

Уральского отделения Российской академии наук







ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

ХХХІІІ Уральской конференции с

международным участием ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ (ЯНУСОВСКИЕ ЧТЕНИЯ)

19-20 апреля 2022 г.

Екатеринбург

Физические методы неразрушающего контроля

(Янусовские чтения)

Тезисы докладов XXXIII Уральской конференции с международным участием

г. Екатеринбург, 2022

СОПРЕДСЕДАТЕЛИ ОРГКОМИТЕТА

Сясько В.А. президент РОНКТД, профессор, д.т.н., Санкт-Петербургский горный университет, г. С.-Петербург

Смородинский Я.Г., профессор, д.т.н., ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург

Крёнинг Х.-М.В., проф., Саарский университет, Саарбрюкен, Германия, проф., университета Сан-Пауло, Бразилия

Сташков А.Н. (ученый секретарь конференции), к.т.н., ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург

Михайлов А.В. (руководитель молодежной секции), к.т.н., ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург

ЧЛЕНЫ ОРГКОМИТЕТА

Вайнштейн И.А., д.ф.-м.н., УрФУ им. Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург Василенко О.Н., к.т.н., ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург Клюев С.В., к.э.н., МНПО "Спектр", г. Москва Костин В.Н., д.т.н., ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург Поволоцкая А.М. к.т.н., ИМАШ УрО РАН, г. Екатеринбург Путилова Е.А. к.т.н., ИМАШ УрО РАН, г. Екатеринбург Ринкевич А.Б., член-корр. РАН, ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург Смирнов С.В. д.т.н., ИМАШ УрО РАН, г. Екатеринбург

Место проведения конференции:

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18.

СОДЕРЖАНИЕ

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТРУБКИ НА ЮСТИРОВКУ ДИФРАКТОМЕТРА Р.Ф. Альмухаметов	7
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ ФЕРРОМАГНЕТИКА ПО ПОЛЯМ РАССЕЯНИЯ В ТАНГЕНЦИАЛЬНОМ НАМАГНИЧИВАЮЩЕМ ПОЛЕ А.В. Никитин	9
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ СТАЛЕЙ ДЛЯ ИХ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ С.Г. Сандомирский	11
ОЦЕНКА СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В СТАЛИ 09Г2С, ПОЛУЧЕННОЙ АДДИТИВНЫМ ЭЛЕКТРОДУГОВЫМ ВЫРАЩИВАНИЕМ ПРИ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ М.С. Аносов	13
ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЙ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ 3D И ЛИТОЙ СТАЛИ 09Г2С ПРИ МАЛОЦИКЛОВЫХ ИСПЫТАНИЯХ А.Н. Сташков	15
ДВУХОСНАЯ ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ МАШИНА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ФИЗИКО- МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ А.Н. Мушников	17
КОНТРОЛЬ ДЕФОРМАЦИИ И ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМИ ДАТЧИКАМИ М.Ю. Федотов	18
ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИТЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ДЕФЕКТАМИ МЕТОДАМИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ТЕНЗОМЕТРИЕЙ С.А. Бехер	20
НОВЫЙ ПРИНЦИП ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ МЕТАЛЛА С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАЗВУКА И РАДАРА ДОПЛЕРА В.А. Суторихин	22
ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МЕТОДА ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ А.А. Антонов	24
РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СИЛИЦИРОВАННОГО ГРАФИТА А.А. Хлыбов	26
ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ТРЕЩИН В РЕЛЬСОВЫХ СТАЛЯХ В.А. Барат	28
ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ТРАКТА ПРИ КОНТРОЛЕ ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ КОЛЕСА РЭЛЕЕВСКИМИ ВОЛНАМИ А.В. Платунов	30

ПРИМЕНЕНИЕ ДЕФЕКТОСКОПА УЛЬТРАЗВУКОВОГО МНОГОКАНАЛЬНОГО АВГУР-АРТ В РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ Д.С. Тихонов	32
КОНТРОЛЬ НАВОДОРОЖИВАНИЯ ФЕРРОМАГНИТНОЙ СТЕНКИ С.Э. Бабкин	34
МЕТОД ВИЗУАЛИЗИРУЮЩЕЙ МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ПЛЕНКИ. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ А.В. Шилов	36
О СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ ТЕХНОЛОГИИ МАГНИТОПОРОШКОВОГО КОНТРОЛЯ БАНДАЖА КОЛЕС ЛОКОМОТИВА Р.А. Ахмеджанов	38
ПРИМЕНЕНИЕ ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ОБОРУДОВАНИЯ ИЗ КРИОГЕННЫХ СТАЛЕЙ В.А. Захаров	40
ПОВЫШЕНИЕ ЛОКАЛЬНОСТИ МЕТОДА «ТОЧЕЧНОГО ПОЛЮСА» С.Г. Сандомирский	42
ПРЕДПОСЫЛКИ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА УПРОЧНЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС МЕТОДОМ «ТОЧЕЧНОГО ПОЛЮСА» С.Г. Сандомирский	44
ВИХРЕТОКОВЫЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ПОДМАГНИЧИВАНИЕМ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ НА СЛАБОМАГНИТНОМ ОСНОВАНИИ П.В. Соломенчук	46
РЕНТГЕНОВСКИЙ КОМПЛЕКС КОНТРОЛЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ НА БАЗЕ МАЛОГАБАРИТНОГО БЕТАТРОНА А.О. Казак	48
ОПТИЧЕСКАЯ ПРОФИЛОМЕТРИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ ПОСЛЕ ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ Н.Н. Соболева	49
ОЦЕНКА СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ УЧАСТКОВ ЗОНЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ А.В. Гончар	50
НАМАГНИЧИВАНИЕ РАЗНОРОДНЫХ КРУПНЫХ ОБЪЕКТОВ КОНТРОЛЯ Т.В. Победа	52
РАЗРАБОТКА ПЕРВИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ А.С. Голев	54
АНАЛИЗ АПЕРТУРНОЙ ФУНКЦИИ РАССЕИВАЮЩЕГО ОБЪЕМА КОЛЛИМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ АЛЬБЕДНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ С КОЛЬЦЕВЫМ ДЕТЕКТОРОМ Е.Е. Журавский	56

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ КОМПОНЕНТОВ СРЕДСТВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ НА ИЗЛОМЫ ИССЛЕДУЕМЫХ ОБРАЗЦОВ А.Б. Муратшин	58
К СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ТРУБОПРОВОДА, ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ, УГЛЕРОДНОЙ НАНОТРУБКИ (УНТ) А.Г. Хакимов	60
ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭВТЕКТОИДНОЙ СТАЛИ С РАЗЛИЧНОЙ МОРФОЛОГИЕЙ ПЕРЛИТА С ПОМОЩЬЮ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДОВ Е.А. Щапова	63
ПОЛЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ НА СТАДИИ ЗАРОЖДЕНИЯ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ К.В. Наумов	65
ДЕФЕКТОМЕТРИЯ И СИНТЕЗ ДАННЫХ ЛАЗЕРНОЙ ВИБРОМЕТРИИ И ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ В.Ю. Шпильной	67
ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ВИБРОМЕТРИИ И АКУСТИЧЕСКОЙ СТИМУЛЯЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГАЗОРАЗРЯДНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ Д.А. Дерусова	69
НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ Тарасова А.А.	71
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ОСТАТОЧНОЙ ТОЛЩИНЫ ОБШИВКИ БОРТА СУДНА ПОД ЗАЩИТНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ ВНЕ ДОКА 3.А. Велеулов	73
МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА КОРОНОК ЗУБЬЕВ КОВШЕЙ ЭКСКАВАТОРОВ Д.С. Громыка	74
ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАГНИТНО-ИНДУКЦИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ТОЛЩИНОМЕРА, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЕЗ ВНЕШНЕГО ПОЗИЦИОНИРУЮЩЕГО КОРПУСА А.Ю. Васильев	76
К ВОПРОСУ О ДОСТОВЕРНОСТИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ДОПУСКОВОГО КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ОСНОВАНИЯХ М.С. Степанова	78
КОМПЛЕКСНЫЙ КОНТРОЛЬ СПЛОШНОСТИ И ТОЛЩИНЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫМ МЕТОДОМ А.С. Мусихин	80
КОНТРОЛЬ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗДЕЛИЙ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА	83

ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ	ł
К.И. Доронин	

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ФОТОМЕТРИЧЕСКОГО БЛЕСКОМЕРА НА РЕЗУЛЬТАТ ИЗМЕРЕНИЯ С.Р. Насырова	85
ОБНАРУЖЕНИЕ ДЕФЕКТОВ В ПОДОШВЕ РЕЛЬСОВ МАГНИТНЫМ (MFL) МЕТОДОМ Г.А. Иванов	87
РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ В.В. Малый	89
ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПРОХОЖДЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ СКВОЗЬ ЗАГОТОВКУ ИЗ ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА Н.В. Ушков	91
ОЦЕНКА ОСНОВНОЙ ЧАСТОТЫ СПЕКТРА АКУСТИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСА ПРОШЕДШЕГО СКВОЗЬ ЗАГОТОВКУ ИЗ ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА Гуляев Е.А.	94
ЗЕРКАЛЬНО-ТЕНЕВОЙ КОНТРОЛЬ ОСЕЙ КОЛЕСНЫХ ПАР С ЦИЛЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЭМА-МЕТОДОМ П.А. Никитина	97
МЕТОД ПОМЕХОУСТОЙЧИВОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ Е. Алтай	99
ОПЫТ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ НА ПАО «ЧМК» С.Ю. Бабинов	101
ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ МЕДИ, ПОЛУЧЕННЫХ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ А.А. Орлов	102
РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ УГЛЕРОД- КЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ Е.А. Павлухин	104
РАЗРАБОТКА СПОСОБА ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ ВОДОРОДНОГО ОХРУПЧИВАНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ Д.А. Рябов	106
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ТЕНЗОМЕТРИИ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ КОЛЕС ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ В.С. Выплавень	108
ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МЕТОДА РЕГИСТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ УДАРНИКА ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ИНДЕНТИРОВАНИИ О.А. Колганов	110

ВОЗМОЖНОСТИ РУЧНОГО ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ГЛУБИНЫ КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН НА ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ РЕЛЬСОВ С.П. Шляхтенков	112
РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПРИЕМА ДАННЫХ ДЛЯ ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДЕФЕКТОСКОПА Е.И. Дьячковский	114
АНАЛИЗ СПОСОБОВ НАСТРОЙКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ КОНТРОЛЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И.А. Смирнов	116
ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН КАРБИДА ВОЛЬФРАМА ИМПУЛЬСНЫМ МЕТОДОМ Т.И. Земсков	119
ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТЕЙ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ДИСПЕРСИОННО ТВЕРДЕЮЩИХ СТАЛЯХ В УСЛОВИЯХ СТАРЕНИЯ А.А. Наговицын	121
МАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ СОДЕРЖАНИЯ МАРТЕНСИТА ДЕФОРМАЦИИ В ОБРАЗЦАХ И ИЗДЕЛИЯХ ИЗ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ А.В. Кочнев	123
СТЕНД ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ БИСТАБИЛЬНЫХ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ И.В. Игнатьев	125
СЕЛЕКТИВНЫЙ МАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ ТОЛЩИНЫ И СТЕПЕНИ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ НА СТАЛЬНЫХ ОБЪЕКТАХ А.В. Бызов	128
ИМПУЛЬСНЫЙ ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ КОРРОЗИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ СТЕНОК ТРУБОПРОВОДОВ ПОД ИЗОЛЯЦИЕЙ А.Е. Горбунов	130
ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ ИДЕНТИФИКАЦИИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ ПО ТИПАМ ДЕФЕКТОВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ДУГОВЫМИ СПОСОБАМИ СВАРКИ, ПО РЕЗУЛЬТАТАМ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ ДИФРАКЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ Д.А. Бачаев	132

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТРУБКИ НА ЮСТИРОВКУ ДИФРАКТОМЕТРА

© 2022 г. <u>Рафаил Фазыльянович Альмухаметов^{1,}</u> *, А. Д. Давлетшина^{1,} **, И.Т. Камалтдинов^{1,}***

¹ - Башкирский государственный университет,

450076, Уфа, ул. Заки Валиди, 32

^{*}rfalmukhametov@mail.ru, **davletshinaalisa@rambler.ru, *** <u>ildar@mail.ru</u>

В работе представлены результаты исследований неконтролируемых погрешностей измерения угла дифракции в рентгеновских дифрактометрах, связанных с изменением режима работы трубки. В связи широким применением рентгеновских дифрактометров для прецизионного определения параметров кристаллической решетки в научных исследованиях и в промышленности тема исследований является актуальной. Основные источники погрешностей измерений угла рентгеновской дифракции от кристаллов изучены достаточно хорошо и могут быть в большинстве случаев учтены. Однако, неконтролируемые погрешности, связанные с режимом работы рентгеновской трубки, в литературе не нашли достаточного отражения. Авторам удалось найти только одну работу, посвященную изучению смещения фокуса рентгеновской трубки в процессе работы аппарата для дефектоскопии РАП 300-5Д [1, 2].

В данной работе исследования проводились на дифрактометре ДРОН-7 с трубкой типа БСВ 27 с кобальтовым анодом. Режим работы рентгеновской трубки варьировали путем изменения подводимой мощности и регулировки объема охлаждающей жидкости за единицу времени. Для регистрации использовали сцинтилляционный блок детектирования БДС-25. Угловое положение первичного луча определяли по его профилю. Результаты исследований авторами подробно изложены в статьях [3, 4].

В работе установлено, что при изменении режима работы рентгеновской трубки угловое положение первичного луча заметно меняется, что приводит к нарушению юстировки дифрактометра и дополнительным погрешностям. При постоянной интенсивности охлаждения анода с увеличением мощности, подводимой к трубке, первичный луч меняет свое направление (рис.1). Мы полагаем, что наблюдаемое изменение углового положения первичного луча связано с термическим расширением анода. Для подтверждения полученных результатов мы изучили температуру анода трубки в зависимости от подводимой мощности. Так как анод нагревается неравномерно,

для контроля эффективной температуры анода мы использовали температуру охлаждающей воды на выходе из трубки. Результаты наших исследований показали, что с увеличением подводимой мощности температура воды на выходе трубки действительно заметно повышается. Это указывает на повышение эффективной температуры анода.



Рис. 1. Зависимость углового положения первичного луча от мощности, подводимой к трубке

По результатам проведенных исследований нами установлено, что режим работы рентгеновской трубки оказывает существенное влияние на юстировку дифрактометра и приводит к дополнительным погрешностям в измерениях дифракционных углов. Это влияние обусловлено изменением температуры анода рентгеновской трубки и его термическим расширением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Штейн А.М. Анализ смещения фокуса в процессе работы рентгеновского аппарата // Дефектоскопия. 2012. № 6. С. 70-76.

2. Stein A.M. Analysis of a focus shift during the operation of an X-ray unit // Russ. J. Nondestruct. Test. 2012. № 6. P. 378-383. https://doi.org/10.1134/S1061830912060071

3. *Almukhametov R.F., Davletshina A.Д., and Kamaltdinov I.T.* The Influence of the Operating Mode of an X-Ray Tube on Diffractometer Alignment // Instrum. Exp. Tech., 2022, Vol. 65, No. 1, pp. 109–112. https://doi.org/10.1134/S0020441222010146

4. *Альмухаметов Р. Ф., Давлетишна А. Д., Камалтдинов И. Т.* Влияние режима работы рентгеновской трубки на юстировку дифрактометра // ПТЭ, 2022, № 1, с. 120–123. https://doi.org/10.31857/S0032816222010141

Восстановление поверхностных дефектов ферромагнетика по полям рассеяния в тангенциальном намагничивающем поле

Андрей Владимирович Никитин^{1,a)}, Ю.Л.Гобов^{1,6)}, А.В. Михайлов^{1,в)}, Л.В.Михайлов^{1,г)}

1 Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, 620108, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18

^{a)} an@imp.uran.ru; ⁶⁾ go@imp.uran.ru; ^{B)} mikhaylov@imp.uran.ru; ^{r)} mikhaylov_lv@imp.uran.ru

В настоящей работе представлен метод решения обратной геометрической задачи магнитостатики — восстановления геометрических параметров поверхностных дефектов [1] по измеренным компонентам магнитных полей рассеяния, измеренных на некотором уровне над поверхностью металла. Магнитные преобразователи могут находиться как над бездефектной поверхностью металла, так и над поверхностью содержащей дефект.

Впервые обратная геометрическая задача магнитостатики без априорной информации была решена в [2], но только для двухмерного линейного случая, при конфигурации, когда магнитные преобразователи расположены над дефектной поверхностью металла.

В [3,4] впервые был описан метод решения обратной задачи магнитостатики, который можно использовать в нелинейном и трехмерном случае при конфигурации, когда магнитные преобразователи расположены над бездефектной поверхностью металла. В [5] приведено экспериментальное подтверждение данного метода в нелинейном двухмерном случае (дефекты вытянуты в одном из направлений).

Используя метод, предложенный в [3,4] можно решить обратную задачу магнитостатики для случая, когда магнитные преобразователи расположены над поверхностью металла с дефектами. Метод можно использовать в трехмерном случае с учетом нелинейных свойств ферромагнетика.

Объясним суть метода предложенного в [3,4] на простом примере: рассмотрим двухмерный дефект, относительная магнитная проницаемость ферромагнетика постоянна и много больше единицы. Измерения компонент магнитного поля произведены на некотором расстоянии от металла в воздухе. Пересчитаем компоненты поля с уровня измерений на границу металл-воздух внутри металла при помощи выражений сопряжения компонент магнитного поля на границе двух сред. Полученные значения компонент магнитного поля в металле, а значит и их производных по оси ординат, послужат начальными условиями. Запишем уравнения Максвелла для случая магнитостатики в конечных разностях.

Запишем уравнения Максвелла для случая магнитостатики в конечных разностях. $H_z(x, Z_0 - \Delta_z) = H_z(x, Z_0) + \frac{\Delta_z * dH_x}{dx};$ $H_x(x, Z_0 - \Delta_z) = H_x(x, Z_0) - \frac{\Delta_z * dH_z}{dx},$ (1) где Z_0 - граница металл-воздух внутри металла; Δ_z - шаг в отрицательном направлении по оси OZ; $\frac{dH_x}{dx}u\frac{dH_z}{dx}$ - производные компонент магнитного поля по х на уровне Z_0 .

Используя систему уравнений (1), мы можем пересчитать значения компонент поля с уровня Z_0 на уровень Z_0 - Δ_z и сколь угодно далее, всюду считая, что под нами находится металл. Восстановим поле вниз, по крайней мере на глубину исследуемой пластины Т. Построим силовые линии магнитного поля. Выберем две силовые линии — одна проходит по границе пластины металл-воздух «сверху», вторая по границе металл-воздух «снизу» пластины. Поскольку при пересчете из водуха в металл значение H_z уменьшилась в μ раз, а значение H_x осталось тем же, то верхняя силовая линия не испытыват изгибов и описывает бездефектную верхнюю поверхность, нижняя силовая линия изогнута в зоне дефекта. Изгиб в зоне дефекта нижней силовой линии отвечает измеренному в воздухе полю. В ферромагнетиках с μ >>1 выход магнитного потока даже в зоне дефекта составляет лишь несколько процентов. Если не учитывать эти несколько процентов, то можно утверждать, что обе силовые линии удовлетворяют начальным условиям и «нижняя» силовая линия

приближенно описывает геометрические параметры дефекта. В случае µ=∞ «нижняя» силовая линия точно опишет форму дефекта.

Рассмотрим конфигурацию, когда магнитные преобразователи расположены над поверхностью металла с дефектом. Для простоты изложения метода вновь рассмотрим двухмерный случай с µ=const, µ>>1.

Начнем с плавных дефектов — то есть таких дефектов, у которых значение тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля мало отличается на бездефектной поверхности и на поверхности с дефектом. Для таких дефектов топографии поля над указанными поверхностями также мало отличаются. Поэтому можно считать, что измерения были проведены над бездефектной поверхностью металла. В таком случае форму дефекта можно получить описанным ранее методом.

Дефекты с большей локализацией требуют процесса итерации для построения границы дефекта с учетом изменения значений компонент поля от бездефектной поверхности к поверхности содержащей дефект.

В обоих случаях, критерием точности построения границы поверхности с дефектом будет равенство для всех значений по оси ординат тангенциальных компонент напряженности магнитного поля: полученных пересчетом поля в воздухе от уровня измерений до точки на границе поверхности с дефектом и полученной пересчетом магнитного поля в металле от бездефектной повехности к точке на границе поверхности с дефектом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Specifications and requirements for in-line inspection of pipelines, 2016, <u>https://pipelineoperators.org/</u>

2. *Кротов Л.Н.* Реконструкция границы раздела сред по пространственному распределению магнитного поля рассеяния. II. Постановка и метод решения обратной геометрической задачи магнитостатики. —Дефектоскопия, 2004, 6, с 36 —44

3. Yu. L. Gobov, A. V. Nikitin, S. E. Popov Solving the Inverse Geometric Problem of

Magnetostatics for Corrosion Defects.— Russian journal of nondestructive testing, 2018, v. 54 p 726-732

4. Yu. L. Gobov, A. V. Nikitin, S. E. Popov Solving the Inverse Geometric Problem of

Magnetostatics for Corrosion Defects with Allowance for Nonlinear Properties of Ferromagnet. — Russian journal of nondestructive testing, 2018, v. 54, p 849—854

5. A. V. Nikitin, A. V. Mikhailov, A. S. Petrov, S. E. Popov, Yu. L. Gobov A Technique for Practical Reconstruction of the Form Parameters of Surface Two-Dimensional Defects Taking into Account Nonlinear Properties of a Ferromagnet — Russian journal of nondestructive testing, 2021, v. 57, p. 1103—1113

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ СТАЛЕЙ ДЛЯ ИХ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

© 2022 г. <u>Сергей Григорьевич Сандомирский^{1*}</u>

¹ – Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Академическая, 12 * - sand_work@mail.ru

Все механические свойства (временное сопротивление $\sigma_{\rm B}$, условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, относительное сужение ψ , твердость по шкалам HRC и HB) важны для расчета эксплуатационных параметров стальных изделий. Но в литературе для многих сталей приведен не весь комплекс характеристик. Поэтому важно установить взаимосвязь между механическими свойствами сталей заданного класса.

Цель доклада – обобщение исследований по аналитическому описанию взаимосвязей механических свойств часто используемых в машиностроении сталей. Расширение на этой основе возможностей их неразрушающего магнитного контроля.

В [1] показано, что контроль комплекса механических параметров стали по результату измерения их магнитных свойств возможен, если между физикомеханическими свойствами имеются тесные корреляционные связи. Для примера на рис. 1 приведены зависимости механических свойств и твердости широко используемой стали 40Х и ее основных магнитных параметров от температуры T_o отпуска.



Рисунок – Зависимость механических (а) и магнитных (б) свойств ($1 - \sigma_{0,2}$, $2 - \sigma_B$, $3 - \psi$, 4 – твердость HB; 5 – твердость HRC, 6 – коэрцитивная сила H_c , 7 – намагниченность M_s технического насыщения, 8 – остаточная намагниченность M_r) стали 40Х от температуры T_o отпуска после закалки

Анализ зависимостей рисунка а). показал, что все механические свойства и твердость стали 40X с увеличением T₀ изменяются монотонно. Это подтверждает наличие тесных корреляционных связей между механическими свойствами и твердостью стали 40X. В подтверждение этого в таблице приведены уравнения регрессии для расчета σ_B ,

 $\sigma_{0,2}$, ψ , HRC и HB стали 40X по любому из этих параметров для всех возможных их комбинаций. В таблице также приведены квадраты коэффициентов *R* корреляции (достоверности аппроксимаций R^2) и значения $\overline{\delta}$ модулей относительного отклонения результатов расчета параметров $\sigma_{0,2}$, $\sigma_{\rm B}$, Ψ , HB и HRC) от их значений на рис.1.

<i>x</i> =	HRC	HB $\sigma_{0,2}$ (MIIa) σ_{B} (MIIa)		Ψ(%)	
HRC =	x	$0,0597x + 20,1 R^2 = 0,9817$	$0,0207x + 20,9 \\ R^2 = 0,9873$	$0,0195x+18,5$ $R^2 = 0,9692$	-0,653x + 73,5 $R^2 = 0,9604$
HB =	16,45x - 323,6 $\overline{\delta} = 1,74\%$	x	$0,346 x+13,6 R^2 = 0,9992$	$0,327x+26,64 R^2 = 0,9885$	$-10,54x+873,3$ $R^2 = 0,9100$
σ _{0,2} (МПа)=	47,73x - 981,4 $\overline{\delta} = 2,81\%$	$2,892x - 38,5$ $\overline{\delta} = 0,75\%$	x	$0,946x + 115,8 R^2 = 0,9851$	$-30,62x + 2493 R^2 = 0,9170$
$\sigma_{\rm B}({\rm M}\Pi{\rm a}) =$	49,6x - 877,4 $\overline{\delta} = 3,22\%$	3,013x + 99,7 $\overline{\delta} = 2,78\%$	1,041x + 140,5 $\overline{\delta} = 3,17\%$	x	$-32,17x + 2749 R^2 = 0,9199$
Ψ(%)=	-1,472x+109,6 $\overline{\delta} = 4,49\%$	-0,0863x+79,3 $\overline{\delta} = 6,39\%$	-0,0229x+78,3 $\overline{\delta} = 7,32\%$	-0,0286x+82,1 $\overline{\delta} = 5,23\%$	x

Таблица – Линейные уравнения регрессии корреляционных взаимосвязей между физикомеханическими свойствами стали 40Х

Высокие значения R^2 (0,91 $\leq R^2 \leq$ 0,999) приведенных в таблице линейных уравнений регрессии и малые $\overline{\delta}$ (0,75% $\leq \overline{\delta} \leq$ 6,39%) (близкие по величине к погрешностей измерения механических свойств) показали, что результаты измерения каждого из физико-механических свойств могут быть использованы для определения (по крайней мере – весьма точной оценки) остальных физико-механических свойств стали 40Х. Следовательно, для неразрушающего контроля механических свойств стали 40Х достаточно разработать достоверный метод контроля ее твердости. Но магнитные свойства стали 40X в практически важном интервале температур отпуска изменяются не монотонно, не значительно или не могут быть измерены точно (рис. б). В рамках разработанного подхода [3] для решения поставленной задачи эффективно использован параметр $H_{c1} = H_c (1 - K_{\Pi})^2$, где $K_{\Pi} = M_t/M_s$, обеспечивший коэффициент корреляции R = 0,977 и среднее квадратичное отклонение $\overline{\sigma} \approx 1$ ед. HRC между результатами неразрушающего определения и измерения твердости HRC стали 40X в практически

ЛИТЕРАТУРА:

1. Сандомирский С.Г. Статистический анализ и использование взаимосвязей между физико-механическими свойствами сталей и чугунов. Мн.: Беларуская навука, 2021. 144 с. 2. Сандомирский С.Г. Корреляционные зависимости между механическими свойствами и магнитным параметром стали 40Х // Механика машин, механизмов и материалов. 2019. № 3 (48). С. 43–50.

3. *Клюев В.В.*, *Сандомирский С.Г.* Анализ и синтез структурочувствительных магнитных параметров сталей. М.: Издательский дом «СПЕКТР», 2017. – 248 с.

ОЦЕНКА СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В СТАЛИ 09Г2С, ПОЛУЧЕННОЙ АДДИТИВНЫМ ЭЛЕКТРОДУГОВЫМ ВЫРАЩИВАНЕМ ПРИ МАЛОШИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

© 2022 г. Максим Сергеевич Аносов^{1*}, Д.А.Рябов^{1**}, Д.А. Шатагин^{1***} ¹ – Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603950 г. Н. Новгород, улица Минина, 24

* - anosov-maksim@list.ru; ** - ryabovdm1996@gmail.com; *** - dmitsanych@ gmail.com

С интенсивным развитием технологий 3D-печати остро стоит проблема обеспечения и контроля структурного состояния конструкционных сплавов как на этапе их получения, так и в процессе эксплуатации. Наиболее универсальной среди аддитивных технологий является электродуговое выращивание (WAAM).

Большое количество деталей механизмов и конструкций работают в условиях усталостных нагрузок [1]. Процесс усталостного разрушения сопровождается процессом зарождения и развития трещин, который начинается, прежде всего, в поверхностном слое деталей [1]. В связи с чем, особый интерес представляет изучение структуры металла, прежде всего на его поверхности и оценки степени его деградации в процессе эксплуатации, еще до появления макротрещины. В последние годы в металловедении стали широко использоваться подходы фрактальных представлений и цифровой обработки микроструктур, позволяющие проводить количественную оценку процессов деградации структуры металла на основе показателя фрактальной размерности, представляющие значительный интерес и для настоящего исследования.

Целью исследования является оценка структурных изменений в металле, полученном на основе аддитивного выращивания при малоцикловой усталости на основе подходов фрактального анализа и цифровой обработки изображений микроструктур.

В качестве материала для исследования выступает сталь 09Г2С, обладающая хорошими технологическими и эксплуатационными свойствами и широко используется для получения изделий методом 3D-печати электродуговой наплавкой. Образцы для испытаний были получены с использованием специализированного стенда [2]. Для оценки механических характеристик исследуемого сплава и выбора амплитуд напряжений были изготовлены и испытаны образцы на растяжение. Условный предел текучести, предел прочности и относительное удлинение составили в среднем 362МПа, 502МПа и 28% соответственно, и практически не отличаются от механических свойств образцов, полученных из проката стали 09Г2С. В процессе испытаний выявлена значительная анизотропия механических и усталостных свойств стали 09Г2С, так

долговечность образцов, полученных в поперечном направлении наплавки меньше на 20...25% по сравнению с образцами, полученными в продольном направлении.

Микроструктуры рабочей зоны образца стали 09Г2С при различной наработке (N/N*) показаны на рис. 1 при амплитуде напряжений в цикле 350МПа.



Рис. 1 Структурные изменения в процессе усталостного нагружения при различной

наработке образца (N/N*) (σ_{max} =350 МПа) (x1000)

С использованием специально разработанной программы в MATLAB определялись информативные параметры микроструктуры металла, в частности, фрактальная размерность изображения микроструктуры D_F и относительная площадь Soth. образовавшихся в процессе усталостного нагружения дефектов микроструктуры и полос скольжения. Полученные зависимости показаны на рис. 2.



Рис. 2 Зависимость D_F (а) и Soth. (б) образовавшихся в процессе усталостного нагружения дефектов микроструктуры и полос скольжения от наработки (N/N*) образца

Полученные зависимости фрактальной размерности микроструктуры и относительной площади, образовавшихся в процессе усталостного нагружения дефектов и полос скольжения, отражают структурные изменения в материале, и могут быть использованы для неразрушающего контроля структурной поврежденности металла.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Терентьев, В.Ф., Кораблева С. А.* Усталость металлов. Ин-т металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова Российской акад. наук. Москва: Наука, 2015. 484 с.

2. *Кабалдин Ю.Г., Хлыбов А.А., Аносов М.С., Рябов Д.А.* Исследование усталостной прочности стали 09Г2С, полученной на основе трехмерной печати электродуговой наплавкой, в широком диапазоне пониженных температур // Черные металлы. 2022. №2. С. 42-48.

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЙ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ 3D И ЛИТОЙ СТАЛИ 09Г2С ПРИ МАЛОЦИКЛОВЫХ ИСПЫТАНИЯХ

© 2022 г. <u>Сташков Алексей Николаевич^{1*}</u>, Е. А. Щапова^{1**}, А. П. Ничипурук¹ ¹ – Институт физики металлов имени М. Н.Михеева Уральского отделения Российской академии наук, 620108, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18 * - stashkov@imp.uran.ru; ** - schapova@imp.uran.ru

Низколегированная конструкционная сталь 09Г2С используется при производстве сортового и листового проката и фасонных профилей повышенной прочности. Прокат, производимый из данной марки стали, зачастую используется для строительных конструкций разных форм и размеров. Высокая механическая прочность стали позволяет использовать более тонкие элементы по сравнению с использованием сталей прочих видов. Из стали 09Г2С изготавливают строительные конструкции, паровые котлы, нефте- и газопроводы. Сталь этой марки часто используется в производстве нефтепромышленного оборудования и разнообразных деталей сельскохозяйственных машин и оборудования. Материал применяется практически во всех сферах машиностроения и производства. Высокая температурная устойчивость позволяет использовать данный вид стали в температурном диапазоне от -70 до +450 ⁰C.

В последнее время все большее применение находят стальные изделия, изготавливаемые с помощью аддитивных технологий и применением лазерного 3D принтера. Свойства таких сталей отличаются от сталей такого же химического состава, но изготовленных «традиционными» методами (литьем, прокаткой) [1]. Целью данной работы являлось исследование поведения магнитных свойств 3D и литой стали 09Г2С, подвергнутых малоцикловым испытаниям при одноосном нагружении.

Исследования проводились на образцах из стали 09Г2С, изготовленных как литьем, так и на лазерном 3D принтере из исходного порошка. Часть литых образцов отжигалась при 650 0 C в течение 2 часов, другая часть подвергалась нормализации при 980 0 C в течение 1 часа. Часть 3D образцов отжигалась при 350 0 C в течение 3 часов для снятия внутренних механических напряжений, другая часть 3D образцов подвергалась нормализации от 980 C в течение 1 часа. Малоцикловые испытания проводили по схеме нагрузка-разгрузка. Нагрузка была растягивающая одноосная, для всех образцов она была выше предела текучести, но относительное его превышение для каждого из испытуемых образцов было разным (превышение предела текучести было от 20 до 70%). Измерение магнитных свойств до и во время циклических испытаний проводили на двух установках: Remagraph C-500 и магнитометрической установке для измерения обратимой магнитной проницаемости [2].

В результате исследований было установлено, что 3D сталь 09Г2С после

изготовления на лазерном 3D принтере имеет большую прочность ($\sigma B=1057 \text{ MIa}$) и низкую пластичность ($\delta=6\%$), что нехарактерно для стали 09Г2С, изготовленной по «традиционной» технологии. Испытания на малоцикловую усталость такой стали (при превышении предела текучести) невозможны. Нормализация при 980 ⁰C (1 час) снижает предел прочности 3D стали 09Г2С в 2 раза ($\sigma_B=502 \text{ MIa}$) и увеличивает относительное удлинение почти в 6 раз ($\delta = 34,6\%$), приближая эту сталь к литой стали 09Г2С.

Основные изменения магнитных свойств (H_c, B_r, µ_{max}) как литой, так и 3D стали наблюдаются на начальном этапе малоцикловых испытаний, дальнейшее увеличение количества циклов (вплоть до разрушения испытуемых образцов) не приводит к существенному изменению магнитных свойств. Характерно, что несмотря на разницу магнитных свойств недеформированных сталей, в конце малоцикловых испытаний значения магнитных свойств литой и 3D сталей становятся практически равны.

Характер изменения магнитоупругого поля Но, определенного из экспериментальных полевых зависимостей обратимой магнитной проницаемости, во время малоцикловых испытаний для литой и 3D сталей кардинально различается: для литой стали изменения невелики и носят неоднозначный характер, для 3D стали – изменения более существенны и однозначны (наблюдается рост Но при увеличении количества циклов).

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», №АААА-А18-118020690196-3) при финансовой поддержке РФФИ (проект №20-58-00015 Бел а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ничипурук А.П., Сташков А.Н., Щапова Е.А., Казанцева Н.В., Макарова М.В. Структура и магнитные свойства стали 09Г2С, полученной методом селективного лазерного сплавления // Физика твердого тела, 2021, том 63, вып. 11. С. 1719-1724. 2. Ничипурук А.П., Сташков А.Н., Кулеев В.Г., Щапова Е.А., Осипов А.А. Методика и устройство для безградуировочного определения величины остаточных сжимающих напряжений в деформированных растяжением низкоуглеродистых сталях// Дефектоскопия. 2017. №11. С. 20-27.

ДВУХОСНАЯ ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ МАШИНА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

© 2022 г. <u>Александр Николаевич Мушников*</u>, С. М. Задворкин, Е. Н. Перунов, Д. И. Вичужанин, Н. Н. Соболева

Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова УрО РАН, 620049, Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34 * - mushnikov@imach.uran.ru

Исследованиями возможности применения магнитных методов неразрушающего контроля для оценки напряженно-деформированного состояния металлоконструкций ученые занимаются с середины прошлого века. Однако зачастую в экспериментах рассматривали «простые» виды нагружения (одноосное растяжение или сжатие, кручение) или частные случаи сложнонапряженных состояний (например, трехосное напряженное состояние в стенке толстостенного сосуда, возникающее под действием внутреннего давления – в этом случае компоненты тензора напряжений связаны линейно). В реальных условиях ферромагнитные элементы конструкций могут быть подвержены более сложным воздействиям. Исследования влияния произвольного плоского напряженного состояния на магнитные характеристики с применением двухосных испытательных машин начались сравнительно недавно. Недостатком серийно выпускаемых испытательных машин является наличие большого количества ферромагнитных элементов в рабочей зоне. Намагничиваясь за счет магнитоупругого эффекта и под действием прикладываемых в экспериментах магнитных полей, детали машины будут вносить искажения в результаты следующих измерений. Это обуславливает актуальность создания специальной двухосной испытательная машины.

В работе представлен испытательный стенд на базе оригинальной двухосной испытательной машины и магнитоизмерительного комплекса. Предложена геометрия образца, позволяющая получить зону для измерений магнитных свойств с однородным напряженным состоянием. Получены зависимости коэрцитивной силы низкоуглеродистой стали от напряжений при независимом двухосном растяжении.

Наибольшие относительные изменения коэрцитивной силы наблюдаются при магнитных измерениях перпендикулярно к направлению приложения нагрузки, а изменения коэрцитивной силы при симметричном растяжении практически укладываются в погрешность измерений, независимо от направления магнитных измерений.

КОНТРОЛЬ ДЕФОРМАЦИИ И ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМИ ДАТЧИКАМИ

© 2022 г. <u>Федотов Михаил Юрьевич, к.т.н., чл.-корр. РИА^{1*}</u>

¹ – Российская инженерная академия (РИА), 125009, г. Москва, Газетный пер., д. 9, стр. 4 * - <u>fedotovmyu@gmail.com</u>, +7-909-691-12-88

Широкое применение полимерных композитных материалов (ПКМ) в различных отраслях промышленности приводит к необходимости совершенствования существующих и развития новых методов неразрушающего контроля (НК) и технической диагностики. Так, ПКМ, в частности углекомпозиты, наиболее целесообразно применять для изготовления высоконагруженных и ответственных авиационных конструкций, таких как панели крыла, фюзеляж, элементы хвостового оперения, мотогондолы и т.п. Вместе с тем, каждая конкретная конструкция в реальных условиях эксплуатации подвержена одновременному воздействию как силовых нагрузок, так и температуры. В связи с этим, актуальным вопросом является применение методов НК, позволяющих осуществлять одновременный контроль этих параметров с необходимой точностью. Это позволит в перспективе реализовать систему НК, обеспечивающую контроль напряженнотемпературного состояния конструкции в процессе эксплуатации, что позволит перейти от эксплуатации по заданному ресурсу к эксплуатации по фактическому техническому состоянию. Одним из наиболее эффективных методов НК, позволяющих обеспечить возможность одновременного контроля деформации и температуры является оптический метод с использованием встроенных в композитную конструкцию волоконно-оптических датчиков (ВОД) на основе волоконных брэгговских решёток (ВБР). Как известно, ВБР представляет собой сложную пространственную структуру, сформированную на участке волоконного световода (ВС) с геометрической длиной, как правило от 2 до 10 мм (рис.1).





Рис.1 – Структура ВБР [1]

ВБР с постоянным периодом Л в соответствии с условием фазового синхронизма (условие, при котором реализуется конструктивная интерференция электромагнитных волн дифрагированных на штрихах решетки) отражает распространяющееся по сердцевине излучение на длине волны [2]:

$$\lambda_{\rm B} = 2n_{\rm eff}\Lambda\,,\tag{1}$$

где $n_{\rm eff} \approx 1,45$ – эффективный показатель преломления основной моды BC; $\lambda_{\rm B}$ – резонансная длина волны BБР, которая для современных систем измерения, как правило, на основе BБР находится в диапазоне 1,5-1,6 мкм.

В общем случае λ_в зависит от двух параметров – деформации и температуры, что позволяет использовать такие системы на практике [3]. Основные методы, потенциально применимые к рассматриваемо задаче, подробно описаны в [4].

Для проведения экспериментальных исследований по одновременному контролю деформации и температуры ПКМ был выбран метод двух волокон, заключающийся в формировании ВОД на основе двух близкорасположенных разнолегированных ВС с ВБР, обладающих различной чувствительностью к деформации и температуре, либо к одному из этих параметров, при этом значения деформации и температуры однозначно определяются соотношением

$$\begin{bmatrix} \varepsilon \\ T \end{bmatrix} = \overline{K}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_{B1} / \lambda_{B1} \\ \Delta \lambda_{B2} / \lambda_{B2} \end{bmatrix}, \ \overline{K}^{-1} = \frac{1}{\det(\overline{K})} \begin{bmatrix} K_{T2} & -K_{T1} \\ -K_{\varepsilon 2} & K_{\varepsilon 1} \end{bmatrix},$$
(2)

где ε – относительная деформация, отн. ед.; *T* – температура, °C; индексы 1 и 2 обозначают характеристики 1 и 2 ВС соответственно; $K_{\rm T}$, пм/°C; K_{ε} , (мкм/м)⁻¹ – коэффициенты чувствительности ВОД к температуре и деформации.

Испытания на растяжение при одновременном изменении температуры от 30 до 120 °C конструктивно-подобных образцов из углекомпозита на основе среднемодульного углеродного жгута IMS65 24K и эпоксидного связующего с интегрированной парой волокон с ВОД на основе ВБР, сформированных на ВС SM1500P (легирование германием) и PS1250-1500 (легирование бором), показали, что предложенный метод контроля обеспечивает точность измерения температуры ~ 2 °C, деформации ~ 60 мкм/м.

ЛИТЕРАТУРА

1. Budadin O., Kozelskaya S., Vavilov V., Kuimova M., Fedotov M., Vasiliev S., Gnusin P. Theoretical and experimental studies of structural health monitoring of carbon composites with integrated optical fiber sensors based on fiber bragg gratings // Journal of Nondestructive Evaluation. 2021. T. 40. № 4. p. 1-11. <u>https://doi.org/10.1007/s10921-021-00822-5</u>.

2. *Botsis J.* Fiber Bragg grating applied to in situ characterization of composites // In book: Wiley Encyclopedia of Composites. 2011. P. 1-15. <u>https://doi.org/10.1002/9781118097298.weoc083</u>.

3. *Ramakrishnan M., Rajan G., Semenova Y., Farrell G.* Overview of fiber optic sensor technologies for strain/temperature sensing applications in composite materials // Sensors. 2016. V16(1). <u>https://doi.org/10.3390/s16010099</u>.

4. Федотов М.Ю., Будадин О.Н., Козельская С.О., Терентьев В.С. Методы одновременного контроля деформации и температуры композитных конструкций волоконно-оптическими датчиками // Конструкции из композиционных материалов. 2020. № 2 (158). С. 44-51.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИТЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ДЕФЕКТАМИ МЕТОДАМИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ТЕНЗОМЕТРИЕЙ

© 2022 г. <u>Сергей Алексеевич Бехер¹</u>*, А.Н. Курбатов, С.П. Шляхтенков, М.А. Гуляев, А.А. Попков ¹ – ФГБОУ ВО СГУПС, 630049 Новосибирск, Дуси Ковальчук, 191 * - behers@mail.ru

При периодическом диагностировании ответственных стальных конструкций методами неразрушающего контроля могут обнаруживаться ранее не выявленные дефекты. Подобная ситуация наиболее вероятна в литых конструкциях, имеющих грубую поверхность с остатками формы и окалиной. Актуальной проблемой является определение типа дефекта и получение количественной информации [1–4] для его достоверной классификации по степени влияния на эксплуатационные свойства объекта.

Цель исследования – определение методами неразрушающего контроля и средствами тензометрии параметров дефекта в литом несущем элементе пресса с максимальной нагрузкой 10 тыс. тонн.

Исследуемый дефект выявлен в труднодоступном месте – внутренней полости архитрава (поперечной балки) гидравлического пресса, отработавшего более 60 лет. Трещиновидный дефект протяженностью более 900 мм расположен в углу вертикальной стенки и ориентирован вдоль линии действия основной нагрузки.

Контроль области металла вблизи дефекта последовательно выполнен магнитопорошковым методом в приложенном поле приставным электромагнитом D310BDC Parker и флюоресцентной суспензией Lumor, вихретоковым методом дефектоскопом ВД-100 на частоте 70 кГц, ультразвуковым дефектоскопом УД2-102 прямым раздельно-совмещенным преобразователем с частотой 2,5 МГц. Тензометрия проводилась системой «Динамика-3» с подключенными по схеме «одиночный тензодатчик» фольговыми тензорезисторами базой 20 мм. Цена наименьшего разряда тензосистемы 0,15 МПа, среднее квадратическое отклонение – 0,5 МПа.

При магнитопорошковом контроле подтвержден трещиновидный дефект длиной 900 мм. Визуально установлен ветвистый характер с несколькими пересекающимися индикаторными следами, которые изменяют направление на противоположное. Вблизи нижней границы дефекта индикаторный рисунок имеет разрывы протяженностью (10 – 15) мм. В средней части индикаторный след имеет характерный ломаный вид. Для количественной оценки степени гладкости магнитной индикации предложено использовать фрактальную размерность. Для исследуемого дефекта фрактальная размерность составила $D = (1,07\pm0,01)$, что свидетельствует о ломаном характере индикации.

Вихретоковым и ультразвуковым методами определена глубина дефекта (табл. 1) в трех зонах: верхней, средней и нижней. Уверенная фиксация эхо-сигнала при контроле прямым преобразователем свидетельствует о наличии ненулевой проекции на поверхность сканирования. На глубине (9 – 20) мм характер дефекта становиться объемным с поперечным размером, сопоставимым с диаметром 2 мм бокового цилиндрического отверстия.

Таблица 1

№ зоны	Вихретоковый контроль		Ультразвуковой контроль	
дефекта	Амплитуда, дБ	Глубина, Ү, мм	Амплитуда, дБ	Глубина, Ү, мм
1	+3	6,1	+5	18,3
2	+2	4,8	+2	8,6
3	+2	4,5	+4	11,7

Результаты измерения глубины дефекта

В процессе работы пресса с использованием тензометрии определены продольные и поперечные дефекту поверхностные напряжения материала в области дефекта и на бездефектном участке на расстоянии 150 мм от вершины. При максимальной нагрузке 5 тыс. тонн напряжения материала не превышают 75 МПа, 1/3 предела выносливости при растяжении-сжатии стали марки 35Л.

Выводы. Прерывистый, ломаный и «ветвистый» характер индикаторного рисунка при магнитопорошковом контроле указывает на металлургические причины образования дефекта. После шлифовки дефекта на глубину 2 мм установлено визуально, что боковая поверхность дефекта темного цвета с плотной окалиной. Ультразвуковым методом показано, что дефект на глубине 9 – 20 мм имеет объемный характер с поперечным размером более 2 мм. По указанным признакам и с учетом его места расположения дефект классифицирован как усадочная раковина по ГОСТ 19200. Механические напряжения в материале пресса при рабочей нагрузке не превышают 1/3 предела выносливости стали марки 35Л.

ЛИТЕРАТУРА

^{1.} *Новослугина А.П., Смородинский Я.Г.* Расчетный способ оценки параметров дефектов в стали // Дефектоскопия. 2017. № 11. С. 13-19.

^{2.} *Качанов В.К., Соколов И.В., Карташев В.Г., Шалимова Е.В.* Применение специальных алгоритмов пространственновременной обработки сигналов при ультразвуковом контроле больших колоколов старинного литья // Дефектоскопия. 2018. № 5.С. 16—25.

^{3.} *Муравьев В.В.* Анализ результатов эксплуатации акустико-эмиссионных стендов для контроля литых деталей тележек железнодорожных грузовых вагонов // Интеллектуальные системы в производстве. 2013. № 1 (21). С. 136-143.

^{4.} Давыдов Д.М. Ультразвуковой контроль заготовок из литых сталей // Контроль. Диагностика. 2017. № 9. С. 32-38.

НОВЫЙ ПРИНЦИП ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ МЕТАЛЛА С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАЗВУКА И РАДАРА ДОПЛЕРА. ТЕЗИСЫ ДОКЛАДА НА XXXII УРАЛЬСКУЮ КОНФЕРЕНЦИЮ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ «ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ (ЯНУСОВСКИЕ ЧТЕНИЯ)» © 2022 г. <u>Малютин Николай Дмитриевич¹</u>, <u>Суторихин Владимир Анатольевич²**</u>,

^{1,2} – ТУСУР, 634050,г.Томск,пр. Ленина № 40 тел. 6-913-824-40-39, * - ndm@main.tusur.ru; ** - winddiad1@yandex.ru

Недавно был создан и прошел испытания новый индикатор активных дефектов металла на основе необычного явления природы, впервые предсказанного гипотезой Б.В. Васильева, В.Л. Любошица [1]. Группа профессора В.И.Горбунова сумела провести экспериментальное подтверждение выводов этой гипотезы. Построить и испытать прибор, который в состоянии определять дефекты на поверхности и внутри металла с помощью одновременного использования ультразвука и радара Доплера. В отличии от известного приема использования ультразвука в качестве объекта способного проникать в металл, отражаться от дефектов (неоднородностей) внутри и на поверхности, производить «засветку» возможных дефектов , сравнимых с длиной волны ультразвука, новый прибор работает за счет механического давления ультразвука на объем электронного газа, связанного с дефектом.

Специалистам в области неразрушающего контроля хорошо известен метод определения неоднородностей металла с помощью проникающего ультразвука. Размер этих неоднородностей может быть любым, но качественное определение этих объектов связано с длиной волны ультразвука, четверть волны которого не должна быть больше линейных размеров объекта. Или площадь объекта должна быть больше $\pi(\lambda/4)^2$ в направлении распространения ультразвука [2].

Известен и другой метод определения особых неоднородностей (дефектов) с помощью акустической эмиссии. В отличии от активного метода ультразвуковой дефектоскопии ультразвуковой сигнал рождается самим дефектов. Поэтому метод называется пассивной ультразвуковой локацией. Размеры дефектов в этом случае могут быть значительно меньше, чем при активной локации. Тем не менее, средняя частота сигналов акустической эмиссии для металлов находится в диапазоне 200-300 КГц. Имеется еще одна положительная особенность метода пассивной ультразвуковой локации, это тот факт, что нет необходимости обсуждать наличие дефекта поскольку он сам «заявляет» о себе в виде единичных или групповых сигналов, подобных ультразвуковым.

Термин «активный дефект» относится к методу акустической эмиссии и означает, что этот сигнал (его скорость счета) нарастает как линейная функция приложенного механического напряжения (мощности). А именно, мощность давления, изгиба, кручения, растяжения или сжатия.

Новый прибор показал свои преимущества при контроле качества металлических объектов. Состав установки прибора Дистанционный Индикатор Активных Дефектов (ДИАД) в составе: радара Доплера частоты 33 ГГц и генератора ультразвука частоты 45-50 КГц. Как известно, радар Доплера способен регистрировать изменение фазы отраженного СВЧ сигнала. Причем эти изменения могут возникать не только при движении объекта, но и при изменении отражательной способности, возникающей из за переменной поверхностной (или объемной) проводимости.

Практика применения прибора для индицирования дефектов металла (трещины, расслоения, микродефекты в виде наводораживания) доказала преимущества по сравнению с активными и пассивными методами ультразвуковой диагностики. Как оказалось на практике надежность определения дефектов практически соответствует методу акустической эмиссии, но не требует применения дополнительных механических усилий. Их заменяет сам ультразвук. Давления ультразвука мощности 15-20 Вт/см² вполне достоточно. Время определения дефекта оказывается весьма коротким, равным времени срабатывания радара Доплера, объединенного с анализатором спектра. Составляет 1-2 секунды.

Опыт использования прибора ДИАД пригодился при диагностике металлических изделий (гильз стрелкового оружия, заготовок циркониевых трубок для ТВЭЛов атомных электростанций). Слабая подготовка специалистов в области работы с новым прибором, обусловленная малой заинтересованностью отечественных источников информации, недоверием специалистов к возможностям нового прибора, Наконец. практическое отсутствие самих приборов как у нас в стране так и за рубежом, сдерживает развитие нового метода. Но, рано или поздно новое направление ультразвуковой диагностики, совмещенной с СВЧ радарами Доплера, займет свое место.

Литература

1*Васильев Б.В., Любошиц В.Л* Теорема вириала и некоторые свойства электронного газа В.Л в металлах //(Сессия РАН 23.02.1994 г.)/ Успехи Физических Наук, 4,(164), 1994, С. 367-374

2 Dopler Radar in Crack Testing, Vladimir Sutorikhin, Sergei Brichkov./British Journal of Applied Science & Technology,4(23), 2014,p.3315-3321

ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МЕТОДА ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

© 2022 г. <u>Алексей Алексеевич Антонов</u>^{1*}, А.А. Бондаренко¹, И.В. Стрельников², И.Ю. Уткин¹

¹-РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Россия 119991, Москва, Ленинский пр-т, 65 ²-АО «НПО Лавочкина», Россия 141402, Московская обл., Ленинградская ул., 24 * <u>trp91@rambler.ru -</u> e-mail;

ВВЕДЕНИЕ

Наличие высокого уровня остаточных напряжений влияет на работоспособность и долговечность сварной конструкции, которые могут приводить к усталостному разрушению, к коррозионному растрескиванию под напряжением, к нестабильности размеров. Поэтому информация о полях остаточных напряжений может существенно помочь в разработке технологических мероприятий, направленных на их снижение или перераспределения [1-3]. Метод состоит в изучении созданной при помощи лазера интерференционной картины поля деформаций при упругой разгрузке, возникающей после сверления зондирующего отверстия.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Поскольку современные способы оценки напряженного состояния методом лазерной интерферометрии дают относительно высокую погрешность для соединений с заведомо низким напряженным состоянием, то следует повысить чувствительность данного метода путем применения двух лазеров различных длин волн.

СУТЬ ОБСУЖДАЕМОЙ ПРОБЛЕМЫ

Основой для обработки результатов служит интерферограмма (рис. 1), представляющая собой картину, на которой видно зондирующее отверстие и отходящие от него черные интерференционные полосы. Расшифровка интерферограммы состоит в определении направления главных перемещений (соответственно, осей главных напряжений по X и V) и величине перемещений точек на кромке отверстия по этим осям. Величина перемещений точек на кромке отверстия по досчет числа интерференционных полос, пересекающих условные оси симметрии картины на интерферограмме, соответствующие направлению осей главных напряжений.

В ряде случаев, когда величина остаточных напряжений в исследуемой точке значительно текучести, чувствительности меньше предела даже повышенной метода лазерной интерферометрии оказывается недостаточно, чтобы относительно достоверно оценить напряженное состояние.

Каждая интерференционная полоса добавляет к значению перемещений точки на кромке отверстия величину, равную $\lambda/2$. Точность определения на кромке не зависит от числа полос и составляет диапазон, равный еще одной интерференционной полосе, т.е.

$$W = \left(N\frac{\lambda}{2}\right)_{-0}^{+\frac{\lambda}{2}},$$

где W – величина перемещения точки, лежащей на главной оси на кромке зондирующего отверстия, N – число интерференционных полос, λ – длина волны излучения лазера.



Рисунок 1.

а) Интерферограмма, полученная при работе лазерого диода с длиной волны 650 нм
б) Интерферограмма полученная при работе лазерого диода с длиной волны 532 нм

Т.е максимальная погрешность, независимо от числа подсчитанных полос, равна одной неучтенной (незамеченной на интерферограмме) интерференционной полосе.

Для дальнейшего повышения чувствительности предложено установить в интерферометре два лазера с разными длинами волн излучения и записывать интерферограммы для каждой воны излучения раздельно. Точность результата возрастает на разность между значениями остаточных напряжений, соответствующих цене деления полосы интерферограммы от конкретной длины волны.

В проведенном эксперименте были использованы лазерные диоды с длиной волн излучения 650 нм (красный спектр излучения) и 532 нм (зеленый спектр излучения) [4]. Пример двух полученных интерферограмм представлен на рисунке 1.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

При получении данных интерферограмм было использовано одно зондирующее отверстие диаметром 3,0 мм и глубиной 1,5 мм. В таблице 1 приведены результаты расчета напряженного состояния по вертикальной оси интерферограммы.

Таблица 1

i csysibiarbi pac icra besin innbi nanpakennoro cocroanna						
№ п/п	Длина волны, нм	Диаметр	Глубина	Цена	Число	Диапазон
		отверстия,	отверстия,	интерференционной	интерференционных	напряженного
		ММ	MM	полосы, МПа	полос	состояния, МПа
1	650	3,0	1,5	12,13	2	24,26 - 36,39
2	532	3,0	1,5	9,93	3	29,79 - 39,72
2	Одновре	20.70 26.70				
3	зондирующего отверстия					29,79 - 30,79

Результаты расчета величины напряженного состояния

Таким образом, в данном случае, нам удалось повысить точность определения значения напряженного состояния с разброса значения в 50% от расчетной величины для красного спектра излучения и 33% для зеленого спектра излучения до величины до 23% при комплексном применении двух лазеров с разными длинами волн.

ВЫВОДЫ.

1. Формирование двух спекл-интерферограмм от лазеров с разными длинами волн излучения позволяет снизить погрешность измерения, обусловленную дискретностью оценки остаточных напряжений при подсчете интерференционных полос.

2. Определение остаточных напряжений по двум спекл-интерферограммам от лазеров с разными длинами волн излучения возможно проводить оперативно и в полевых условиях.

3. Конструкция лазерного интерферометра и его оптическая схема практически не изменяется. Вместо одного лазера в интерферометр монтируются два лазера с разными длинами волн излучения.

4. Оценка остаточных напряжений от лазеров с разными длинами волн особенно важно для случаев, когда величины напряжений малы (аддитивные технологии, лазерная сварка, сварка трением с перемешиванием) или, когда необходимо точное измерение (отработка технологий наклепа, вибростабилизации, лазерной поверхностной закалки и т.д.).

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Антонов А.А. Оперативная оценка и исследование напряженно-деформированного состояния сварных соединений объектов нефтегазового комплекса // Сварочное производство, 2010. № 5. С. 23–27.
- 2. Пономарёв К.Е., Стрельников И.В. К вопросу выбора экспериментального метода оценки остаточных напряжений в сварных конструкциях // Сварка и Диагностика. 2018. № 2. С.29-34.
- 3. Антонов А.А., Капустин О.Е., Уткин И.Ю. Развитие метода лазерной интерферометрии, предназначенного для оценки остаточных напряжений в сварных конструкциях // Дефектоскопия. 2020. №5. С. 45-51.
- 4. Антонов А.А., Стрельников И.В. Способ определения внутренних остаточных напряжений и устройство для его осуществления. Патент на изобретение RU 2712929 C1.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СИЛИЦИРОВАННОГО ГРАФИТА

Александр Анатольевич Хлыбов¹, И. А. Иляхинский², С.Н. Пичков^{1,2}, А.В. Иляхинский³

 ¹Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (НГТУ), Россия 603950 Нижний Новгород, ул. Минина, 24
 ²АО «Опытное конструкторское бюро машиностроения имени И.И. Африкантова» (АО «ОКБМ Африкантов»), Россия 603074 Нижний Новгород, Бурнаковский пр., 15
 ³Институт проблем машиностроения РАН, Россия 603024, Нижний Новгород, Белинского 85

E-mail: ¹*hlybov_52@mail.ru*, ³ilyahinsky-aleks@bk.ru

Для обеспечения надежной и безопасной работы пар трения используются материалы, обладающие высокой окислительной стойкостью, высокой прочностью и способностью работать в ряде агрессивных сред. Представителем таких материалов является силицированный графит (SiSiC), технология получения которого состоит из пропитки предварительно сформованной углеродной заготовки жидким кремнием с образованием композитного материала с керамической матрицей. При получении материала происходит одновременно несколько процессов - смачивание жидким кремнием поверхности углеродной основы и его растекание, пропитка, взаимодействие углерода и кремния с образованием карбида кремния, насыщение расплава кремния углеродом и другие химические реакции [1,2]. Сложность протекающего процесса приводит к тому, что практически всем силицированным графитам присущ один существенный недостаток: это невозможность получения равномерного распределения физико-механических свойств по всему объему получаемого материала. Это отрицательно сказывается на выходе годных изделий, обеспечивающих длительную и стабильную работу в сложных условиях эксплуатации: высокие температуры, коррозионная среда. Применение рентгеновского контроля заготовок данного материалов позволяет выявить такие дефекты, как непросилицированные участки, раковины, трещины, участки «непропрессова», но не дает однозначного ответа на вопрос о состоянии структуры силицированного графита. Использование рентгеновского контроля также невозможно в процессе эксплуатации. В тоже время по условиям обеспечения безопасной эксплуатации разрушение недопустимо.

Анализ и апробирование методов неразрушающего контроля показал, что структура карбидокремниевых материалов оказывает существенное влияние на скорость и затухание упругих волн [3,4].

Измерения подшипников насосов, имеющих разрушение на рабочей поверхности, показали, что скорость упругих волн (дефектоскоп фирмы Krautkramer USN 52).в разных

местах этой поверхности имеет разные значения. При этом наибольшее значимое отклонение скорости до 15 % от ее среднего значения для всей рабочей поверхности наблюдается в зоне разрушения.

Измерения электропроводности по поверхности рабочей части этого же подшипника (дефектоскоп ВД-2А с датчиком 2 кГц) показали, что результаты изменения скорости звука и электропроводности в одних и тех же точках рабочей части подшипника совпадают. При этом превышение значения измеренного параметра электропроводности в зоне разрушения составляет 40%.

Таким образом, результаты проведенных исследований позволили разработать методику неразрушающего контроля пар трения из силицированного графита. Методика, в основе которой лежит измерения скорости звука и электропроводности, внедрена в производственный процесс и позволяет выявить на рабочей поверхности подшипников потенциальные места будущего возможного разрушения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гнесин Г.Г. Карбидокремниевые материалы. М.: Металлургия, 1977. 216 с.

2. Шикунов С.Л. Получение и использование новых карбидокремниевых материалов для различных применений // Материаловедение. 2012. № 5. С. 51—57.

3. Иляхинский И.А., Бугреев А.В., Иляхинский А.В., Родюшкин В.М. Неразрушающий контроль структуры карбидокремниевографитового композита акустическим методом // Атомная энергия. 2015. Т. 119. Вып. 6, С. 336-339

4. Хлыбов А.А.,. Иляхинский И.А Неразрушающий контроль изделий из карбидокремниевых материалов // Дефектоскопия, 2019, №1 С. 39-43

ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ТРЕЩИН В РЕЛЬСОВЫХ СТАЛЯХ

 © 2022 г. Барат Вера Александровна^{1,2*}, А. Ю. Марченков^{1**}, В. В. Бардаков^{1,2***} ¹ – ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», 111250 Москва, ул. Красноказарменная, д.17 ² – ООО «Интерюнис-ИТ», 111024 Москва, шоссе Энтузиастов, д. 206 * - vera.barat@mail.ru; ** - art-marchenkov@yandex.ru; *** - bardakovvv@interunis-it.ru

В рамках данной работы было проведено экспериментальное исследование акустической эмиссии (АЭ) трещин железнодорожных рельсов при нагружении, имитирующем проезд вагона поезда. Исследовались образцы, представляющие собой фрагменты рельса P43 толщиной 10±1 мм. Всего было испытано 12 образцов, из них 3 без дефекта, а 9 с искусственно выращенными усталостными трещинами длиной до 2,5 мм. Нагружение образцов производили циклическим сжатием по программируемому циклу, имитирующему проезд вагона [1]. Регистрация АЭ сигналов осуществлялась с помощью системы A-Line-32 с преобразователями GT200. Уровень акустического шума после установки образца в захваты испытательной машины составил 30 дБ, порог амплитудной дискриминации был установлен равным 45 дБ.

При испытании бездефектных образцов наблюдалась активность АЭ, выраженная импульсами амплитудой 45-55 дБ и малой длительностью, до 350 мкс (рис.1а). Импульсы регистрировались, преимущественно в фазе возрастания нагрузки с активностью не более 25-30 импульсов за цикл. При испытании образцов с дефектом регистрировались импульсы амплитудой до 80 дБ, причем активность наблюдалась и при повышении, и при понижении нагрузки. Импульсы АЭ, соответствующие образцам с дефектом, имели большую длительностью ~1-3 мс, также регистрировались импульсы с амплитудной модуляцией (рис.1б), источником которых может быть трение берегов трещины.





Активность АЭ при нагружении бездефектных образцов может быть объяснена наличием неметаллических включений, которые были выявлены при микроскопическом исследовании (рис.2а). Исследование излома рельса с помощью сканирующего электронного микроскопа позволило установить, что большую часть неметаллических включений составляют сульфиды марганца и комплексные силикаты марганца, которые могут существенно влиять на активность АЭ при нагружении даже в упругой области [2].



Рис. 2. Неметаллические включения в продольном сечении образца

Показательным диагностическим признаком являются также распределения амплитуд импульсов АЭ. Распределение, полученное для бездефектных образцов, соответствует экспоненциальному закону (рис.3а), что является характерным для стадии рассеянного разрушения и подтверждает гипотезу о влиянии структурного шума. При появлении трещины распределение амплитуд в каждом цикле нагружения соответствует полунормальному закону (рис.3б).



Рис.3 Распределение амплитуд а. для бездефектного образца б. для образца с трещиной

Появление трещины приводит к увеличению активности АЭ и изменению характера распределения амплитуд импульсов. Присутствие нескольких источников АЭ, связанных с ростом трещины, трением берегов, а также наличие структурного шума, приводит к нормализации закона распределения амплитуд импульсов АЭ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного Фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-38-51019.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Marchenkov A.Yu., Barat V.A., Sharikova M.O.*, Poroykov A.Yu Optical diagnostics of railway rail defects. Journal of Physics: Conference Series. "16th International OMFI 2021" c. 012044. 2. *Ono K., Yamamoto M.* Anisotropic mechanical and acoustic emission behavior of A533B steels // Materials Science and Engineering. 1981. Vol. 47. pp. 247-26.

ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ТРАКТА ПРИ КОНТРОЛЕ ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ КОЛЕСА РЭЛЕЕВСКИМИ ВОЛНАМИ

© 2022 г. Андрей Валерьевич Платунов, В.К. Грязев

ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т.Калашникова», 426069 г. Ижевск, ул. Студенческая, д.7 e-mail: uosp@mail.ru

Ультразвуковой контроль поверхности катания цельнокатаных колес и бандажей эхо-методом с использованием поверхностных волн [1] широко распространен на предприятиях по ремонту подвижного состава, при этом очевидны преимущества: не требуется сканирование, высокая производительность. Однако на практике при увеличении координаты отражателя амплитуда эхо-сигнала может как возрастать, так и уменьшаться, в связи с чем у оператора возникают трудности интерпретации и понимания результатов контроля; краткое описание и примеры дефектограмм в нормативной документации не дают ответов на возникающие вопросы.

Целью работы являлся расчет и анализ акустического тракта пьезопреобразователей поверхностных волн, выявление закономерностей распространения волны по ограниченной цилиндрической поверхности.

Полученные результаты. На диаграммах направленности пьезопреобразователей рэлеевских волн, рассчитанных с использованием [2] и полученных экспериментально, дополнительно к основному и боковым присутствует побочный лепесток, ориентированный противоположно направлению излучения – так называемый «задний». С его использованием регистрируется второй сквозной сигнал, прошедший поверхность катания дважды, от амплитуды которого зависит коэффициент автоматического усиления дефектоскопа, и, в конечном счете – усиление амплитуды эхо-сигнала от дефекта.

Относительная амплитуда волны, излучаемой или принимаемой «задним» лепестком, зависит от параметров аппаратуры; это влияние более выражено при отклонении ширины прямоугольного пьезоэлемента преобразователя и изменении частоты в рамках 20%, допускаемых ГОСТ Р 55724-2013. Таким образом, два преобразователя одного типа, но несколько отличающиеся по АЧХ, могут быть одинаково эффективны при излучении в основном направлении, но отличаться при приеме волн «задним» лепестком. Например, при отклонении частоты на 5% амплитуда может отличаться на 6 дБ, при отклонении частоты на 20% - на 12дБ.

Рассчитана модель акустического тракта рэлеевской волны, отразившейся от дефекта на поверхности катания колеса. Показано, что амплитуда эхо-сигнала изменяется неравномерно: локальные максимумы, полученные экспериментально, достигают 9 дБ относительно монотонной экспоненциальной зависимости, характерной для рэлеевской

волны, распространяющейся на безграничной поверхности (рис.1). Причиной таких явлений являются многократные переотражения волн от границ (фаска обода, переход к гребню) и дальнейшая их интерференция. Экспериментальные данные хорошо коррелируют с расчетными.



Рисунок 1 – Модель распределения амплитуд интерферирующих волн в результате их отражения от границ с учетом ослабления ультразвука

Выводы. Амплитуда эхо-сигнала, отраженного от дефекта на поверхности катания колеса (бандажа) меняется немонотонно с увеличением пройденного расстояния волной по причине интерференции расходящейся релеевской волны с многократными переотражениями от границ контролируемой зоны. Неточность изготовления или согласования ПЭП может повлиять на чувствительность и, как следствие, на величину коэффициента усиления, определяемого по второму сквозному сигналу.

ЛИТЕРАТУРА

 Дымкин Г.Я., Гурвич А.К., Костюк О.М. Способ ультразвукового контроля цилиндрических изделий. Патент на изобретение №2032171. Бюл. изобр. №9, 1995.
 Буденков Г. А., Недзвецкая О. В. К расчету пьезопреобразователей рэлеевских волн // Дефектоскопия. 1992. № 10.С. 76—81.

ПРИМЕНЕНИЕ ДЕФЕКТОСКОПА УЛЬТРАЗВУКОВОГО МНОГОКАНАЛЬНОГО АВГУР-АРТ В РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

© 2022 г. Дмитрий Сергеевич Тихонов^{1*}, А.Е. Базулин^{1**}, С.А. Коколев^{1***}

¹ – ООО «НПЦ «ЭХО+», 123458, г. Москва, улица Твардовского, 8 * - dtikh@echoplus.ru; ** - android@echoplus.ru; *** - kokolev@echoplus.ru

Универсальный ультразвуковой многоканальный дефектоскоп АВГУР-АРТ разработанный и производимый ООО «НПЦ «ЭХО+» реализует технологии ФАР, ЦФА (TFM), TOFD, TRL, DMA, зональный контроль. Количество независимых каналов составляет от 32 до 64 и коммутируемых каналов от 64 до 128, реализованы две пары каналов TOFD, что позволяет решить большую часть задач УЗК в промышленности. Дефектоскоп существует в портативном исполнении с ярким экраном диагональю 13". Вес дефектоскопа в комплекте с двумя аккумуляторами составляет 7 кг. Разъем IPEX со 128 контактами совместим с большинством импортных дефектоскопов и фазированных решеток.

Портативный дефектоскоп АВГУР-АРТ работает под управлением одноплатного компьютера, что позволяет сделать его «цифровым» сердцем системы неразрушающего контроля, подключать любые периферийные устройства по протоколам USB, ETHERNET, WiFi, GPRS, CANBUS:

- модули автоматизированного визуального контроля;
- видеокамеры;
- краскоотметчики, звуковая и световая сигнализация;
- сканирующие устройства с сервоприводами.

В случае необходимости для автоматизированного контроля управление дефектоскопом передается внешнему управляющему компьютеру, расположенному в безопасном месте.

Программное обеспечение систем серии АВГУР построено на основе базы данных, содержащей информацию об объекте контроля, применяемом оборудовании, методике контроля, параметрах данных контроля и выявленных дефектов. Поддерживается выдача заключений и дефектограмм по формам, регламентированным действующей в РФ нормативной документации.

Редактор схем контроля в составе программного обеспечения позволяет создавать электронную технологическую карту контроля с указанием параметров контролируемого объекта, преобразователей, призм, углов прозвучивания.

Поддерживаются все способы выравнивания чувствительности по плоскодонным и боковым отверстиям, сегментным отражателям, построение ВРЧ, ПРЧ, расчет двухмерных АРД-диаграмм в режиме фазированной решетки.

Дефектоскоп АВГУР-АРТ поддерживает сбор данных, синхронизированный с показаниями до трёх квадратурных энкодеров и обеспечивает механизированный и автоматизированный ультразвуковой контроль любых изделий, для которых возможна такая механизация и автоматизация с помощью сканирующих и роботизированных устройств:

- стыковые, угловые, тавровые сварные соединения трубопроводов и сосудов;
- основной металл трубопроводов и сосудов;
- изделия из композитных материалов.

Среди примеров применения дефектоскопов АВГУР-АРТ в 2021-2022 гг можно выделить:

- контроль кольцевых сварных соединений магистральных газопроводов диаметром от 159 до 1420 мм, толщинами от 6 до 42 мм;
- контроль кольцевых сварных соединений плакированных газопроводов

диаметром от 426 мм, толщиной 20 мм;

- контроль кольцевых сварных соединений оборудования и трубопроводов АЭС (диаметры от 108 до 4000 мм, толщины от 6 до 145 мм);
- контроль стыковых и тавровых сварных соединений конструкции испытательной камеры ИТЭР (материал – нержавеющая сталь, толщины от 8 до 300 мм);
- контроль сварных швов приварки бобышек (велдолетов);
- контроль сварных соединений корпусов судов (Х-образная разделка, толщина 20 мм);
- контроль изделий из композитных материалов для гражданской авиации;
- контроль труб из полиэтилена высокого давления;
- контроль основного металла изделий из циркониевых сплавов толщиной 3-6 мм;
- контроль основного металла жаропрочных труб (159х6);
- контроль изделии из бронзы БрХ0,8.



Рис.1 Общий вид дефектоскопа АВГУР-АРТ

Современные отечественные решения в области автоматизированного и механизированного ультразвукового контроля с применением технологий ФАР, ЦФА, ТОFD позволяют решать задачи выявления и определения параметров дефектов в сварных швах и основном материале, в том числе в сварных соединениях из аустенитных материалов, решать задачи контроля объектов со сложной геометрией (патрубки, внутренние проточки, трубные доски).

Дефектоскоп АВГУР-АРТ успешно прошел испытания в Госстандарте РФ, АО Концерн «Росэнергоатом», ПАО «Газпром» и готов к решению рутинных и нестандартных задач ультразвукового контроля, в том числе в качестве импортозамещающего оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Базулин А. Е., Базулин Е. Г., Коколев С. А. и др. Система автоматизированного контроля «АВГУР-АРТ» – от искусства новых возможностей к практической диагностике // Ультразвуковая дефектометрия. 25 лет: юбилейный сб. тр. ООО НПЦ «ЭХО+» / под ред. А. Х. Вопилкина. М.–СПб.: СВЕН, 2015. С. 76 – 85.

2. Базулин А. Е. и др. «Применение технологии TOFD в разработках ООО «НПЦ «ЭХО+» // Контроль. Диагностика, 2020, том 23, № 5.

КОНТРОЛЬ НАВОДОРОЖИВАНИЯ ФЕРРОМАГНИТНОЙ СТЕНКИ

© 2022 г. Сергей Энгелевич Бабкин

Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, 426000, г.Ижевск, ул.Кирова, 132, e-mail: babkin@udman.ru

В связи с развитием водородной энергетики встает проблема контроля наводороживания металлических изделий, используемых при производстве и хранения водорода. Как известно, наводороживание приводит к хрупкости металлов, что увеличивает риск техногенных катастроф.

При наводороживании металлов меняются их физическо-механические свойства свойства, что может быть использовано для косвенного контроля содержания водорода [1]. В работе [2] предлагается для этого использовать метод электромагнитноакустического преобразования (ЭМАП). Показано, что объемное наводороживание хорошо выявляется как, в резонансном, так и в импульсном вариантах преобразования. Так при 6-часовом катодном наводороживании ферромагнитных материалов, таких как Армко-железо, сталь, никель,- амплитуда принятого сигнала падает от 25 до 75% к исходному.

Отдельной является проблема прохождения водорода сквозь металлическую стенку. При этом наводороживание идет с внутренней стороны стенки (например, резервуара), а контроль надо проводить с внешней стороны.

В данной работе предлагается использовать для этой цели импульсное ЭМАП поверхностных волн Рэлея. Была собрана установка для одностороннего наводороживания плоских образцов Армко-железа и перминдюра 49КФ2 одинакового размера, но разной толщины. Катодное наводороживание проводилось по стандартной методике при плотности тока 15мА/см²[3]. Наводороживание проводилось в течении 6 часов. Через каждый час процесс останавливался, образец вынимался, и снимались показания ЭМАП приставным П-образным датчиком поверхностных волн [4]. Информационный параметр – амплитуда принятого сигнала после двойного ЭМАП.

Затем образец помещался обратно в установку и наводороживание продолжалось. ЭМА датчик работает в раздельном режиме на частоте ЗМГц, что соответствует для указанных материалов длине волны Рэлея около 1мм.

Результаты эксперимента показали, что на стороне наводороживания падение амплитуды ЭМА сигнала идет в режиме объемного наводороживания [2]. За 6 часов амплитуда плавно падает для Армко-железа на 25%, а для перминдюра на 28-30%.

Показания ЭМА сигнала на обратной стороне зависит от толщины образца. Для тонких образцов (2мм) кривая падения амплитуды повторяла график зависимости наводороживаемой стороны с небольшим запаздыванием. Для образцов толщиной 4мм реальное падение сигнала заметно только после 4-5 часов наводороживания и составляет около10%. Для образцов толщиной 5мм даже после 6 часов наводороживания падение амплитуды не фиксировалось или было на уровне ошибки (3%).

Это позволяет оценить возможности метода. Если при 6-часовом наводороживании насыщение водорода в металле оценивается в 15 ppm (единицы измерения насыщенности водородом), а начальное насыщение 0 ppm, то насыщению соответствует изменение амплитуды на 25%. Значит изменение амплитуды на 3% соответствует примерно наводороживанию в 2 ppm. Таким образом, предельная чувствительность ЭМА метода по водороду в ферромагнетиках составляет 2 ppm.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гельд П.В., Рябов Р.А., МохрачевЛ.П. Водород и физические свойства металлов и сплавов. М.: Наука, 1985, 232 с.

2. ИльясовР.С., Лебедева М.Ю., Бабкин С.Э., Бурнышв И.Н. О возможности использования методик электромагнитно-акустического преобразования для оценки степени наводороживания ферромагнетиков //Химическая физика и мезоскопия, 2012, Т.14, №2, с.237-242.

3. *Бурнышев И.Н., Абрамов К.А.* Об акустической эмиссии при наводороживании малоуглеродистой стали //Письма в ЖТФ, 2009, Т.35, вып.2, с.90-94.

4. Бабкин С.Э., Ильясов Р.С. и др. Устройство для бесконтактного возбуждения и приема волн Рэлея в ферромагнетиках // Дефектоскопия. 1989. № 6.С. 93-94.
МЕТОД ВИЗУАЛИЗИРУЮЩЕЙ МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ПЛЕНКИ. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ.

© 2022 г. В. А. Новиков¹*, <u>Андрей Владимирович Шилов</u>¹**, А. В. Кушнер¹***.

¹Белорусско-Российский университет, 212030, Могилев, Проспект мира,30. *e mail: *- novikovva@tut.by; e mail: **- shilov.andrej.80@gmail.com; - e mail: *** - kushnerandrej@tut.by.*

Цель работы – ознакомить с основными результатами исследований и перспективами применения метода контроля, основанного на использовании визуализирующей магнитные поля пленки.

Пленка содержит немагнитную основу, к которой прикреплены миниатюрные капсулы, содержащие гель. В нем находятся частицы слабомагнитного металла никеля. В зависимости от расположения частиц никеля пленка по-разному отражает падающий свет. Если частицы расположены параллельно поверхности пленки, то она окрашивается в светлые тона, а если перпендикулярно, то становится темной.

Метод контроля заключается в фиксации индикаторных рисунков дефектов на пленке, помещенной на намагниченный объект. Остановимся на наиболее важных результатах исследований, а также перспективах применения метода контроля:

– при тангенциальном намагничивании объекта на пленке, даже если она находится в нескольких миллиметрах от поверхности объекта, возникают вызванные магнитными полями рассеяния дефектов индикаторные рисунки, которые позволяют распознать вид несплошностей, установить их расположение, отличить компактные дефекты от протяженных;

– в зависимости от угла наблюдения индикаторные рисунки протяженных дефектов имеют вид светлых полос, по обе стороны которых располагаются темные полосы, или прилегающих друг к другу темных и светлых полос;

– посередине межполюсного пространства электромагнита на пленке наблюдается узкая светлая полоса, аналогичная индикаторному рисунку, вызванного полем протяженного дефекта, т. к. при приближении к полюсам увеличивается нормальная составляющая внешнего поля, и пленка темнеет. Если увеличить расстояние между полюсами электромагнита, то зона однородного поля увеличится, пленка намагнитится более равномерно, и светлая полоса исчезнет. Это объясняет причину отсутствия помехи на пленке, когда электромагнит и пленка находятся с разных сторон пластины;

– определены условия контроля изделий толщиной до 30 мм, позволяющие уверенно обнаруживать дефекты: расстояние между полюсами электромагнита – не меньше 200 мм; напряженность поля, создаваемого электромагнитом при отсутствии объекта – 500 ... 650 А/см; индикаторные рисунки дефектов нужно фотографировать в приложенном поле при постоянной чувствительности матрицы цифровой камеры и угле наблюдения α ≤ 40°.

– установлен основной информативный параметр пленки– коэффициент диффузного отражения света r, равный отношению отраженного светового потока от пленки к падающему. Изменение r(x) поперек индикаторного рисунка дефекта имеет вид остроконечного импульса с двумя минимумами по обе стороны. Аналогично изменяется H_{τ} магнитного поля у поверхности объекта с дефектом. Поэтому r(x) можно использовать для оценки величины и глубины залегания дефектов в ферромагнитных объектах;

– разработаны теоретические и экспериментальные основы количественной оценки величины и глубины залегания дефектов в ферромагнитных объектах путем компьютерной обработки изображений их индикаторных рисунков на пленке, созданы технические средства и методики магнитного контроля стальных деталей и заготовок с поверхностью в состоянии поставки после литья; – установлены два информативных параметра индикаторного рисунка дефекта – приращение коэффициента диффузного отражения света от пленки и расстояние между его минимумами. Глубину залегания дефекта определяют по предварительно построенному графику зависимости глубины залегания несплошности от расстояния между минимумами r(x), а о величине дефекта h_d судят по предварительно построенному графику зависимости h_d от приращения r(x). Появилась возможность определять величину плоских дефектов наружной и внутренней поверхности в объекте толщиной до 30 мм, а также диаметр внутренней несплошности и глубину ее залегания.

Для определения количественных характеристик дефектов с помощью пленки, визуализирующей магнитные поля, была разработана методика экспериментальных исследований и спроектирована и изготовлена установка. Установка состоит из электромагнита постоянного тока с П-образным сердечником, на полюсах которого располагается контролируемый образец с уложенной на его поверхность визуализирующей магнитные поля пленкой, светодиода и стабилизированного по току источника питания, светофильтра и двояковыпуклой линзы, помещенных в корпус, цифровой камеры и устройства обработки информации. Магнитную пленку освещал и с помощью оптической системы. которая позволяла получить на выходе параллельный пучок света. Фотографирование изображений индикаторных рисунков дефектов на пленке, помещенной на объект, производили в приложенном поле электромагнита. Съемка выполнялась в темном помещении, чтобы исключить влияние посторонних источников света. Из полученного цифрового изображения индикаторных рисунков дефектов были попиксельно считаны в массив значения интенсивности излучения, пропорциональные диффузно отраженному от пленки световому потоку Φ_r , затем цифровую камеру устанавливали навстречу световому излучению Φ_0 . Строили график зависимости коэффициента диффузного отражения света от расстояния поперек индикаторного рисунка дефекта [1].

В настоящее время визуализирующая магнитные поля пленка большого формата (210×297 мм) производится в Российской Федерации, ее можно многократно использовать, а также длительное время хранить полученные на ней изображения индикаторных рисунков дефектов. Авторы провели сравнение возможностей российской пленки и пленки «Flux-detector», наиболее уязвимые поверхности которых были ламинированы, при контроле объектов с реальными дефектами сплошности. Установлено, что в приложенном магнитном поле более четкими и контрастными получаются изображения индикаторных рисунков дефектов на пленке "Flux-detector", а при контроле на остаточной намагниченности – на пленке ООО НПК "ПРОФ-МАГНИТ".

Метод визуализирующей магнитные поля пленки не требует предварительной механической подготовки поверхности объекта (даже стального литья), позволяет осуществлять оперативный контроль объектов, производить дефектоскопию под водой, на большой высоте, во взрывоопасных помещениях, определять наличие измененных номеров кузовов автомобилей.

Метод контроля реализован при дефектоскопии стальных литых заготовок опор рамы автомобиля «БелАЗ», ножей куттерных LASKA FLT-330, деталей железнодорожного транспорта.

Результаты исследований показывают, что метод визуализирующей магнитные поля пленки имеет большие перспективы широкого применения в промышленности для дефектоскопии ферромагнитных объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1 Пат. 21905 С1 ВҮ, МПК G 01N 27/85. Способ магнитографической дефектоскопии объекта и устройство для его осуществления /В.А. Новиков, А.В. Шилов; заявитель и патентообладатель Белорусско-Российский ун-т.–№ а20130262; заявл.04.03.2013; опубл. 28.02.2018, Бюл. № 6.– 8с.

Ахмеджанов Равиль Абдрахманович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск

О совершенствовании технологии магнитопорошкового контроля бандажа колес локомотива

В условиях деповского ремонта внутреннюю обточенную поверхность бандажа перед его нагревом и прессованием подвергают магнитопорошковому контролю в приложенном магнитном поле.





Контроль выполняют с помощью стенда (рис. 1) для поворота бандажа, навешенного своей внутренней поверхностью на поверхности роликов привода поворота, закрепленных на корпусе стенда, и седлообразного соленоида типа МД-12ПС с подвеской над контролируемой поверхностью бандажа. При этом соленоид опускают так, чтобы между дугообразной поверхностью соленоида и поверхностью бандажа обеспечивался зазор 40...60 мм, затем включают соленоид и наносят суспензию с обеих сторон в пределах зоны достаточной намагниченности. Дают стечь суспензии и осматривают поверхность указанной зоны.

Очевидно, что свободно вращающийся бандаж создает потенциальную опасность съезда его с роликов и падения на обслуживающий персонал. Кроме того, подвес седлообразного соленоида на качающейся штанге или тросе исключает нормальное его позиционирование на контролируемые участки бандажа с установлением допустимого зазора, навес и съем очередного контролируемого бандажа технологически затруднен, имеет место отсутствие четких механизмов связи работы оператора с движением бандажа, его позиционирования и выставления упомянутого зазора.

Предложено вместо операции подвешивания ставить бандаж 1 (рис. 2 и 3) на опорные ролики 2 с размещением его обода между прижимными роликами 6, смонтированными на торцах вертикальных направляющих 4, а седлообразный соленоид 9





оборудовать манипулятором, выполненным в виде дугообразного рычага 10, шарнирно закрепленного на раме 5 и снабженного приводом поворота, например, В виде пневматического цилиндра 11, корпус 11 и шток 12 которого шарнирно связаны соответственно с рамой 5 и рычагом 6. Его концевая его часть соединена посредством кронштейна 13 с корпусом соленоида 9 с возможностью перемещения последнего в вертикальной плоскости, проходящей через центр и поперек бандажа. При этом вал ведомого опорного ролика 2 связан с входом энкодера, выходом присоединенного к управляющему входу пускателя привода поворота бандажа через формирователь импульса останова, генерируемого в момент превышения зоны достаточной намагниченности контролируемой поверхности бандажа. Запуск очередного шага сканирования осуществляется нажатием кнопки на пульте оператора.

Предложенная конфигурация снимает стенда радикально опасность опрокидывания И съезда бандажа И технологические трудности оператора на начальном (постановка бандажа) И конечном (съем бандажа) этапах контроля с повышением точности установления упомянутого зазора. Кроме того, достигнутая автоматизация сканирования контролируемой поверхности бандажа позволяет снизить интенсивность работы оператора и сосредоточить его внимание на операциях визуализации и анализа магнитных индикаций, что способствует повышению достоверности магнитопорошкового контроля бандажа.

ПРИМЕНЕНИЕ ВИХРЕТОКОВОГОКОНТРОЛЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ОБОРУДОВАНИЯ ИЗ КРИОГЕННЫХ СТАЛЕЙ

©2022г.<u>Владимир Анатольевич Захаров</u>^{1*}, К.В.Захаров^{2**}

¹РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 119991, Москва, Ленинский пр-т, д. 65 ²ИСМАН имени А.Г.Мержанова РАН, 142432, Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 8 *-v.a.zaharov@inbox.ru

** - zakharov@ism.ac.ru

Криогенная сталь - сталь, предназначенная для работы при температурах ниже минус 70 ^оС до минус 269 ^оС [1]. В зависимости от химического состава и диапазона рабочих температур согласно ГОСТ Р 58915 криогенные стали подразделяют на: - стали легированные специальные (экономнолегированные никелем) марок 0Н6Б. 0Н9,

0Н9Б;

- стали нержавеющие аустенитного класса, имеющие структуру аустенита:

а) хромоникелевые стали марок 08Х18Н10Т и 12Х18Н10Т:

б)хромомарганцевые стали марки 10Х14Г14Н4Т;

в)сложнолегироеанные стали повышенной прочности марок: 03X17H14M3. 03X20H16AГ6, 07X21Г7AH5.

Техническими условиями на указанный стандарт предусматривается, что остаточная магнитная индукция листов в состоянии поставки не должна превышать 0,005 Тл, а стали марок 03X17H14M3. 03X20H16AГ6, 07X21Г7AH5. 08X18H10T. 10X14Г14H4T и 12X18H10T следует контролировать на содержание ферритной фазы.

В качестве материалов для оборудования сжиженного природного газа при температуре -163°С авторами работы [2] рекомендуется использовать стали с содержанием 5–9% (по массе) никеля (хромоникелевые и хромомарганцевые стали). При этом, для обеспечения надежности, долговечности и безопасной эксплуатации технических устройств важнейшими критериями являются стабильность фазового состава, ударная вязкость при рабочих температурах, технологичность в процессе производства оборудования.

По требованиям ASMEB31.3 для материалов из аустенитных нержавеющих сталей (AISI типа 304, 316) указывается, что регистрационные записи сварочных процедур должны включать измерения ферритной фазы, содержание феррита должно находиться в диапазоне 3-15 FA.

Таким образом, для правильного выбора материального исполнения, выбора и коррекции технологических процессов изготовления криогенного оборудования,

вызывающих изменения структуры аустенитных нержавеющих сталей (в том числе фазового состава), требуется соответствующееконструкторско-технологическое обеспечение на всех этапах технологической цепочки: от исходных элементов к узлам и готовому изделию.

Исследования, выполненные в ИФМ УрО РАН, показали возможность использования российских ферритометров как для контроля фазы феррита, так и для определения ферритного числа на изделиях из аустенитных и аустенитно-ферритных сталей [3].

Объектом исследования выбран змеевик из хромоникелевой аустенитной стали, предназначенный для замены иностранного аналога в составе установки подготовки и сжижения попутного нефтяного газа. Обследование объекта включало анализ технической и эксплуатационной документации, визуально-измерительный контроль и идентификацию, особое внимание уделялось вихретоковому контролю ферритной фазы сварных соединений. Установлено, что в процессе изготовления и при эксплуатации необходим контроль над изменениями структуры и фазового состава металла, поскольку они могут претерпевать заметные изменения под воздействием различных триботехнических факторов, соблюдение и контроль заданного содержания ферритной фазы может обеспечить требуемый уровень технологических И эксплуатационных свойств оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 58915-2020. Прокат толстолистовой из криогенных сталей. Технические условия.

2. Вознесенкая Н. М., Тонышева О. А., Елисеев Э. А.. Современные конструкционные стали криогенного назначения и влияние некоторых легирующих элементов на их свойства (обзор) //Труды ВИАМ, 2020, №1 (85).

3. Ригмант М.Б., Ничипурук А.П., Худяков Б.А., Пономарев В.С., Терещенко Н.А., Корх М.К. Приборы для магнитного фазового анализа изделий из аустенитных коррозионностойких сталей // Дефектоскопия, 2005, № 11, с. 3—14.

повышение локальности метода «точечного полюса»

© 2022 г. Сергей Григорьевич Сандомирский^{1*}

¹ – Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Академическая, 12 * - sand_work@mail.ru

Неразрушающий анализ структуры крупногабаритных стальных изделий и чугунных отливок основан на локальном измерении их коэрцитивной силы [1]. Одним из методов намагничивания изделий для этого является метод «точечного полюса» [2] и реализующие его приборы [2 – 4], например, «Магнитный сортировщик MC» (рис. 1).



Рисунок 1 – Прибор «Магнитный сортировщик МС»

Недостаток приборов – не высокая локальность намагничивания изделия – связан с тем, что в формирование намагниченного «пятна» изделия вовлекаются участки, расположенные за пределами площадки контакта известных устройств с поверхностью изделия, и эти участки не намагничиваются до технического насыщения.

Цель доклада – разработка и анализ устройства, повышающего локальность намагниченного участка на изделии при его «точечном» намагничивании.

Разработанное устройство (рис. 2), содержит стержневой постоянный магнит 1, намагниченный перпендикулярно своей рабочей поверхности, и экран 2, изготовленный из магнитомягкого материала, охватывающий боковую поверхность магнита [5]. Плоскость расположения торцевой поверхности экрана совпадает с плоскостью рабочей (контактирующей с поверхностью изделия 3) поверхностью магнита. Экран и магнит выполнены одинаковой длины и их торцевые поверхности, противоположные рабочей поверхности магнита, расположены в одной плоскости и замкнуты между собой магнитным шунтом 4 из магнитомягкого материала. Плоскость расположения торцевой поверхности экрана совпадает с плоцадь *S*_Э сечения экрана, параллельного рабочей поверхности магнита, обеспечивает концентрацию в нем практически всего магнитного потока от магнита.

Для намагничивания изделия осуществляют контакт поверхности изделия с рабочей поверхностью устройства, которое после этого удаляют от изделия.



Рисунок 2 – схема устройства [5] и зависимость градиента ∇Н⊥ поля остаточной намагниченности диска из стали 3 диаметром 196 мм толщиной 34 мм после его намагничивания устройством от площади *S*_Э сечения экрана

Подмагничивание магнита полем охватывающего его не рабочую поверхность экрана увеличивает намагниченность магнита и эффективность намагничивания локального участка изделия. При намагничивании силовые линии магнитной индукции, сосредоточенные в магните, через его магнитный полюс N и изделие замыкаются на магнитный полюс S', индуцированный на торцевой поверхности экрана магнитным полюсом N магнита. При этом в формировании локально намагниченного «пятна» изделия участвуют только его области, расположенные под местом контакта рабочей поверхности устройства с поверхностью изделия, которые при этом намагничиваются до магнитного насыщения. Следствием усиления локализации «пятна» остаточной намагниченности на поверхности изделия и лучшего намагничивания его материала является увеличение (рис.2) градиента ⊽Н⊥ нормальной составляющей поля остаточной намагниченности на поверхности изделия после его полюсного намагничивания устройством [5] по сравнению с намагничиванием изделия только магнитом.

Устройство повышает локальность намагничивания изделия и остаточную намагниченность контролируемого участка, достоверность контроля механических свойств изделий за счет усиления коэрцитиметрического эффекта метода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гобов Ю.Л., Жаков С.В., Михайлов А.В. Измерение коэрцитивной силы в локальной области образца // Дефектоскопия. 2017. №11. С. 27-32.

4. Сандомирский С.Г., Цукерман В.Л., Линник И.И., Сандомирская Е.Г. Универсальный магнитный сортировщик и его применение для решения задач неразрушающего контроля // Контроль. Диагностика. 2004. № 8. С.27-31.

^{2.} *Сандомирский С.Г.* Применение полюсного намагничивания в магнитном структурном анализе (обзор) // Дефектоскопия. 2006. № 9. С.36-64.

^{3.} *Матюк В.Ф.* Приборы магнитной структуроскопии на основе локального однополярного импульсного намагничивания // Неразрушающий контроль и диагностика. 2012. № 2. С.28-64.

^{5.} *Сандомирский С.Г.* Устройство для локального намагничивания изделия из ферромагнитного материала: пат. на изобр. 25573 Респ. Беларусь // Аф. бюл. 2021. № 6.

ПРЕДПОСЫЛКИ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА УПРОЧНЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС МЕТОДОМ «ТОЧЕЧНОГО ПОЛЮСА»

© 2022 г. <u>Сергей Григорьевич Сандомирский^{1*}, Александр Леонидович Валько^{1**},</u> <u>Сергей Петрович Руденко^{1***}.</u>

¹ – Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Академическая, 12 * - sand_work@mail.ru, ** - valcoalex5@gmail.com, *** - sprud.47@mail.ru

Для обеспечения требуемого ресурса зубчатых колес регламентируют поверхностную твердость и эффективную толщину $h_{э\phi\phi}$ цементованного слоя [1]. Эти величины определяют прочность и технологию термообработки цементируемых зубчатых колес. Прямые методы определения механических свойств и структуры являются разрушающими. Их не используют для контроля качества изделий, предназначенных для эксплуатации. Разработке достоверной и надежной методики неразрушающего контроля $h_{э\phi\phi}$ посвящен настоящий доклад.

Известны магнитные методики определения толщины упрочненного слоя [2, 3]. В [3], например, показано, что изменение ее величины в наибольшей степени влияет на напряженность тангенциальной составляющей поля на поверхности объекта в межполюсном пространстве постоянного магнита, а изменение физико-механических свойств слоя – на величину магнитного потока в цепи «преобразователь-объект». Это различие магнитных параметров предложено использовать для селективного контроля качества поверхностного упрочнения.

Но для цементованного слоя важен лишь один параметр – его эффективная толщина $h_{3\phi\phi}$, за которую принимают металлографически определяемое расстояние от поверхности до области с содержанием углерода 0,35%, а после закалки – расстояние от поверхности до зоны, имеющей твердость 50 HRC [1]. Поэтому возможна разработка более простого неразрушающего метода контроля качества цементации, основанного на использовании метода «точечного полюса».

В [4] исследовано влияние продолжительности цементации образцов из стали 18ХГТ, используемой для изготовления зубчатых колес трансмиссий мобильных машин, на $h_{3\phi\phi}$ диффузионного слоя. Установлено совпадение $h_{3\phi\phi}$ до и после закалки. С применением прибора «Сортировщик магнитный МС-1», измеряющего градиент ∇H^{\perp} нормальной составляющей поля остаточной намагниченности над местом контакта полюса постоянного магнита с поверхностью металла, установлена (рисунок) зависимость между $h_{3\phi\phi}$ исследованных образцов и ∇H^{\perp} .

Статистическая обработка результатов исследований проведена в программе Microsoft-XL. Полученные результаты показали, что между *h*_{эфф} исследованных образцов и ∇Н⊥ имеется тесная корреляционная зависимость, которая имеет более выраженный

характер (увеличение $h_{3\phi\phi}$ вызывают большее увеличение $\nabla H\perp$) при использовании прибора MC-1 до закалки изделий (рисунок а). Это объясняется увеличением твердости (в 2 – 5 раз в зависимости от расстояния до поверхности) и коэрцитивной силы цементированной стали при закалке и снижением глубины ее намагничивания постоянным магнитом преобразователя прибора MC-1.



Рисунок – Линии тренда (полиномы 2-й степени) зависимостей показаний (∇Н⊥·10⁻⁵, А/м²) прибора МС-1 от *h*_{эфф} цементированного слоя после цементации (а) и после цементации и закалки (б) образцов из стали 18ХГТ

Глубина и локальность промагничивания изделия может быть увеличена использованием разработанного преобразователя [5], в котором стержневой постоянный магнит помещен в жестко с ним скрепленный полузамкнутый магнитомягкий экран, плоскость расположения торцевой поверхности которого совпадает с плоскостью рабочей поверхности магнита, а толщина экрана обеспечивает концентрацию в нем практически всего магнитного потока от постоянного магнита.

Полученные результаты являются предпосылкой разработки методики неразрушающего контроля процесса цементации зубчатых колес трансмиссий мобильных машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. СТБ 2307-2013 Поверхностно-упрочненные слои металлических деталей. Методы измерения толщины. – Минск: Госстандарт, 2013. 16 с.

2. Неразрушающий контроль : справочник : в 8 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. – Т. 6: в 3 кн. – Кн. 1: Магнитные методы контроля / В. В. Клюев [и др.]. – М.: Машиностроение, 2003. 848 с.

3. Бызов А.В., Ксенофонтов Д.Г., Костин В.Н., Василенко О.Н. Селективный магнитный контроль толщины и степени упрочнения поверхностных слоев на стальных объектах // Дефектоскопия. 2021. № 12. С. 39–45.

4. Сандомирский С.Г., Валько А.Л., Руденко С.П. Анализ влияния продолжительности цементации на эффективную толщину цементованного слоя и магнитный параметр стали 18ХГТ после закалки // Механика машин, механизмов и материалов. 2020. № 3. С. 71–77.

5. *Сандомирский С.Г.* Устройство для локального намагничивания изделия из ферромагнитного материала: пат. на изобр. 25573 Респ. Беларусь // Аф. бюл. 2021. № 6.

ВИХРЕТОКОВЫЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ПОДМАГНИЧИВАНИЕМ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ НА СЛАБОМАГНИТНОМ ОСНОВАНИИ

© 2022 г. <u>Соломенчук Павел Валентинович</u>^{1*}, Ступин Сергей Сергеевич² ¹ – ООО «Константа», 198098 Санкт-Петербург, Огородный пер., 21 ² – Санкт-петербургский Горный университет 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2 * - pavel257@mail.ru, +7 (812) 372-29-03

Для измерения толщины диэлектрического покрытия на немагнитном основании аустенитной стали 12Х18Н10Т применяются параметрические вихретоковые ИЗ преобразователи (ВТП). Однако, в случае пескоструйной обработки основания перед нанесением покрытия, в приповерхностном нагортованном слое основания выпадает мартенсит деформации, который придает основанию слабомагнитные свойства, значение относительной магнитной проницаемости основания возрастает ЛО 1.15...1.2. Слабомагнитные свойства основания оказывают влияние на сигналы ВТП, что приводит к возникновению значительной погрешности измерения толщины покрытия, которая не может быть учтена ноль-калибровкой в виду разброса магнитных свойств по поверхности объекта контроля, зависящих от интенсивности пескоструйной обработки.

Для подавления магнитных свойств основания, предлагается применить подмагничивание основания с помощью постоянного магнита, расположенного в корпусе ВТП возле обмоток. При этом магнитное поле постоянного магнита намагничивает мартенситные включения практически до уровня технического насыщения, тем самым уменьшая значение относительной магнитной проницаемости до ≈ 1 вне зависимости от того, какое оно было на поверхности основания после пескоструйной обработки.

Графическое представление конечно-элементной модели ВТП представлено на рис. 1.



Рис. 1 – графическое представление конечно-элементной модели ВТП, 1 - постоянный магнит, 2 – защитный керамический элемент, 3 – обмотка ВТП, 4 – объект контроля

Параметры постоянного магнита и конструкция ВТП рассчитаны с применением конечно-элементного моделирования и уточнены в ходе экспериментальных работ.

В рамках доклада подробно описаны: конструкция ВТП, основные этапы и результаты его моделирования, результаты практических испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Филиппов М.А., Литвинов В.С., Немировский Ю.Р. Стали с метастабильным аустенитом. М.: Металлургия, 1988.- 255 с.
- Влияние деформации прокаткой и одноосным растяжением на структуру, магнитные и механические свойства армко-железа, стали 12Х18Н10Т и составного материала "сталь 12Х18Н10Т - армко-железо-сталь 12Х18Н10Т" / Э. С. Горкунов, С. М. Задворкин, Е. А. Коковихин [и др.] // Дефектоскопия. – 2011. – № 6. – С. 16-30.

РЕНТГЕНОВСКИЙ КОМПЛЕКС КОНТРОЛЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ НА БАЗЕ МАЛОГАБАРИТНОГО БЕТАТРОНА

<u>Казак Алексей Олегович*.</u>, Екимов Ю.М. Малышев М.А. ФГУП «РФЯЦ–ВНИИТФ», г.Снежинск, ул.Васильева 13 *89227424584, vniitf@vniitf.ru (Для Казака А.О.)

Рентгеновский контроль позволяет определять дефекты в заготовках, деталях, а также контролировать взаимное положение элементов сложных структур до и после воздействия на них различного типа нагрузок (виброиспытания, ударные и т.п.). Высокая энергия имеющихся в «РФЯЦ-ВНИИТФ» малогабаритных установок, используемых совместно с цифровыми комплексами радиографии на основе фосфорных пластин, позволяет проводить контроль состояния внутренних элементов крупногабаритного промышленного оборудования, деталей, отливок. В докладе рассмотрены имеющиеся источники излучения, примеры исследуемых крупногабаритных объектов контроля и их рентгенографические изображения.

ОПТИЧЕСКАЯ ПРОФИЛОМЕТРИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ ПОСЛЕ ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ

© 2022 г. <u>Наталья Николаевна Соболева¹*</u>, Н. А. Давыдова¹, А. В. Макаров^{1,2}
 ¹ – Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук, 620049, Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34
 ² – Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, 620108, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18

 * - паtashasoboleva@list.ru

Формирование хромоникелевых покрытий на поверхности деталей машин и инструмента является эффективным методом повышения износо- и коррозионной стойкости изделий. Нанесение покрытий может быть осуществлено многими методами, популярным из которых в настоящее время является лазерная наплавка. Покрытия, созданные лазерной наплавкой, в большинстве случаев характеризуются существенной волнистостью и шероховатостью, что устраняется шлифовкой их поверхности, имеющей недостатки. Поэтому ранее авторами работы была предложена финишная фрикционная обработка хромоникелевых покрытий скользящими инденторами.

При фрикционной обработке возможно изменение параметров обработки, в частности, материала индентора, нагрузки на индентор, кратности сканирования поверхности индентором. При этом важно получить поверхностный слой не только с повышенной твердостью и износостойкостью, но и низкой шероховатостью и отсутствием процессов схватывания и разрушения поверхностного слоя. Неразрушающий контроль последних двух характеристик эффективен с использованием оптической профилометрии. В работе представлено использование для этого бесконтактного профилометра-профилографа Optical profiling system Veeco WYKO NT 1100, работающего по принципу интерферометрического микроскопа.

В работе показано, что проведение даже однократного сканирования поверхности при подобранных фрикционной обработки индентором режимах уменьшает шероховатость поверхности по сравнению с полированным состоянием. Повышение нагрузки на индентор может приводить к возникновению режима схватывания, что контролируется не только по параметрам шероховатости (Ra – среднее арифметическое отклонение профиля, Rt – максимальная высота профиля и др.), но и по 3-d профилограммам. Кроме того, оптическая профилометрия позволяет определить глубину продавливания поверхностного слоя индентором в результате фрикционной обработки, что важно учитывать для оценки конечных размеров при изготовлении прецизионных изделий.

ОЦЕНКА СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ УЧАСТКОВ ЗОНЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

© 2022 г. <u>Александр Викторович Гончар</u>^{1*}, М.С. Аносов^{2**}, Д.А.Рябов^{2***} ¹ – Институт проблем машиностроения РАН филиал ФГБНУ «ФИЦ ИПФ РАН», 603024 г. Н. Новгород, улица Белинского, 85

² – Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603950 г. Н. Новгород, улица Минина, 24 * - avg-ndt@mail.ru; ** - anosov-maksim@list.ru; *** - ryabovdm1996@gmail.com

Большое количество изделий машиностроения получено с использованием сварки. В зоне термического влияния после сварки наблюдается значительный градиент физикомеханических характеристик материала, вследствие особенностей формирования в ней микроструктуры материала. Зона термического влияния (ЗТВ) сварки является наиболее слабым местом в конструкционном материале. В связки с этим, в процессе эксплуатации конструкции, необходимо иметь данные о фактическом состоянии материала в различных участках ЗТВ и остаточном ресурсе материала. Одним из наиболее информативных методов оценки структурного состояния является метод оптического наблюдения и контроля наиболее нагруженных участков в конструкции с использованием количественных параметров микроструктуры. Целью исследования является оценка структурных изменений при механических испытаниях участков ЗТВ сварного соединения.

Для исследования процесса статического и усталостного нагружения различных участков ЗТВ сварных соединений в качестве материала для исследования выбрана сталь марки СтЗ, широко применяемая для изготовления сварных конструкций. Образцы для испытаний были получены из различных участков ЗТВ, а именно из участка перегрева и нормализации, где наблюдается соответственно наибольший и наименьший размер зерна. Для цифровой обработки изображений микроструктуры рабочей зоны в процессе испытаний образца была разработана программа в среде MATLAB [1]. Программа позволяет проводить расчет концентрации образовавшихся в процессе испытаний дефектов и полос скольжения (n) (мм⁻²), а также их относительной площади Sorth. в процентном соотношение к площади анализируемого изображения.

Наибольший интерес представляет анализ эволюции микроструктур в процессе упругопластического циклического деформирования различных участков ЗТВ СтЗ. Микроструктуры рабочей зоны образца в исходном состоянии и в момент появления магистральной трещины показаны на рис. 1 для анализируемых участков. При усталостном нагружении, уже на начальном этапе, наблюдается образование большого

количества полос скольжения и микротрещин, анализ которых проводили с использованием указанных количественных показателей микроструктуры (рис. 2).



Рис. 1 Структурные изменения в процессе усталостного нагружения участка перегрева и участка нормализации ЗТВ при различной наработке образца в исходном состоянии (а, в) и в момент образования макротрещины (б, г) ($\sigma_{max} = 250 \text{ M}\Pi a$) (x500)

Образование макротрещины наблюдается при наработке порядка 0,85 и 0,7 для участка перегрева и нормализации ЗТВ соответственно.



Рис. 2 Зависимость относительной площади Sorn. (а) и удельного количества n (б) дефектов и полос скольжения в изображении микроструктуры от наработки образца на участках перегрева (1) и нормализации (2) 3TB

При усталостном нагружении различных участков ЗТВ наблюдается монотонное увеличение общего количества и относительной площади полос скольжения и микродефектов в структуре ст. 3 (рис. 2), вплоть до образования магистральной трещины. После появления магистральной трещины Sorth. практически не изменяется, а удельное количество дефектов и полос скольжения в структуре снижается, прежде всего, за счет слияния отдельных дефектов и полос скольжения в процессе роста усталостной трещины.

Таким образом, рассчитанные количественные показатели могут быть использованы в качестве информативных параметров для оценки структурной поврежденности и наработки материала в различных участках ЗТВ сварного соединения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 21-79-10395.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Gonchar A.V., Andreeva O.V., Anosov M.S.* Study of fatigue failure of construction steels by using modern methods of digital processing of microstructural images. Materials Today: Proceedings. ICMTMTE 2020. 2021. C. 1701-1705.

НАМАГНИЧИВАНИЕ РАЗНОРОДНЫХ КРУПНЫХ ОБЪЕКТОВ КОНТРОЛЯ

© 2022 г. Татьяна Валерьевна Победа

ГОУ ВО ЛНР «Луганский государственный университет им. В. Даля», 91034, ЛНР, г. Луганск, кв. Молодёжный, 20 А pobeda-tatyana@rambler.ru

Намагничивание разнородных объектов контроля (ОК), каким является короткозамкнутый (КЗ) ротор асинхронного двигателя (АД), является сложной практической задачей. Для КЗ роторов характерны дефекты технологического и эксплуатационного характера, что связано с особенностями их производства, разнообразными областями их использования и условиями эксплуатации.

Для намагничивания КЗ ротора наиболее подходящей является разомкнутая система колец Гельмгольца, которая позволяет создать магнитное поле необходимой величины, обеспечивает возможность сканирования поверхности КЗ ротора электромагнитной системой и позволяет поворотному устройству поворачивать ротор на необходимый угол [1, 2].

Для многовитковой круглой катушки прямоугольного сечения примем равномерным распределение плотности тока *j* по площади поперечного сечения обмотки и запишем напряженность поля в виде:

$$H_{z} = jR_{1}k_{0} \left[1 + k_{2} \frac{u_{2}}{R_{1}^{2}} + k_{4} \frac{u_{4}}{R_{1}^{4}} + ... \right],$$

$$H_{\rho} = jR_{1}k_{0} \left[-k_{2} \frac{v_{2}}{R_{1}^{2}} - k_{4} \frac{v_{4}}{R_{1}^{4}} - ... \right],$$
(1)

где R_1 – внутренний радиус катушки, k_n – коэффициенты, определяемые числом катушек в системе и их геометрией, v_n - координатные функции по координате ρ [3, 4].

В выражении (1) координатные функции u_n , v_n являются однородными гармоническими многочленами степени *n* относительно декартовых координат (x, y, z). Обозначив через $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ расстояние от контрольной точки, в которой необходимо определить величину поля, до оси системы устройства намагничивания (УН), координатные функции выразим следующим образом:

$$u_{2} = \frac{1}{2} (2z^{2} - \rho^{2}), \quad u_{4} = \frac{1}{8} (8z^{4} - 24z^{2}\rho^{2} + 3\rho^{4}), \quad \dots,$$

$$v_{2} = z\rho, \quad v_{4} = \frac{1}{2} z\rho (4z^{2} - 3\rho^{2}), \quad \dots$$
(2)

Используя соотношения (1) и задаваясь координатными функциями (2) $u_n(z, \rho)$, $v_n(z, \rho)$, определим распределение поля между катушками УН. В силу аксиальной, а также дополнительной симметрии системы относительно центральной плоскости определим напряженность поля *H* только в одном квадранте системы намагничивания, результаты представим в табл. 1.

Таблица 1

<i>х, м</i> <i>у, м</i>	0,1	0,15	0,2
0	48300	48550	50000
0,1	48150	48200	48400
0,15	47730	47750	48000

Напряженность магнитного поля, создаваемого УН, А/м

По результатам табл. 1 построен график распределения напряженности магнитного поля в пространстве между катушками УН (рис. 1).



Рис. 1. Распределение напряженности магнитного поля, создаваемого УН, по оси X (у=0)

На графике можно выделить область 100-150 мм в центре УН, которая наиболее приемлема для проведения контроля стержней КЗ роторов, где неоднородность магнитного поля составляет 2,5-3%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Победа Т.В. Электромагнитный контроль стержней короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя: дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.11.13. – Луганск, 2014. – 191 с. 2. Герасимов В.Г., Покровский А.Д., Сухоруков В.В. Неразрушающий контроль: в 5 кн. – М.: Высшая школа, 1992 – Кн.3: Электромагнитный контроль: практ. пособие; под ред. В.В. Сухорукова. – 312 с.

3. *Нейман Л.Р., Демирчян К.С.* Теоретические основы электротехники: учебник для вузов. Том 2. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд., 1981. – 416 с.

4. Афанасьев Ю.В., Студенцов Н.В., Хореев В.Н., Чечурина Е.Н., Щелкин А.П. Средства измерений параметров магнитного поля. Л.: Энергия. Ленингр. отделение, 1979. – 320 с.

РАЗРАБОТКА ПЕРВИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ

© 2022 г. Гоголинский К.В. ^{1*}, <u>Голев Артём Сергеевич</u> ^{1**}, Сясько В.А. ^{1***}, Уманский А.С. ^{1****}, Шакирзянова Д.Р. ^{1*****}

¹ - Санкт-Петербургский горный университет, 199106 Санкт-Петербург, Bacuльевский остров, 21 линия дом 2 * nanoscan@yandex.ru; **artemgolev1999@gmail.com; *** 9334343@gmail.com; **** refreshermd@gmail.com; *****dinara.shakirzyanova@yandex.ru

Измерение механических свойств материалов безобразцовыми методами непосредственно на контролируемых объектах в условиях производства или эксплуатации является широко востребованной задачей. Такими объектами являются: сварные соединения нефтегазовых трубопроводов, ответственные элементы подъёмнотранспортного оборудования и многие другие.

В настоящее время эта задача решается с помощью портативных твердомеров [1]. Одним из наиболее распространенных типов портативных твердомеров является твердомеры по шкалам Либа [2]. Их недостатком является то, что твердость по Либу является одновременно функцией пластических и упругих свойств материала и может быть сопоставлена со статическими шкалами твердости (Бринелля, Роквелла или Виккерса) только эмпирически для строго определенных материалов. Альтернативой данного метода является метод динамического инструментального индентирования (ДИИ), предложенный в [3]. Однако в настоящее время серийные приборы, реализующие метод ДИИ, отсутствуют.

В представленной работе решалась задача разработки первичного преобразователя для неразрушающего контроля механических свойств методом ДИИ путем модернизации ударного преобразователя (УП) твердомера по шкале Либа.

Принцип работы ударного преобразователя твердомера Либа в соответствии с [4] основан на том, что ударник, содержащий постоянный магнит, падает нормально к поверхности объекта испытания (ОИ), соударяется с ним и отскакивает. Пролетая через измерительную катушку постоянный магнит наводит в ней электродвижущую силу (ЭДС), пропорциональную скорости. Твердость по методу Либа рассчитывается по формуле (1).

$$HL = \frac{V_R}{V_A} \cdot 1000, \tag{1}$$

где V_R – скорость отскока ударника, V_A – скорость падения ударника.

Предложен способ модернизации ударного преобразователя (УП) Либа и способ обработки сигнала для реализации метода ДИИ [5].

Способ обработки сигнала заключается в численном дифференцировании и интегрировании временной зависимости скорости ударника в процессе контакта с поверхностью ОИ. Скорость ударника вычисляется из измеренной временной зависимости ЭДС, умноженной на коэффициент пропорциональности, определяемый независимой калибровкой [6]. Зависимость силы взаимодействия ударника с ОИ от глубины внедрения P(h), аналогичная формату представления данных в методе инструментального индентирования [7], строится на основе данных, полученных интегрированием (глубина h) и дифференцированием (ускорение a) графика скорости. Сила P определяется из произведения массы ударника и ускорения. Анализ кривой P(h) позволяет рассчитать максимальную и остаточную глубины внедрения ударника, рассеиваемую и упругую энергии удара, геометрические параметры отпечатка и максимальную нагрузку при ударе [3].

Для реализации описанного способа обработки сигнала были заменены металлические элементы УП (упорное кольцо и направляющая трубка) на неметаллические и изменено положение измерительной катушки относительно опоры УП, что позволило линеаризовать сигнал [5].

Для подтверждения предложенной методики был проведён эксперимент с использованием модернизированного УП Либа на трёх образцах (алюминиевом, латунном и стальном) твердостью по шкале Виккерса 30, 78 и 206 HV соответственно Полученные результаты показали возможность использования модернизированного УП Либа для реализации метода ДИИ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gogolinskii K.V., Syasko V.A., Umanskii A.S., Nikazov A.A. and Bobkova T.I. Mechanical properties measurements with portable hardness testers: advantages, limitations, prospects. 2019 Journal of Physics Conference Series 1384:012012. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1384/1/012012.

2. Leeb D. Dynamic hardness testing of metallic materials. NDT Int. 1979, 12, 274–278.

3. *Rudnitskii V.A., Rabtsevich A.V.* Method of dynamic indentation for evaluating the mechanical characteristics of metallic materials. Russ. J. Nondestruct. Test. 1997, 33, 266–271.

4. ISO 16859-1:2015, Metallic materials — Leeb hardness test — Part 1: Test method, MOD.

5. Aleksander Umanskii, Gogolinskii Kirill, Syasko Vladimir and Golev Artem. 2022. "Modification of the Leeb Impact Device for Measuring Hardness by the Dynamic Instrumented Indentation Method" Inventions 7, no. 1: 29. https://doi.org/10.3390/inventions7010029.

6. *Gogolinskii K., Syasko V., Umanskii A., Kazieva T., Gubskiy K., Kuznetsov A., Gluhov R.* Impactor velocity measurement system for dynamic hardness testers and calibration machines on Leeb scales. Measurement 2021, 173, 108632. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108632.

7. *Oliver W. C., Pharr G. M.* A new improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and sensing indentation experiments // J. of Mater. Res. — 1992. — 7, No. 6. — P. 1564—1582. https://doi.org/10.1557/JMR.1992.1564.

АНАЛИЗ АПЕРТУРНОЙ ФУНКЦИИ РАССЕИВАЮЩЕГО ОБЪЕМА КОЛЛИМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ АЛЬБЕДНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ С КОЛЬЦЕВЫМ ДЕТЕКТОРОМ

Журавский Е.Е. Белкин Д.С., НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ, ТОМСК, РОССИЯ, zhuravskiy@tpu.ru. Научный руководитель Чахлов С.В.

Введение

Радиационный контроль (РК) на комптоновском обратном рассеянии (КОР) применяется в различных областях промышленности: аэрокосмической, нефтегазовой, досмотровом контроле. РК на КОР применяется для выявления в действующих стальных нефтепродуктопроводах коррозионных и эрозионных разрушений, обнаружения арматуры в бетоне – там, где применение других видов контроля является не невозможным или их применение не обеспечивается требуемую достоверность результатов контроля. Известная установка для альбедной компьютерной томографии (АКТ) Гамбургской лаборатории ComScan фирмы "Philips позволяет контролировать при одностороннем доступе изделия из стали с глубиной контроля до 3 мм, из алюминия с глубиной контроля до 10 мм, при напряжении на рентгеновской трубке E_{max} =160 кВ. Повысить контролируемую толщину стальных объектов, возможно, в том числе, благодаря изменению конструкции коллимационной системы (КС). Изменение конструкции заключается в применении кольцевого детектора.



Рис. 1 – геометрия формирования потока обратно—рассеянного излучения

Методы и средства исследований

Общий процесс формирования поля обратнорассеянного излучения представлен на рис. 1 Излучение с эффективной энергией E_{eff} от анода рентгеновской трубки падает перпендикулярно на границу Т, и проходит внутрь среды в виде "карандашного" пучка, сформированного пинхолом первичного коллиматора диаметром а. В разработанной КС расстояние от анода рентгеновской трубки до рассеивателя составляет 163 мм. Рассеянный пучок формируется щелевым кольцевым пинхолом вторичного коллиматора шириной *b*, формирующим зону чувствительности детектора.

Уравнения апертурной функции рассеивающего объема (АФРО) с учетом геометрического ослабления в среде:

$$\Phi_{1d} = \mathbf{I}_n \left(x, E_{eff} \right) \cdot \Phi_1;$$

$$\Phi_{2d} = \mathbf{I}_n \left(x, E_{eff} \right) \cdot \Phi_2$$
(1)

Где:

 Φ_1 и Φ_2 уравнения апертурных функций рассеивающего объема, $I_n(x, E_{eff})$ – интенсивность на определенной глубине залегания рассеивающего объема. Форма АФРО по уравнению 1 представлена на рис. 2.

Экспериментальные результаты

Экспериментально-полученная АФРО представлена на рис. 3. Формы АФРО на рис. 2 и рис. 3 сопоставляются между собой.



Результаты экспериментов:

- Получены формулы АФРО КС с кольцевым детектором для разного соотношения размеров пинхолов первичного и вторичного коллиматоров.
- Функция распределения плотности на рис. 5 сопоставляется с сигналом рис. 4, из чего следует, что вид уравнения АФРО (1) получены корректные.

Список литературы

- 1. Капранов Б. И. Дис. Разработка метода и средств реконструктивной комптоновской томографии, д-ра тех. наук. Томский политехнический университет, Томск, 2000.
- 2. Капранов, Б. И., Короткова, И. А., Чахлов, В. Л., Филинов, В. Н., Маклашевский, В. Я. Анализ систем сканирования в комптоновской томографии. Возможные области применения. Известия Томского политехнического университета, 2003. Т.306. №1 С. 122—127.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ КОМПОНЕНТОВ СРЕДСТВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ НА ИЗЛОМЫ ИССЛЕДУЕМЫХ ОБРАЗЦОВ

2022 г. Анатолий Борисович Муратшин^{1*}, А. А. Любимов^{1**}, Е.А. Шорина^{1***}

¹ – ОАО «ВТИ», 115280, г. Москва, ул. Автозаводская, д. 14 * - ABMuratshin@vti.ru; ** - AALyubimov@vti.ru; *** - EAShorina@vti.ru

Цель работы. Определение методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) химического состава, морфологии отложений после проведения неразрушающего контроля (капиллярная - цветная дефектоскопия (ЦД) и люминесцентная дефектоскопия (ЛЮМ), магнитопорошковая дефектоскопия (МПД)) для идентификации их, как наносных при фрактографическом исследовании изломов.

Суть обсуждаемой проблемы. При обнаружении трещины методами неразрушаещего контроля (ЦД, ЛЮМ, МПД) на элементах энергетического оборудования, например, на рабочих и направляющих лопатках турбины, возникает необходимость установления причин разрушения. Для этого следует проводить фрактографическое исследование излома после вскрытия трещины, на поверхности которого остались составляющие компонентов средств неразрушающего контроля. Для достоверной интерпретации полученных результатов фрактографического исследования требуется гарантированно отсечь наносные отложения.

Результаты. На основании проведенного исследования были получены:

- изображения отложений компонентов цветной дефектоскопии, что позволяет оценить морфологию и размеры. Основа отложений – оксиды углерода;
- изображения отложений компонентов магнитопорошковой дефектоскопии, что позволяет оценить морфологию и размеры. Основа отложений – оксиды железа, также в составе отложений обнаружена сера (0,17 – 0,26 % масс.);
- изображения отложений компонентов люминесцентной дефектоскопии тонкой пленки, основа которой оксиды углерода, а также фосфор (1,08 – 1,76 % масс.).

Выводы. На основании проведенного исследования установлено следующее:

- после проведения ЦД на изломе остаются отложения, содержащие оксиды углерода, зная характерный вид и состав которых, можно не учитывать их во время фрактографического исследования излома;
- после проведения МПД на изломе остаются отложения, содержащие серу (от 0,17 до 0,26 масс) и оксиды железа, зная характерный вид и состав которых, можно не учитывать их во время фрактографического исследования излома;

- после проведения ЛЮМ на изломе остаются отложения, содержащие оксиды углерода, а также фосфор от 1,08 до 1,76, зная характерный вид и состав которых, можно не учитывать их во время фрактографического исследования излома;
- с целью подтверждения полученных данных и исключения влияния других составляющих необходимо проведение аналогичных исследований средств неразрушающего контроля других производителей.

К СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ТРУБОПРОВОДА, ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ, УГЛЕРОДНОЙ НАНОТРУБКИ (УНТ)

© 2022г. Аким Гайфуллинович Хакимов

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, 450054 Уфа, пр-т Октября, 74 hakimov@anrb.ru

Актуальность работы заключается в том, что до сих пор не учитывается влияние среднего давления на устойчивость поперечного сечения трубопровода, цилиндрической оболочки, УНТ. Указанные элементы конструкций широко применяются в нефте - газо - продуктопроводах, в ракетных и авиационных двигателях, в воздушной и гидравлической системах самолетов и т.д. В гидроупругих системах одновременно происходит взаимодействие упругих и гидродинамических неустойчивостей.

В данной работе определяются критические давления внутри и вне трубопровода с учетом действия среднего избыточного давления на ее поверхности и кривизны поперечного сечения срединной поверхности.



Рис. 1. Элемент *dx* поперечного сечения срединной поверхности трубопровода, цилиндрической оболочки, УНТ.

На внутреннюю и внешнюю поверхности конструкции действуют избыточные давления p_i и p_e жидкостей с плотностями ρ_i и ρ_e (рис. 1). Предполагается идеальность и несжимаемость жидкостей. Давления внутри и вне трубопровода p_i , p_e изменяются независимо друг от друга. Интенсивность их возрастания от нуля будем считать такой, чтобы инерционные силы в системе были малы. Уравнение радиальной статики тонкой цилиндрической оболочки, трубопровода относительно функций текущего и начального прогиба *w u w*₀ имеет вид [1] (положительное направление прогиба к центру)

$$\frac{\partial^{6} w}{\partial \theta^{6}} + 2 \frac{\partial^{4} w}{\partial \theta^{4}} + \frac{\partial^{2} w}{\partial \theta^{2}} - \frac{TR^{2}}{D} \left(\frac{\partial^{4} \left(w_{0} + w \right)}{\partial \theta^{4}} + \frac{\partial^{2} \left(w_{0} + w \right)}{\partial \theta^{2}} \right) = \frac{R^{4}}{D} \frac{\partial^{2} q}{\partial \theta^{2}}, \tag{1}$$

где q – внешнее давление, действующее на цилиндрическую оболочку, при определении которого исходим из предположения, что ρ_i , ρ_e и p_i , p_e остаются постоянными при изгибе трубопровода. θ – центральный угол, R – радиус срединной поверхности, D – цилиндрическая изгибная жесткость, T – кольцевое растягивающее усилие при $p_i > p_e$, которое находится по формуле

$$T = p_i \int_{0}^{\pi/2} \left(R - \frac{h}{2} \right) \cos \theta d\theta - p_e \int_{0}^{\pi/2} \left(R + \frac{h}{2} \right) \cos \theta d\theta = \left(p_i - p_e \right) R - \left(p_i + p_e \right) \frac{h}{2}, \tag{2}$$

где h – толщина. В предварительно деформированной конструкции остаточные напряжения отсутствуют, например, в результате отжига. При $p_i = 0$, $p_e = 0$ поперечное сечение срединной поверхности трубопровода имеет малое начальное w_0 и текущее w отклонения от оси x в виде

$$W_0 = W_{0n} \cos n\theta, \ w = W_n \cos n\theta, \ n = 2, 3, ...$$
 (3)

где W_{0n} , W_n – амплитуды малого начального и текущего отклонения. Подставляя (2), (3) в уравнение (1) и учитывая независимость нагрузки q от центрального угла θ , получаем отношение амплитуды текущего прогиба к амплитуде начального прогиба

$$\frac{W_n}{W_{0n}} = \frac{3(\alpha_1 - \alpha)}{n^2 - 1 - 3(\alpha_1 - \alpha)}, \quad \alpha = \frac{(p_i - p_e)R^3}{3D}, \quad \alpha_1 = \frac{(p_i + p_e)}{2}\frac{R^2h}{3D}.$$
(4)

Из (4) видно, при $\alpha_1 - \alpha = (n^2 - 1)/3$ прогиб в рассматриваемом линейном приближении растет неограниченно. Полученное условие устойчивости учитывает действие среднего давления α_1 . Здесь $\alpha_1 - \alpha$ представляет собой критическую комбинацию внешних воздействий p_i , p_e , для системы с заданными параметрами материалов и размерами *E*, *h*, *R*. С возрастанием внешних воздействий рост прогиба (4) происходит наиболее быстро при n = 2. Указанная критическая комбинация внешних воздействий по (4) является минимальной при n = 2. При $\alpha = 0$, $\alpha_1 = 1$ происходит потеря устойчивости круговой формы поперечного сечения трубопровода в виде эллипса (n = 2), причем, критическое давление потери устойчивости равно

$$p_{1cr} = \frac{3D}{R^2 h} = \frac{Eh^2}{4R^2(1-v^2)}$$

откуда следует, что трубопровод может потерять устойчивость даже при нулевом перепаде давления вследствие действия среднего давления. Например, при $E = 2 \cdot 10^5 \text{М} \Pi a$, v = 0.3, R = 0.1 м, h = 0.002 м и при нулевом перепаде давления критическое давление потери устойчивости p_{1cr} = равно 21.9 МПа.

Трубопровод, оболочка, УНТ может потерять устойчивость даже при нулевом перепаде давления вследствие действия среднего давления.

Эти результаты могут быть использованы при моделировании деформирования трубопроводов, оболочек, УНТ, контактирующих с жидкостью и газом. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-21-00578.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Timoshenko S.P., Young D.H., Weaver W.* Vibration Problems in Engineering. New York: John Wiley & Sons, 1974.

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ МОЛОДЕЖНОЙ СЕКЦИИ

ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭВТЕКТОИДНОЙ СТАЛИ С РАЗЛИЧНОЙ МОРФОЛОГИЕЙ ПЕРЛИТА С ПОМОЩЬЮ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДОВ

© 2022 г. <u>Шапова Елизавета Андреевна^{1*}</u>, А. Н. Сташков^{1**}, А. П. Ничипурук¹, Л. А. Сташкова

¹ – Институт физики металлов имени М. Н.Михеева Уральского отделения Российской академии наук, 620108, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18 * - schapova@imp.uran.ru; ** - stashkov@imp.uran.ru

Эвтектоидная сталь У8 нашла широкое применение на практике в качестве сырья для изготовления инструментов, рельсов и оснастки. Известно, что в зависимости от термомеханических воздействий [1,2] в структуре стали У8 может наблюдаться пластинчатый или глобулярный перлит. В некоторых случаях возможны промежуточные варианты структуры [3]. Свойства конечного изделия при механических воздействиях определяются морфологическими особенностями перлита [4]. Большое внимание в последнее время уделяется вопросу улучшения механических свойств изделий из эвтектоидной стали. Данная работа направлена на исследование напряженно-деформированного состояния эвтектоидной стали У8, обладающей структурой глобулярного и грубопластинчатого перлита, с помощью магнитного, рентгеновского методов, а также методом EBSD-анализа.

Исследования проводились образцах на ИЗ стали У8 co структурой грубопластинчатого И глобулярного перлита. Образцы представляли собой параллелепипеды длиной 250 мм и сечением 2х8 мм². Эксперимент заключался в последовательной пластической деформации растяжением испытуемых образцов с измерением обратимой магнитной проницаемости после каждой ступени деформационного воздействия. Метод измерения обратимой магнитной проницаемости и расчета остаточных напряжений сжатия подробно описан в работе [5].

Для проведения EBSD-анализа были вырезаны образцы вблизи области разрыва. После вырезки образцы шлифовались с постепенным уменьшением зернистости наждачной бумаги. Толщина образцов после шлифовки составляла 100 мкм. Далее образцы были подвержены электрополировке в растворе Ленуара на горизонтальном участке вольтамперной характеристики для предотвращения травления структуры. Рентгеноструктурные исследования проводились на дифрактометре высокого разрешения Empyrean, в фильтрованном Cu-Ка излучении в угловом интервале (35-125)° с шагом сканирования 0,013°.

Полевые зависимости обратимой магнитной проницаемости были проанализированы для выделения вклада в процессы перемагничивания от необратимого

смещения 90-градусных доменных границ (ДГ) [5]. Установлено, что остаточные механические напряжения в пластически деформированных образцах стали У8 различаются в зависимости от формы перлита: в образце с пластинчатым перлитом остаточные механические макронапряжения сжатия после разрушения составляли -349 МПа против -222 МПа в образце с глобулярным перлитом. По результатам рентгеновского анализа, макронапряжения в образце с пластинчатым перлитом -342 МПа, в глобулярном -251 МПа, что достаточно близко к результатам, полученным магнитным методом.

EBSD-анализ показал, что в результате пластической деформации для образцов с грубопластинчатым перлитом характерно увеличение доли малоугловых границ между зернами (с 25 % до 80 %); для образцов с глобулярным перлитом увеличение доли малоугловых границ после деформации гораздо меньше (с 65 % до 70 %), при этом произошло резкое увеличение доли зерен с размером менее 10 мкм (с 60 % до 99 %). По картам разориентировок зерен были построены карты фактора Шмидта для системы скольжения <110> {11}.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», №АААА-А18-118020690196-3) при финансовой поддержке РФФИ (проекты №20-32-90139).

ЛИТЕРАТУРА

1. Счастливцев В.М., Мирзаев Д.А., Яковлева И.Л., Окишев К.Ю., Табатчикова Т.И., Хлебникова Ю.В. Перлит в углеродистых сталях. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. 310 С.

2. *Wu T., Wang M., Gao Y., Li X., Zhao Y., Zou Q.* Effects of Plastic Warm Deformation on Cementite Spheroidization of a Eutectoid Steel// Journal of iron and steel research, International. 2012. V.19. No. 8. P. 60-66.

3. *Zheng C., Li L., Yang W., Sun Z.* Enhancement of mechanical properties by changing microstructure in the eutectoid steel // Materials Science and Engineering: A.2012. 558. P. 158–161.

4. *Toribio J.* Relationship between microstructure and strength in eutectoid steels// Materials Science and Engineering A. 2004. V. 387. P. 227-230.

5. *Ничипурук А.П., Сташков А.Н., Кулеев В.Г., Щапова Е.А., Осипов А.А.* Методика и устройство для безградуировочного определения величины остаточных сжимающих напряжений в деформированных растяжением низкоуглеродистых сталях// Дефектоскопия. 2017. №11. С. 20-27.

Поля пластических деформаций на стадии зарождения усталостной трещины

© 2022 г. Константин Вячеславович Наумов^{1*}, А.П. Владимиров^{1,2**}

¹ – Уральский федеральный университет, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19

² – Институт машиноведения УрО РАН, 620049, Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34

* - knaumov98@mail.ru; ** - vap52@bk.ru;

(Руководитель Владимиров А.П.)

Согласно разным литературным источникам, от 50 до 80% деталей техники разрушаются многоцикловой усталости [1,2]. Несмотря на длительную историю вследствие исследования и многочисленные публикации, в настоящее время отсутствуют методы диагностики, оценки и расчета остаточного ресурса объектов, эксплуатируемых В условиях многоцикловой усталости, удовлетворяющих требованиям инженерной практики [2]. Такая ситуация во многом связана с отсутствием простых и надежных методов измерения и контроля, позволяющих в режиме реального времени анализировать необратимые процессы, протекающие при многоцикловой усталости материалов. В статье [3] было показано, что уже на ранних стадиях усталости происходит локализация необратимых процессов, в одной из зон локализации деформаций возникает разрушение материала. Предельная растягивающая деформация металла в этой зоне достигает значения порядка 10⁻¹. Однако не было ясно, каковы эпюры пластических деформаций, как в зоне зарождения трещины, так и вдали от нее на разных стадиях усталости. Целью исследования было построение эпюр пластических деформаций в указанных зонах изучаемого объекта. Объектом исследования являлся образец из стали 09Г2С с плоской рабочей частью с двумя симметрично расположенными вырезами радиусом 2,5 мм. Образец подвергали испытанию в условиях отнулевого нагружения с частотой около 100 Гц. Относительные перемещения точек поверхности, расположенные на расстоянии порядка 5 мкм, определяли методом усредненных во времени спекловых изображений. Время усреднения равнялось 50 циклам периодически прилагаемых усилий. Приводятся и обсуждаются 1) зависимости двух компонент вектора относительных перемещений от числа циклов нагружения, 2) эпюры указанных компонент при разных циклах в зоне зарождения трещины и в центре образца. Показано, что на поверхности образца имеются участки как сжимающих, так и растягивающих деформаций. Указывается, что данные о пластических деформациях не дают полную картину эволюции усталостных явлений в металле. Сделан вывод о необходимости в дальнейшем определять не только пластические, но и упругие деформации поверхности, изменяющиеся в течение периода циклически прикладываемых усилий.

Литература

- 1. Тупикин Д.А. Термоэлектрический метод контроля усталостных явлений // Контроль. Диагностика. 2003. № 11. С. 53–61.
- 2. Новиков И.И., Ермишин В.А. Физическая механика реальных материалов. М.: Наука, 2004. 328 с.

3. A. P. Vladimirov, N. A. Drukarenko, and K. E. Myznov. Using Speckle Images for Determining the Local Plastic Strains Arising at High-Cycle Fatigue of 09G2S Steel. Technical Physics Letters, 2021, Vol. 47, No. 8, pp. 773–776.

ДЕФЕКТОМЕТРИЯ И СИНТЕЗ ДАННЫХ ЛАЗЕРНОЙ ВИБРОМЕТРИИ И ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ

© 2022 г. Виктор Юрьевич Шпильной^{1*}, Д.А. Дерусова^{1**}, В.П. Вавилов^{1***}

¹ – НИИ ТПУ, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30 * - vshpilnoy@list.ru; ** - red@tpu.ru; *** - vavilov@tpu.ru

В настоящее время полимерные композиционные материалы находят широкое применение в автомобилестроении, а также в ракетно-космической и авиационной промышленности [1, 2]. В процессе производства и эксплуатации изделий из композитов могут возникать различные дефекты (ударные повреждения, расслоения, трещины, неполное отверждение связующего), а периодическое изменение температуры окружающей среды и влажности, в свою очередь, приводят к их прогрессирующему росту. Существующие методы неразрушающего контроля композитов обладают определенными преимуществами и недостатками. В связи с этим, разработка методик синтеза данных, полученных различными методами НК, позволит скомпенсировать недостатки отдельных методов, а также обеспечить длительную и безопасную эксплуатацию изделий авиационной и ракетнокосмической промышленности.

В настоящем исследовании предлагается алгоритм (рис.1) автоматического анализа монохромных и градиентных графических изображений с целью определения площади дефектных областей, а также синтеза данных, полученных различными методами НК. На основе алгоритма для автоматического распознавания дефектов реализовано программное обеспечение DeFinder [3], позволяющее проводить анализ графических изображений в различных форматах (*.bmp, *.jpg, *.jpeg), получаемых при проведении НК материалов и изделий.



Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма обработки данных в программе DeFinder.

Согласно алгоритму, представленному на рисунке 1, после загрузки графических изображений в программное обеспечение (ПО), производится нормировка данных и построение градиентной цветовой палитры. Каждой ячейке изображения задается вес в зависимости от насыщенности цвета. Далее оператор задаёт пороговое значение сигнал/шум, на основании которого производится автоматическое распознание дефектных зон с построением карты дефектов. При подсчете итоговой площади дефекта рисунок анализируется программой в виде оттенков серого. Для этого осуществляется построение черно-белых изображений, не визуализированных для пользователя. Все пиксели со значением веса ниже порогового не отображаются на итоговом кадре и не используются при подсчете размеров дефекта. Результатом работы подпрограммы является синтезированное изображение контроля исследуемого объекта одним или несколькими методами. При необходимости, карты дефектов нескольких различных измерений могут быть синтезированы в одно изображение, а также совмещены с исходными данными.

Экспериментальная часть работы посвящена апробации разработанного программного обеспечения для автоматического распознавания дефектов на примере исследования ударного повреждения в углепластиковом композите размерами 155×175×1,5 мм с ударным повреждением энергией 18 Дж в центре. В частности, контроль композита проведен методами лазерной виброметрии с использованием бесконтактного магнитострикционного излучателя [4],

ультразвуковой вибротермографии [5], теплового контроля [6] и ультразвукового Ссканирования. Результаты синтеза данных указанных методов НК представлены на рисунке 2.



Рисунок 2 – Синтез методов лазерной виброметрии с использованием бесконтактного магнитострикционного излучателя, ультразвуковой вибротермографии, теплового контроля (а) и ультразвуковое С-сканирования (б)

Анализ экспериментальных данных НК углепластикового композита в программе DeFinder позволил определить размер, форму и расположение ударного повреждения, а также рассчитать его площадь. Результаты исследования показали, что проведение синтеза данных нескольких методов НК повышает достоверность дефектоскопии композиционных материалов В результате компенсации ограничений каждого используемого метода НК. отдельно Повышение достоверности обнаружения ударного повреждения подтверждается результатами ультразвукового С-сканирования, выбранного в качестве эталонного метода НК в настоящем исследовании.

Проведение синтеза данных нескольких методов НК позволяет минимизировать вероятность возникновения ошибок различного типа ввиду того, что способ физического воздействия и условия проведения эксперимента в данном случае будут отличаться для каждого конкретного метода контроля, а автоматизация процесса распознавания дефектов позволит повысить точность результатов, производительность контроля, а также исключить субъективный характер анализа данных в рамках дефектометрии.

Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук МК-1221.2021.4

ЛИТЕРАТУРА

1. *Rahammer M., Solodov I, Gulnizkij N, Kreutzbruck M.* Local defect resonance for efficient defect detection in composites // ECCM 2016 – Proc. of the 17th European Conf. on Comp. Materials, 2016. – article number 126913.

2. Solodov I., Döring D., Busse G. Air-coupled laser vibrometry: Analysis and applications// Applied Optics. V. 48. No.7. 2009. P.C33—C3

3. Шпильной В.Ю. Программа для ЭВМ: «Выявление дефектов и расчет их площади по предоставленному изображению в заданном диапазоне оттенков», номер регистрации (свидетельства) 2020612786. Дата регистрации: 03.03.2020

4. Вавилов В.П. Тепловой неразрушающий контроль материалов и изделий (обзор) // Дефектоскопия. 2017. № 10. С. 34-57.

5. *Derusova D.A., Vavilov V.P., Nekhoroshev V.O., Shpil'noi V.Y., Druzhinin N.V.* Features of Laser-Vibrometric Nondestructive Testing of Polymer Composite Materials Using Air-Coupled Ultrasonic Transducers // Rus. J. of NDT. 2021. V. 57. No 12. P. 1060-1071

6. *Balageas D, Maldague X.* Thermal (IR) and Other NDT Techniques for Improved Material Inspection // J. of Nond. Evaluation. V. 35. No 1. 2016. P. 1-17.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ВИБРОМЕТРИИ И АКУСТИЧЕСКОЙ СТИМУЛЯЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГАЗОРАЗРЯДНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

© 2022 г. <u>Дерусова Дарья Александровна</u>^{1*}, В.О. Нехорошев^{2*}, В.Ю. Шпильной^{1***}, В.П. Вавилов^{1****}

¹Томский политехнический университет, 634028, Томск, ул. Савиных, 7 ²Институт сильноточной электроники СО РАН, 634055, Томск, пр. Академический, 2/3 * red@tpu.ru; ** credence@vtomske.ru; ****vshpilnoy@list.ru, ****vavilov@tpu.ru.

Акустические методы в настоящее время считаются одними из наиболее надежных методов неразрушающего контроля (НК) изделий авиационной и ракетно-космической техники [1-3]. Сочетание акустической стимуляции с лазерной виброметрией при проведении контроля качества является сравнительно новым подходом в области контроля качества полимерных композитов, активно развивающимся в последнее десятилетие [4, 5]. К главным достоинствам средства измерения относят высокую точность и бесконтактный способ анализа вибраций. В связи с этим, указанный метод находит всё более широкое применение в современных диагностических системах НК, включая роботизированные системы промышленного назначения [6, 7].

Применение воздушно-связанных излучателей для бесконтактного ввода акустического сигнала в контролируемые материалы стало одним из приоритетных направлений исследований в области НК. В настоящее время для бесконтактной ультразвуковой стимуляции материалов используются акустические излучатели на основе пьезоэлектрических или магнитострикционных преобразователей. В связи с тем, что излучатели указанных типов обладают рядом характерных недостатков, их применение в процедуре контроля качества слоистых композиционных материалов ограничено [8].

Настоящая работа посвящена исследованию особенностей проведения НК полимерных композитов на основе сканирующей лазерной виброметрии при бесконтактной акустической стимуляции. В настоящем исследовании ввод акустического сигнала в объект контроля проводится с использованием бесконтактного излучателя, представляющего газоразрядную систему, позволяющую выводить акустические колебания в окружающую среду. Отражен принцип работы системы для генерации акустических колебаний на основе газоразрядного излучателя и результаты его применения для неразрушающего контроля ударных повреждений в углепластиковых композитах. В частности, результаты исследования особенностей НК композитов бесконтактным способом показали, что использование газоразрядного излучателя позволяет проводить акустическую стимуляцию материалов в диапазоне частот 0,05-100 кГц, а использование лазерной виброметрии

необходимо для регистрации вибрационного сигнала при проведении НК. Результатом лазерного сканирования являются амплитудно-частотные спектры вибраций материала и виброграммы, отражающие распределение колебаний на поверхности контролируемого объекта. Анализ амплитудно-частотного спектра вибраций позволяет определить собственные частоты исследуемого материала и резонансные частоты дефектов при их наличии, что подтверждается на соответствующих виброграммах. Важно также отметить, что особенностью работы излучателя является импульсный режим генерации акустического сигнала, что препятствует формированию стоячей волны в воздушном пространстве между излучателем и объектом контроля. При данном способе возбуждения исключается необходимость обеспечения согласования акустических колебаний по фазе, что является одним из важных преимуществ газоразрядного излучателя перед традиционными типами воздушно-связанных ультразвуковых преобразователей. Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда № 21 – 79 - 00169

ЛИТЕРАТУРА

 Ambrozinski L., Spytek J., Dziedziech K., Pieczonka L. Damage identification in plate-like structures based on Lamb waves mode-conversion sensing using 3D laser vibrometer // IEEE International Ultrasonics Symposium, IUS31 October 2017. – Article number 8092404.
 Pelivanov I., Ambroziński Ł., Khomenko A. High resolution imaging of impacted CFRP composites with a fiber-optic laser-ultrasound scanner // Photoacoustics. V. 4. Iss. 2. 2016. P. 55-64.

3. *Balageas D, Maldague X*. Thermal (IR) and Other NDT Techniques for Improved Material Inspection // Journal of Nondestructive Evaluation. V. 35. Iss. 1. 2016. P. 1-17.

4. *Solodov I., Döring D., Busse G.* Air-coupled laser vibrometry: Analysis and applications// Applied Optics. V. 48. No.7. 2009. P.C33–C3

5. *Solodov I.* Resonant defects: A new approach to highly-sensitive defect-selective ultrasonic imaging // Emerging Technologies in Non-Destructive Testing VI – Proc. of the 6th International Conference on Emerging Technologies in Nondestructive Testing, 2016. P. 13-21.

6. *Chowanietz M., Bhangaonkar A., Semken M., Cockrill M.* Improving the correlation of structural FEA models by the application of automated high density robotized laser Doppler vibrometry // AIP Conference Proceedings. V. 174028. 2016. Article number 070002

7. Segers J., Hedayatrasa S., Poelman G., Van Paepegem W., Kersemans M. Robust and baselinefree full-field defect detection in complex composite parts through weighted broadband energy mapping of mode-removed guided waves // Mechanical Systems and Signal Processing. V. 151. 2021. Article number 107360

8. Баженов С.Л. (2014) Механика и технология композиционных материалов. М.: Интеллект.

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ

© 2022 г. <u>Алена Александровна Тарасова*</u>, А. В. Мельникова** Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2; * - aat15S@yandex.ru; ** - mlnkval77@gmail.com; Научный руководитель: д.т.н., профессор К. В. Гоголинский

В связи с широким применением полиэтиленовых (ПЭ) труб для строительства газопроводов низкого и среднего давления все более актуальной становится задача диагностирования технического состояния и оценки ресурса таких газопроводов. Одним из существенных параметров, характеризующих материал ПЭ труб, является предел текучести, которой определяется при испытании на растяжение согласно ГОСТ 11262-2017 [1]. Данный вид испытания является разрушающим, поскольку в нем применяются образцы, вырезанные из части полиэтиленовой трубы. Вырезка образцов необходимого размера требует приостановки эксплуатации газопровода и последующего его ремонта. К тому же данный метод контроля является выборочным, снижая вероятность получения достоверного результата. Предлагается альтернативное решение, основанное на применении метода неразрушающего контроля - динамического инструментального индентирования (ДИИ) [2].

Измерение твердости методом ДИИ осуществляется с помощью прибора ИСПГ-1 [3]. Прибор включает в себя чувствительный датчик с гравитационным разгоном ударника, соединенный с блоком приема и обработки данных и с блоком отображения информации. Использование метода требует предустановки программного обеспечения на персональный компьютер с целью сбора данных и их визуализации. В датчике перед измерением взводится пружина, фиксирующая индентор, который жестко сцеплен с постоянным магнитом. При нажатии кнопки пружина распрямляется и инициирует падение индентора, который, в свою очередь, проходит катушку индуктивности, установленную в корпусе датчика, и создает в ней ЭДС. Сигнал передается через блок усиления на блок обработки для последующей интерпретации. Особенностью используемого прибора является малая энергия падения ударника, позволяющая использовать его для контроля тонкостенных изделий из полимерных материалов (ПЭ труб).

Для проведения экспериментальных исследований были взяты образцы полиэтиленовых газопроводов с различными сроками эксплуатации (6 образцов), а также один образец новой трубы.
Результаты измерений предела текучести при испытаниях на растяжение и твердости, измеренные методом ДИИ представлены на рис. 1 и 2.



Установлено, что среднее значение отношения предела текучести S и значений твердости HD K=S/HD для всех образцов равно 0,137, а максимальное отклонение от этого значения не превышает 7%. Таким образом показано, что предел текучести ПЭ труб различных марок и возрастов может быть измерен методом ДИИ при соответствующей калибровке прибора на образце ПЭ трубы с известным пределом текучести.

Применение метода ДИИ для неразрушающего контроля механических параметров материалов полиэтиленовых трубопроводов позволяет сохранить целостность объекта исследования. Кроме того, метод ДИИ обладает высокой информативностью и удобством применения.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 11262-2017 Пластмассы. Метод испытания на растяжение - М.: Стандартинформ, 2018 год.

2. *Umanskii A., Gogolinskii K., Syasko V., Golev A.*. Modification of the Leeb Impact Device for Measuring Hardness by the Dynamic Instrumented Indentation Method. Inventions. 2022; 7 (1):29.

3. *Крень А.П., Рудницкий В.А., Зинкевич Н.В.* Моделирование ударного контакта индентора с нежесткими стальными конструкциями при измерении твердости / // Известия

национальной академии наук Беларуси. Серия Физико-технических наук. – 2017. - №4.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ОСТАТОЧНОЙ ТОЛЩИНЫ ОБШИВКИ БОРТА СУДНА ПОД ЗАЩИТНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ ВНЕ ДОКА

© 2022 г. Автор: <u>Велеулов Закий Алексеевич</u>^{1*}, Г. Галиндэв^{1**} Научный руководитель: д.т.н. Сясько Владимир Александрович^{1***} ¹– Санкт-Петербургский горный университет, 199106 Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия дом 2 * zveleulov@yandex.ru; **send2ganzo@gmail.com; ***9334343@gmail.com

Ультразвуковая толщинометрия получила широкое распространение в судоремонте для определения остаточной толщины стенок металлической обшивки судна, подверженных коррозии. Современные отечественные технологии измерения толщины стенок судов в сухом доке предполагают зачистку металлической поверхности, что экономически затратно, в связи с чем количество точек измерения небольшое и достоверность измерения невысокая.

В связи с этим актуальным является обеспечение возможности проведения измерений остаточной толщины подводной части стенок корпуса вне дока (на плаву), повышение достоверности, характеризуемой неопределенностью результатов и приписываемой им доверительной вероятностью, а также производительности таких измерений.

В работе рассматриваются возможности обеспечения достоверности измерений с помощью подробно рассмотренных программно-аппаратных средств и новых методик зондирования, в частности трипл-эхо. Также рассмотрена реализация функция автоматической установки нуля раздельно-совмещенного преобразователя. Изложены основные соотношения для расчета параметров измерительного преобразователя и его метрологических характеристик.

Представлены алгоритмы работы толщиномера, позволяющие производить достоверный контроль остаточной толщины стенок металлической обшивки судов для типовых коррозионные повреждений обшивки под водой, подробно изложена методика измерения, рассмотрено влияние мешающих параметров при установке нуля и измерениях, приведены основные характеристики, предложено метрологическое обеспечение измерений.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА КОРОНОК ЗУБЬЕВ КОВШЕЙ ЭКСКАВАТОРОВ

© 2022 г. Дмитрий Сергеевич Громыка^{1*}, К. В. Гоголинский^{1**}

1-Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, 21 линия В.О.,

д. 2

* - poloronta@yandex.ru; ** - nanoscan@yandex.ru;

Работа выемочно-погрузочных горных машин зачастую ведется в сложных условиях, примером таких объектов может служить Коркинский разрез, выведенный из эксплуатации вследствие эндогенного горения угля, где температура поверхности очагов горения может достигать 100-300 °C. Такие условия существенно ускоряют процесс расходования ресурса оборудования, однако существующие методики оценки остаточного ресурса не позволяют заранее выявить сроки замены коронок, а также сроки мероприятий по техосмотру и ремонту ковшей, что приводит к учащению аварийных случаев и увеличению времени простоя техники.

Авторами было обнаружено, что величину остаточного ресурса можно оценить по вызываемому нагрузками наклепу материала деталей, что может быть определено по изменению поверхностной твердости [1] и показателя дефектности, являющегося интегральным показателем глубины и количества трещин на участке поверхности, в зоне наклепа зубьев [2].

Исследование состояния поверхности коронок зубьев ковшей экскаваторов с разным сроком их эксплуатации проводились с использованием портативных твердомеров Константа КТ с ударным преобразователем по методу Либа тип D [3] и вихретоковых дефектоскопов Константа ВД-1 [4] на гидравлических экскаваторах Komatsu PC-400LC-7, работающих на Коркинском разрезе. Для данного объекта предельная величина срока эксплуатации коронок по критерию критического угла затупления острия составляет 4 месяца.

Результаты измерения твердости показали, что за 4 месяца эксплуатации твердость зуба в области формирования наклепа изменилась с 450 HB до 490 HB, при этом твердость острия коронки сохранила изначальную твердость с незначительным ростом (с 450 HB до 460 HB). Наибольшие значения показателя дефектности по истечению 4 месяцев эксплуатации коронки также наблюдаются в области формирования наклепа и достигают 700-900 мкм, тогда как в других областях поверхности значения показателя не превышают 200-400 мкм.

На основе проведенных измерений и анализа полученных результатов изменения твердости и показателя дефектности поверхности коронки в области максимального

наклепа, были предложены следующие диагностические критерии: приращение значений твердости относительно исходных значений на поверхности в зоне максимального наклепа; значения показателя дефектности поверхности; увеличение скорости роста показателя дефектности, являющееся маркером ускорения изнашивания коронки и близости наступления предельного состояния.

Диагностические критерии для определения степени изнашивания в процентах от предельного состояния для условий Коркинского разреза указаны в табл. 1.

Таблица 1

Диагностические критерии для определения остаточного ресурса коронок в условиях Коркинского разреза

	Диагностический критерий	
Степень изнашивания, %		
,	Диапазон роста значений	Диапазон роста значений показателя
	твердости по Бринеллю, НВ	дефектности поверхности, мкм
0-25	450-470	50-400
25-75	470-480	400-550
75-100	480-495	550-750

На основе анализа предложенных диагностических критериев был разработан проект методики оценки остаточного ресурса, включающий проведение периодичных замеров диагностических параметров в зоне максимального наклепа с построением зависимости данных параметров от срока эксплуатации, анализ тенденций изменения параметров и выявление значений диагностических критериев, определения значения параметров, соответствующих предельному состоянию. На основе данной методике можно вычислить остаточный ресурс коронки в процентах от предельного состояния.

ЛИТЕРАТУРА

1. Звонарев И.Е., Иванов С.Л., Шишлянников Д.И., Фокин А.С. Исследования поверхностной твердости металла в областях повышенного износа и разрушения деталей горных машин // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2014. № 11. С. 67—76.

2. Добровольский В.И., Добровольский С.В. Корреляция долговечностей по трещинообразованию и разрушению элементов конструкций при малоцикловой усталости // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2009. № 1 (41). С. 33—36.

3.Твердомер портативный многофункциональный: [Электронный ресурс] //
Константа. URL: constanta.ru/catalog/tverdomery/konstanta_kt. (Дата обращения: 24.12.2021)4.Вихретоковый дефектоскоп: [Электронный ресурс] //
KoнстантаURL: constanta.ru/catalog/vikhretokovye_defektoskopy_preobrazovateli_kontrolnye_obraztsy.(Дата обращения: 24.12.2021).

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАГНИТНО-ИНДУКЦИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ТОЛЩИНОМЕРА, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЕЗ ВНЕШНЕГО ПОЗИЦИОНИРУЮЩЕГО КОРПУСА.

©2022 г. <u>Васильев Алексей Юрьевич¹</u>, Никитина Ольга Артемовна². Научный руководитель: д.т.н. Сясько Владимир Александрович³.

^{1,3} – ООО «Константа», 198097, г. Санкт-Петербург, Огородный переулок, д.21.
2- Санкт-петербургский Горный университет
199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2
1 – vasilev.ay@bk.ru, +7 981 890 94 42
2- <u>neketena200@mail.ru</u>, +7 981 717 47 61
3 – <u>9334343@gmail.com</u>

В современных условиях развития промышленного производства отдельное внимание уделяется покрытиям металлических изделий, которые позволяют решить вопросы защиты металла от коррозии, от воздействия внешней агрессивной среды или приданию поверхности металла дополнительных свойств (износостойкость, уменьшение трения, декоративные свойства и пр.). Особое место занимает измерение толщины покрытия (*h*, мкм) как одного из основных параметров, описывающих качество получаемого покрытия.

Среди задач по контролю толщины покрытия можно выделить задачи, которые подразумевают проведения измерений в труднодоступных местах (рис. 1, (a,б)).



Рисунок 1. Примеры измерения толщины покрытия в труднодоступных местах: внутренняя часть корпуса (а) и автомобильного диска (б)

Большинство производителей (Elcometer, Helmut Fischer, KOHCTAHTA и пр.) изготавливают преобразователи толщиномеров для решения задач измерения толщины покрытий в труднодоступных местах, как правило с вынесенным чувствительным



Рисунок 2. ЧЭ магнитно-индукционного преобразователя на шарнире (а) и статично расположенный на рукояти (б).

элементом (ЧЭ), который расположен в подвижном корпусе на шарнире (рис. 2a), или стационарно размещенный на длинной рукояти (рис. 2б).

Данная конструкция, как правильно, не имеет позиционирующего корпуса, обеспечивающего перпендикулярность оси преобразователя к касательной поверхности объекта контроля.

В связи с этим возникает необходимость оптимизации конструкции таким образом, при котором асимметричность магнитных полей (рис. 3), вызванная наклоном оси преобразователя, будет оказывать минимальное влияние на результаты измерений.

В ходе проведенных работ по разработке и оптимизации конструкции, были определены основные зависимости и принципы построения магнитно-индукционного



Рисунок 3. Картина асимметричности магнитного поля в случае наклона оси преобразователя относительно перпендикуляра к касательной на 10°

преобразователя, обеспечивающего 5% погрешность результатов измерения при наклоне оси преобразователя в пределах 10°. В докладе детально рассмотрены все нюансы, связанные с разработкой подобного рода преобразователей, а также сложности, возникающие при промышленном изготовлении подобной конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

- Потапов А.И., Сясько В.А. Неразрушающие методы и средства контроля толщины покрытий и изделий. /Научное, методическое, справочное пособие. Санкт-Петербург. – СПб: Гуманистика, 2009 г
- ISO 2178:2016 Non-magnetic coatings on magnetic substrates Measurement of coating thickness Magnetic method
- Syasko, V.A., Vasilev, A.Y. Pulsed Magnetic Thickness Measurment of Metal Coatings. *Russ J Nondestruct Test* 57, 806–813 (2021). <u>https://doi.org/10.1134/S1061830921090102</u>

К ВОПРОСУ О ДОСТОВЕРНОСТИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ДОПУСКОВОГО КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ОСНОВАНИЯХ

© 2022 г. <u>Степанова Мария Сергеевна^{1*}</u>, В. А. Сясько^{2**}, А. С. Мусихин^{3***} ¹ – Санкт-Петербургский Горный университет, 199106, Санкт-Петербург, 22-я линия В.О., д.1.² – ООО «КОНСТАНТА», 198095, Санкт-Петербург, Огородный пер., д.21, литер А.³ – ВНИИМ им. Менделеева, Санкт-Петербург * - <u>stepanovamariya11.02.01@gmail.com</u>, +7 981 943 41 40; ** - 9334343@gmail.com; *** -+7 981 129 14 73

Для защиты изделий от коррозии все большее применение находят диэлектрические покрытия, в т.ч. лакокрасочные. Однако при нанесении и в ходе эксплуатации покрытий возникают как сквозные, так и несквозные дефекты. Для выявления сквозных дефектов покрытия широко применяется электроискровой метод неразрушающего контроля (НК) [1]. Анализ показывает, что с его использованием может быть получена информация о недопустимых утонениях покрытия.

Для определения пробивного напряжения покрытия был проведен эксперимент (рис. 1). В ходе эксперимента были использованы листы фольгированного текстолита и алюминия, на которые было нанесено лакокрасочное покрытие – эмаль для дисков MLS 306.



Рисунок 1 – зависимость пробивного напряжения от толщины покрытия В силу того, что полученные значения пробивного напряжения имеют достаточно большой разброс, для получения информации об остаточной толщине дефекта покрытия был применен алгоритм с численным откликом [2]. По полученным экспериментальным данным была построена линейная регрессия вида y = kx + b, для которой была построена функция нормального распределения от испытательного напряжения метода (рис. 2).

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma} \int_{-\infty}^{x} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt$$

1. Границы доверительного интервала для регрессионной модели:



 $y_P(x) = y(x) \pm t_P \sqrt{D} \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(\ln x - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (\ln x_i - \bar{x})^2}}$

Рисунок 2 – распределение вероятности пробоя покрытия в зависимости от приложенного напряжения. Р1 – для толщины покрытия 31 мкм; Р2 – для толщины 89 мкм; Р3 – для толщины 113; Р4 – для толщины 148 мкм

В результате проведенного эксперимента и анализа полученных данных было показано, что, зная зависимость электрической прочности покрытия от его толщины, можно определить вероятность обнаружения недопустимого утонения (задаваемой толщины покрытия) при рассчетном испытательном напряжении, что повышает информативность и расширяет диапазон применимости электроискрового метода НК.

Литература:

[1] ГОСТ 34395. Материалы лакокрасочные. Электроискровой метод контроля сплошности диэлектрических покрытий на токопроводящих основаниях. – М.: Стандартинформ, 2018. – 11 с.

[2] В.Ю. Чертищев. Оценка вероятности обнаружения дефектов акустическими методами в зависимости от их размера в конструкциях из ПКМ для выходных данных контроля в виде бинарных величин // Авиационные материалы и технологии №3 (52) 2018. С. 65 – 79. // URL: <u>https://journal.viam.ru/en/system/files/uploads/pdf/2018/2018_3_9_1.pdf</u>

КОМПЛЕКСНЫЙ КОНТРОЛЬ СПЛОШНОСТИ И ТОЛЩИНЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫМ МЕТОДОМ

В.А. Сясько ¹, <u>Алексей Сергеевич Мусихин</u>², И.С. Гнивуш³

¹ООО «КОНСТАНТА», Санкт-Петербург, Россия, <u>9334343@gmail.com</u> ²ВНИИМ им. Д.И.Менделеева, Санкт-Петербург, Россия, <u>musihinaleksei@mail.ru</u>, +7-981-129-14-73 ³СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия, <u>klin4_g@mail.ru</u>

Современные темпы развития мировой промышленности вызывают существенный рост применения диэлектрических антикоррозионных покрытий. Важными параметрами таких покрытий являются толщина и сплошность, контроль которых осуществляется разливными методами неразрушающего контроля (НК). Однако, современные методы НК, в рамках стандартизированных методик, не позволяют проводить контроль сразу обоих параметров покрытия. Представляет интерес использование электроискрового метода, как метода допускового контроля толщины и сплошности диэлектрических покрытий [1].

Использование электроискрового метода НК подразумевает создание условий на поверхности покрытия, при которых на участках покрытия со сквозными отверстиями или недопустимыми утонениями (дефектами) произойдет электрический пробой, не повлияв при этом на эксплуатационные параметры бездефектных участков.

Пробивное напряжение дефекта покрытия $U_{\rm np}$ (сквозного и не сквозного) можно определить расчетным путем:

$$U_{\rm np} \approx \frac{E_{np}}{h}$$

Для недопустимого утонения покрытия [2]:

где *Е*_{пр} – электрическая прочность покрытия [кВ/мм].

$$E_{np} = K \cdot K_B \cdot (A_c^0)^{1.1} \cdot exp\left(\frac{a}{b + \lg(b)} + \frac{m}{n + \lg(\tau)}\right),$$

где, K – коэффициент пропорциональности, зависящий от толщины d диэлектрика, τ – длительность воздействия приложенного напряжения, $K_{\rm B}$ – вероятность пробоя, A_c^0 - энергия каналообразования, a, b, n, m – некоторые постоянные.

Для воздушного промежутка [3]:

$$E_{\rm B} = \frac{B_0 \cdot P}{\ln \frac{A_0 \cdot P \cdot d}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}}$$

где, *P* – давление газа, *A*₀ – коэффициент, зависящий от состава газа, *B*₀ – коэффициент, зависящий от энергии ионизации газа, *d* – толщина диэлектрического покрытия, *γ* – вторичный коэффициент ионизации газа.

Так же пробивное напряжение для дефектов можно определить экспериментально. В ходе эксперимента для нанесения покрытий использовалась эмаль KU-1102, а в качестве подложки контрольного образца - лист фольгированного текстолита со слоем медной фольги толщиной 70 мкм. На различные области подложки было нанесено три, шесть и девять слоев эмали. Результаты приведены на рис 1.



Рис. 1. Зависимость пробивного напряжения покрытия U_{np} от толщины покрытия *d*. На основании полученных значений построена линейная регрессия.

Опираясь на полученные экспериментальные данные с использованием алгоритма с численным откликом [4,5] была получена зависимость вероятности обнаружения дефектов (типа недопустимое утонение) от испытательного напряжения электроискрового метода (рис. 2).





Таким образом, теоретический и экспериментальный анализ процессов искрообразования в области дефектов диэлектрических покрытиях, а так же применение вероятностного подхода к процедурам подготовки и проведения НК, позволили разработать методики контроля, повышающие информативность и производительность контроля диэлектрических покрытий.

Литература

- Вершинин Ю.Н. Электронно-тепловые и детонационные процессы при электрическом пробое твердых диэлектриков: Книга – Екатеринбург: УрО РАН, 2000 - 260 с
- Райзер Ю.П. Физика газового разряда: Учебное руководство 2-е изд. М. Наука. 1992 – 536 с.

- Физика диэлектриков (область сильных полей): Учебное пособие / Г.А. Воробьев, Ю.П. Похолков, Ю.Д. Королев и др. – Томск: Изд-во ТПУ,2003. – 244 с.
- Чертищев В.Ю. Оценка вероятности обнаружения дефектов акустическими методами в ависимости от их размера в конструкциях из ПКМ для выходных данных контроля в виде бинарных величин // Авиационные материалы и технологии. 2018. №3. С 65-79. ;
- 5. Лебедев А.М. Исследование достоверности допускового контроля // Научный вестник МГТУ ГА. 2005.№4 С 65-70.

КОНТРОЛЬ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗДЕЛИЙ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ © 2022 г. Доронин Кирилл Игоревич¹*

Научный руководитель: д.т.н. Носов Виктор Владимирович¹**

¹ – Санкт-Петербургский Горный университет, 199106 Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2 * - doronin.k.i@mail.ru; ** - <u>nosovvv@list.ru</u>.

Аддитивное производство стало одним из направлений четвертой промышленной революции (Индустрии 4.0). Рост интереса обусловлен снижением затрат на производство и возможностью получать изделия сложной геометрии для деталей и ответственных узлов с минимальным количеством технологических операций. Последние достижения в области 3D-печати позволяют синтезировать изделия из конструкционных материалов, что значительно повысило применимость данной технологии во многих областях промышленности. В зависимости от поставленной задачи могут использоваться различные способы нанесения слоев (SLS, SLM, EBF и др.). Для металлов популярность набирает технология селективного лазерного сплавления (SLS), основанная на консолидации зерен мелкодисперсного порошка под воздействием инфракрасного лазерного излучения (диаметр частиц d \approx 50 мкм, длина волны излучения $\lambda \approx 1,06$ мкм).

Технологии послойного изготовления предусматривают неоднородную структуру материала с определенными макроскопическими дефектами. Усадка материала при резком остывании после воздействия лазерного излучения и сложная местная геометрия вызывает локальное напряженно-деформированное состояние макроструктуры, которое в свою очередь и является причиной появления несплошностей [1]. Образовавшиеся микротрещины на межзеренных и межфазных границах, поры, включения и другие дефекты влияют на механические свойства всего изделия, что сказывается на его эксплуатационных характеристиках. Помимо дефектов на качество влияет:

-технология аддитивного производства (грануляция, экструзия);

-принцип реализации технологии (режим, направление сканирования);

-качество исходного материала (порошок, проволока).

Вышеперечисленные аспекты обуславливают необходимость контроля физикомеханических свойств изделий, изготовленных с помощью аддитивных технологий.

Неразрушающий контроль изделий, полученных с помощью аддитивных технологий, – сложная инженерная задача. Основная особенность состоит в подборе видов и методов контроля, так как анизотропия получаемой структуры определяет неравномерное распределение механических свойств. Для нахождения дефектов часто используется радиографический метод (томография), подходящий для поиска включений и пор [2].

Данный тип дефекта часто образуются вследствие необходимости использования среды с инертным газом во время изготовления. Пористость является фактором, снижающим устойчивость материала к усталостным нагрузкам, т.е. связана с механическими свойствами получаемого изделия. Ультразвуковой контроль позволяет косвенно определить модуль упругости материала, но данный метод осложняется анизотропией материала и конструктивными особенностями изделий сложной геометрии. Также перспективным является применение многоуровневой модели процесса разрушения на основе регистрации сигналов, полученных с помощью метода акустической эмиссии [3].

Для исследования механических свойств предлагается использовать метод инструментального индентирования, позволяющий получить данные о физикомеханических характеристиках испытуемого образца в микро- и нанометровом диапазонах, т.к. твердость является косвенной комплексной характеристикой сопротивления упругопластической деформации. Основные контролируемые параметры – твердость *H*, модуль упругости *E*, коэффициент упругого восстановления материала *R*. Аппаратурой, реализующей данный метод, является сканирующий нанотвердомер «Наноскан-4D», который позволяет измерять механические свойства объекта контроля на различных масштабных уровнях. Расчет параметров происходит с помощью полученной кривой нагрузка-деформация [4].

В данной работе рассмотрены технологические вопросы изготовления изделий с помощью метода селективного лазерного спекании и основные виды дефектов, возникающие в процессе производства. Рассмотрено применение метода инструментального индентирования для определения физико-механических параметров изделий аддитивного производства на образцах из коррозионно-стойкой стали аустенитного класса 12Х18Н10Т. Результаты исследований можно использовать для снижения неопределенности измерений при применении других физических методов неразрушающего контроля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алёшин Н.П., Мурашов В.В., Евгенов А.Г., Григорьев М.В., Щипаков Н.А., Василенко С.А., Краснов И.С. Классификация дефектов металлических материалов, синтезированных методом селективного лазерного сплавления, и возможности методов неразрушающего контроля для их обнаружения // Дефектоскопия. 2016. № 1. С. 48—55.

2. Алёшин Н.П., Григорьев М.В., Щипаков Н.А., Прилуцкий М.А., Мурашов В.В. Применение методов неразрушающего контроля для оценки качества деталей непосредственно в процессе аддитивного производства // Дефектоскопия. 2016. № 9. С. 64—71.

3. *Nosov V. V., Grigoriev E. V.* Micromechanics, nanophysics and non-destructive testing of the strength of structural materials // Materials Physics and Mechanics. 2019. V. 42. №6. Р. 804-824. 4. Головин И.Ю. Наноиндентирование и его возможности. М.: Машиностроение, 2009. 312 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ФОТОМЕТРИЧЕСКОГО БЛЕСКОМЕРА НА РЕЗУЛЬТАТ ИЗМЕРЕНИЯ

© 2022 г. <u>Севиль Руслановна Насырова^{1*}</u>,

Научный руководитель: к.ф.-м.н. Сясько Алексей Владимирович²

¹ - Санкт-Петербургский горный университет, 199106 Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия дом 2

² - Санкт-Петербургский государственный университет, 199034 Санкт-Петербург, Университетская набережная, дом7/9 * пурута @yandex.ru

* - svsvnn@yandex.ru

В современном производстве визуальное восприятие продукции является одним из ключевых факторов, влияющих на выбор и покупку потребителем. Это привело к необходимости производственного и постпроизводственного контроля различных оптических характеристик поверхностей и покрытий изделий.

Наряду с цветом, одной из ключевых оптических характеристик, влияющих на визуальное восприятие объекта человеческим глазом, является блеск - оптическая характеристика, описывающая способность поверхности отражать свет в зеркальном направлении.

Измерение блеска стало одним из стандартных методов контроля при оценке внешнего вида покрытий. Соответствующий фотометрический прибор – блескомер включает в свой состав осветитель, оптическую систему, формирующую параллельный пучок света, и приемный канал, состоящий из фотоприемника и оптической системы, фокусирующей свет на нем. Оптические схемы блескомеров, а также методы контроля покрытий регламентируются различными стандартами, как отечественными, так и европейскими, американскими. Регламентируется использование данных измерительных приборов при контроле блеска лакокрасочных материалов, пластиков, бумаги, металлов, керамических и деревянных изделий и т.д. [1]. В последние годы наблюдается рост спроса на регулярный осмотр солнечных панелей и оценку качества очистки поверхностей. Объем рынка блескомеров оценивается примерно в 30 000 единиц в год.

Блеск покрытий влияет на такие технические характеристики изделий, как атмосферостойкость (гладкие поверхности имеют более сильное отражение, удерживают меньше влаги и загрязнений), теплоотведение (более гладкие поверхности лучше отражают свет) и ряд других.

В соответствии с [2-3] за 100 единиц блеска принимается отражение от образца из черного полированного стекла с показателем преломления 1,567, измеренным при длине волны 587,6 нм. Регламентируются следующие геометрии блеска в зависимости от степени блеска поверхности образца: геометрия 20° - для высокоглянцевых поверхностей, геометрия 60° - для поверхностей со средним блеском, геометрия 85° - для матовых поверхностей. Принцип определения блеска основан на измерении относительной интенсивности направленно отраженного от контролируемой поверхности пучка света. Интенсивность этого пучка света измеряют в определенном угловом поле вокруг угла отражения. Ось падающего пучка света должна находиться под углом $20,0^{\circ}\pm0,1^{\circ}$, $60,0^{\circ}\pm0,1^{\circ}$ и $85,0^{\circ}\pm0,1^{\circ}$ к нормали к испытуемой поверхности. В настоящее время в литературе отсутствуют исследования по анализу влиянию неточности установки геометрии освещения-наблюдения на погрешность измерения блеска.

В настоящей работе исследовано отклонение значения блеска при абсолютной допустимой погрешности задания геометрий освещения-наблюдения путем теоретических вычислений и экспериментальной работы с прибором для высокоточного измерения углов (гониометром). Выполнено сравнение результатов двух видов анализа.

Теоретическая часть исследования основывается на определении значения блеска согласно [2-3]. При этом необходимо учитывать, что связь между коэффициентом преломления материала и его блеском может быть определена на основе формул Френеля, которые сводятся к соотношению [2-3]:

$$K(n,\alpha_1) = 100 \cdot A(\alpha_1) \cdot \left[\left[\frac{\sin(\alpha_1 - \alpha_3)}{\sin(\alpha_1 + \alpha_3)} \right]^2 + \left[\frac{\tan(\alpha_1 - \alpha_3)}{\tan(\alpha_1 + \alpha_3)} \right]^2 \right]$$
(1)

где $K(n, \alpha_1)$ - блеск образца с показателем преломления *n* при угле падения света α_1 ; $A(\alpha_1)$ -поправочный коэффициент, зависящий от угла падения α_1 ;

 α_1 -угол падения света;

α₃- угол преломления света.

На основании анализа (1) определены отклонения блеска при изменении геометрии освещения - наблюдения в соответствии с абсолютной допустимой погрешностью.

Экспериментальная часть работы проведена с использованием гониометрической установки. Исследования проводились на образце из черного полированного стекла с известным показателем преломления путем фотометрического измерения отраженного сигнала при изменении геометрии освещения – наблюдения в допустимых пределах погрешности.

В работе приведены основные результаты теоретических и экспериментальных исследований и получены зависимости, позволяющие задать допуски на изготовление элементов оптической системы блескомера в зависимости от устанавливаемых значений абсолютной допустимой погрешности измерений с учетом стабильности работы элементов электрической части.

ЛИТЕРАТУРА

1.Gloss-meters. Gloss Meter Industry Standards: official website. - North America, 2021. URL: http://www.gloss-meters.com/GlossIntro5.html (date of application 19.03.2022).

2.ГОСТ 31975-2017. Материалы лакокрасочные. Метод определения блеска лакокрасочных покрытий под углом 20°, 60°, и 85: межгосударственный стандарт: дата введения 2018-07-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – Изд.официальное. – Москва: Стандартинформ, 2017. – 24 с.

3.ISO 2813:2014. Paint materials. Method for determination of gloss of paint materials at 20° , 60° and 85° : international standard: Fourth edition 2014-10-01 / International Organization for Standardization. -Official publication. - Switzerland: ISO copyright office, 2014. - 24 p.

ОБНАРУЖЕНИЕ ДЕФЕКТОВ В ПОДОШВЕ РЕЛЬСОВ МЕТОДОМ ВЫТЕСНЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОТОКА

© 2022 г. <u>Иванов Георгий Андреевич^{1,2}</u>, А.А. Марков², В.А.Сясько¹

1 – Санкт-Петербургский горный университет, 199106, С-Петербург, 21-я лин. В.О., д.2

2 – АО «Радиоавионика», 190005, С-Петербург, Троицкий пр., 4, лит. Б.

* - george97ivanov@yandex.ru; ** - amarkovspb@gmail.com; *** - syasko_va@pers.spmi.ru

На сети дорог ОАО «РЖД» по официальной статистике ежегодно около 30% изломов рельсов происходят из-за дефектов в подошве рельса. Это свидетельствует о том, что известные способы и устройства не обеспечивают надежного и своевременного обнаружения указанных дефектов. Попытки обнаружить дефекты в перьях подошвы рельсов акустическими методами контроля с поверхности катания, в том числе с помощью фазированных решеток, не нашли успешного применения. Обнаружение дефектов с поверхности перьев подошвы ультразвуковыми методами ограничено состоянием поверхности перьев, наличием загрязнений и коррозии [1].

В работе предлагается технология обнаружения дефектов в перьях подошвы рельсов с помощью метода вытеснения магнитного потока [2]. Работоспособность метода в скоростной рельсовой дефектоскопии подтверждена многолетним опытом создания и эксплуатации системы намагничивания для поиска дефектов в головке рельса, а также конструктивных элементов пути [3]. Выполнено численное моделирование процессов намагничивания металла рельса в области перьев подошвы. По расчетным данным изготовлена система намагничивания и система съема и обработки информации, включающая в себя линейку из 4 датчиков Холла, измеряющих тангенциальную составляющую вектора напряженности магнитного поля. Проведены экспериментальные работы по оценке выявляемости искусственных дефектов, представленных на рис.1 (пропилы с величиной раскрытия 1-1,5 мм) в фрагментах рельсов, с учетом наличия рельсовых скреплений.



Рис. 1. Искусственные дефекты в рельсе

Вид сигналов на выходе датчиков Холла при сканировании пера с искусственными дефектами представлен на рис. 2.



Рис. 2. Сигналы от искусственных дефектов в подошве рельса

В ходе исследований:

 проведено моделирование процесса намагничивания подошвы рельсов, определены оптимальные параметры системы намагничивания;

 изготовлен макет системы намагничивания и съема информации, подтверждены результаты численного моделирования, подтверждена возможность обнаружения моделей дефектов в перьях подошвы.

 установлено по результатам экспериментальных исследований, что минимальная глубина обнаруживаемого дефекта составляет 4 мм при условии его нахождения вне зоны скреплений (не менее 8 мм в зоне скрепления).

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент № 2645818 С1 Российская Федерация, МПК G01N 29/04. Способ ультразвукового контроля подошвы рельсов: № 2016150036: заявл. 19.12.2016: опубл. 28.02.2018 / А. А. Марков, С. Л. Молотков; заявитель Открытое акционерное общество "РАДИОАВИОНИКА".

2. Патент № 2736177 С1 Российская Федерация, МПК G01N 27/82. Способ магнитной дефектоскопии подошвы рельсов: № 2020119190: заявл. 02.06.2020: опубл. 12.11.2020 / А. А. Марков, А. Г. Антипов, В. В. Мосягин; заявитель ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО "РАДИОАВИОНИКА".

3. Antipov A.G., Markov A.A. DETECTABILITY OF RAIL DEFECTS BY MAGNETIC FLUX LEAKAGE METHOD // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. T. 55. № 4. C. 277-285.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

© 2022 г. Валерий Валерьевич Малый¹*, А. С. Костюхин¹**

¹ – Университет ИТМО, 197101 Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49 * - banqvalera@mail.ru; ** - noxx9999@yandex.ru

Цель работы. Разработка технологии, позволяющей автоматизировать процесс неразрушающего контроля качества паяных соединений теплообменных аппаратов на дефекты типов «неспай» и «непропай».

Суть обсуждаемой проблемы. Теплообменные аппараты представляют собой геометрически сложную конструкцию с множеством различных внутренних полостей, что, в свою очередь обуславливает сложность технологии пайки, связанную с нанесением припоя и обеспечением стабильности величины гарантированного зазора между сопрягаемыми элементами. Наиболее остро стоит вопрос качества паяных соединений, так как из-за особенностей режимов работы теплообменных аппаратов, а также из-за высоких нагрузок при эксплуатации, дефект может привести к выходу дорогостоящего теплообменного аппарата из строя, который по стоимости разработки и производства составляет 20-40% стоимости изделия. Основными дефектами паяных соединений являются «непропай» и «неспай», а их наличие, в большинстве случаев, приводит к нарушениям теплообменных режимов в аппарате, и как следствие, к выходу оборудования из строя. Минимальный размер площади дефекта, который в соответствии с конструкторской документацией необходимо выявлять, составляет 1мм².

Полученные результаты. Существующая оценка качества пайки регламентируется ОСТ 92-1190 и на практике, в большинстве случаев, сводиться к проведению металлографических исследований паяных соединений. Ha заводе-изготовителе теплообменных аппаратов, проводится рентгеновский контроль качества паяных соединений. Рентгеновский метод позволил уверенно определять наличие заплавления каналов припоем, однако ввиду физических особенностей метода оказался не способен обнаружить несплошности в паяных соединениях из-за их малого раскрытия. Одним из путей решения задачи обеспечения качества паяных соединений теплообменных аппаратов технологий неразрушающего является внедрение новых контроля, а также совершенствование уже используемых методов, средств и методик дефектоскопии и дефектометрии. Согласно ГОСТ 24715-81[1], основными методами неразрушающего контроля для обнаружения несплошностей (непропай, неспай) являются радиационный, акустический и вихретоковый. Проанализировав данные методы неразрушающего контроля, а также, рассмотрев работы, в которых были представлены и проанализированы

подобные вопросы, было отмечено, что ультразвуковой метод является наиболее перспективным методом контроля качества паяных соединений теплобменных аппаратов. Также, проведя анализ текущих достижений в области неразрушающего контроля паянных соединений, был сделан вывод, что на данный момент существуют методы и средства контроля, позволяющие обнаруживать дефекты типа «непропай» и «частичный непропай» [2, 3]. Однако, задача выявления дефектов типа «неспай» до сих пор остается актуальной.

Выводы. Проведен анализ методов и средств ультразвуковой дефектоскопии, в части их применимости для выявления дефектов типа «неспай» и «непропай» в паяных соединениях оребренных конструкций теплообменных аппаратов. Для повышения вероятности обнаружения дефектов в паяных соединениях, принято решение использовать комбинированный эхо-импульсный и теневой методы.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 24715-81. Соединения паянные. Методы контроля качества: утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 29 апреля 1981 г. N 2182: дата введения 1983-01-01. М.: Издательство стандартов, 1981. – 11 с. 2. *Кинжагулов И.Ю*. Модель термооптического возбуждения ультразвуковых волн в паяных тонкостенных изделиях // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54. № 7. С. 39–44. 3. *Сергеев Д.С.* Методика контроля качества паяных соединений камер ЖРД с применением метода лазерно-ультразвуковой диагностики / *Д.С. Сергеев, Н.В. Астрединова* // Сборник трудов II Всероссийский конгресс молодых ученых. – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – С. 67.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПРОХОЖДЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ СКВОЗЬ ЗАГОТОВКУ ИЗ ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА

2022 г. А.В. Блинова, <u>Никита Вернерович Ушков</u>, В.К. Грязев, Д.В. Злобин ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т.Калашникова», 426069, г. Ижевск, Студенческая, 7 <u>anna.tarasovaaa@mail.ru</u> Научный руководитель – к.т.н., доцент О.П. Богдан

Целью данной работы является исследование коэффициента прохождения акустической волны сквозь заготовку из терморасширенного графита.

Изделия из терморасширенного графита (ТРГ) обладают исключительным сочетанием интересных свойств и представляют собой основу для разработки многофункциональных материалов. Высокая пористость ТРГ, низкая насыпная плотность и хорошо развитая удельная поверхность определяют сорбционные свойства ТРГ [1]. Необходимо проводить контроль свойств (плотность, теплопроводность и т.п.) объектов из ТРГ в процессе производства, так как ТРГ применяется в опасных производственных объектах. Одним из основных физических параметров заготовок из ТРГ является плотность и неоднородность ее распределения по площади заготовки.

Для исследования коэффициента прохождения акустической волны *D* использовался амплитудно-теневой метод акустического контроля, в основе которого лежит измерение амплитуды прошедшей акустической волны сквозь заготовку из ТРГ. Экспериментальная установка, используемая для данной цели, и принцип ее работы представлены в [2-5].

Коэффициент прохождения акустической волны D сквозь заготовку из ТРГ определялся как отношение амплитуды прошедшей волны сквозь заготовки из ТРГ (U_{0K}) к амплитуде прошедшей волны по воздуху (U):

$$D = \frac{U_{OK}}{U_{GO3O}} \cdot 100\%$$
(1)

Исследование коэффициента прохождения акустической волны D через заготовки из ТРГ проводилась на образцах из ТРГ размером 30х30 см, изготовленных ООО «СИЛУР», толщиной h (0,2 – 1,5 мм) с различными плотностями ρ , лежащими в диапазоне 643 кг/м³ – 1543 кг/м³.

По полученным результатам измерения получен график зависимости коэффициента прохождения акустической волны *D* от произведения толщины h заготовки на ее плотность ρ (рис. 1).



Рисунок 1 – График зависимости коэффициента прохождения *D* от произведения толщины h на плотность р заготовки

Таким образом, выполнено исследование коэффициент прохождения акустической волны сквозь заготовку из ТРГ, которое показало, что с увеличением произведения толщины на плотность заготовки коэффициент прохождения уменьшается. Полученная зависимость может быть использована для определения критериев браковки при выполнении контроля заготовок из ТРГ на стадии изготовления.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям «УМНИК-21» в рамках договора 17166ГУ/2021.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Финаенов А.И, Трифанов А.И., Журавлев А.М.* Области применения и получение терморасширенного графита // Новые материалы и технологии. 2004. №1 (2). С. 77–80.

2. *Bogdan O.P., Zlobin D.V., Muravieva O.V., Muraviev V.V., Volkova L.V.* Acoustic and Eddy Current Methods of Nondestruc-tive Testing of Thermally Expanded Graphite Sheets // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020, V 543 No. 1. P. 012033. DOI: 10.1088/1755-1315/543/1/012033.

3. *Bogdan, O.P, Muravieva O.V., Zlobin D.V.* Acoustic Density Testing of Blanks Made of Thermally Expanded Graphite // AIP Conference Proceedings. Proceeding of the 14th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures. 2020. P. 04000.

4. *Bogdan, O.P, Zlobin D.V., Murav'eva O.V, Molin S.M., Platunov A.V.* Evaluation of nonuniformity of elastic properties of sheets made from closed-cell polyolefin foams by acoustic method // Приборы и методы измерений. 2021. Т. 12. № 1. С. 58–66.

5. Богдан О.П., Муравьева О.В., Платунов А.В., Рысев Д.С. Исследование характеристик листов пенополиэтилена акустическими методами // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2020. Т 24. № 2. С. 61-68.

ОЦЕНКА ОСНОВНОЙ ЧАСТОТЫ СПЕКТРА АКУСТИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСА ПРОШЕДШЕГО СКВОЗЬ ЗАГОТОВКУ ИЗ ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА

2022 г. А.В. Блинова, <u>Егор Антонович Гуляев</u>, Д.В. Злобин ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т.Калашникова», 426069, г. Ижевск, Студенческая, 7 <u>anna.tarasovaaa@mail.ru</u> Научный руководитель – к.т.н., доцент О.П. Богдан

Целью данной работы является исследование основной частоты спектра акустического сигнала прошедшего сквозь заготовки из терморасширенного графита (ТРГ).

Графит и различные композитные материалы на основе графита, включая графитовые интеркалированные соединения, широко используются в различных областях науки, техники и промышленности. Подобно графиту, ТРГ химически инертен и термостоек. Его электропроводность и теплопроводность определяются пористой структурой материала и могут сильно варьироваться [1-3]. Важным отличием ТРГ от всех других порошкообразных углеродных материалов является его способность формировать углеродные изделия без какого-либо связующего.

Для исследования изменения основной частоты спектра акустического импульса прошедшего сквозь заготовку из ТРГ разной плотности используется бесконтактный амплитудно-теневой метод акустического контроля, в процессе реализации которого излучается акустический импульс, проходящий через заготовку, и далее регистрируется прошедший акустический сигнал с последующей обработкой с помощью ПО WinПOC.

Исследования выполнены с помощью экспериментальной установки, представленной в [2-5], для демпфированного и недемпфированного приемника акустической волны на заготовках из ТРГ размером 30х30 см, изготовленных ООО «СИЛУР», толщиной 0,4 мм с различными плотностями 643 кг/м³, 709 кг/м³, 1147 кг/м³. Для зарегистрированных акустических импульсов, прошедших сквозь заготовку из ТРГ, с помощью ПО WinПОС строился спектр, по которому определялась основная частота foch спектра акустического импульса. По полученным данным построена зависимость основной частоты спектра f_{och} от плотности ρ заготовки из ТРГ (рис. 1). Из графика видно, что с увеличением плотности заготовки из ТРГ наблюдается рост основной частоты в спектре акустического импульса прошедшего сквозь заготовку из ТРГ как для демпфированного, так и для недемпфированного приемника акустической волны. При этом демпфирование приемника акустической волны приводит к уменьшению основной частоты спектра акустического импульса прошедшего сквозь заготовку из ТРГ.



Рисунок 1 – Зависимость основной частоты *focн* спектра от плотности р заготовки из ТРГ

По результатам исследований можно сделать вывод о том, что увеличение плотности заготовки из ТРГ приводит к увеличению основной частоты спектра прошедшего акустического сигнала сквозь заготовку из ТРГ, что может являться дополнительным критерием при оценке качества заготовок из ТРГ и требует дальнейшего исследования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям «УМНИК-21» в рамках договора 17166ГУ/2021.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yakovlev A. V., Finaenov A. I., Zabud'kov S. L., Yakovleva E. V. Thermally Expanded Graphite: Synthesis, Properties, and Prospects for Use // Russian Journal of Applied Chemistry. 2006. V. 79. No. 11. P. 1741–1751.

2. *Bogdan O.P., Zlobin D.V., Muravieva O.V., Muraviev V.V., Volkova L.V.* Acoustic and Eddy Current Methods of Nondestruc-tive Testing of Thermally Expanded Graphite Sheets // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020, V 543 No. 1. P. 012033. DOI: 10.1088/1755-1315/543/1/012033.

3. *Bogdan, O.P, Muravieva O.V., Zlobin D.V.* Acoustic Density Testing of Blanks Made of Thermally Expanded Graphite // AIP Conference Proceedings. Proceeding of the 14th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures. 2020. P. 04000.

4. *Bogdan, O.P, Zlobin D.V., Murav'eva O.V, Molin S.M., Platunov A.V.* Evaluation of nonuniformity of elastic properties of sheets made from closed-cell polyolefin foams by acoustic method // Приборы и методы измерений. 2021. Т. 12. № 1. С. 58–66.

5. Богдан О.П., Муравьева О.В., Платунов А.В., Рысев Д.С. Исследование характеристик листов пенополиэтилена акустическими методами // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2020. Т 24. № 2. С. 61-68.

ЗЕРКАЛЬНО-ТЕНЕВОЙ КОНТРОЛЬ ОСЕЙ КОЛЕСНЫХ ПАР С ЦИЛЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЭМА-МЕТОДОМ

© 2022 г. Полина Анатольевна Никитина

Научный руководитель к.т.н. Платунов А.В. ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т.Калашникова», 426069 г. Ижевск, ул.Студенческая, д.7 e-mail: uosp@mail.ru

В настоящее время для контроля осей подвижного состава зеркально-теневым методом (ЗТМ) в радиальном направлении с цилиндрической поверхности используются пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) с частотой генерации продольной волны 5 МГц. Измерение амплитуды донного сигнала в этом случае имеет субъективную составляющую: на полученные результаты влияют сила прижатия ПЭП к цилиндрической поверхности, количество и качество контактной жидкости, отклонения шероховатости поверхности. Перечисленных недостатков лишен бесконтактный электромагнитно-акустический способ приема-ввода волн. Целью работы является демонстрация возможности ЗТМ контроля осей с использованием электромагнитно-акустического преобразователя (ЭМАП).

Для сравнения акустических полей П111-5-6 (с дефектоскопом УД2-102ВД) и ЭМАП структуроскопа СЭМА (структуроскоп внесен в реестр средств измерений №61957-15) были экспериментально получены диаграммы направленности с использованием образца ОСО 32-0006-2002, рабочая поверхность которого соответствует цилиндрическому профилю оси. Ширина раскрытия диаграмм оказалась сопоставима (рис.1), при этом ПЭП излучает продольную волну, а ЭМАП – поперечную, чувствительность которой к дефектам структуры выше.



Рисунок 1 – диаграммы направленности для ЭМАП (а) и (б) П111-5-6

Сравнение ПЭП и ЭМАП проведено на четырех вагонных и одной локомотивной осях, бывших в эксплуатации. Поверхность ввода приведена в соответствие с нормативнотехнической документацией. Шероховатость поверхности в по шкале R_Z оценивалась с помощью профилографа. Согласно требованиям [1,2] в любых трех точках одной зоны разница амплитуд донных сигналов ΔU не должна отличаться больше чем на 8 дБ (6 дБ для новых осей). С увеличением R_Z поверхности амплитуда донного импульса ожидаемо снижается, однако если в контролируемой зоне шероховатость поверхности меняется не значительно, ΔU будет минимальна. В случае, когда шероховатость поверхности меняется более существенно в пределах одной зоны контроля, ΔU будет увеличиваться.



Рисунок 2 – Разница амплитуд донных сигналов при увеличении разброса шероховатости поверхности

На рисунке 2 показана разница ΔU между максимальным и минимальным значениями амплитуды, полученным по измерениям различными преобразователями в пяти точках исследуемой зоны, в зависимости от увеличения разброса шероховатости ΔR_Z . Эксперимент показал, что увеличение ΔR_Z ведет к возрастанию разницы амплитуд, измеренных ПЭП, причем на некоторых участках она превысила допустимые 6-8 дБ. При измерении ЭМАП корреляция между распределением амплитуд сигнала и шероховатостью поверхности не выявлена.

Таким образом, использование ЭМАП для ЗТМ осей с цилиндрической поверхности целесообразно, так как отсутствует влияние отклонений шероховатости поверхности объекта на амплитуду донного сигнала, и имеется потенциал для повышения чувствительности к дефектам структуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 33200-2014 Межгосударственный стандарт. Оси колесных пар железнодорожного подвижного состава. Общие технические условия. [Электронный pecypc]. Режим доступа: https://docs.cntd.ru/document/1200121492 (Дата обращения: 29.03.2022 г.)

2. ТИ НК В.21-1.2019 Технологическая инструкция по неразрушающему контролю деталей и составных частей колесных пар вагонов при ремонте. Ультразвуковой метод. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://opzt.ru/wp-content/uploads/2019/12/TI-NK-V.21-1.2019.pdf (Дата обращения: 29.03.2022 г.)

МЕТОД ПОМЕХОУСТОЙЧИВОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

<u>Алтай Ельдос</u>^{1*}, **А.В.** Федоров^{1**}, **К.А.** Степанова^{1***,} **Д.О.** Кузиванов^{1****} ¹ – Университет ИТМО, 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект д. 49.

*- aeldos@inbox.ru,, **- avfedorov@itmo.ru, ***- ledy.xs93@yandex.ru, ****- kuzivanovdmitry@gmail.com

На сегодняшний день в неразрушающем контроле для повышения точности измерения сигналов акустической эмиссии (АЭ) актуальной научной задачей является разработка помехоустойчивых методов обработки измерительной информации. Данная актуальность обусловлена тем, что помехоустойчивые методы во многом позволяют противостоять искажающему действию помех, возникающих при регистрации сигналов АЭ и повысить точность измерения при выделении информационных составляющих. В практических условиях точность измерения информационных составляющих сигналов АЭ значительной степени снижается тогда, когда влияет помеха, вызванного сварочным производством [1]. Наличие такой помехи в рассматриваемом наборе измерений приводит к искажению амплитудно-временных параметров сигнала АЭ и снижает их точностных характеристик и, следовательно, данные измерений становится непригодным даже для визуальной оценки акустических событий. В работе [2] для ослабления и идентификации формы сигнала данной помехи синтезирован и предложен помехоустойчивый метод обработки сигнала, основанный на двунаправленном алгоритме фильтров Баттерворта. Использование таких полиномиальных фильтров позволяют производить их настройку в зависимости от характеристик сигналов АЭ для дальнейшего выделения информационных составляющих из аддитивной смеси помехи. Результаты апробации предложенного метода показали, что сочетание методов спектрального анализа и оптимизирующей настройки параметров синтеза полиномиальных фильтров позволяет максимизировать отношения акустического сигнала к влияющей помехе на выходе системы обработки.

Однако, в отличие от [2], в данном докладе рассматриваются результаты оценки эффективности методов полиномиальной фильтрации Баттерворта, Чебышева, Бесселя на помехоустойчивость и точность при использовании экспериментально-тестовых моделей сигналов АЭ и помех. Такое исследование дает значимое преимущество, заключающееся в возможности синтезировать помехи и формировать их аддитивные модели для получения расчетно-теоретических результатов между входом и выходом системы обработки сигналов АЭ.

Целью рассматриваемого доклада является оценка расчетных показателей отношения сигнал/помеха и погрешности фильтрации, выработанного при реализации методов полиномиальной фильтрации для обоснования цифрового фильтра.

Постановка задачи исследования. Сформулируем задачу обработки сигнала АЭ для полиномиальной фильтрации аддитивной помехи, вызванного сварочным производством. Формулируемая задача обработки сигнала АЭ в первую очередь направлена на выделение информационных составляющих компонент s(q) из аддитивной смеси сигналов АЭ и высокочастотной помехи $\xi(q)$, описываемого в виде (1). Ставится задача выделения информационного сигнала s(q) путем полиномиальной высокочастотной и низкочастотной фильтрации анализируемого сигнала x(q), регистрируемого в дискретные моменты времени $q=q_1...,q_n$, от искажающей помехи $\xi(q)$.

$$x(q) = s(q) + \xi(q), \tag{1}$$

где s(q) – сигнал АЭ, $\xi(q)$ – высокочастотная помеха. Модель сигнала информационной составляющей получены из [3], а в качестве модели помехи рассматриваются характеристики идентифицированной формы сигнала электромагнитной помехи, изменяющейся в широком диапазоне частоты 800кГц [2].

$$\xi_{3\pi}(q) = \sum_{i=1}^{m} A_{i} \sin(2\pi \frac{f_{i}}{f_{\pi}} k + \varphi_{i}), \qquad (2)$$

Таблица 1

где m – число гармоник помехи, A_i – амплитуда *i*-ой гармоники помехи, f_i – частота помехи, f_{π} – частота дискретизации помехи, k – порядковый номер отсчетов помехи, φ_i – начальная фаза сигнала *i*-ой гармоники помехи.

Базируясь на аппарат передаточных функций для решения поставленной задачи (1) и ослабления влияние помехи (2) получены результаты синтеза, настройки полиномиальных фильтров верхних и нижних частот (ФВЧ и ФНЧ) Баттерворта, Чебышева, Бесселя и изучены их вырабатываемые свойства для фильтрации.

Результаты исследований. При различных значениях зашумленности сигналов АЭ оценивалась помехоустойчивость системы обработки и погрешность фильтрации. Результаты сравнения показателей, характеризующих качества системы обработки сигналов АЭ при фильтрации помехи представлены в табл. 1.

Показатели ОСП после, дБ СКО, мВ ФНЧ ОСП до, дБ ФНЧ в [2] ФНЧ ФНЧ ФНЧ ФНЧ Чебышева Бесселя Чебышева Баттерворта Бесселя 55,9866 19,7332 0,00029 0,0046 0,0061 -10 26,0380 0,00035 -5 50,9737 16,6756 18,2825 0,0022 0,0059 0,00039 0,0050 47,8142 14,2940 16,4388 0,0065 0 5 42,2212 11,3280 13.9640 0.00043 0,0064 0,0055 7,5650 0,00050 0,0013 0,0061 10 38,5917 9,2708 ОСП до, дБ ФВЧ в [2] ФВЧ ФВЧ ФВЧ ФВЧ ФВЧ Бесселя Чебышева Баттерворта Бесселя Чебышева -10 71,1891 25,0885 28,9426 0,00020 0,0028 0,0043 58,7505 24,6672 19,5249 0,00029 0,0029 0,0058 -5 45,5076 23,6069 19,1447 0,00032 0,0032 0,0061 0 22,2834 41,2702 13,9796 0,00051 0,0030 0,0055 5 10 35,8920 21,9811 7,7510 0,00058 0,0032 0,0055

Полученные результаты сравнительной оценки показывают, что при использовании алгоритма [2] помехоустойчивость системы обработки сигнала АЭ возрастает (показатель ОСП), следовательно, меньше искажает форму сигнала (показатель СКО), чем при использовании фильтров Чебышева и Бесселя. Это позволяет сделать вывод о том, что при обработке сигналов АЭ алгоритм обработки [2] вырабатывает наименьшее значение собственной ошибки, обусловленной их свойствами и характеристиками. Если сравнить ОСП и СКО для ФВЧ и ФНЧ оцениваемого алгоритма между собой, то высокочастотная фильтрация на основе ФВЧ позволяет повысить качества обработки сигнала.

ЛИТЕРАТУРА

- Степанова К.А. Разработка методики акустико-эмиссионного контроля дефектообразования в процессе формирования соединения сваркой трением с перемешиванием: автореф. канд. тех. наук: 05.11.13 / Степанова Ксения Андреевна. – СПб, 2020. - 20 с.
- Altay Y.A., Fedorov A.V., Stepanova K.A. Acoustic emission signal processing based on polynomial filtering method // Proceedings of the 2022 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. 2022. P. 1320 – 1326.
- 3. Алтай Е., Федоров А.В., Степанова К.А. Формирование моделей информационных составляющих для оценки спектрально-статистических характеристик и влияние параметра фильтров на точность измерения сигналов акустической эмиссии // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. 2022.

НАЗВАНИЕ — ОПЫТ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ НА ПАО «ЧМК» для XXXII УРАЛЬСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ «ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ (ЯНУСОВСКИЕ ЧТЕНИЯ)»

© 2022 г. Бабинов Сергей Юрьевич, Хисматулина Лилия Расифовна, Маврин А.С.

Научный руководитель работы: Молоканов Сергей Яковлевич (Удостоверение №РО-0139; Третий уровень по акустическому виду НК; Третий уровень по вихретоковому виду НК; Второй уровень по магнитному виду НК)

¹ – ПАО «ЧМК», 454047, 2-я Павелецкая, № 14 * - SergeyBabinov@mechel.ru, LiliyaHismatulina@mechel.ru

В 2016 году на Челябинском металлургическом комбинате введена в эксплуатацию линия автоматизированного неразрушающего контроля рельсов производства NDT Technologies Inc., имеющая в своем составе как ультразвуковые станции («SONOTRONTM») – EMAT 880, «SONOTRONTM/24»), так и вихретоковую станцию («EDDYTRONTM»). Данные станции линии НК предназначены для проведения приемо-сдаточного неразрушающего контроля по внутренним и поверхностным дефектам рельсов длиной 100 и более метров в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51685-2013 и СТО РЖД 1.11.004-2009.

В материале рассматриваются технические аспекты проведения неразрушающего контроля рельсовой продукции на автоматизированной линии НК. Приведены особенности внедренных доработок и дооснащения элементов линии НК, выполненные на основе бесконтактных лазерных технологий. Данные модернизации позволяют обеспечивать сохранность элементов систем станций, входящих в состав линии НК, препятствуя заданию на контроль стометровых рельсов, имеющих превышение предельно-допустимой кривизны концевых участков, что в свою очередь позитивно влияет на проведение достоверного неразрушающего контроля рельсовой продукции в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51685-2013 и СТО РЖД 1.11.004-2009.

Рассматривается опыт ПАО «ЧМК» в проведении импортозамещения в части изготовления динамических вихретоковых преобразователей для станции «EDDYTRONTM», а также изготовления ручных ультразвуковых преобразователей, использующихся для контроля листового проката.

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ МЕДИ, ПОЛУЧЕННЫХ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

© 2022 г. Андрей Андреевич Орлов^{1*}, А. Л. Сотников^{2**}

¹ – Донбасский государственный технический институт, 94204, Алчевск, пр. Ленина, 59 ² – Донецкий национальный технический университет, 83001, Донецк, ул. Артема, 58 * - <u>orlov.orlov-andrey193@yandex.ru</u>; ** - <u>0713019870@mail.ru</u>

Научный руководитель: д.т.н., доц., зав. каф. «Машины металлургического комплекса» ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ» Вишневский Дмитрий Александрович

При внедрении технологии сварки трением с перемешиванием (далее – СТП) в производство металлоконструкций из меди, первоочередным вопросом ставится контроль качества получаемых сварных соединений из меди. Широкая разновидность методов неразрушающего контроля (далее – НК) дает возможность выполнять контроль качества с различной степенью достоверности идентификации разнообразных типов дефектов.

Известны работы [1,2,3 и др.], посвященные комплексному рассмотрению методов НК применительно к сварным соединениям, полученных СТП, главным образом из алюминия, его сплавов и титана. Но технология СТП применима и к другим цветным металлам, в рассматриваемом случае к меди, которая также широко используется в различных отраслях промышленности, в энергетике, металлургии и т.д. [5].

С целью выбора рациональных методов НК был выполнен сопоставительный анализ методов контроля с типовыми дефектами сварных соединений из меди, полученных СТП. Сопоставительный анализ позволил выделить общие признаки и функциональные возможности анализируемых методов НК, определить различия, исходя из достоверности идентификации типовых для СТП дефектов конкретных объектов контроля, общих для всех анализируемых методов.

Анализ работ [1,3,4,5] позволил систематизировать наиболее распространённые дефекты сварных соединений из алюминия, его сплавов и титана. Эти металлы, как и собственно медь, относятся к классу цветных металлов, что позволяет предполагать о сходстве возможных типовых дефектов при их сварке с помощью технологии СТП.

В ходе анализа методов НК сварных соединений, полученных СТП, были выделены две группы методов: мониторинга процесса сварки и контроля качества сварных соединений (рис. 1). Дальнейшая классификация методов НК на основе сопоставительного анализа была положена в основу выработки подходов по выбору рациональных методов контроля качества сварных соединений из меди, полученных СТП, исходя из различных критериев: трудоемкости контроля, количества и типов выявляемых дефектов, оперативности и безопасности контроля и т.д. Кроме этого, проведенные исследования дали возможность сформулировать и обозначить ряд задач, которые необходимо решить далее с целью подтверждения правильности выбора рациональных методов НК.



Рис. 1. Классификация методов неразрушающего контроля применительно к сварным соединениям из меди, полученных СТП

Таким образом, с точки зрения выше обозначенных критериев, рациональными методами контроля качества сварных соединений из меди является: 1) визуальный и измерительный контроль для идентификации внешних дефектов; 2) ультразвуковой контроль, главным образом с применением фазированных антенных решеток, для идентификации внутренних дефектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Филиппов, А. В. Определение дефекта в виде заглаженного непровара после сварки трением с перемешиванием при неразрушающем контроле [Текст] / А. В. Филиппов, С. Ю. Тарасов, Е. А. Колубаев, В. Е. Рубцов // Томск: Фундаментальные исследования. — 2015. — №6. — С. 296–300.

2. Бычков, В. М. Неразрушающий контроль сварных соединений, полученных сваркой трением [Текст] / В. М. Бычков, М. П. Савичев // Уфа : УГТУ — 2012. — 3 с.

3. Рубцов, В. Е. Использование методов неразрушающего контроля для диагностики дефектов в сварных швах, полученных сваркой трением с перемешиванием [Текст] / В. Е. Рубцов, С. Ю. Тарасов, Е. А. Колубаев, С. Ф. Гнюсов // Томск: Контроль. Диагностика. — 2015. — №2. — С. 51–58.

4. Левихина, А.В. Рекомендации по методике проведения теплового контроля соединений, получаемых сваркой трением с перемешиванием в процессе сварки [Текст] / А. В. Левихина, Г. Е. Руденский // Современные проблемы науки и образования. — 2013. — № 6.

5. Кривонос, Е. В. Анализ дефектов, возникающих при сварке трением с перемешиванием [Текст] / Е. В. Кривонос, И. К. Черных, Е. Н. Матузко, Е. В. Васильев // Омск : Омский научный вестник. — 2017. — №2 (152). — С. 24–27.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ УГЛЕРОД-КЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

©2022 г. <u>Павлухин Евгений Александрович</u>

Университет ИТМО, 197101 г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., дом 49, лит. А E-mail: <u>Zhekakbr@gmail.com</u>, тел.: 8 (988) 964 30 83

Суть обсуждаемой проблемы.

В настоящее время в различных отраслях промышленности вопрос обеспечения качества выпускаемой продукции и ее контроля стоит особенно остро. Это связано, в первую очередь, с постоянно возрастающими требованиями к повышению надежности при возрастающих нагрузках на изделия, что влечет за собой ужесточение технических норм на наличие дефектов определенного типа в готовой продукции. Сегодня данным требованиям в полной мере удовлетворяют углерод-керамические композиционные материалы (УККМ).

На качество конструкций УККМ влияет множество факторов, в том числе параметры технологического процесса и технический уровень оборудования изготовления материалов и конструкций. Одним из важнейших моментов в процессе создания изделий является формирование армирующих компонентов, матрицы и их структурных связей. Эффективность работы системы структурных связей зависит от однородности (неоднородности) строения материала. Требуемые механические и теплофизические свойства обеспечиваются однородностью (сплошностью) структуры, изменение которой отражается на свойствах материала в целом. В случае нарушения сплошности может произойти неравномерное (непредвиденное) распределение механических и тепловых полей, которое поставит под угрозу работоспособность всей конструкции.

Целью работы является разработка методики неразрушающего контроля изделий из углерод-керамических композиционных материалов.

Наиболее перспективными с точки зрения повышения достоверности результатов проводимой дефектоскопии изделий и скорости ее проведения являются автоматизированные системы неразрушающего контроля.

Для неразрушающего контроля изделий из УККМ в условиях производства и эксплуатации применяются различные методы, основанные на взаимодействии проникающего излучения с объектом контроля: радиационные, тепловые, акустические, радиоволновые и др. Одним из наиболее распространенных методов является акустический, имеющий преимущества перед другими методами контроля изделий из УККМ. Анализ состояния разработок автоматизированных систем неразрушающего контроля изделий из УККМ, а также существующей технической базы для проведения работ по автоматизации, позволил определить круг проблем и сопутствующих факторов, определяющих особенности разработки узлов систем автоматизированного НК. Следует отметить, что ряд проблем при проектировании систем автоматизированного НК возникает из-за специфических свойств УУКМ и УККМ, прежде всего, анизотропности структуры.

Полученные результаты и выводы.

В результате выполненной работы был проведён анализ существующих методов неразрушающего контроля изделий из УККМ, который показал преимущества ультразвукового метода контроля и разработан настроечный образец для проведения контроля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Li, C., Li, K., Li, H., Zhang, Y., Ouyang, H., Yao, D., Liu, L. – Microstructure and ablation resistance of carbon/carbon composites with a zirconium carbide rich surface layer. // Corrosion Science // 85, 160–166. (2014).

2. Вашуков Ю. А. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композитных материалов. – Самара, 2012. – 185 стр.

3. *Мелешко А.И., Половников С.П.* Углерод. Углеродные волокна. Углеродные композиты. – Москва, Сайнс-пресс, 2007. – 194 стр.

4. Андрюшкин А.Ю., Иванов В.К. Композиционные материалы в производстве летательных аппаратов. – СПб, 2010. – 136 стр.

РАЗРАБОТКА СПОСОБА ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ ВОДОРОДНОГО ОХРУПЧИВАНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

© 2022 г. Дмитрий Александрович Рябов*, А. А. Хлыбов**

²Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603950 г. Н. Новгород, улица Минина, 24 * - ryabovdm1996@gmail.com; ** - hlybov_52@mail.ru

Одним из проблемных узлов ЯЭУ является парогенератор, трубчатка которого изготавливается из титанового сплавов ПТ-7М [1]. Анализ разрушения теплообменных труб показал, что причиной деградации материала в этой зоне является чрезмерное содержание водорода. Негативное действие водорода чаще всего проявляется в виде водородной хрупкости [1, 2], которая характеризуется снижением пластичности и вязкости титановых сплавов. Анализ современных исследований показывает, что проблема, связанная с изучением наводороживания титановых сплавов в процессе длительной эксплуатации и разработкой методов мониторинга содержания водорода является актуальной. Целью исследовательской работы является разработка современных неразрушающих подходов к оценки наводороженного состояния (охрупчивания) титановых α-сплавов на примере сплава ПТ-7М с использованием методов физической акустики.

В данной работе исследования проводили на трубчатых и плоских образцах из αтитанового сплава ПТ-7М. Образцы подвергали наводороживанию при температурах 200°С - 500°С в течение 30 минут для каждой температуры. После насыщения образцы имели различные массовые доли водорода. Также для проведения исследований использовали образцы, вырезанные из теплообменной трубы парогенератора РУ, который эксплуатировался в течение ~ 10⁵ ч. Для акустических измерений использовался измерительно-вычислительный комплекс «АСТРОН» и датчики поперечных и продольных волн с частотой 5 МГц.

Для практического применения акустических методов оценки степени наводороживания удобнее использовать акустический диагностический параметр D_τ [1]:

$$D_{\tau} = \frac{\tau_t^{II} + \tau_t^{\perp}}{\tau_l}$$

где τ_t^{II} [нс] – время распространения импульса упругой сдвиговой волны с продольной поляризацией; τ_t^{\perp} [нс] – время распространения импульса упругой волны сдвиговой с поперечной поляризацией; τ_l [нс] – время распространения импульса упругой продольной волны.

Микроструктурный анализ наводороженных образцов показал (рис. $1a, \delta$), что титановый сплав ПТ-7М склонен к значительному наводороживанию при температурах свыше 400 °C.



Рис. 1. Микроструктуры наводороженных образцов: а - при 500 °С на внешней (С[H] = 0, 01 масс. %), б – на внутренней (С[H] = 0,1 масс. %) поверхностях образца

Комплекс исследований сплава ПТ-7М продольными и поперечными волнами показывает чувствительность данного типа волн к структурным изменениям, вызванным поглощением водорода. Результаты (рис. $2a, \delta$) доказывают, что выбранный в качестве диагностического параметра акустический параметр D является достаточно информативным и может быть использован при диагностике охрупченного состояния изделий из титановых сплавов после контакта с водородосодержащими средами.



Рис. 2. Зависимость акустического параметра D от массовой доли водорода (а) и зависимость ударной вязкости сплава ПТ-7М от изменения акустического параметра D

Таким образом, полученные зависимости акустического параметра D от содержания водорода в сплаве ПТ-7М позволяют проводить техническую диагностику водородного охрупчивания материала трубных систем, а также оценивать их остаточный ресурс.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Khlybov A.A., Ryabov D.A., Pichkov S.N., Shishulin D.N., Zakharov D.A.* Developing an Acoustic Method for Determining the Degree of Hydrogenation in Structures Made of Titanium Alloys. Russian Journal of Nondestructive Testing. Vol. 55 (4), pp. 255-261.

2. *Khlybov A.A., Ryabov D.A., Pichkov S.N., Shishulin D.N.* Study of the hydrogenation effect on the structure and flattening of tubular samples of PT-7M titanium alloy/ Tsvetnye Metally. 2021. No. 4. pp. 71–77.
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ТЕНЗОМЕТРИИ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ КОЛЕС ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

© 2022 г. Выплавень Владимир Сергеевич*, Бехер Сергей Алексеевич Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук 191 *-vladimir97927@gmail.com, 89232319779

Эксплуатация колесных пар грузовых вагонов ведет за собой образование дефектов на поверхности катания колеса. Наиболее распространенными дефектами являются ползуны, навары, выщербины и неравномерный прокат колеса, возникающие в следствии неисправности тормозного оборудования, резкого торможения и работы горочных комплексов. В процессе движения поезда железнодорожный путь подвергается ударному воздествию. Возникающая при этом динамическая погонная нагрузка не должна превышать допустимую (168 кН/м). Наезд дефектного колеса на рельс сопровождается возникновением высокой ударной нагрузки, в несколько раз превышающей статическую [1]. Отклонение от допустимой погонной нагрузки приводит к появлению дефектов в верхнем строении пути и в ходовой части грузовых вагонов, что влечет за собой риски возникновения аварий, повреждений инфраструктуры железнодорожного пути и сход подвижного состава с рельс.

Классическим методом обнаружения дефектов поверхности катания колеса является визуально-измерительный контроль с использованием абсолютного шаблона. Недостатками такого метода являются значительные временные затраты и неполный осмотр поверхности катания из-за того, что доступ к нижней части поверхности катания ограничен. Дефекты, возникшие в процессе эксплуатации, при длительном движении поезда, полностью или частично закатываются в поверхность катания колеса, следовательно они не будут обнаружены при визуальном осмотре. Однако существует опасность их повторного появления. Решением описанных проблем является внедрение автономной системы контроля колес подвижного состава в режиме реального времени при его эксплуатации. Существует множество как российских, так и зарубежных комплексов, предназначенных для контроля поверхности катания железнодорожных колес в движении. Комплексы используют различные подходы неразрушающего контроля: лазерный контроль, контроль с использованием оптоволокна и виброконтроль [2, 3]. Широко используемым методом контроля колес является тензометрический. Он основан на измерении вертикальных деформаций рельса под нагрузкой от колеса. По показателям деформаций определяется динамическая нагрузка колеса на рельс и наличие дефектов на поверхности катания колеса.

В работе представлен измерительный комплекс, спроектированный на базе быстродействующей тензометрической системы «Динамика-3» [4]. Система регистрирует деформации шейки рельса под нагрузкой от колеса. Результаты измерений обрабатываются специализированным программным обеспечением. Представленные алгоритмы обработки сигналов деформаций, основанны на спектральном и корреляционном анализе [5, 6]. Результаты работы алгоритмов апробировались испытаниями при многократном проходе подвижного состава по кольцевому пути. Перед началом испытаний все колёсные пары подвергались визуально-измерительному контролю, по результатам которого оценивалась работоспособность предложенных алгоритмов.

В ходе испытаний проконтролирована 261 колесная пара. Дефекты размером более 40 мм распознаны тензометрическим методом с вероятностью более 50%. Выявлена и проанализирована группа дефектов, обнаружение которых затруднено ввиду их расположения, размеров и формы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bekher S.A., Kolomeets A.O.: Increasing the reliability of quality control of the wheels of freight cars in motion using digital data processing // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2015, V. 51, P. 179-184.

2. Kundu P., Darpe A.K., Singh S.P., et al. Review on Condition Monitoring Technologies for Railway Rolling Stock // Proceedings of the European Conference of the PHM Society, 2018. Sept 24, Philadelphia, PA, 2018. V. 4.

3. Filograno M.L., Corredera P., Rodríguez-Plaza M., et al. Wheel Flat Detection in High-Speed Railway Systems Using Fiber Bragg Gratings // IEEE Sensors Journal, 2013, V. 13, iss. 12, No 6563101, P. 4808-4816.

Stepanova L.N., Kabanov S.I., Bekher S.A., et al. Microprocessor multi-channel strain-gauge systems for dynamic tests of structures // Autom. Remote Control, 2013, V. 74, iss. 5, P. 891-897.
Bogdevicius M., Zygiene R., Bureika G., et al. An analytical mathematical method for calculation of the dynamic wheel–rail impact force caused by wheel flat // Vehicle System Dynamics, 2016. V. 54, iss. 5, P. 689-705.

6. Krummenacher G., Ong C.S., Koller S., et al. Wheel Defect Detection with Machine Learning // IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems, 2018. V. 19. No 4. P. 1176-1187.

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МЕТОДА РЕГИСТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ УДАРНИКА ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ИНДЕНТИРОВАНИИ

© 2022 г. Колганов Олег Александрович^{1*}, А.В. Фёдоров^{1**}, Г.Н. Лукьянов^{1**}

¹ – Университет ИТМО, Кронверкский пр., 49, Санкт-Петербург, 197101 * - коlganoff2014@yandex.ru; ** - afedor62@yandex.ru; *** - gen-lukjanow@yandex.ru

Контроль физико-механических свойств материалов на различных стадиях жизненного цикла изделия является актуальной и востребованной задачей как на производстве, так и в эксплуатации. В настоящее время для решения данной задачи начинают широко применяться безобразцовые методы и портативные средства. Применение этих методов и средств, там, где это возможно снижает конечную стоимость продукции и повышает оперативность контроля.

Одним из перспективных поверхностных методов безобразцового контроля физикомеханических свойств материала образца или изделия является метод динамического индентирования (ДИ). Сущность метода ДИ заключается в регистрации параметров движения индентора в процессе его контактно ударного взаимодействия (КУВ) с испытуемым материалом. Основой приборной реализации метода является конструкция датчика для прибора ДИ, который состоит из следующих основных элементов:

- устройство сброса ударника;
- система регистрации параметров движения индентора;
- ударник.

В настоящее время регистрацию параметров движения индентора выполняют на основе магнитоиндукционного метода. Применение этого метода регламентируется ГОСТ Р 56474-2015. В ходе КУВ движение магнита, жестко закреплённого с индентором, вызывает изменение магнитного потока, проходящего через катушку индуктивности. При этом, в последней наводится сигнал электродвижущей силы (ЭДС), пропорциональный скорости движения индентора на всем временном интервале его КУВ.

Целью данной работы является обоснование выбора метода регистрации параметров движения ударника и разработка прототипа датчика динамического индентирования.

Одним из главных требований при разработке системы регистрации движения индентора, чтобы на всем участке контактно-ударного взаимодействия (КУВ) наблюдалась линейная зависимость скорости внедрения. Данное требование достигается конструктивными особенностями системы регистрации и электрическими параметрами катушки. Несмотря на широкое применение магнитоиндукционного метода для регистрации параметров движения ударника, магнитоиндукционный метод с одной катушкой имеет недостатки, которые влияют на форму получаемого первичного сигнала.

Одним из недостатков преобразователей такого типа является то, что количество линий потока, пересекающих катушку, меняются в зависимости от положения и выходное напряжение является функцией как скорости, так и положения. Вторым недостатком является то, что, когда ударник центрирован относительно катушки индуктивности, линии потока, которые обусловлены отрицательным полюсом, также могут индуцировать напряжение в катушке противоположной полярности.

Для устранения этих недостатков предлагается реализация магнитоиндукционного метода с использованием двух катушек. В рабочем диапазоне преобразователя оба конца магнита находятся внутри катушки, которая разделена на две секции. В каждой секции катушки расположен свой полюс магнита. Эти две катушки затем соединяются последовательно, чтобы получить выходное напряжение постоянного тока, пропорциональное скорости магнита. Достоинствам данного метода является, то, что при соединении катушек с противоположной полярностью генерируется напряжение пропорциональное скорости, и это напряжение не зависит от положения в ограниченном диапазоне.Для отработки регистрации движения ударника с помощью метода с двумя катушками индуктивности был разработан прототип датчика динамического индентирования.

Таким образом, был рассмотрен датчик для прибора динамического индентирования и выделены основные элементы конструкции. Предложено использование магнитоиндукционного метода с двумя катушками для регистрации движения ударника. Показана актуальность и применимость решения задачи оптимизации системы регистрации параметров движения индентора. Разработан прототип датчика динамического индентирования на основе магнитоиндукционного с двумя катушками (LVT).

Литература

1. Крень А.П., Рабцевич А.В., Зинкевич Н.В. Моделирование ударного контакта индетора с нежесткими стальными конструкциями при изменении твердости // Известия национальной академии наук Беларуси. Серия Физико-технических наук. 2017. №4. С. 38 – 45.

2. ГОСТ Р 56474-2015 Системы космические. Контроль неразрушающий физикомеханических свойств материалов и покрытий космической техники методом динамического индентирования. Общие требования.

3. Егоров Р.А. Разработка алгоритмического и программно-технического обеспечения первичной обработки при динамическом индентировании: диссерт. Канд. Техн. Наук. – СПб., 2021 – 170 с.

ВОЗМОЖНОСТИ РУЧНОГО ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ГЛУБИНЫ КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН НА ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ РЕЛЬСОВ

© 2022 г. <u>Сергей Павлович Шляхтенков</u>¹, Д.Б. Некрасов^{2,*}, С.В. Палагин², О.В. Бессонова², С.А. Бехер^{1,**}

 ¹ – Сибирский государственный университет путей сообщения, Россия 630049 Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191
² – ЕВРАЗ ЗСМК, Россия 654042 Новокузнецк, Космическое шоссе, 16 *E-mail*: *dmitry.nekrasov@evraz.com; **behers@mail.ru

Динамические силы от железнодорожного подвижного состава ведут к снижению контактно-усталостной прочности и как следствие назначенного ресурса верхнего строения пути. В результате напряженно-деформированного состояния в контакте рельса с колесом, возникают и накапливаются повреждения поверхностного, деградирующего слоя. Износ и повреждения рельсов в эксплуатации в подавляющем большинстве случаев определяются зарождением и развитием трещин контактно-усталостного характера поверхности головок рельсов. Устранение усталостных дефектов рельсов проводят с помощью профилактической шлифовки, с разной периодичностью. Для оценки технического дефектного рельса, эффективного планирования шлифовки требуется состояния информация о глубине трещин, от которой в значительной степени зависит уровень опасности дефектов.

Целью работы является определение возможностей ручного вихретокового контроля для измерения глубины контактно-усталостных трещин на поверхности катания рельсов, оценка показателей точности и степени влияния мешающих факторов.

Исследования проводились на вырезанных из действующего пути фрагментах рельса с реальными дефектами поверхности катания. Установлены основные конфигурации трещин: одиночные трещины, сетка трещин в рабочей грани и средней части, ориентированные вдоль, поперек и под углом к продольной оси рельса. Обнаруженные трещины контролировались вихретоковым методом на частотах 100 и 400 кГц дефектоскопом Вектор-60Д. Для уменьшения влияния наклона преобразователя измерялась проекция сигнала на ось, перпендикулярную направлению изменения сигнала, вызванного влиянием мешающего фактора. При этом влияние мешающего фактора на результаты измерения глубины уменьшалось.

Далее проконтролированные образцы разрезались по линии сканирования и параллельно ей для оценки глубины трещин. На полученных металлографических шлифах с помощью оптического микроскопа с увеличением ×100 и ×200 для каждой трещины в трех сечениях измерялись: глубина, ширина раскрытия на поверхности и угол наклона

относительно вертикальной плоскости. В 6 образцах идентифицировано 72 трещины глубиной от 0,12 до 1,73 мм.

На основе полученных данных построена зависимость глубины трещины от амплитуды сигнала, которая аппроксимировалась линейной зависимостью методом наименьших квадратов:

$$A = b \cdot h + a,$$

где h – глубина, мкм; A - амплитуда сигнала, относительные единицы; $\alpha = 0,14$ мм ($\sigma_{\alpha} = 0,005$ мм) – коэффициент пропорциональности; b = 1,11 мм⁻¹ ($\sigma_{b} = 0,038$ мм⁻¹) коэффициент смещения.

Максимальная чувствительность сигнала ВТП к глубине трещины реализуется при частоте 100 кГц по всем образцам, коэффициент корреляции составляет 0,78 (отдельно для каждого образца 0,72 - 0,97). На частоте 400 кГц значение коэффициента корреляции k = 0,61. Это связано с меньшей в два раза глубиной проникновения вихревых токов и в 2 и более раза чувствительностью к углу наклона преобразователя. Толщина скин-слоя, составляет 0,066 мм для 100 кГц и 0,033 мм для 400 кГц.

Погрешность измерения глубины трещины ручным вихретоковым методом на частоте 100 кГц в диапазоне от 0,12 до 1,5 мм содержат аддитивную и мультипликативную составляющие. Границы с доверительной вероятностью 0,95 аддитивной составляющей $\pm 0,15$ мм, мультипликативной – $\pm 6,9$ %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коссов В.С., Волохов Г.М., Краснов О.Г., Овечников М. Н., Протопопов А. Л., Огуенко В.В. Влияние величины осевых нагрузок подвижного состава на контактноусталостную долговечность рельсов. // Вестник ВНИИЖТ. 2018. Т. 77. № 3. С. 149–156.

2. Тапков К. А., Муравьев В. В. Моделирование напряженно-деформированного состояния рельса при эксплуатации // Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства. 2018. С. 205–212.

3. Жданов А. Г., Крюков А. С., Лунин В. П., Чегодаев В. В. Неразрушающий контроль поверхности головок рельсов вихретоковым методом // Технология машиностроения. 2015. № 6. С. 41–44.

4. Park, Jeong & Lee, Taek & Back, In & Park, Sang & Seo, Jong & Choi, Won & Kwon, Se. Rail surface defect detection and analysis using multi-channel eddy current method based algorithm for defect evaluation. // Nondestructive Evaluation. 2021. V. 83.

5. *Peng Xu, ChenLu Zhu, HongMing Zeng, Ping Wang*. Rail crack detection and evaluation at high speed based on differential ECT system. // Measurement. 2020. V. 166. P. 108-152.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПРИЕМА ДАННЫХ ДЛЯ ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДЕФЕКТОСКОПА

©2022 г. Дьячковский Евгений Иннокентьевич

Университет ИТМО, 197101 г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., дом 49, лит. А E-mail: <u>oberprocuror1996@gmail.com</u>, тел.: 8 (981) 965 93 95

Суть обсуждаемой проблемы.

Лазерно-ультразвуковой метод направление оптико-акустического метода, предполагающего генерацию ультразвука лазерным импульсом за счет оптоакустического эффекта. Для генерации лазерного ультразвука используются импульсные лазеры с длительностью импульса от десятков наносекунд до фемтосекунд и с высокой пиковой мощностью. Лазерное излучение преобразуется в тепло в поверхностном слое специальной среды, называемой оптико-акустическим генератором, или материала исследуемой среды. За счет поглощения электромагнитной энергии локальное вещество быстро нагревается локально, происходит его последующее расширение и релаксация при таком возбуждении, что приводит к генерации ультразвуковых волн, так называемому оптико-акустическому эффекту. Если определенный порог мощности лазерного импульса превышен, материал генерирующей среды удаляется. Спектральный состав лазерного ультразвукового импульса определяется длительностью лазерного импульса, размером и формой пятна фокусировки лазерного излучения, а также свойствами генерирующей среды.

Существующие средства лазерно-ультразвукового контроля обладают рядом недостатков, к ним относятся:

- большие габариты генерирующего и принимающего блока, что существенно ограничивает мобильность средств неразрушающего контроля;

- отсутствие встроенной системы визуализации полученных данных, как следствие необходимость использование дополнительного персонального компьютера;

- отсутствие встроенного аккумулятора, что обуславливает необходимость постоянного питания от сети.

Целью работы является разработка алгоритма приема данных с АЦП и ее передача в персональный компьютер. Алгоритм разрабатывается для разработанной ранее платы сбора данных. Данная задача была решена в рамках проектирования и разработки лазерноультразвукового дефектоскопа.

Полученные результаты и выводы.

В данной работе был рассмотрен принцип работы будущего устройства лазерно – ультразвукового дефектоскопа. На его основании был разработан алгоритм регистрации и передачи данных с платы сбора данных с учетом всех функциональных в ней узлов.

Был разработан блок регистрации данных с АЦП с учетом его особенностей. С его помощью производится преобразование цифровых данных в параллельном виде в последовательный. Это необходимо для того, чтобы наладить отправку покадрово.

Была подтверждена работоспособность всего макета с помощью измерения толщины нескольких мер длин, соответствующих ГОСТ 9038-73, при помощи измерения скорости звука в материалах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Быченок В.А., Кинжагулов И.Ю., Никитина М.С. Исследование метода лазерноультразвуковой диагностики остаточных напряжений в специальных материалах изделий ракетно-космической техники. Сб. матер. I Междунар. науч.-практ. конф. "Технические науки: современные проблемы и перспективы развития". 2013. С. 61-63. 2. *Карабутов А.А., Жаринов А.Н., Ивочкин А.Ю., Каптильный А.Г.* Лазерно-ультразвуковой метод выявления продольных напряжений рельсовых плетей // Мир измерений – 2012 - №9 – С.10-17

3. *Жмудь В.А.* Применение ЦАП и АЦП в системах управления высшей точности // Автоматика и программная инженерия – 2013 - №4 – С.68-79

4. Балдин М.В., Воронков Д.И., Руткевич А.В., Сенченко М.Н., Стешенко В.Б., Шишкин Г.В. Эволюция применения ПЛИС в системах ЦОС: от специализированного сопроцессора к аппаратной платформе / М.В. Балдин. // Цифровая обработка сигналов. – 2008. – № 2. – С. 58-64.

«Анализ способов настройки чувствительности при ультразвуковом контроле сварных соединений»

© 2022 г. Иван Александрович Смирнов*, В. Н. Коншина**

ФГБОУ ВО ПГУПС, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9 * - ivan.18smirnoff@gmail.com; ** - vera.konshina@gmail.com;

Цель работы заключается в анализе способов настройки чувствительности при ультразвуковом контроле сварных соединений деталей подвижного состава и определении расхождений в реализуемых уровнях чувствительности при применении различных способов их настройки, предусмотренных ISO 11666.

Требования к качеству сварных соединений при изготовлении подвижного состава могут быть сформулированы в конструкторской документации (в этом случае в чертеже задаются либо минимальные размеры подлежащих выявлению дефектов, что создает свои проблемы при формулировке браковочных критериев при проведении ультразвукового контроля и в настоящем докладе не рассматривается, либо в терминах эквивалентной площади дефектов [1], что позволяет их однозначно сформулировать) или установлены в виде категории качества в соответствии с требования ГОСТ 33976 [2] или класса контроля по ГОСТ EN 15085-5 [3]. В свою очередь, в указанных стандартах категории качества или классы контроля связаны с уровнями качества в соответствии с ГОСТ ISO 5817 [4], которые уже в ГОСТ Р ИСО 17635 [5] привязаны к конкретным уровням приемки по ISO 11666 [6].

В ISO 11666 [6] содержатся конкретные браковочные критерии для ультразвукового контроля швов сварных соединений в большом диапазоне размеров контролируемых сварных соединений (с толщинами от 8 мм до 100 мм). В стандарте указано, что опорный уровень чувствительности можно настраивать 4 разными способами, подразумевая, видимо, и получение одинаковых результатов контроля. При применении способа 2 (настройка по АРД-диаграммам, нормируется диаметр плоскодонного отражателя (ПДО), а для способа 1 соответствующие уровни чувствительности определены по амплитуде эхо-сигнала от бокового цилиндрического отражателя (БЦО). Известно, что зависимость амплитуды от расстояния для БЦО не соответствует закону изменения амплитуды от ПДО [7].

Используя известные формулы акустического тракта [7, 8], были определены величины расхождения уровней чувствительности приемки (различие между опорными уровнями чувствительности и уровнями приемки также определены соответствующими приложениями ISO 11666 [6]) при настройке способами 1 и 2 для диапазона толщин от 8 до 100 мм. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результат сравнения уровней чувствительности при настройке по способам 1 и 2 (ISO 11666 [6])

Наименование параметра УЗК					Разн	ица в	
Частота ультразвуковых колебаний, f, МГц	Угол ввода, α, град	Скорость Размер распростране пьезопластины, ультразвуко 2а, мм колебаний в об контроля, Ct		Диапазон толщин, мм	чувствитель ности для уровней приемки 2, 3 и оценочного, △Н, дБ		
		t _{min}	t _{max}				
5	65	8	3260	814	-10	-8	
5	70	8	3260	814	-10	-2	
2,5	65	8	3260	1539	-6	-2	
2,5	65	8	3260	4049	-5	-4	
2,5	60	10	3260	4049	-6	-5	
2,5	55	10	3260	4049	-6	-5	
2,5	50	10	3260	4049	-7	-6	
2,5	50	10	3260	5099	-6	-3	
2,5	45	10	3260	5099	-6	-3	
2,5	40	10	3260	5099	-6	-4	
Примечание: «-» означает, что уровень чувствительности при настройке по способу 1 ниже, чем по способу 2.							

Анализ табл. 1 показывает, что переход от способа 2 настройки чувствительности к способу 1 приведет во всех указанных диапазонах толщин к изменению предельной чувствительности, а значит и к изменению всех уровней чувствительности. В зависимости от толщины изделия и параметров контроля изменение чувствительности варьируется от 2 до 10 дБ, что может вызвать проблемы с воспроизводимостью результатов контроля и с качеством самого контроля. Пример различия уровней чувствительности приведен на рис. 1.



Рисунок 1 - Различие уровней чувствительности при настройке по способу 1 и 2 для диапазона толщин от 8 до 15 мм (уровень приемки 2)

Устранение указанной проблемы возможно, если в отраслевых документах по ультразвуковому контролю сварных соединений подвижного состава будут установлены конкретные требования по способам настройки чувствительности. Такой подход будет использован при разработке проекта межгосударственного стандарта «Соединения сварные в стальных конструкциях железнодорожного подвижного состава».

ЛИТЕРАТУРА

1. Лапидус А., Нурматов И., Пасси Г. Эталонирование чувствительности и обеспечение её равномерности в прозвучиваемом сечении при ультразвуковом контроле сварных соединений с применением фр-преобразователей // В мире неразрушающего контроля. 2016. №3. С. 17-27.

2. ГОСТ 33976-2016 Соединения сварные в стальных конструкциях железнодорожного подвижного состава. Требования к проектированию, выполнению и контролю качества — М.: ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2017 — 49 с.

3. ГОСТ EN 15085-5-2015 Железнодорожный транспорт. Сварка железнодорожных транспортных средств и их элементов. Часть 5. Контроль, испытания и документация — М.: ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2016 — 14 с.

4. ГОСТ Р ИСО 5817-2009 Сварка. Сварные соединения из стали, никеля, титана и их сплавов, полученные сваркой плавлением (исключая лучевые способы сварки). Уровни качества — М.: ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2011 — 24 с.

5. ГОСТ ISO 17635-2018 Неразрушающий контроль сварных соединений. Общие правила для металлических материалов — М.: ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2019 — 19 с.

6. ISO 11666:2018 Non-destructive testing of welds. Ultrasonic testing. Acceptance levels

7. *Алешин Н.П.* Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений: учебное пособие. — М.: Машиностроение, 2013. — 576 с.

8. *Гурвич А.К., Кузьмина Л.И.* Справочные диаграммы направленности искателей ультразвуковых дефектоскопов. — К.: Техніка, 1980. — 101 с.

© 2022 г. Земсков Тимур Иванович¹*

¹ –ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова», 426069 г. Ижевск, ул. Студенческая, 7 Научный руководитель д.т.н., проф. В. В. Муравьев** * - tim.zemskov@mail.ru; **pmkk@istu.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН КАРБИДА ВОЛЬФРАМА ИМПУЛЬСНЫМ МЕТОДОМ

Определение скорости ультразвуковых волн (УЗ) с высокой точностью позволяет получать информацию о структурном состоянии и физико-механических свойствах материалов. Точное измерение скорости ультразвука позволяет оценивать свойства материала (например, его упругие модули), производить оценку химического состава, определять наличие внутренних напряжений [1]. В данной статье были проведены измерения с использованием установки, описанной ранее [2].

Целью работы является оценка точностных параметров определения скорости УЗ волн в образцах из карбида вольфрама.

В эксперименте по определению скорости УЗ использованы концевые меры длины (КМД) 1 класса точности стандарта DIN-861, изготовленные из карбида вольфрама. Отобрано 4 образца разной длины из одного набора (70 мм, 80 мм, 90 мм, 100 мм), произведены 5-кратные замеры времени распространения продольных волн на образцах при комнатной температуре, рассчитаны средние значения скорости продольных волн, абсолютная и относительная погрешности с доверительной вероятностью 0,95 (табл. 1).

Анализируя полученные данные, наблюдается различие скоростей в образцах, которые также подтверждаются в следующем эксперименте: произведен нагрев образцов КМД окунанием в горячую воду с одновременной термометрией с использованием цифрового термометра и измерение времени пробега УЗ продольных волн с помощью разработанной установки. Зависимость рассчитанной скорости ультразвука от температуры отобранных образцов представлена рисунке (рис. 1).

Таблица 1

Толщина, мм (±0,2 мкм)	Среднее значение времени распространения, нс	Среднее значение скорости распространения, м/с	Абсолютная погрешность , м/с	Относительн ая погрешность, %
100	14622,1	6839,0	0,3	0,004
90	13168,6	6834,4	0,3	0,004
80	11688,0	6844,6	0,6	0,009
70	10243,8	6833,4	0,5	0,007

Результаты измерений скорости УЗ волн в образцах КМД



Рисунок 1 Результаты определения скорости продольных волн образцов концевых мер длины карбида вольфрама при различной температуре.

По результатам эксперимента видно, что все образцы имеют идентичную температурную зависимость скорости распространения продольных волн. Анализ химического состава показывает содержание W-92%, Co-8%. Можно предположить, что данные образцы КМД изготовлены из сплава YG8 (аналог BK8).

Определение плотности данных образцов, рассчитанной путем измерения их массы с помощью электронных весов и габаритов с помощью штангенциркуля ШЦ-1-125-0,1 также соответствуют данному сплаву (14,8 г/см ³)

Основной способ производства изделий из твёрдых сплавов - спекание заготовки, сформованной из смеси порошков карбида и цементирующего металла методами обработки давлением. Можно предположить, что заключительная операция спекания (нагрев до 1350...1550°С) повлияла на отличие скоростей продольных волн в образцах КМД вследствие структурных изменений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. В. Волкова, А. В. Платунов Использование многократного зеркально-теневого метода при ультразвуковом контроле пера подошвы рельса // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2019. – Т. 22. – № 4. – С. 38-45. – DOI 10.22213/2413-1172-2019-4-38-45..

2. В. В. Муравьев, Д. В. Злобин, Т. И. Земсков, Г. В. Безрученков, В. В. Сяктерева Реализация импульсного метода определения скорости ультразвука с высокой точностью // Интеллектуальные системы в производстве. – 2021. – Т. 19. – № 2. – С. 13-19. – DOI 10.22213/2410-9304-2021-2-13-19.

ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТЕЙ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ДИСПЕРСИОННО ТВЕРДЕЮЩМХ СТАЛЯХ В УСЛОВИЯХ СТАРЕНИЯ

© 2022 г. <u>Александр Александрович Наговицын</u>, О.В. Муравьева, А. Л. Владыкин, К. Ю. Белослудцев

ФГБОУ ВО Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, 426069 Ижевск, Студенческая, 7

*<u>pmkk@istu.ru</u>

Дисперсионно-твердеющие сплавы - это материалы, упрочненные дисперсными частицами избыточной фазы, выделяющейся при старении. Стали данного класса сочетают высокую прочность, надежность и трещиностойкость материала с хорошими технологическими параметрами, в первую очередь свариваемостью. В работе исследованы высокопрочные хромоникелевые стали аустенитно-мартенситного класса (03X14H7B и XM-12 ASTM), применяемые для производства валов погружных центробежных насосов нефтедобывающих скважин. Высокие прочностные свойства сталей данного класса достигаются после комплексной термической обработки, состоящей из закалки или нормализации при температурах 925–1050 С, высокого отпуска при 745–775 С и старения при 350–500 С с охлаждением на воздухе (табл.1).

Известно, что структура и механические свойства сталей, определяемые режимами термообработки, напрямую влияют на их акустические свойства и упругие модули. Целью исследования является оценка скоростей акустических волн и упругих модулей в образцах мартенситно-стареющих сталей в условиях старения.

При исследованиях использован зеркально-теневой метод на многократных отражениях. Метод реализован с помощью электромагнитно-акустического (ЭМА) преобразователя поперечной волны, а также фокусирующего пьезопреобразователя на основе гибкой пьезопленки ПВДФ продольной волны, обеспечивающих распространение волн по диаметральным направлениям сечения цилиндрического образца. Погрешность определения скорости упругих волн не превышает ± 2 м/с. При оценке упругих модулей прутков (модуль Юнга *E*, модуль сдвига *G*, коэффициент Пуассона v) используется их функциональная связь со скоростями распространения объемных (продольных и поперечных) волн в объекте при известной плотности ρ . Существенно, что при прозвучивании образца в одном сечении с использованием двух типов объемных (продольной и поперечных) волн появляется возможность определения коэффициента

Пуассона вне зависимости от толщины образца: $v = \frac{1-2\gamma^2}{2(1-\gamma^2)}$, где $\gamma^2 = \frac{t_l^2}{t_r^2}$ – отношение

времен поперечной и продольной волн, пропорциональное отношению скоростей их распространения. Результаты определения скоростей упругих волн и модулей упругости представлены в таблице.

#	Марка стали	Режим термообработки	σ _в , МПа	<i>С</i> _{<i>t</i>} , м/с	<i>Сl</i> , м/с	ν	<i>G</i> , ГПа	<i>Е</i> , ГПа
1	XM-12 ASTM	Отжиг на твердый раствор, 1040°С 0,5 ч на воздух	1070	3126	5789	0,294	79,2	205,1
2	XM-12 ASTM	Старение, 470°С, 3 ч	1455	3182	5849	0,289	82	211,6
3	XM-12 ASTM	Старение, 565°С, 3ч	1230	3203	5866	0,287	83,1	214
4	03X14H7B	Отжиг на твердый раствор, 1040°С, 0,5 ч на воздухе	1040	3145	5830	0,295	80,1	207,5
5	03X14H7B	Старение 450°С, 3 ч	1210	3187	5836	0,294	82,3	211,8

Таблица 1. Механические свойства и акустические характеристики исследуемых образцов





В результате исследований установлено, что скорость объемных продольных и поперечных волн имеет минимальные значения для образцов после отжига на твердый раствор. Операция старения приводит к существенному росту скоростей объемных волн (на 2,4% для стали XM-12 и на 1,3% для стали 03X14H7B в случае поперечных волн). Те же закономерности наблюдаются для упругих модулей Юнга и сдвига, при этом коэффициенты Пуассона имеют противоположную тенденцию.

Влияние механических характеристик (прочности материала образца) на скорость поперечных волн и модуль Юнга показано на рис.1. Для операции отжига характерны минимальные значения механических характеристик и максимальные значения скоростей упругих волн и модулей упругости. Процесс старения образцов ведет к увеличению механических свойств (пределы прочности, текучести, твердость), сопровождающемуся ростом скоростей акустических волн и модулей упругости материала и уменьшением коэффициента Пуассона. Следует отметить, что увеличение температуры старения с 470°С до 565°С для стали XM-12 приводит к росту скоростей объемных волн, модулей Юнга и сдвига. при этом механические свойства несколько ухудшаются.

Проведенные исследования показали возможность оценки влияния операции старения на акустические характеристики материала, а предлагаемая методика может быть использована для структуроскопии дисперсионно-твердеющих сплавов.

Магнитный контроль содержания мартенсита деформации в образцах и изделиях из аустенитных сталей

© 2022 г. <u>Александр Викторович Кочнев¹*</u>, М. Б. Ригмант¹**, М. К. Корх¹*** ¹ – ИФМ УрО РАН, 620108, г.Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18 * - kochnevav@imp.uran.ru; контактный телефон (343)378-36-10; научный руководитель – М.Б. Ригмант; ** - rigmant@imp.uran.ru; *** - korkhmk@imp.uran.ru

Аустенитные стали часто называют «качественными сталями», так как их используют для изготовления ответственных деталей и узлов установок, где предъявляют высокие требования к коррозионной стойкости, жаропрочности и ударной вязкости. Необходимые эксплуатационные свойства определяются не только химическим, но и фазовым составом: а именно количественным содержанием в металле ферромагнитных фаз – феррита и мартенсита. Однозначное определение вида фазы в готовой детали на данный момент недостаточно исследовано и проработано. Данная проблема требует тщательного исследования и разработки новых методик, а также приборной базы. В ИФМ УрО РАН проводятся работы по созданию средств измерения (приборов) фазового состава при различных сочетаниях ферромагнитных фаз в аустенитных сталях [1].

Цель данной работы – использование структурочувствительных магнитных характеристик для обеспечения фазового контроля и обнаружения мартенсита деформации в аустенитных сталях.

Для этого на установке Remagraph C-500 были получены частные петли магнитного гистерезиса в магнитных полях амплитудой 250–600 А/см с использованием двухфазных образцов из аустенитных сталей. Дополнительно эти измерения были проведены на макете прибора с малогабаритным электромагнитом и дифференциальной катушкой, надетой на один из полюсов. Наибольшую корреляцию с фазовым составом из проанализированных параметров показала максимальная дифференциальная магнитная восприимчивость [2].

Применение описанного выше способа контроля наиболее целесообразно при сравнительно высоких процентных содержаниях фаз феррита и мартенсита в аустенитных сталях. Однако нужно учитывать и возможность наличия малых включений ферромагнитных фаз, так как в определённых отраслях промышленности требуется полная парамагнитность металла. Возможное образование деформационного мартенсита во время эксплуатации, помимо появления ферромагнитных свойств, приводит к снижению коррозионной стойкости и пластичности стали. Поэтому необходимо определять присутствие данной ферромагнитной фазы уже при малых (1–5%) её содержаниях.

Такое исследование было проведено в ИФМ УрО РАН на прокатанных аустенитных образцах с помощью прибора «ФерроКОМПАС», который может работать в двух режимах: измерителя магнитной проницаемости при малом (менее 5%) процентном содержании ферромагнитной фазы, либо ферритометра при их большем количестве. Используя прибор «ФерроКОМПАС» в первом режиме, было установлено, что при наличии мартенсита деформации наблюдается анизотропия относительной магнитной проницаемости в зависимости от положения датчика устройства (табл. 1) [3].

Таблица 1

	Солержание	Относительная магнитная проницаемость µ				
Деформация, %	мартенсита, %	Перпендикулярно направлению прокатки	По направлению прокатки			
16	1,5	1,036	1,045			
31	4	1,267	1,283			
55	8	1,485	1,530			

Результаты измерения относительной магнитной проницаемости после прокатки

По итогам работы было установлено:

1) применение комплекса структурочувствительных параметров в средних магнитных полях 250–600 А/см позволило отказаться от использования традиционных методов магнитного контроля с намагничиванием до насыщения и перейти к малогабаритным средствам фазового контроля с возможностью разделения феррита и мартенсита;

2) метод локального анализа магнитных полей прибором «ФерроКОМПАС» в деформированных прокаткой аустенитных образцах при образовании в них мартенсита деформации чувствителен к проявлению анизотропии магнитных свойств. Появление анизотропии относительной магнитной проницаемости может быть использовано для обнаружения мест зарождения и развития дефектов, вызванных образованием мартенсита деформации.

ЛИТЕРАТУРА

^{1.} *Rigmant M.B., Kochnev A.V., Korkh M.K., Sazhina E.Yu.* Assessment of phase composition of corrosion-resistant chromo-nickel steels by magnetic properties // AIP Conference Proceedings. 2019. V. 2174. P. 20052 (6 pp.)

^{2.} Korkh M.K., Rigmant M.B., Sazhina E.Yu., Kochnev A.V. Measuring Ferromagnetic Phase Content Based on Magnetic Properties in Two-Phase Chromium–Nickel Steels // Russian journal of nondestructive testing. 2019. V. 55. №11. P. 837 — 850.

^{3.,} Rigmant M.B., Kazantseva N.V., Kochnev A.V., Koemets Yu.N., Korkh M.K., Karabanalov M.S. Revealing Magnetic Anisotropy in Austenitic Chromium–Nickel Steel After Rolling // Russian journal of nondestructive testing. 2021. V. 57. №12. P. 1113 —1119.

СТЕНД ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ БИСТАБИЛЬНЫХ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

© 2022 г. Игнатьев Иван Викторович¹*, В. А. Стрижак²**

^{1,2} – ФГБОУ ВО ИжГТУ им. М.Т. Калашникова, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7 * - ig.vanya@yandex.ru; ** - str@istu.ru

Цель работы. Цель работы заключается в разработке системы регистрации основных информативных параметров скачков Баркгаузена у бистабильных ферромагнетиков, представленных в виде проволоки диаметром 0,25-0,40 мм.

Суть обсуждаемой проблемы. Регистрация больших скачков Баркгаузена бесконтактным способом в перемагничивающем, регулируемом по амплитуде магнитном поле частотой 50 Гц, с регистрацией величины и позиции сигналов.

Введение. Эффект Баркгаузена, открытый в 1917 году, был назван в честь германского ученого Генриха Георга Баркгаузена и описывал скачкообразное изменение намагниченности ферромагнетика под воздействием медленно изменяющегося поля. В специально обработанных образцах доля скачков может достигать порядка 95% и более [1]. Данный эффект применяется на практике к примеру, для контроля упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием [2].

Одна из ветвей развития магнитных датчиков связана с появлением особого класса материалов – бистабильных ферромагнетиков. Такие материалы при достижении некоторого внешнего поля, называемого полем старта, перемагничиваются по всему объему единичным скачком, называемым большим скачком Баркгаузена [1]. Примером таких ферромагнетиков является проволока, изготовленная из викаллоевого сплава (Fe₃₇Co₅₂V₁₁) [3], формирование бистабильных свойств которой происходит только за счет упругопластического кручения.

Полученные результаты. Разработан стенд (*Puc. 1*) осуществляющий перемагничивание сердечников квазистационарным магнитным полем одновременно с, регистрацией больших скачков Баркгаузена бесконтактным способом при помощи феррозондового преобразователя. Бистабильный сердечника, длиной 10 мм и диаметром 0,3 мм, фиксируется на П-образном электромагните, попадая в переменное магнитное поле частотой 50 Гц. Значения тока в цепи намагничивания и сигнал с феррозонда подаются на систему регистрации.

Условия эксперимента требуют, чтобы тангенциальная составляющая поля имела минимальные отклонения в зоне установки сердечника, а нормальная составляющая стремилась к нулю. Поэтому для магнитного поля электромагнита определена топология поля по нормальной и тангенциальной составляющей при помощи магнитометра МФ-

23ИМ вдоль продольного сечения электромагнита. Условия, описанные выше, соблюдаются на участке от -10 до 10 мм вблизи центра верхней плоскости.



Рис. 1. Экспериментальная установка: феррозондовый преобразователь (1); ЛАТР (2); бистабильный ферромагнетик (3); электромагнит (4); цифровой осциллограф АКИП-4115/4А (5)

Осциллограмма демонстрирует картину бистабильного поведения сердечника (*Puc.* 2 (2)). График единичного скачка Баркгаузена представлен на изображении (*Puc.* 2 (1)). Величина поля старта образца фиксируется исходя из величины тока в цепи электромагнита.



Выводы. Полученный стенд позволяет качественно и количественно оценить основные параметры бистабильных ферромагнетиков: величины скачков Баркгаузена и величины полей старта. Определена зона установки сердечника с приемлемыми значениями, попадающими в нормальное, тангенциальное поле, и равняется 10-20 мм. Реализован бесконтактный метод съема сигнала с бистабильных ферромагнетиков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ломаев, Г. В. Датчики Баркгаузена : монография / Г. В. Ломаев, Г. В. Каримова ; Г. В. Ломаев, Г. В. Каримова ; М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования "Ижевский гос. технический. ун-т". – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2008. – ISBN 978-5-7526-0357-0.

2. Николаева, Е. П. Применение метода шумов Баркгаузена для контроля упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / Е. П. Николаева // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 15. – № 6-2. – С. 428-431.

3. Ахизина, С. П. Бистабильные магнитные элементы из сплава викаллой: технологический, физической и прикладной аспекты исследования : специальность 01.04.01 "Приборы и методы экспериментальной физики" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Ахизина Светлана Павловна. – Ижевск, 1997. – 24 с.

МАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЕННЫХ СТАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

© 2022 г. <u>Александр Викторович Бызов^{1*}</u>, Д. Г. Ксенофонтов^{1**}, В. Н. Костин^{1***}, О. Н. Василенко^{1****}

¹ – Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, 620108, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18

* - byzovav@imp.uran.ru; ** - ksenofontov@imp.uran.ru; *** - kostin@imp.uran.ru; **** - vasilenko@imp.uran.ru;

Существующие методики и средства измерений [1] толщины и качества поверхностного упрочнения предполагают последовательное определение глубины и прочности поверхностных слоев с помощью существенно различающихся методик и устройств. Однако, у таких методов высокая трудоемкость и стоимость контроля. Таким образом, остается актуальной задача разработки достаточно простой и достоверной методики селективного определения параметров упрочненных слоев на ферромагнитных изделиях. Разработка такой методики является задачей настоящей работы.

Для селективного определения толщины и прочности поверхностного слоя был изготовлен моделирующий магнитомягкую сердцевину прямоугольный параллелепипед из отожженной стали 3 с размерами 23,3х34,5х97 мм и коэрцитивной силой 2,1 А/см, а также набор пластин из закаленной стали 60C2A различной толщины с площадью 40,5х90,7 мм и коэрцитивной силой 32,5 А/см, с помощью которого варьировалась толщина упрочненного слоя. Измерение тангенциальной компоненты напряженности магнитного поля в образце H_x и нормальной компоненты индукции магнитного поля в сердечнике электромагнита B_y было выполнено с помощью магнитного мультитестера MMT-3 [2]. Полученные зависимости H_x и B_y от толщины упрочненного слоя d имеют сходство с рассчитанными в работе [3] зависимостями.

На рисунке 1 приведена зависимость измеренного с помощью аппаратнопрограммной системы DIUS-1.15M [2] максимального магнитного потока Φ_m и тока размагничивания I_{Hc} коэрцитиметра КИФМ-1 от толщины упрочненного слоя, который был имитирован пластинами различной толщины и обладающих различной твердостью и магнитными свойствами. Измерения проводились с U-образным электромагнитом и сечением полюсов 12х28 мм.

Пусть допустимый диапазон толщин составляет (3÷6) мм. В случае нормально упрочненных слоев, имеющих допустимые значения толщины, измеренные значения величин I_{Hc} и Ф_m должны одновременно попадать в заштрихованные на рисунке 1 области. Выпадающим из этих областей двум образцам соответствуют пониженные значения I_{Hc} и

завышенные значения Φ_m , что свидетельствует об их недостаточном поверхностном упрочнении.



Рисунок 1 - Зависимость величины тока размагничивания (а) и максимального магнитного потока (б) от толщины нормально упрочненных (**•**) и отличающихся по магнитным свойствам (**•**) поверхностных слоев на магнитомягкой сердцевине

В результате выполненной работы установлено, что указанные величины I_{Hc} и Φ_m чувствительны к свойствам упрочнённого слоя и селективный контроль качества поверхностного упрочнения может быть реализован с помощью I_{Hc} и Φ_m . Различие чувствительностей величин к изменению толщины и физических свойств упрочненного слоя может быть использовано для селективной оценки качества поверхностного упрочнения стальных изделий с помощью аппаратно-программной системы DIUS-1.15M [4].

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика» Г.р. № 122021000030-1). Д. Ксенофонтов и А. Бызов благодарят Институт физики металлов имени М.Н. Михеева за поддержку их работы по государственному заданию Минобрнауки России по теме «Диагностика», которая выполнялась в рамках молодежного проекта ИФМ УрО РАН № 22-21/мол.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Горкунов Э.С., Махов В.Н., Поволоцкая А.М., Тузанкин С.В., Субботин Ю.С., Лапидус Б.М. Магнитно-измерительный комплекс для магнитоструктурных исследований. Дефектоскопия, 1999, № 3, с. 78-84.

[2] В.Н. Костин, О.Н. Василенко, А.В. Бызов Мобильная аппаратно-программная система магнитной структуроскопии DIUS-1.15М. Дефектоскопия, 2018, № 9, с. 47-53.

[3] A.V. Byzov, D.G. Ksenofontov, V.N. Kostin and O.N. Vasilenko. Magnetic field distribution in steel objects with different properties of hardened layer. Advances in computational design, 2022, V.7, p.57-68.

ИМПУЛЬСНЫЙ ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ КОРРОЗИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ СТЕНОК ТРУБОПРОВОДОВ ПОД ИЗОЛЯЦИЕЙ.

©2022 г. <u>Горбунов Антон Евгеньевич¹</u>, Соломенчук Павел Валентинович².

Научный руководитель: к.т.н. Ивкин Антон Евгеньевич³. ^{1,3}– Санкт-петербургский Горный университет 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2 2 - ООО «Константа», 198097, г. Санкт-Петербург, Огородный переулок, д.21. 1 — ae.gorbunov.w@gmail.com,+7-999-210-39-96 2 — pavel257@mail.ru, +7-911-933-88-09 3 — ivkin@constanta.ru, +7-904-640-67-07

По оценке Всемирной организации коррозии, ежегодно коррозия наносит ущерб, оцениваемый в 2,2 трлн долларов. Порядка 45% всех потерь приходится на нефтегазовую отрасль, в которой от 40% до 60% всех затрат на ремонт трубопроводов связано именно с процессом коррозии под изоляцией. Финансовые затраты на ремонт подобных дефектов составляют 10% от общего объема затрат в отрасли.

Эксперты полагают, что убытки от коррозии можно снизить на 20–25% за счёт использования современных технологий неразрушающего контроля.

В международной практике последние десять лет идут активные обсуждения и исследования импульсного вихретокового контроля (ИВТК), а также развивается практическое применения в широком спектре областей: от нефтегазовой отрасли до ядерной энергетики и авиационной промышленности (рис. 1).



Рисунок 1. Пример применения импульсного метода вихретокового неразрушающего контроля для оценки коррозионных повреждений стенок трубопровода под изоляцией.

В отличии от классического вихретокового контроля, при котором катушка возбуждения при подаче синусоидального сигнала излучает электромагнитное поле установленной частоты, в импульсном методе, исходя из названия, на катушку возбуждения подаётся импульсный сигнал (рис. 2). Это позволяет за один короткий



сокращая время проведения контроля.

Рисунок 2. Сравнение форм сигналов возбуждения методов вихретокового контроля.

На данный момент рынок приборов на основе ИВТК представлен всего тремя иностранными устройствами (EtherNDT, Eddyfi, AcuTech), обладающими одними и теми же недостатками, среди которых невозможность определения абсолютной толщины стенки трубопровода, усреднение измеренной толщины по всей площади контролируемой зоны, влияние относительной магнитной проницаемости и электропроводности материала трубопровода и изменяющегося зазора.

В связи с этим возникает необходимость построения адекватной модели взаимодействия измерительного преобразователям с объектом контроля для определения путей оптимизации конструкции и выделения информативных параметров контроля с дальнейшим созданием отечественного аналога.

В докладе описываются существующие приборы импульсного вихретокового контроля, цели и задачи проводимого исследования, а также детально рассматриваются нюансы построения конечно-элементной модели импульсного вихретокового преобразователя и возможные пути его оптимизации.

ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ ИДЕНТИФИКАЦИИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ ПО ТИПАМ ДЕФЕКТОВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ДУГОВЫМИ СПОСОБАМИ СВАРКИ, ПО РЕЗУЛЬТАТАМ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ ДИФРАКЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

<u>Денис Александрович Бачаев¹</u>, 2-М.П. Савичев², 3- Д.А. Аджибае³, 4- В.В. Атрощенко⁴

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ), г. Уфа.

<u>denisba4aev14@gmail.com¹</u>, savichevmax@mail.ru², <u>danno23@mail.ru³</u>, 91250@mail.ru⁴

Аннотация: Целью работы является разработка критериев идентификации и интерпретации дефектов сварных соединений, полученных дуговыми способами сварки, по результатам ультразвукового контроля дифракционно-временным методом (TOFD)

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, неразрушающий контроль, сварные соединения, дефекты, TOFD.

ТОFD-метод основан на взаимодействии ультразвуковых волн с краями несплошностей. Это взаимодействие приводит к излучению дифракционных волн в широком диапазоне углов. Обнаружение дифракционных волн позволяет установить наличие несплошности.

Время прохождения регистрируемых сигналов является мерой оценки высоты несплошности. Размер несплошности всегда определяется временем прохождения дифракционных сигналов. Амплитуда сигнала не используется для определения размера.

Основная конфигурация TOFD-метода состоит из разделенных ультразвукового излучателя и приемника. В связи с тем, что дифракция ультразвуковых волн слабо зависит от ориентации края несплошности, обычно используются преобразователи продольной волны с широко расходящимся пучком лучей. Это дает возможность проведения контроля требуемого объема за одно линейное сканирование. Однако при этом предъявляются ограничения к объему, который может быть проконтролирован за одно сканирование.

Дифракционно-временной метод является достаточно точным и в некоторых случаях способен полностью заменить использование рентгенографического метода. Согласно анализу результатов, полученных при сравнении эффективности применения дифракционно-временного метода и радиографии, TOFD-метод позволяет провести измерения размеров дефекта и глубину его залегания в материале. В частности, TOFDметод показал себя более чувствительным к таким дефектам, как плоскостные трещины. Из прочих преимуществ данного метода контроля можно отметить безопасность, отсутствие расходных материалов и быстроту получения результатов.

Первым сигналом, попадающим на приемник после излучения ультразвукового импульса, обычно является головная волна, которая проходит прямо под верхней поверхностью объекта контроля. При отсутствии несплошностей вторым сигналом, прибывающим на приемник, является эхо-сигнал от донной поверхности. Эти два сигнала обычно применяются для установления контрольных точек. Если пренебречь изменением фазы волны, любые сигналы, создаваемые несплошностями в материале, должны поступать между головной волной и эхо-сигналом от донной поверхности (с учетом того, что последние две отвечают, соответственно, самому короткому и самому длинному путям между излучателем и приемником). По тем же причинам дифракционный сигнал, созданный верхним краем несплошности, прибудет до сигнала, созданного нижним краем несплошности.

В ТОFD преобразователях предусмотрен высокий уровень затухания и широкая полоса пропускания для низкоуровневых продольных волн в стали. Наиболее распространены

ТОFD ПЭП с частотой 10-15 МГц. Меньшие частоты используются для контроля в нескольких зонах, где требуются длинные УЗ-пути и большое межосевое расстояние (PCS).

Группа TOFD использует линейное сканирование под углом продольной волной двумя ПЭП, работающими в раздельно-совмещенном режиме. Они выставляются таким образом, чтобы центр луча передатчика и приемника фокусировался на нужной позиции в сварном шве. Обычно это 2/3 толщины (66%) при контроле одной группой TOFD. При отсутствии усилителя не важно, какой ПЭП является передатчиком, а какой приемником.

Луч группы TOFD может фокусироваться двумя способами:

1. Изменение угла падения луча за счет смены призмы.

2. Изменение межосевого расстояния ПЭП (PCS) при их смещении.

Межосевое расстояние (PCS) — расстояние между точками выхода луча двух ПЭП. Эта величина требуется как в ходе контроля, так и при калибровке УЗ данных для определения высоты и глубины дефекта.

Для расчета используется следующая формула: $PCS = (2t * FD) * \tan A$, где t – толщина;

FD - глубина фокусировки (обычно 66% для одной группы TOFD);

tan A - тангенс угла входа луча. (обычно 60° или 70° для одной группы TOFD).

В ходе TOFD-контроля рассматривается участок между продольной волной на поверхности сварного шва и донным сигналом. Сигнал между поверхностной волной и донным эхосигналом является продольной волной, и программа может калибровать линейки и курсоры по УЗ осям для обеспечения точности измерений. После сигнала, отраженного от задней стенки, показана область детектирования поперечных волн, что удобно для выявления дефекта, но невозможна калибровка для высокой точности измерений.

В настоящий момент за рубежом и на территории Республики Беларусь разработаны и введены в действие все необходимые стандарты для широкого применения метода TOFD. В России нормативная документация проходит стадию утверждения. Для применения метода TOFT требуется дополнительное обучения дефектоскописта УЗК настройке и калибровке оборудования, и расшифровке сканов TOFT. Обучение правильной интерпретации дефектов по сканам TOFT проводится на изображениях типовых дефектов.

В настоящий момент подготовлены образцы для исследований, представляющий собой сварные листы 300*300 мм и толщиной 8 мм. Образцы проконтролированы визуальноизмерительным контролем, цифровой радиографией и ультразвуковым контролем эхоимпульсным методом с применением фазированных антенных решеток. Проведение TOFT будет производиться на новом отечественном дефектоскопе УСД 60/128ФР.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кретов Е.Ф.* Методические аспекты УЗК дифракционно-временным методом в европейских стандартах. – В мире НК. – Сентябрь 2011 г. – № 3 (53). – С. 47–49.

2. СТБ EN 583-6-2013 Контроль неразрушающий. Ультразвуковой метод. Часть 6. Дифракционно-временной метод обнаружения и измерения несплошностей

3. СТБ EN 10863 Контроль неразрушающий сварных соединенийю. Ультразвуковой метов. Применение дифракционно-временного метода (TOFD).

4. СТБ EN 15617-2013 Контроль неразрушающий сварных соединений. Дифракционновременной метод (TOFD). Границы допустимости.

5. ISO 16828:2012 - Неразрушающий контроль. Ультразвуковой контроль. Дифракционно-временной метод (TOFD), как метод обнаружения и определения размеров несплошностей.

6. ISO 23279:2010 - Неразрушающий контроль сварных швов. Ультразвуковой контроль. Определение параметров индикаций в сварных швах.

7. Сайт компании «Olympus» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.olympus-ims.com. – Дата доступа: 20.02.2022.

8. Сайт «TOFD и фазированные решетки» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://tofd-pa.ru. – Дата доступа: 20.02.2022.

9. Сергеев С.С, Прокопенко Е.Н., Сергеева О.С. Приборы и методы акустического контроля. Методические указания к самостоятельной работе студентов специальности 1-540102 «Методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов». – Могилев; ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет, 356 (2014).