

АНАЛИЗ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ СТРЕЛЫ КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА МЕТОДОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

*Лагунова Ю.А., Хорошавин С.А., Набиуллин Р.Ш., Калянов А.Е.
Уральский государственный горный университет, Екатеринбург*

Ключевые слова: стрела карьерного экскаватора, методы неразрушающего контроля, ультразвук, экспериментальные данные, корреляционные зависимости, дефектоскоп.

Аннотация. Рассмотрены преимущества и недостатки метода неразрушающего контроля с помощью ультразвука, а именно автоматизированного ультразвукового контроля (АУЗК) с когерентной обработкой данных. Оценена информативность и чувствительность этого метода. Дано описание и характеристика прибора для измерения толщины стенки стрелы карьерного экскаватора. Проанализированы возможности измерения размеров дефектов при АУЗК. Описан принцип действия и дана техническая характеристика дефектоскопа ультразвукового А1211 Mini. Приведены результаты измерения геометрии и исследования напряженного состояния металлоконструкций полый стрелы карьерного экскаватора с помощью ручного дефектоскопа. Выявлены зависимости появления дефектов в металлоконструкции стрелы карьерного экскаватора. Показаны места концентрации наибольших напряжений в металлоконструкции стрелы карьерного экскаватора.

EVALUATION OF METAL STRUCTURES OF A MINING EXCAVATOR BOOM BY NON-DESTRUCTIVE TESTING

*Lagunova Yu.A., Khoroshavin S.A., Nabiullin R.Sh., Kalyanov A.E.
Ural State Mining University, Ekaterinburg*

Keywords: mining excavator boom, non-destructive testing methods, ultrasound, experimental data, correlation dependences, flaw detector.

Abstract. The advantages and disadvantages of the method of non-destructive testing using ultrasound, namely, automated ultrasonic testing with coherent data processing, are considered. The information content and sensitivity of this method are estimated. The description and characteristics of the device for measuring the wall thickness of the boom of a mining excavator are given. The possibilities of measuring the size of defects in automated ultrasonic testing with coherent data processing are analyzed. The principle of operation is described, and the technical characteristics of the A1211 Mini ultrasonic flaw detector are given. The results of measuring the geometry and studying the stress state of metal structures of a hollow boom of a quarry excavator using a manual flaw detector are presented. The dependencies of the appearance of defects in the metal structure of the boom of a mining excavator are revealed. The places of concentration of the greatest stresses in the metal structure of the boom of a quarry excavator are shown.

Введение

Исследование металлоконструкций стрелы экскаватора с помощью ультразвука – это основной метод неразрушающего контроля, который применим для оценки фактического значения толщины стенок элементов конструкции двухбалочной стрелы круглого сечения способом однократного измерения, т.к. обычным механическим инструментом эту процедуру выполнить невозможно.

Наиболее часто используемые приборы – ультразвуковые толщинометры, которые измеряют время прохождения ультразвукового импульса от излучателя до противоположной поверхности объекта контроля и обратно к преобразователю. Для проведения таких измерений доступ к противоположной поверхности объекта контроля не требуется. Благодаря этому, если противоположная поверхность объекта контроля является труднодоступной или полностью недоступной, необходимость разрезать объект контроля (что требуется при использовании микрометра или штангенциркуля) отсутствует [1].

Т.к. ультразвук плохо распространяется в воздухе, между преобразователем и поверхностью объекта контроля наносится небольшое количество контактной жидкости – глицерин, пропиленгликоль, вода или масло. Ультразвуковой импульс, излучаемый

преобразователем, проникает в объект контроля, проходит до противоположной поверхности, отражается от нее и попадает обратно на преобразователь. Подобно эхолоту, толщиномер точно измеряет временной интервал между отправкой зондирующего импульса и получением отраженного эхосигнала, составляющий обычно несколько микросекунд [1-10].

Практическое применение ультразвукового контроля

На долю ультразвукового контроля приходится почти 40% от объемов неразрушающего контроля по основным методам. Широко используется ультразвуковой метод при оценке напряженного состояния сварных металлоконструкций.

Принцип ультразвуковой толщинометрии импульсными приборами основан на измерении времени прохождения ультразвукового импульса в изделии или в слое и умножении измеренного времени на коэффициент, учитывающий скорость звука в материале изделия. В резонансных приборах для измерения толщины используется локальный резонансный метод или локальный метод свободных колебаний, а также интерференционные явления, возникающие при распространении акустических волн в изделии.

Резонансный метод позволяет измерять толщину от минимального значения

$$h_{\min} = 0,5c / f_{\max},$$

где c – скорость звука в материале изделия; $f_{\max}$ – максимальная частота прибора [4-6, 11].

При повышении частоты до 30 МГц можно измерять толщины стальных изделий, начиная с 0,1 мм. Измерение таких толщин эхо-методом выполнить не удастся. Использование иммерсионного варианта метода обеспечивает непрерывный контроль труб диаметром 34 мм и более, что также трудно обеспечить другими методами; погрешность составляет при этом 1-2%. Резонансный метод применяют для контроля изделий с гладкими поверхностями. Изменение толщины в зоне измерения не должно превышать 8%, при этом измеряется средняя толщина, а не наименьшее ее значение. Этими возможностями определена область преимущественного использования резонансных толщиномеров для измерения толщины при автоматическом контроле тонкостенных труб малого диаметра в иммерсионном варианте. В остальной области повсеместно применяют ультразвуковые эхо-импульсные толщиномеры – простые в управлении и компактные приборы, позволяющие с хорошей точностью измерять толщину 0,5 мм.

Достоинства, недостатки и характеристика метода ультразвукового контроля

Автоматизированный ультразвуковой контроль с когерентной обработкой данных имеет **ряд преимуществ**.

- Ультразвук хорошо отражается от наиболее опасных плоскостных дефектов – типа трещин, непроваров. Это связано тем, что само распространение ультразвуковых волн происходит вследствие наличия упругих связей между элементами среды, а любая, даже очень тонкая несплошность нарушает эти связи.

- Приборы ультразвукового контроля более мобильны, и контроль можно выполнять практически в любых условиях.

- В дефектоскопии используется ультразвук очень малой мощности, который полностью безвреден для персонала и для окружающих лиц.

- Отсутствие расходных материалов.

Вместе с тем ультразвуковой метод имеет **ряд недостатков**.

- В УЗК не существует обширного атласа изображений дефектов, по которому легко классифицировать тип дефекта. Это связано с тем, что:

- вид изображения существенно зависит от использованных алгоритмов его построения;
- в большинстве случаев вид изображения не совпадает с его оптическим образом (связано с большей длиной используемой звуковой волны по сравнению с оптической);

- объемные дефекты (поры, шлаковые включения) обнаруживаются достаточно легко, но оценить параметры такого дефекта по его изображению очень непросто.

- УЗК значительно хуже выявляет и классифицирует объемные дефекты типа пор и шлаковых включений [12-16].

Ультразвуковой метод контроля фиксирует форму дефекта, развивающегося в металлоконструкции стрелы карьерного экскаватора, так при ультразвуковом контроле оценивается весьма грубо (точность определения границ несплошности не превышает длину волны λ). Вместе с тем использование специальных алгоритмов обработки данных контроля (MULTY-C-SAFT [17]) в дополнение к обычно применяемому послойному методу FT-SAFT [18, 19] позволяет уверенно различать типы дефектов – объемные (шлаковые включения, поры) и плоскостные (трещины, непровары).

Измерения размеров дефектов в ультразвуковом контроле. Геометрические размеры несплошности определяются:

- по протяженности (вдоль и поперек СС) выбранной схемой регистрации и обработки данных и составляет величину от нескольких мм (при применении послойной регистрации и обработке данных) и длиной используемой акустической волны λ – при использовании 3D регистрации и обработке данных контроля [3, 20];

- по высоте дефектов величиной λ и типом несплошности. Для несплошностей с размерами меньше $1 \div 2 \lambda$ высоту дефектов можно определить, сопоставляя амплитуды изображения несплошности и опорного отражателя, который должен иметь то же акустическое поведение (иметь похожую геометрическую форму). Поэтому оценка размеров несплошности, основанная на амплитуде, является достаточно грубой. Для несплошностей бóльших размеров при определении высоты дефекта играет элемент изображения, связанный с дифракцией края дефекта, и, т.к. размеры этого элемента по уровню 6 дБ составляют величину не менее λ , то погрешность определения размеров $\pm 0,5 \lambda$.

Экспериментальные данные и обработка результатов

Анализ состояния металлоконструкций стрелы карьерного экскаватора был проведен с помощью дефектоскопа ультразвукового A1211 Mini (рис. 1).

Прибор относится к ультразвуковым (УЗ) приборам общего назначения портативного исполнения для ручного контроля эхо-методом, теньевым и зеркально-теньевым методами. Дефектоскоп предназначен для поиска, определения координат и оценки размеров различных нарушений сплошности и однородности материала в изделиях из металлов и пластмасс. Дефектоскоп позволяет формировать, регистрировать и сохранять в памяти прибора временные реализации импульсных ультразвуковых сигналов, а также передавать сохраненные данные на внешний персональный компьютер (ПК), для их последующего анализа и документирования. Связь с компьютером осуществляется через USB порт. Дефектоскоп имеет возможность изменения ориентации изображения на 90 градусов в правую или левую сторону. Цветной TFT дисплей обеспечивает отображение УЗ сигналов в форме А-Скана. Предусмотрено ручное и автоматическое измерение временных интервалов, амплитуд сигналов и автоматический расчет координат дефектов. Прибор позволяет проводить измерения в сложных климатических условиях при низких температурах окружающей среды:

- температура от минус 20 до плюс 50°C;
- относительная влажность воздуха до 95% при температуре плюс 35°C.

Техническая характеристика приведена в таблице 1.

Акустический контакт ультразвуковых преобразователей с объектом контроля обеспечивается путем прижатия рабочей поверхности преобразователя к поверхности контролируемого объекта через слой контактной жидкости. Прибор с помощью ультразвукового преобразователя периодически посылает в контролируемый объект короткие



Рис. 1. Вид A1211 Mini

импульсы ультразвуковых волн. Импульсы отраженных обратно или прошедших сквозь материал ультразвуковых волн преобразуются в электрические сигналы и поступают в электронный блок прибора. После усиления, оцифровки и обработки встроенным процессором сигналы отображаются на дисплее. Амплитуда отраженного сигнала несет информацию о величине отражателя (дефекта) в объекте контроля и о степени его «прозрачности». Время задержки сигнала зависит от длины пути, по которому прошел сигнал.

При работе прибора эхо-методом с совмещенным или раздельно-совмещенным преобразователем временное положение эхо-сигналов на экране пропорционально дальности расположения отражателей от преобразователя. Основным рабочим режимом прибора является режим ДЕФЕКТОСКОП, дополнительно предусмотрены режимы СТОП и НАСТРОЙКА. В рабочем режиме происходит формирование зондирующего импульса, усиление принимаемых эхо-сигналов, представление их на экране прибора и выполнение измерений. Режим СТОП предназначен для остановки (замораживания) реализаций сигнала (кадров) на дисплее, записи их в память прибора, а также просмотра и удаления ранее сохраненных кадров. В режиме НАСТРОЙКА осуществляется выбор и изменение параметров настройки прибора.

Стрела карьерного экскаватора ЭКГ-10И имеет двухбалочную конструкцию и состоит из двух шарнирно сочлененных секций: нижней и верхней. Обе секции представляют собой сварные металлические конструкции из горячекатаных стальных труб, листов и стальных отливок. Нижняя секция стрелы осями закреплена в кронштейнах на поворотной платформе.

Табл. 1. Технические характеристики A1211 Mini

Наименование параметра	Значение
Диапазон устанавливаемых скоростей ультразвука, м/с	От 1000 до 14999
Диапазон рабочих частот преобразователей, МГц	От 0,5 до 15,0
Диапазон перестройки калиброванного усилителя, дБ	От 0 до 80
Диапазоны измерений глубины залегания дефекта (по стали) с прямыми преобразователями, мм: с преобразователем S3568 2.5A0D10CL с преобразователем D1771 4.0A0D12CL	От 7 до 900 От 2 до 450
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений глубины залегания дефекта (по стали) с прямыми преобразователями, мм, где H – измеряемая глубина залегания дефекта в мм	$\pm(0,03H+1,00)$
Пределы допускаемой абсолютной погрешности установки коэффициента усиления, дБ	$\pm 0,5$
Номинальное напряжение питания, В	3,7
Продолжительность работы от аккумулятора, ч, не менее	9
Средняя наработка на отказ, ч	18000
Установленный срок службы, лет	5

Обследование металлоконструкции стрелы карьерного экскаватора ЭКГ-10И проводили в предполагаемых точках восприятия наибольших нагрузок. Места установок преобразователей показаны на рисунке 2. зелеными маркерами.

Стрела карьерного экскаватора была размечена, точки измерения пронумерованы (1...16) в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 2. Разметка выполнена с помощью маркировочного фломастера так, чтобы она не мешала измерению и не стиралась при осуществлении процесса измерения. Для измерения толщины трубы стрелы была подготовлена площадка 30×30 мм с центром в точке измерения. Подготовленная площадка освобождается от загрязнений, отслаивающейся окалины и краски. Шероховатость поверхности стрелы со стороны ввода ультразвуковых колебаний составила $Ra=6,3$ мкм, что соответствует ГОСТ 2789-73.

На каждом из заранее промаркированных участков выполнялось однократное измерение толщины. Если возникала грубая ошибка, то есть погрешность измерения существенно превышала ожидаемую в конкретных условиях эксплуатации стрелы, то этот результат отбрасывали и выполняли три измерения взамен ошибочного, среднеарифметическое брали за результат. При измерении толщины трубы стрелы ультразвуковым дефектоскопом необходимо обеспечить равенство амплитуд измеряемых импульсов и идентичность считывания результатов измерений.

Поскольку карьерный экскаватор эксплуатируется при любых погодных условиях, а в условиях Урала это осадки в виде дождя и снега, то естественно, что металлоконструкции стрелы подвержены воздействию коррозии. Некоторые особенности имеет измерение остаточной толщины в местах коррозионных повреждений. Перед измерением необходимо получить сведения о характере ожидаемых коррозионных повреждений (например, визуальным осмотром, с помощью оптических приборов и т.д.) и, по возможности произвести зачистку поверхности, подвергнутой коррозии. При измерении остаточной толщины стрелы в местах пятнистой или язвенной коррозии поверхности в заранее намеченных местах измерения проводились с шагом не более 3 мм. За результат измерения принимали минимальное показание прибора.

Если прибор стабильно показывал значение толщины, равное номинальной толщине металлоконструкции стрелы или близкое к нему – то, значит, стрела в этом месте коррозионным повреждениям не была подвергнута. Если прибор стабильно показывал значение толщины меньше номинальной толщины металлоконструкции стрелы, значит, в измеряемом месте стрела была подвергнута равномерной коррозии. Если прибор показывал номинальное значение толщины, а при дальнейшей перестановке преобразователя на ограниченном участке – нулевое значение или нестабильное, или меньше номинального, значит, металлоконструкция стрелы подверглась язвенной коррозии.

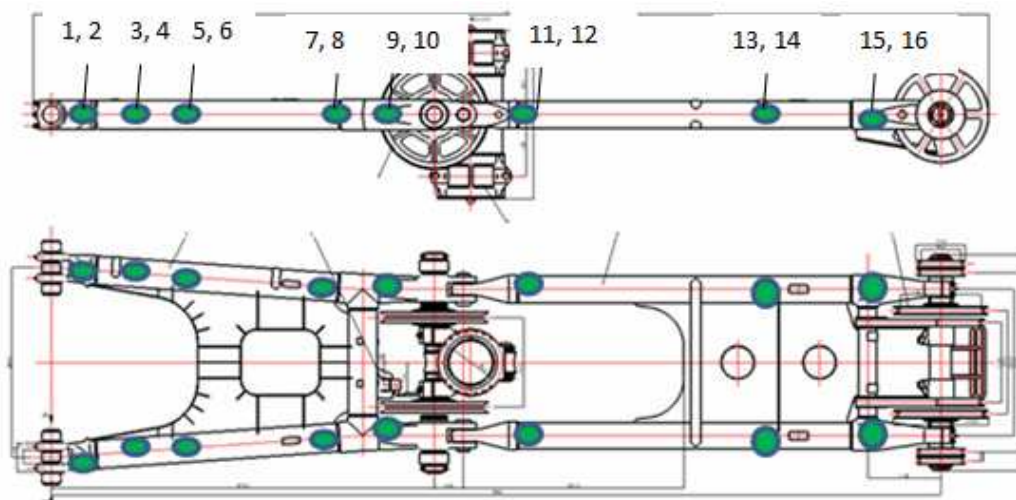


Рис. 2. Схема установки преобразователей

В результате трехкратных замеров к каждой точке были получены результаты, указывающие на появление дефектов в местах проушин (мест крепления стрелы), что показано на рисунке 3 и в таблице 2.

Табл. 2. Результаты измерений при скорости звука 5920 м/с

Кадр	1	4	5	6	7	8	9	10
Z, мм	20,2	15,3	6,9	9,4	9,4	7,8	6,4	6,5
A, дБ	94,2	94,2	75,4	80,8	82,5	84,3	73,2	94,1
Кадр	11	12	13	14	15	16	17	18
Z, мм	7,6	7,5	7,6	7,2	6,9	9,0	7,1	8,0
A, дБ	92,2	85,7	82,3	83,0	79,1	96,1	95,1	91,5



Рис. 3. Некоторые кадры дефектоскопа

Результат измерений с учетом погрешностей представлен в виде:

x, Δ от ΔH до $\Delta B; P$,

где x , мм – номинальное значение результата измерения; $\Delta H, \Delta B$ – нижний и верхний пределы погрешности измерения; P – вероятность, с которой погрешность находится в этих границах, то есть $7,3 \text{ мм} \pm 0,2 \text{ мм}$; $P = 0,972$. Значение доверительной вероятности допускается не указывать, если $P = 0,95$.

Данные, полученные при ультразвуковом обследовании металлоконструкций стрелы, были использованы в дальнейшем при исследовании общего напряженно-деформированного состояния стрелы.

Анализ напряженно-деформированного состояния позволяет выявить элементы оборудования, которые имеют слабые места или излишние запасы прочности ещё на стадии проектирования. Для расчета напряжений применяются специализированные программные пакеты. Наиболее известный на весь мир программный пакет, который может нам предоставить такую возможность – Ansys, в России наиболее перспективным и популярным пакетом является APM WinMachine, который используется также в нашем университете. На базе этого программного пакета проводим исследование напряженно-деформированного состояния рабочего оборудования экскаватора ЭКГ-8И, в частности – стрелы.

Модели конструкций могут содержать стержневые, пластинчатые, объемные элементы или их комбинации. Для моделирования рабочего оборудования решено было применить комбинированную модель, которая содержит в себе пластинчатые и стержневые элементы, в которой основной исследуемый объект – стрела – смоделирована из пластинчатых элементов. Это сделано для того, чтобы была возможность изменять толщину стенок балок, при необходимости уменьшая площадь сечения в тех местах, где имеются излишние запасы прочности, или, наоборот, увеличивая площадь сечения там, где запас прочности недостаточен для безотказной работы металлоконструкции. Модель учитывает некачественную сварку и заводские дефекты в материале, это необходимо учесть при расчётах и анализе исследуемого объекта. Возможные концентраторы напряжений, такие как кронштейны для крепления осей и др., в модели были выполнены максимально приближенными к элементам стрелы реально существующей машины для более подробной картины и правильного анализа напряженно-деформированного состояния.

Результаты расчетов приведены на рисунке 4.

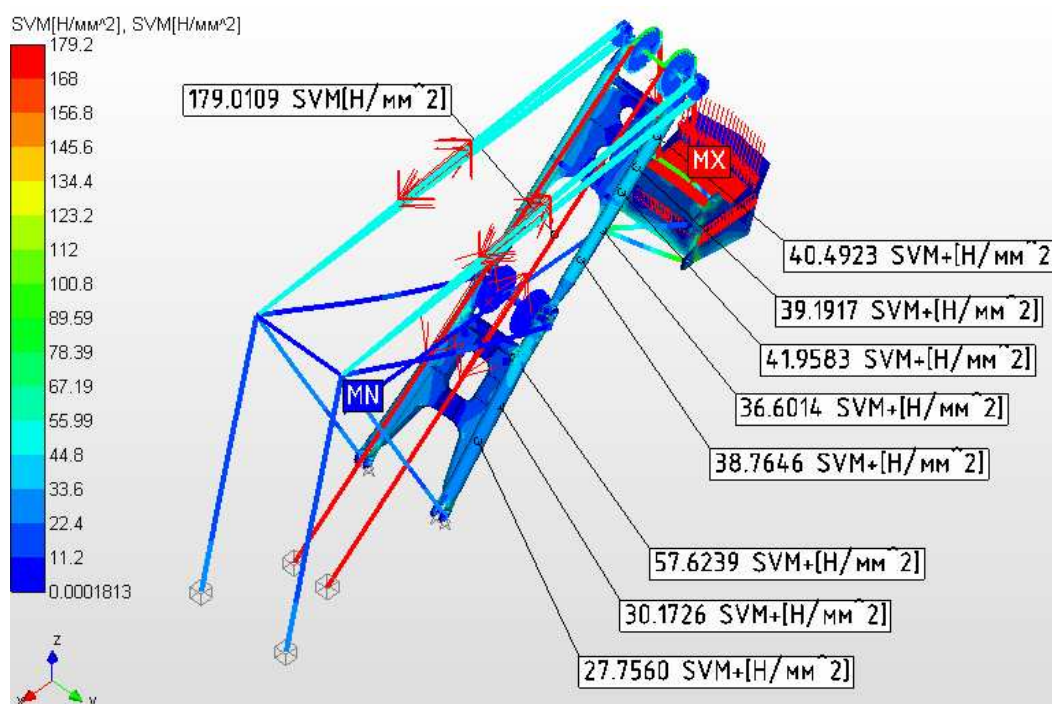


Рис. 4. Карта напряжений

Как видно по карте напряжений (рис. 4), в металлоконструкции стрелы отсутствуют предельно допускаемые напряжения, максимальное наблюдается в месте соединения нижних балок стрелы поперечиной (57,6239 МПа – отмечено выноской). В подъемных канатах ковша при таком режиме работы наблюдаются напряжения величиной 179,0109 МПа (отмечено выноской на рис. 4), но они не являются предметом нашего исследования, однако их диаметр соответствует диаметру подъемных канатов, которые используются в реально существующей машине. Данные по расчёту приведены в таблице 3.

Табл. 3. Результаты расчёта

Максимальные напряжения в канатах, МПа	179,01
Максимальные напряжения в теле стрелы, МПа	57,62
Максимальные напряжения в балках нижней секции стрелы, МПа	30,2
Максимальные напряжения в балках верхней секции стрелы, МПа	41,95
Максимальное перемещение в конструкции при действующих силах, мм	22,59
Масса конструкции, кг	57262,87

Выводы

В работе рассмотрены преимущества и недостатки метода автоматизированного ультразвукового контроля с последовательной обработкой данных. Информативность и чувствительность этого метода оценивается как достаточная для проведения исследований металлоконструкций карьерных экскаваторов. Представлены результаты исследования напряженного состояния металлоконструкций полый стрелы карьерного экскаватора с помощью ручного дефектоскопа. Проведены исследования общего напряженно-деформированного состояния стрелы карьерного экскаватора ЭКГ-10И. Предельно допустимых напряжений в металлоконструкции стрелы нет, максимальные напряжения наблюдаются в местах соединения нижних балок стрелы с поперечиной и составляют 57,6239 МПа.

Список литературы

1. Коротков М.М. Ультразвуковая толщинометрия: учебное пособие. – Томск: Изд. ТПУ, 2008. – 94 с.
2. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Ультразвуковой контроль: Неразрушающий контроль. Справочник / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.

3. РД РОСЭК-006-97. Машины грузоподъемные. Конструкции металлические. Толщинометрия ультразвуковая. Основные положения. – М.: Машиностроение, 1998.
4. Алешин Н.П., Белый В.Е., Вopilкин А.Х., Вошанов А.К., Ермолов И.Н., Гурвич А.К. Методы акустического контроля металлов. – М.: Машиностроение, 1989. – 456 с.
5. Кретов Е.Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении. – 3 изд., перераб. и доп. – СПб.: СВЕН, 2011. – 305 с.
6. Кретов Е.Ф. Ультразвуковая толщинометрия в машиностроении // В мире неразрушающего контроля. – 2008. – № 2 (40). – С. 26-28.
7. Zamen S., Dehghan-Niri E., Al-Beer H., Lindahl J., Hassen A.A. Characterization of nonlinear ultrasonic waves behavior while interacting with poor interlayer bonds in large-scale additive manufactured materials // NDT and E International. 2022, vol. 127, p. 102602. DOI: 10.1016/j.ndteint.2022.102602.
8. Mazeika L., Raišutis R., Jankauskas A., Rekuviene R., Sliteris R., Samaitis V., Nageswaran C., Budimir M. High sensitivity ultrasonic NDT technique for detecting creep damage at the early stage in power plant steels // International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2022, vol. 196, p. 104613. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2022.104613.
9. Chang J., Wang C., Tang Y., Wenchao L. Numerical Investigations of Ultrasonic Reverse Time Migration for Complex Cracks Near the Surface // IEEE Access. 2022, vol. 10, pp. 5559-5567. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3140119.
10. Gardner C., Ko Y., Koutoumbas M., Flynn E., Cummings I., Cornwell P. Delamination Detection in Fiber Metal Laminates Using Ultrasonic Wavefield Imaging // Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. Rotating Machinery, Optical Methods & Scanning LDV Methods. 2022, vol. 6, pp. 59-72. doi.org/10.1007/978-3-030-76335-0_6.
11. Müller F.W., Schiebahn A., Reisinger U. Quality prediction of disturbed ultrasonic metal welds // Journal of Advanced Joining Processes. 2021, vol. 5, p. 100086. DOI: 10.1016/j.jajp.2021.100086.
12. Ермолов И.Н., Вopilкин А.Х., Бадалян В.Г. Расчеты в ультразвуковой дефектоскопии (краткий справочник). – М.: ООО НПЦ НК «ЭХО+», 2004. – 108 с.
13. Ермолов И.Н., Ермолов М.И. Ультразвуковой контроль: учебник для специалистов первого и второго уровней квалификации. – Изд. 2-е, испр. – М., 1998. – 208 с.
14. Бирюков Д.Ю. Преобразователи и методы неразрушающего контроля. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008. – 179 с.
15. Кириков А.В., Забродин А.Н., Комлик А.В. Методы и средства ультразвукового контроля проката с применением электромагнитно-акустических преобразователей // В мире НК. – 1999. – №3.
16. Потапов А.И., Сясько В.А., Пудовкин О.П. Оптимизация параметров первичных измерительных преобразователей, реализующих технологию MFL // Дефектоскопия. – 2015. – № 8. – С. 64-71.
17. Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х., Тихонов Д.С. Использование волн дифракции для ультразвуковой дефектоскопии в алгоритмах когерентного восстановления высококачественных изображений отражателей // В мире неразрушающего контроля. – 2012. – № 3 (57). – С. 20-25.
18. Бадалян В.Г., Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х., Кононов Д.А., Самарин П.Ф., Тихонов Д.С. Ультразвуковая дефектоскопия металлов с применением голографических методов. – М.: Машиностроение, 2008. – 368 с.
19. Слесарев Д.А., Абакумов А.А. Обработка и представление информации в MFL методе неразрушающего контроля // Дефектоскопия. – 2013. – № 9. – С. 3-9.
20. Потапов А.И., Сясько В.А., Соломенчук П.В., Ивкин А.Е., Чертов Д.Н. Электромагнитные и магнитные методы неразрушающего контроля материалов и изделий. Т. 2: Электромагнитные и магнитные методы дефектоскопии и контроля свойств материалов. – СПб.: Нестор-История, 2015. – 440 с.

References

1. Korotkov M.M. Ultrasonic thickness measurement: textbook. – Tomsk: Publ. house of TPU, 2008. – 94 p.
2. Ermolov I.N., Lange Yu.V. Ultrasonic control: Non-destructive testing. Guide / Under the gen. edit. of V.V. Klyuev. Vol. 3. – M.: Mechanical Engineering, 2004. – 864 p.
3. RD ROSEK-006-97. Lifting machines. Metal structures. Ultrasonic thickness measurement. Main provisions. – M.: Mechanical Engineering, 1998.
4. Aleshin N.P., Beliy V.E., Vopilkin A.Kh., Voshchanov A.K., Ermolov I.N., Gurvich A.K. Methods of acoustic control of metals. – M.: Mechanical Engineering, 1989. – 456 p.
5. Kretov E.F. Ultrasonic flaw detection in power engineering. – 3rd ed., reprint and additional. – SPb.: SVEN, 2011. – 305 p.
6. Kretov E.F. Ultrasonic thickness measurement in mechanical engineering // In the world of non-destructive testing. 2008, no. № 2 (40), pp. 26-28.
7. Zamen S., Dehghan-Niri E., Al-Beer H., Lindahl J., Hassen A.A. Characterization of nonlinear ultrasonic waves behavior while interacting with poor interlayer bonds in large-scale additive manufactured materials // NDT and E International. 2022, vol. 127, p. 102602. DOI: 10.1016/j.ndteint.2022.102602.
8. Mazeika L., Raišutis R., Jankauskas A., Rekuviene R., Sliteris R., Samaitis V., Nageswaran C., Budimir M. High sensitivity ultrasonic NDT technique for detecting creep damage at the early stage in power plant steels // International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2022, vol. 196, p. 104613. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2022.104613.

9. Chang J., Wang C., Tang Y., Wenchao L. Numerical Investigations of Ultrasonic Reverse Time Migration for Complex Cracks Near the Surface // IEEE Access. 2022, vol. 10, pp. 5559-5567. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3140119.
10. Gardner C., Ko Y., Koutoumbas M., Flynn E., Cummings I., Cornwell P. Delamination Detection in Fiber Metal Laminates Using Ultrasonic Wavefield Imaging // Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. Rotating Machinery, Optical Methods & Scanning LDV Methods. 2022, vol. 6, pp. 59-72. doi.org/10.1007/978-3-030-76335-0_6.
11. Müller F.W., Schiebahn A., Reisgen U. Quality prediction of disturbed ultrasonic metal welds // Journal of Advanced Joining Processes. 2021, vol. 5, p. 100086. DOI: 10.1016/j.jajp.2021.100086.
12. Ermolov I.N., Vopilkin A.H., Badalyan V.G. Calculations in ultrasonic flaw detection (short reference). – M.: LLC NPTS NK "ECHO+", 2004. – 108 p.
13. Ermolov I.N., Ermolov M.I. Ultrasonic control: textbook for specialists of the first and second skill levels. – 2nd edition, ispr. – M., 1998. – 208 p.
14. Biryukov D.Y. Converters and methods of non-destructive testing. – Yekaterinburg: UGTU-UI, 2008. – 179 p.
15. Kirikov A.V., Zabrodin A.N., Komlik A.V. Methods and means of ultrasonic inspection of rolled products using electromagnetic-acoustic transducers // In the world of NK. 1999, no. 3.
16. Potapov A.I., Syasko V.A., Pudovkin O.P. Optimization of parameters of primary measuring transducers implementing MFL technology // Flaw detection. 2015, no. 8, pp. 64-71.
17. Bazulin E.G., Vopilkin A.H., Tikhonov D.S. The use of diffraction waves for ultrasonic flaw detection in algorithms for coherent reconstruction of high-quality images of reflectors // In the world of non-destructive testing. 2012, no. 3 (57), pp. 20-25.
18. Badalyan V.G., Bazulin E.G., Vopilkin A.H., Kononov D.A., Samarin P.F., Tikhonov D.S. Ultrasonic metal flaw detection using holographic methods. – M.: Mechanical Engineering, 2008. – 368 p.
19. Slesarev D.A., Abakumov A.A. Processing and presentation of information in the MFL method of non-destructive testing // Flaw detection. 2013, no. 9, pp. 3-9.
20. Potapov A.I., Syasko V.A., Solomenchuk P.V., Ivkin A.E., Chertov D.N. Electromagnetic and magnetic methods of non-destructive testing of materials and products. Vol. 2: Electromagnetic and magnetic methods of flaw detection and control of material properties. – SPb.: Nestor-History, 2015. – 440 p.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Лагунова Юлия Андреевна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой ГМК	Lagunova Yulia Andreevna – doctor of technical sciences, professor, head of department MMC
Хорошавин Сергей Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры ГМК	Khoroshavin Sergei Alexandrovich – candidate of technical sciences, associate professor department MMC
Набиуллин Рустем Шафкатович – кандидат технических наук, доцент кафедры ГМК	Nabiullin Rustem Shafkatovich – candidate of technical sciences, associate professor department MMC
Калянов Александр Евгеньевич – кандидат технических наук, доцент кафедры ГМК	Kalyanov Alexander Evgen'evich – candidate of technical sciences, associate professor department MMC
Yuliya.Lagunova@m.ursmu.ru	

Получена 29.05.2022