверхность покрытия была отшлифована, на образце визуально определяется граница зоны переплава (термического воздействия).

УДК 620.179.16  
DOI: 10.14489/td.2024.07.pp.016-023

# АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УЛЬТРАЗВУКОВОГО БЕСКОНТАКТНОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА КОМПОЗИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ С ПОВЕРХНОСТЬЮ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ



**О. Н. Будадин,**  
д-р техн. наук,  
АО «ЦНИИ специального  
машиностроения»,  
Хотьково, Россия.  
E-mail: tsniiism@tsniism.ru



**А. Ф. Разин,**  
д-р техн. наук,  
АО «ЦНИИ специального  
машиностроения»,  
Хотьково, Россия.  
E-mail: tsniiism@tsniism.ru



**А. Н. Пичугин,**  
канд. техн. наук,  
АО «ЦНИИ специального  
машиностроения»,  
Хотьково, Россия.  
E-mail: tsniiism@tsniism.ru



**В. А. Анискович,**  
д-р техн. наук,  
АО «ЦНИИ специального  
машиностроения»,  
Хотьково, Россия.  
E-mail: tsniiism@tsniism.ru



**В. В. Борисенко,**  
ООО «НПЦ «Кропус-ПО»,  
Москва, Россия.  
E-mail: sales@kropus.ru



**А. С. Богачев,**  
ООО «НПЦ «Кропус-ПО»,  
Москва, Россия.  
E-mail: sales@kropus.ru

Описана разработанная и сданная в промышленную эксплуатацию универсальная автоматизированная система ультразвукового бесконтактного контроля сложнопрофильных изделий из композитных материалов.

Экспериментальные исследования и результаты промышленной эксплуатации наглядно показали, что разработанные автоматизированная система контроля и алгоритм обработки информации обеспечивают заданную достоверность выявления дефектов в изделиях, при этом осуществляется: автоматическая адаптация системы контроля к изделиям с произвольной формой поверхности путем ее настройки по 3D-модели изделия, закладываемой в систему управления, что позволяет значительно расширить номенклатуру контролируемых изделий без существенной доработки системы контроля; повышение помехозащищенности и обнаружение дефектов по адаптивным алгоритмам с заданной погрешностью с применением специальных алгоритмов обработки сигналов; автоматический контроль изделий со сложной формой поверхности с изменением режимов контроля; автоматизированная регистрация выявленных дефектов на поверхности контролируемого изделия.

**Ключевые слова:** автоматизированный неразрушающий контроль, выявление дефектов, достоверность, вероятность обнаружения, оценка технического и эксплуатационного состояния, сложные конструкции.

O. N. Budadin<sup>1</sup>, A. F. Razin<sup>1</sup>, A. N. Pichugin<sup>1</sup>, V. A. Aniskovich<sup>1</sup>,  
V. V. Borisenko<sup>2</sup>, A. S. Bogachev<sup>2</sup>, A. N. Rykov<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>JSC "Central Research Institute of Special Mechanical Engineering",  
Khotkovo, Russia  
<sup>2</sup>LLC SPC "KROPUS-PO", Moscow, Russia

## AUTOMATED SYSTEM FOR ULTRASONIC NON-CONTACT NON-DESTRUCTIVE QUALITY CONTROL OF COMPOSITE PRODUCTS WITH COMPLEX-SHAPE SURFACE

The article describes a universal automated system for ultrasonic non-contact testing of complex-profile products made of composite materials, developed and put into commercial operation.

Experimental studies and results of industrial operation have clearly shown that the developed automated control system and information processing algorithm provide the specified reliability of identifying defects in products, while the following is carried out: automatic adaptation of the control system to products with an arbitrary surface shape by adjusting it according to a 3D model of the product embedded in the control system, which allows you to significantly expand the range of controlled products without significant modification of the control system; increasing noise immunity and detecting defects using adaptive algorithms with a given error using special signal processing algorithms; automatic control of products with complex surface shapes with changing control modes; automated registration of detected defects on the surface of the controlled product.

**А. Н. РЫКОВ,**

канд. техн. наук,  
АО «ЦНИИ специального  
машиностроения»,  
Хотьково, Россия.  
E-mail: tsnism@tsniism.ru

**Keywords:** automated non-destructive testing, defect detection, reliability, detection probability, assessment of technical and operational condition, complex structures.



Статья поступила в редакцию 14.03.2024

Received 14.03.2024

Повышение надежности эксплуатации сложных конструкций из *полимерных композиционных материалов* (ПКМ) невозможно без одновременно, а в ряде случаев и опережающего развития технологий и аппаратуры неразрушающего контроля материалов.

Наиболее распространенным подходом к выявлению внутренних несплошностей (дефектов) в материале является сравнение характеристик физических полей до и после взаимодействия с материалом [1].

В зависимости от вида излучения методы неразрушающего контроля подразделяются на тепловые (инфракрасные), ультразвуковые, электромагнитные и др. [2 – 5]. Одним из перспективных методов является ультразвуковой бесконтактный метод контроля [2].

В последнее время активно развивается автоматизация методов неразрушающего контроля, что связано с необходимостью повышения производительности контроля, достоверности результатов, исключения влияния на результаты контроля субъективных факторов и т.п. Этому также способствует быстрое развитие вычислительной техники, электромеханического оборудования, автоматизированных систем проектирования, оборудования механической обработки металлов (станки с ЧПУ), программного обеспечения.

Автоматизированный контроль особенно актуален для изделий сложной формы и больших габаритов, имеющих труднодоступные для контроля зоны, из материалов с большим разбросом характеристик с точки зрения влияния на результаты взаимодействия с различными физическими полями. Связано это с тем, что при постоянных условиях контроля (что практически трудно реализовать при ручном контроле) возможны реализация сложных алгоритмов обработки информации для обеспечения необходимой достоверности контроля и использование бесконтактных методов контроля. При

этом постоянство условий контроля автоматически обеспечивается при автоматической перенастройке сканирующей системы под различные конфигурации поверхности контролируемых изделий.

Для контроля изделий из ПКМ сложной формы разработана универсальная автоматизированная система ультразвукового бесконтактного контроля, структурная схема алгоритма функционирования которой приведена на рис. 1 [6]. Уникальность данной системы заключается в следующем:

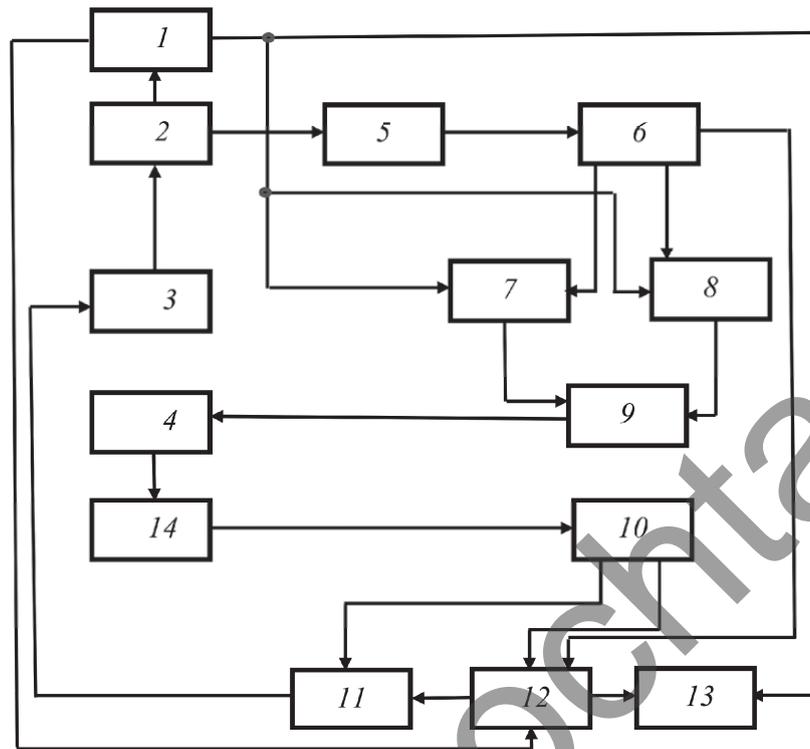
- автоматической адаптации системы контроля к изделиям с произвольной формой поверхности путем ее настройки по 3D-модели изделия, закладываемой в систему управления;
- применении специальных алгоритмов обработки сигналов, обеспечивающих повышение помехозащищенности, и обнаружении дефектов по адаптивным алгоритмам с заданной погрешностью;
- обеспечении автоматического контроля изделий со сложной формой поверхности с изменением режимов контроля;
- автоматизированном процессе регистрации выявленных дефектов на поверхности контролируемого изделия.

На рис. 2 – 4 приведены фотографии сканирующей системы, рабочего места оператора-дефектоскописта, регулируемого узла акустического бесконтактного преобразователя на внутренней штанге сканирующей системы.

На рис. 5 представлена структурная схема блока (системы) управления сканирующей системой автоматизированного контроля, размещенного в шкафу 5 (см. рис. 2).

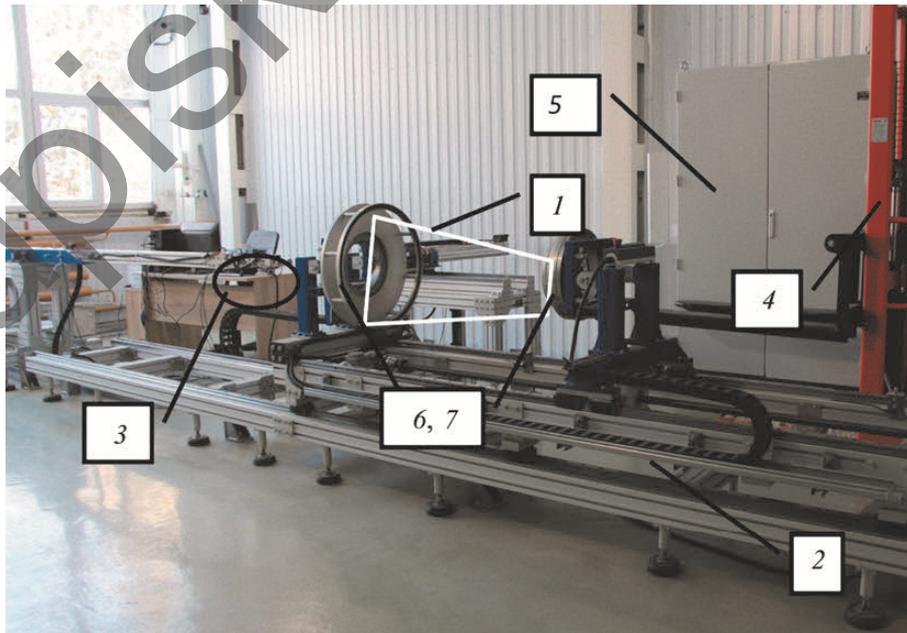
Автоматизированный контроль конструкций из ПКМ разработанной системой осуществляется следующим образом.

Перед проведением контроля для обеспечения сканирования сложнопрофильного изделия в компьютерную систему закладывается его 3D-профиль (рис. 6) и режимы контроля по каждой зоне.



**Рис. 1. Структурная схема алгоритма функционирования системы автоматизированного неразрушающего контроля:**

1 – датчики позиционирования; 2 – контролируемое изделие; 3 – сканирующая система; 4 – блок памяти (архив исходных данных); 5 – устройство регистрации информационного сигнала (ультразвуковые бесконтактные преобразователи); 6 – устройство измерения информационного сигнала (ультразвуковой дефектоскоп УСД-60Н); 7 – устройство измерения среднего значения информационного сигнала; 8 – устройство измерения среднеквадратичного измерения информационного сигнала; 9 – делитель; 10 – сумматор; 11 – датчик продолжения сканирования; 12 – устройство обнаружения дефектов; 13 – регистратор (компьютерная система); 14 – инвертор



**Рис. 2. Пятикоординатная сканирующая система автоматизированного контроля:**

1 – контур контролируемого изделия; 2 – сканирующая система; 3 – устройство регистрации информационного сигнала (блок ультразвукового бесконтактного преобразователя на внутренней штанге); 4 – устройство установки изделия на сканирующую систему; 5 – шкаф блоков управления сканирующей системой; 6, 7 – устройства позиционирования изделия на сканирующей системе

## ИННОВАЦИОННЫЙ ШЛАНГОВЫЙ ГАММА-ДЕФЕКТОСКОП «РИД 50W»



**А. С. Декопов,**  
канд. техн. наук,  
АО «Энергомонтаж  
Интернэшнл»,  
Москва, Россия.  
E-mail: 16deko29@mail.ru



**А. А. Лукьянов,**  
АО «Энергомонтаж  
Интернэшнл»,  
Москва, Россия.  
E-mail: lukyanov\_a\_a@bk.ru



**С. В. Михайлов,**  
АО «Энергомонтаж  
Интернэшнл»,  
Москва, Россия.  
E-mail: svm@jsscemi.ru



**С. П. Масленников,**  
д-р техн. наук,  
Национальный  
исследовательский  
ядерный университет  
«МИФИ», Москва, Россия.  
E-mail: spmaslennikov@  
mephi.ru



**В. А. Федоров,**  
АО «Энергомонтаж  
Интернэшнл»,  
Москва, Россия  
E-mail: instruktor\_fwa@  
rambler.ru



Статья поступила в редакцию 02.05.2024

Received 02.05.2024

Проблема утилизации аппаратуры, содержащей блоки биологической защиты из обедненного урана, и мораторий стран ОАЭ и ЕС на использование указанных средств неразрушающего контроля явились триггером создания экологически адаптированных к особым условиям эксплуатации эффективных шланговых средств радиографического контроля (СРК) переносного класса на основе блока биологической защиты из вольфрама.

Представлена инновационная модель шлангового гамма-дефектоскопа переносного класса «РИД 50W», оснащенная экологически чистым вольфрамовым блоком защиты для работы с излучателями на основе  $^{75}\text{Se}$  и  $^{192}\text{Ir}$ . Рассмотрены вопросы оптимизации, синтеза, компьютерной инженерии ответственных компонентов, представлена количественная оценка технических параметров и характеристик оборудования.

**Ключевые слова:** шланговый гамма-дефектоскоп, блок биологической защиты, псевдосплав ВНЖ-95, лазерный визир, корректор из вольфрама.

A. S. Dekopov<sup>1</sup>, A. A. Lukyanov<sup>1</sup>, S. V. Mikhailov<sup>1</sup>, S. P. Maslennikov<sup>2</sup>,  
V. A. Fedorov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Joint Stock Company “Energomontazh International”, Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

### INNOVATIVE HOSE GAMMA FLAW DETECTOR “RID 50W”

An innovative model of a portable class hose gamma flaw detector “RID 50W” is presented, equipped with environmentally friendly tungsten components: a biological protection unit, a shutter assembly and a multi-link source holder for working with emitters based on  $^{75}\text{Se}$  and  $^{192}\text{Ir}$ .

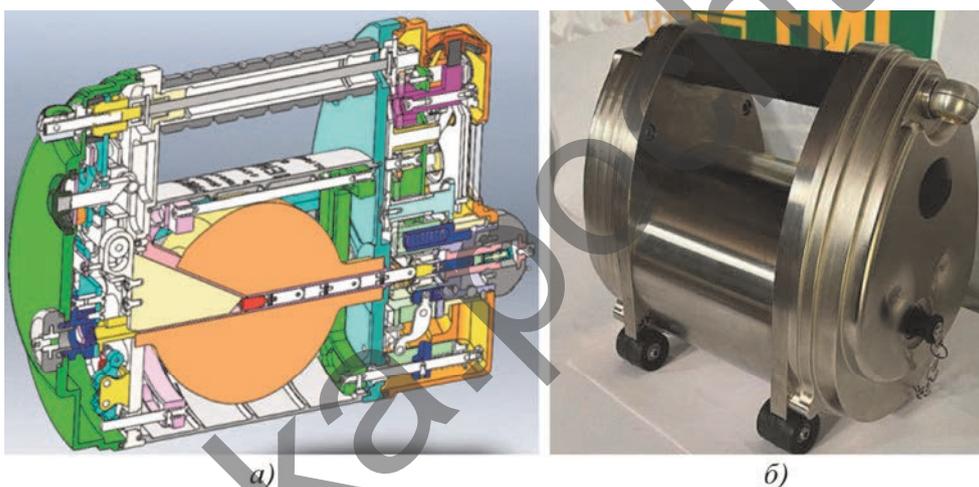
The design features of the radiation head model, the principles of release and shutdown of the radiation beam in the “RID 50W” apparatus, issues of optimization, synthesis, and computer engineering of critical components are considered, and a quantitative assessment of the technical parameters and characteristics of the equipment is presented. The exposure dose rate of the diffusion flux of penetrating gamma radiation from a working emitter based on  $^{192}\text{Ir}$  was calculated in the Geant4 software package, followed by practical verification using standard dosimetric monitoring tools. Conclusions based on the results of verification of the obtained data are presented.

The design and operating principle of a patented laser sight designed to expand the functionality of a hose gamma flaw detector during operation, including in critical conditions of structural constraint, is also considered.

**Keywords:** hose gamma-defectoscope, biological protection unit, pseudo-alloy WNIFE-95, laser sight, tungsten corrector.

Шланговый гамма-дефектоскоп «РИД 50W» переносного класса (рис. 1) с блоком биологической защиты, затворным узлом и многосвязным держателем источника на основе вольфрама реализован АО «ЭМИ» в формате интеллектуального продукта [1] с учетом действующих регламентов [2 – 6], синтеза апробированной конструктивной платформы [7 – 9] поляризованного клиновидного обтюлятора, блокиратора одноразового рабочего

**Рис. 1. Рабочий комплект шлангового гамма-дефектоскопа «РИД 50W» класса Р**



**Рис. 2. Радиационная головка (РГ) гамма-дефектоскопа «РИД 50W»:**  
*a* – вертикальный разрез 3D-модели РГ; *б* – внешний вид РГ

цикла [1] и визуальной системы навигации [12] виртуальной оси пучка  $\gamma$ -излучения относительно «зоны интереса».

Модель радиационной головки (РГ) шлангового гамма-дефектоскопа класса Р «РИД 50W» (рис. 2) для радионуклидных излучателей на основе  $^{192}\text{Ir}$  и  $^{75}\text{Se}$  с блоком биологической защиты из псевдосплава вольфрама ВНЖ-95 [15] разработана с использованием системы автоматизированного проектирования (САПР).

На стадии проектирования комплекс САПР обеспечил возможность виртуально апробировать 3D-модель радиационной головки «РИД 50W» в алгоритме рабочего цикла, исключив необходимость натурного макетирования, испытаний и выявления несогласованности сопрягаемых деталей при изготовлении, а математическая модель радиационной головки стала основой управляющих программ для станков с ЧПУ при серийном изготовлении элементов конструкции.

Конструктивное исполнение модели радиационной головки (рис. 2) совершенствует дизайн органов управления системой выпуска (перекрытия) пучка излучения прототипа [7 – 9] и, согласно концептуальным решениям его конструктивной платформы, обеспечивает блокирование:

- замкового и исполнительных механизмов радиационной головки, исключающее возможность выполнения рабочего цикла без предварительного подсоединения штуцеров ампулопровода, зубчатого троса и соединительного рукава пульта дистанционного управления;
- выпуска пучка излучения в положении «ЗАКРЫТО» замкового механизма;
- штуцеров ампулопровода и соединительного рукава пульта управления в присоединенном состоянии в положении «ОТКРЫТО» замкового механизма;
- рабочего цикла при несанкционированной попытке выпуска пучка излучения без перевода механизма одноразового цикла в рабочее положение.

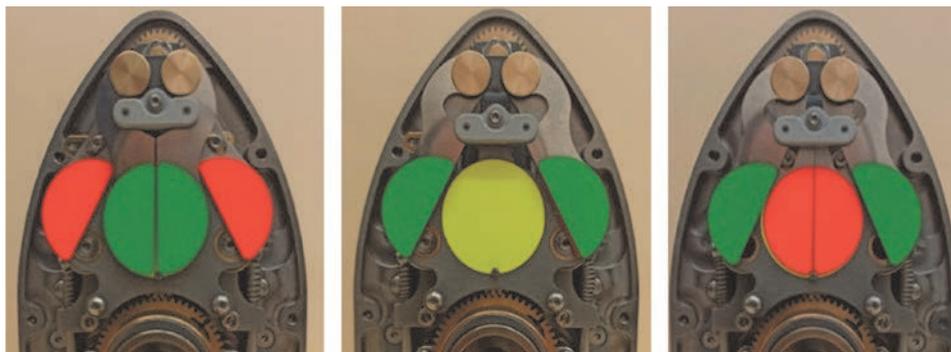


Рис. 3. Маятниковый сигнализатор положения источника излучения радиационной головки «РИД 50W» (без внешнего кожуха с окуляром)

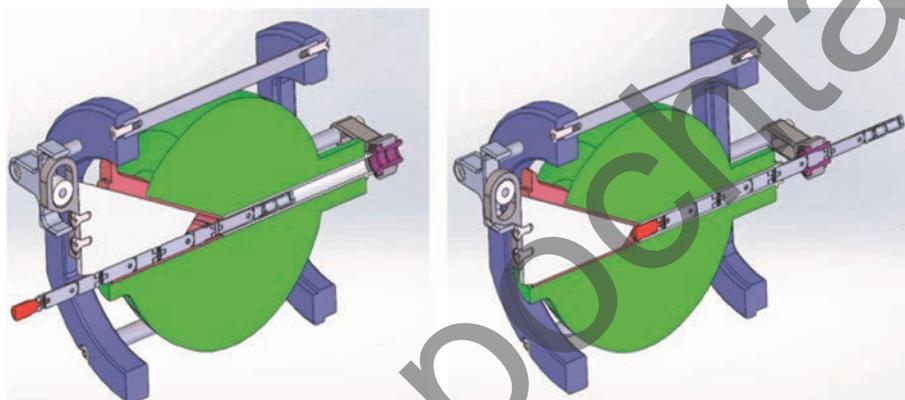


Рис. 4. Схема выпуска и перекрытия пучка излучения клиновидным obtюратором

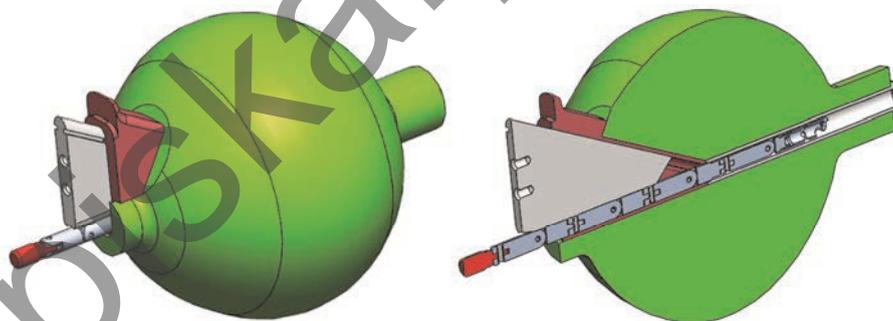


Рис. 5. Модель составных компонентов модернизированного блока биологической защиты и затворного узла из вольфрама радиационной головки «РИД 50W»

Выполненный в укрупненном формате маятниковый сигнализатор положения источника излучения (рис. 3) представленной модели радиационной головки оперативно отображает соответствующую информацию в рабочем алгоритме в цветовой гамме:

- зеленый цвет – пучок излучения перекрыт;
- желтый цвет – выпуск пучка излучения подготовлен;
- красный цвет – пучок излучения выпущен.

Выпуск и перекрытие пучка излучения радиационной головки обеспечиваются дискретными перемещениями поляризованного клиновидного obtюратора толкающим усилием контактной поверхности рабочей капсулы источника либо тянущим

усилием профилированной хвостовой части многозвенного держателя источника при его поступательных перемещениях вдоль оси канала (рис. 4) согласно техническому решению прототипа [9].

Конструктивно-технологические сопряжения составных компонентов вновь разработанного блока биологической защиты и затворного узла радиационной головки «РИД 50W» из псевдосплава ВНЖ-95 [15] на основе вольфрама (рис. 5) минимизируют геометрические параметры зоны диффузии  $\gamma$ -квантов в сравнении с прототипом [9] и выполнены с соблюдением конструктивных зазоров, обеспечивающих санитарные нормы радиационной безопасности [3].

УДК 620.179.17  
DOI: 10.14489/td.2024.12.pp.004-013

# ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ РАЗНОРОДНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ



**В. А. Барат,**  
д-р техн. наук,  
ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ»,  
ООО «Интерюнис-ИТ»,  
Москва, Россия.  
E-mail: vera.barat@mail.ru



**А. Ю. Марченков,**  
канд. техн. наук,  
ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ»,  
Москва, Россия.  
E-mail: art-marchenkov@  
yandex.ru



**М. В. Карпова,**  
ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ»,  
Москва, Россия.  
E-mail: karpova.m.v24@  
gmail.com



**В. В. Бардаков,**  
канд. техн. наук,  
ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ»,  
Москва, Россия.  
E-mail: bardakovvv@  
interunis-it.ru



**Е. А. Лепшеев,**  
ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ»,  
ООО «Интерюнис-ИТ»,  
Москва, Россия.  
E-mail: lepsheeva@  
interunis-it.ru



**С. В. Ушанов,**  
ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ»,  
ООО «Интерюнис-ИТ»,  
Москва, Россия.  
E-mail: ushanovsv@mpei.ru



**С. В. Елизаров,**  
ООО «Интерюнис-ИТ»,  
Москва, Россия.  
E-mail: serg@interunis-it.ru

Рассматривается возможность применения искусственных нейронных сетей для обнаружения сигналов в системах акустико-эмиссионного (АЭ) мониторинга. Особенность предлагаемого метода заключается в том, что данные, на основании которых обучается нейронная сеть, формируются с помощью комплексной методики, базирующейся на применении как технологии моделирования, так и измерений, проведенных в заводских условиях.

В качестве объекта контроля рассматривались технологические трубопроводы с разнородными сварными соединениями. Моделирование сигналов АЭ проводилось гибридным способом: форма сигнала определяется на основании конечно-элементной модели, а амплитуды импульсов АЭ – на основании физического эксперимента по испытанию образцов разнородных сварных соединений. В качестве реализаций помех использовались данные измерений на технологических трубопроводах промышленных установок. Для классификации данных применялся многослойный перцептрон, архитектура которого выбиралась на основании минимизации погрешности классификации.

**Ключевые слова:** разнородные сварные соединения, акустическая эмиссия, диффузионные прослойки, нейронные сети в акустической эмиссии, классификация сигналов акустической эмиссии, моделирование акустического тракта.

V. A. Barat<sup>1,2</sup>, A. Yu. Marchenkov<sup>1</sup>, M. V. Karpova<sup>1</sup>, V. V. Bardakov<sup>1</sup>,  
E. A. Lepsheev<sup>1,2</sup>, S. V. Ushanov<sup>1,2</sup>, S. V. Elizarov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research University “MPEI”, Moscow, Russia

<sup>2</sup>“Interunis-IT” LLC, Moscow, Russia

## APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS FOR DETECTION OF DEFECTS IN DISSIMILAR WELDED JOINTS BY ACOUSTIC EMISSION METHOD

The paper considers the possibility of using artificial neural networks to detect hits in acoustic emission (AE) testing. A distinctive feature of the proposed method is that the training set of the neural network is formed using a complex technique based on the application of modeling technology, on the one hand, and on calibration measurements carried out in the field, on the other. In this paper, process pipelines with dissimilar welded joints were considered as a test structure. AE signals were modeled using a hybrid method: the signal waveform was determined based on a finite element model, and the AE hits amplitudes were determined on the basis of a physical experiment on cyclic stretching of samples of dissimilar welded joints. Acoustic signals measured on the process pipelines bodies in the field condition were used as noise. A multilayer perceptron was used to classify the data, the architecture of which was selected based on the minimization of the classification error.

**Keywords:** dissimilar welded joints, acoustic emission, diffusion layers, neural networks in acoustic emission, classification of acoustic emission signals, waveguide modeling.



Статья поступила в редакцию 01.08.2024

Received 01.08.2024

## Введение

Метод акустической эмиссии (АЭ) является диагностическим видом неразрушающего контроля, позволяющим выявлять развивающиеся дефекты конструкций с использованием упругих волн релаксации напряжения. Благодаря чувствительности к изменению структурных параметров контролируемых материалов, метод АЭ позволяет выявлять не только дефекты сплошности, но и дефекты структуры. В частности, авторами данной статьи были проведены исследования по выявлению дефектов структуры разнородных сварных соединений – диффузионных прослоек, образующихся вдоль линий сплавления сталей различных структурных классов [1].

В результате исследований было установлено, что диффузионные прослойки являются источниками АЭ и могут быть выявлены как при статическом, так и при циклическом нагружении на основании результатов локации или по специфическим значениям параметров АЭ [2]. Для исследования возможности практического применения полученных результатов в рамках данной работы рассматриваются вопросы выявления дефектов разнородных сварных соединений в заводских условиях на фоне технологических помех.

Из-за низкого соотношения сигнал/помеха выявление импульсов АЭ на фоне технологических помех представляет собой сложную задачу. Для увеличения чувствительности в системах АЭ-мониторинга применяют технологии беспороговой регистрации данных или пороговую регистрацию со значением порога, установленным заведомо ниже уровня шумов [3]. Такой способ регистрации позволяет избежать пропуска импульсов, соответствующих дефектам, но допускает регистрацию большого объема помех. Для выявления сигналов на фоне помех в системах АЭ-контроля и мониторинга эффективно используются различные методы классификации данных, позволяющие разделить сигналы и помехи.

При обработке данных АЭ широко применяются различные методы классификации: статистическая Байесовская классификация [4], различные методы кластеризации [5, 6], метод главных компонент, опорных векторов [7] и др.

Особое место в задаче распознавания и классификации данных АЭ занимают искусственные нейронные сети [8 – 10]. Преимущество нейронных сетей при обработке АЭ-данных по сравнению со статистическими классификаторами и методами машинного обучения заключается в формализации этапа предварительной обработки. Применение статистических классификаторов требует, как правило, предварительной обработки данных, поиска закономерностей и выделения информативных признаков, связанных с определенными физическими процессами. Данные АЭ, как полезные сигналы, так и помехи, имеют случайный характер и характеризуются значительной вариативностью [11], поэтому поиск информативных параметров является сложной и трудоемкой задачей, не всегда приводящей к получению достоверного результата.

Применение нейросетевых технологий позволяет за счет более сложной нелинейной структуры классификатора упростить процесс предварительной обработки, переложив поиск закономерностей и обобщение данных с этапа предварительной обработки на этап классификации. С помощью нейронных сетей можно использовать избыточное количество признаков, применять в качестве информативных признаков стандартные АЭ-параметры или непосредственно временные реализации и спектры АЭ-сигналов [9].

Общим недостатком существующих методов нейросетевой обработки данных АЭ является сложность формирования обучающей выборки. При использовании диагностических данных АЭ, полученных в заводских условиях, сложно сформировать репрезентативную выборку полезных сигналов, так как активность источников АЭ при эксплуатационных нагрузках достаточно низкая, и для выборки достаточного объема требуется длительный мониторинг выявленных дефектов [12]. В то же время данные, полученные при испытании образцов в лабораторных экспериментах, не учитывают влияния акустического тракта контролируемого объекта, поэтому результаты обучения нейросетевого классификатора на лабораторных данных не могут быть использованы для применения в системах промышленного АЭ-мониторинга.

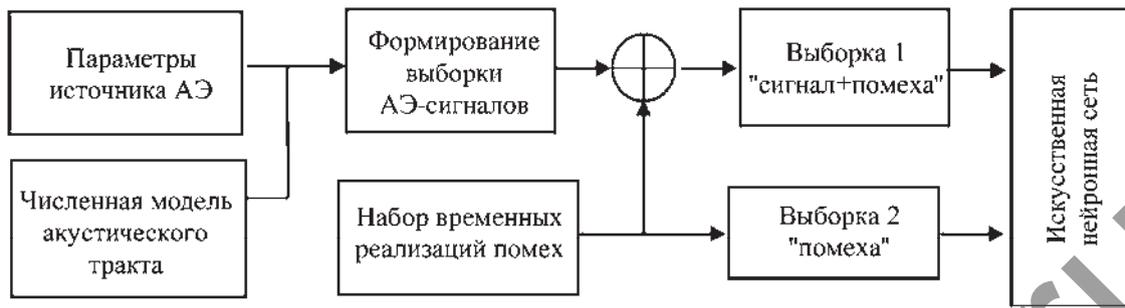


Рис. 1. Блок-схема алгоритма классификации

В рамках данной работы предлагается подход к нейросетевой классификации данных АЭ, адаптированный для применения в составе систем АЭ-мониторинга и обеспечивающий большую гибкость и универсальность по сравнению с существующими методами. Универсальность предлагаемого метода достигается за счет гибридного формирования обучающей выборки данных: значения амплитуд импульсов АЭ и активности формируются в результате физического эксперимента, акустический тракт контролируемого объекта учитывается с помощью численного моделирования, а при формировании выборки помех используются реализации технологических помех, полученные в заводских условиях.

### Материалы и методы исследования

**Общее описание алгоритма классификации данных АЭ.** Преимуществом предлагаемого подхода к построению нейросетевого классификатора является методика формирования репрезентативной обучающей выборки с учетом всех аспектов процедуры АЭ-контроля: учитываются параметры источника АЭ, характеристики акустического тракта и параметры помех, присутствующих на контролируемом объекте. Общая схема алгоритма классификации показана на рис. 1.

Выборка помех формируется на основании реализаций акустических помех, полученных в результате калибровочных измерений в заводских условиях на корпусе контролируемого объекта при различных режимах работы. АЭ-сигналы получают с помощью моделирования: форма импульсов рассчитывается на основании конечно-элементной модели объекта контроля, а амплитуды определяются на основании экспериментов по механическому испытанию образцов с нагрузками, близкими к эксплуатационным.

В результате моделирования и расчета формируются две выборки – выборка помех и выборка «сигнал + помеха», состоящая из импульсов АЭ, полученных в результате моделирования, и помех, полученных при калибровочных измерениях.

**Характеристика источника АЭ.** В качестве объекта контроля в данной работе рассматривались разнородные стыковые сварные соединения стали 20 (углеродистая сталь с феррито-перлитной структурой) и стали 12Х18Н10Т (легированная сталь аустенитного класса), которые диагностировались методом АЭ в целях выявления диффузионных прослоек, образующихся вдоль линии сплавления при длительной эксплуатации разнородного сварного соединения при высоких температурах.

Для изготовления сварных соединений использовали листы из стали 20 и стали 12Х18Н10Т толщиной 3 мм. Листы сваривали между собой встык двусторонней аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом с присадочной проволокой, обеспечивающей формирование аустенитной структуры металла шва. Для формирования в сварных соединениях диффузионных прослоек часть образцов подвергали последующей термической обработке. После термической обработки вдоль линии сплавления образовались две диффузионные прослойки (рис. 2) – обезуглероженная, толщиной около 250 мкм, и карбидная, толщиной около 50 мкм.

Из сварных соединений вырезали плоские образцы для механических испытаний с шириной



Рис. 2. Фотография линии сплавления с измеренными значениями толщин диффузионных прослоек

УДК 620.179.147  
DOI: 10.14489/td.2025.01.pp.062-067

# СПОСОБ КОНТРОЛЯ УРОВНЯ ЖИДКОЙ СТАЛИ С ПОМОЩЬЮ ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ



**И. В. Терехин,**  
канд. техн. наук,  
Национальный  
исследовательский  
университет  
«Московский  
энергетический институт»,  
Москва, Россия.  
E-mail: terekhin.iv@mail.ru



**Е. А. Славинская,**  
канд. техн. наук,  
Национальный  
исследовательский  
университет  
«Московский  
энергетический институт»,  
Москва, Россия.  
E-mail: carpe\_ugulum@  
mail.ru

Рассматривается способ определения среднего положения движущегося металла с использованием постоянного магнитного поля применительно к задаче контроля уровня жидкого металла в кристаллизаторах машин непрерывной разливки стали. С помощью конечно-элементного моделирования и лабораторного опыта определена конструкция чувствительного элемента и получены основные характеристики. Работоспособность предложенного способа контроля уровня подтверждена в промышленных условиях.

**Ключевые слова:** вихретоковый контроль, разливка стали, постоянный магнит, кристаллизатор.

I. V. Terekhin, E. A. Slavinskaya  
(National Research University “Moscow Power Engineering Institute”,  
Moscow, Russia)

## METHOD FOR LIQUID STEEL LEVEL CONTROL USING A PERMANENT MAGNETIC FIELD

The paper deals with the way to determine average moving melt position using the permanent magnetic field applied to the task of mold liquid metal level control. The sensor design and characteristics are obtained by means of the finite element method and laboratory experience. The suggested level control method performance is confirmed in industrial conditions.

**Keywords:** eddy current testing, steel casting, permanent magnet, mold.



Статья поступила в редакцию 22.07.2024

Received 22.07.2024

### Введение

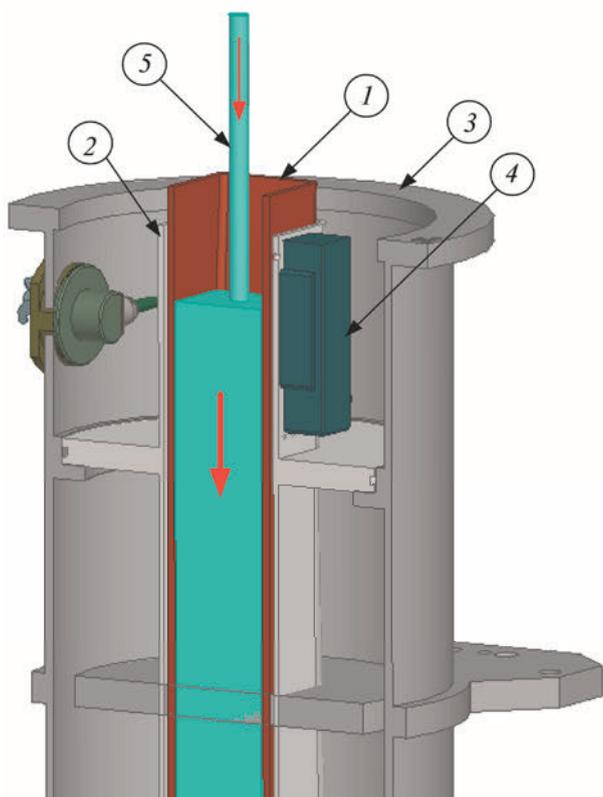
В современной черной металлургии распространена непрерывная разливка стали. Технология заключается в том, что жидкий металл непрерывно подается в сквозную медную трубу (кристаллизатор), внутри которой металл кристаллизуется, а затем вытягивается снизу в зону вторичного охлаждения. Процесс разливки автоматизирован: преобразователь, измеряющий уровень металла (на рис. 1 показан встроенный *вихретоковый преобразователь* (ВТП)), контролирует заполнение кристаллизатора, его сигнал служит для управления расходом жидкого металла или скоростью вытягивания слитка.

Гильза может быть цельной или сборной, иметь размеры от 80×80 мм до 2000×200 мм и разную толщину стенки. Для предотвращения подлипания металла к гильзе во время разливки добавляют смазку – масло или *шлакообразующую смесь* (ШОС). Разливочная смесь частично плавится при контакте с металлом, создавая слой, который предохраняет металл от окисления. Для обеспечения равномерного распределения смазки по периметру

слитка и предотвращения прилипания к гильзе кристаллизаторы качают с амплитудой 3...4 мм и частотой 2...4 Гц. Подробно технология непрерывной разливки описана в работе [1].

Уровень металла в гильзе контролируют с помощью радиоизотопных и электромагнитных приборов. Источник и приемник изотопного прибора размещены внутри кристаллизатора. Изотопные приборы чувствительны к ШОС, слой которой составляет 40...60 мм. Согласно данным производителя [2], чувствительность к ШОС составляет 50...80 % от чувствительности к металлу. По этой причине периодическое добавление ШОС интерпретируется изотопным прибором как повышение уровня металла. Система стабилизации получает соответствующий сигнал и быстро понижает истинный уровень металла, что может стать причиной брака заготовки [1].

В разных типах кристаллизаторов используют электромагнитные приборы разных типов – со штативными, бортовыми или встроенными ВТП [3, 4]. Бортовые и штативные преобразователи применяют исключительно на кристаллизаторах большого



**Рис. 1. Основные узлы сортового кристаллизатора:**  
 1 – гильза; 2 – нержавеющая обечайка; 3 – корпус;  
 4 – датчик уровня металла; 5 – жидкий металл

сечения. Универсальным вариантом мог бы стать встроенный преобразователь [5, 6], расположенный сбоку на медной стенке гильзы (см. рис. 1), так как технических препятствий для его размещения в любом кристаллизаторе нет. Такое расположение ВТП не мешает работе персонала и обеспечивает любой диапазон измерений. Встроенный ВТП контролирует уровень косвенно по электропроводности медной стенки: чем выше уровень металла, тем выше средняя температура стенки в области контроля преобразователя. Непосредственно контролировать металл такой преобразователь не может из-за малой величины сигнала от металла по сравнению с сигналом от нагрева медной стенки гильзы [6]. Косвенный принцип контроля является основным недостатком встроенного преобразователя: тепловой контакт между металлом и кристаллизатором осуществляется через слой ШОС. Повышение уровня сопровождается захватом сухой ШОС и ее плавлением, что приводит к запаздыванию нагрева гильзы относительно подъема уровня металла. Вследствие этого в сигнале преобразователя возникает запаздывание, величина которого зависит от сечения кристаллизатора и достигает нескольких секунд. В результате встроенные преобразователи используются с гильзами малого сечения, где в качестве смазки применяют масло. С точки зрения металлур-

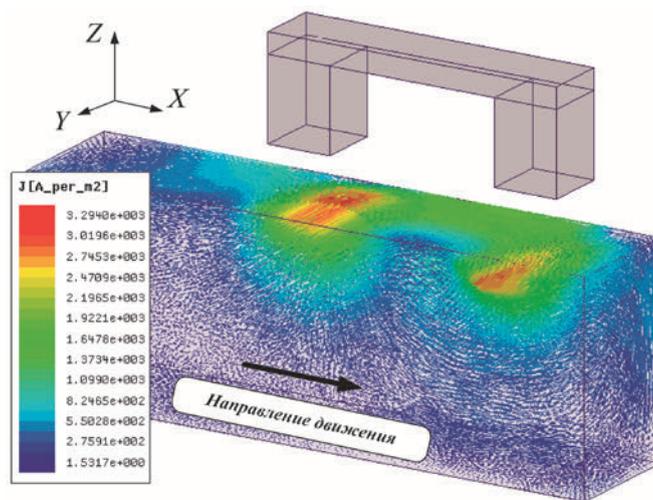
гии идеальным вариантом преобразователя представляется встроенный в кристаллизатор электромагнитный преобразователь, способный контролировать непосредственно уровень металла. Такого преобразователя на сегодняшний день нет, хотя потребность в нем высока.

### Чувствительный элемент с постоянными магнитами

Общая идея работы нового встроенного ВТП основана на том, что со старта разливки кристаллизатор непрерывно качают. Постоянное относительно кристаллизатора магнитное поле индуцирует вихревые токи только в жидком металле, который перемещается в магнитном поле. Единственным источником сигнала ВТП будут вихревые токи в жидком металле. Таким образом можно получить все полезные свойства электромагнитных приборов уровня, устранив недостатки.

Для создания постоянного магнитного поля удобно использовать постоянный магнит. Известно, что при перемещении электропроводящего объекта в поле постоянного магнита возникает вихревой ток, направленный перпендикулярно векторам магнитной индукции и скорости. Вихревой ток достигает максимума под магнитом, а вне его ток замыкается. Для магнита предпочтительна П-образная форма, так как в этом случае под разноименными полюсами возникают вихревые токи противоположной направленности, и при верном подборе габаритов магнита в объекте контроля образуется замкнутый контур вихревых токов, как показано на рис. 2 (модель осесимметричная, плоскость симметрии XZ).

Поле вихревых токов удобно фиксировать катушкой, помещенной между полюсов магнита, параллельно вихретоковому контуру. Качания кри-



**Рис. 2. Модель вихревого тока в поле постоянного магнита**