УДК 620.179.147

А. В. Грабовский, Г. А. Петров
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Многоканальные сканеры вихретокового контроля

Поднимаются проблемы неразрушающего контроля продукции черной металлургии на фоне роста объемов производства. Приводится обзор современных средств вихретокового контроля. Описывается отечественная разработка, позволяющая значительно увеличить производительность вихретоковой дефектоскопии. Показаны примеры использования разработки в отраслях промышленности.

Вихретоковый контроль, дефектоскопия, многоканальные сканирующие устройства

Эксплуатация технически сложных и опасных объектов всегда сопряжена с необходимостью проведения технического контроля, обслуживания и ремонта. Сокращение временных затрат на проведение регламентных работ, создание аппаратуры и объективных методик контроля состояния объектов является актуальной задачей как с точки зрения безопасной эксплуатации объектов, так и требований сокращения времени простоя. Не стоит забывать и об угрозах для экологии, чего стоила одна только авария на буровой платформе в Мексиканском заливе. В нашей стране в последние годы обострилась проблема схода грузовых вагонов по причине изломов боковых рам тележек, что приводит к значительным экологическим последствиям.

Увеличение числа аварий является следствием критического износа оборудования, нарушений технологических и производственных процессов, наличием человеческого фактора в процессе эксплуатации, обслуживания и ремонта. Неразрушающий контроль и диагностика (НК и Д) позволяют решить эти проблемы, а автоматизация процессов контроля – исключить человеческий фактор.

Ужесточение норм качества промышленной продукции и надежности объектов требуют постоянного совершенствования методов и средств неразрушающего контроля. В мире существует четыре основных направления развития НК и Д [1]:

– интеллектуализация методов и средств НК и Д;

– разработка единой системы контроля качества технических объектов и окружающей среды;

– совершенствование диагностических технологий;

– организационное обеспечение НК и Д на международном уровне.

Темпы роста мировой промышленности не должны идти вразрез с качеством продукции. Так, например, суммарные мировые объемы производства черной металлургии (чугунов, ферросплавов и сталей) в 2014 г. превысили 3 млрд тонн. Это в 2 раза больше, чем было произведено в мире в 2006 г. Трубы, рельсы, металлоконструкции, корпуса судов, валы и прочие детали машиностроения обязательно должны подвергаться диагностированию. Но в неразрушающем контроле продукции черной металлургии есть ряд принципиальных сложностей, например:

1. Ржавчина, затрудняющая визуальный контроль и требующая дополнительной подготовки поверхности объекта. При ультразвуковом контроле ржавчина может являться причиной плохого акустического контакта. Наличие ржавчины на поверхности также затрудняет проведение капиллярного контроля.

2. Нанесенные на поверхность лакокрасочные покрытия (ЛКП). Для борьбы с коррозией изделия часто покрывают ЛКП, что создает большие трудности для проведения НК и Д. Чаще всего при проведении диагностирования объекта ЛКП полностью снимается, а затем наносится заново. Такая процедура вносит дополнительные затраты как временные, так и финансовые.

3. Локальные изменения магнитных свойств объекта. Данная особенность сильно затрудняет проведение электромагнитных методов контроля, так как приводит к ложным срабатываниям оборудования.

4. Высокая шероховатость и плохое состояние контролируемой поверхности в целом. Эта особенность свойственна большой части трубной продукции, а также листовому прокату и несущим металлоконструкциям.

Для решения перечисленных проблем все чаще используется вихретоковый метод контроля (ВК). Применение данного метода хорошо зарекомендовало себя при контроле изделий из цветных металлов и сплавов. Однако для магнитных сталей метод ВК долго считался неподходящим, имеющим слишком много недостатков.

Высокая магнитная восприимчивость магнитных сталей и чугунов сильно ограничивает глубину проникновения электромагнитного (ЭМ) поля. Контроль подповерхностных слоев объекта с использованием современных датчиков достигается либо за счет управления режимом генерации сигналов, либо за счет комбинирования ВК с другим методом, который менее чувствителен к поверхностным дефектам объекта (например, ультразвуковой метод).

Неоднородность электромагнитных свойств контролируемого материала затрудняет проведение ВК. В ранних образцах вихретокового оборудования неоднородность свойств вызывала ложные срабатывания при поиске дефектов. В современном оборудовании неоднородность электромагнитных свойств нивелируется за счет использования дифференциальных датчиков и сложных алгоритмов обработки сигналов.

Лакокрасочные и другие виды покрытия, ржавчина, следы машинного масла и грязи, маркировка деталей не являются помехой в проведении ВК, так как электромагнитное поле не искажается при прохождении диэлектрических покрытий. Эта же особенность метода позволяет проводить контроль без непосредственного контакта объекта и преобразователя. Более того, ВК используют для контроля многослойных изделий из цветных металлов, например алюминия. Так, в авиационной промышленности проверяют многослойную обшивку планеров в местах клепаных соединений.

Вихретоковый метод контроля. В простейшем случае вихретоковым преобразователем может являться виток провода с протекающим по нему переменным током. В случае когда виток находится над металлическим объектом, магнитный поток (первичное ЭМ-поле, поле возбуждения), пронизывающий этот виток, будет создавать в объекте вихревые токи, которые будут противоположны по направлению току, протекающему в витке в текущий момент времени. В свою очередь, вихревые токи тоже будут создавать свое электромагнитное поле (вторичное ЭМ-поле, поле вихревых токов), которое будет ослаблять поле возбуждения, так как оно направлено в противоположную сторону (рис. 1). Именно по результатам этого взаимодействия (взаимодействия ЭМ-полей) судят о состоянии объекта контроля. Так, например, трещина в объекте контроля под витком с током вызывает ослабление вихревых токов и, соответственно, вызывает ослабление поля вихревых токов. В результате воздействие на поле возбуждения изменяется, что отражается на сигнале.

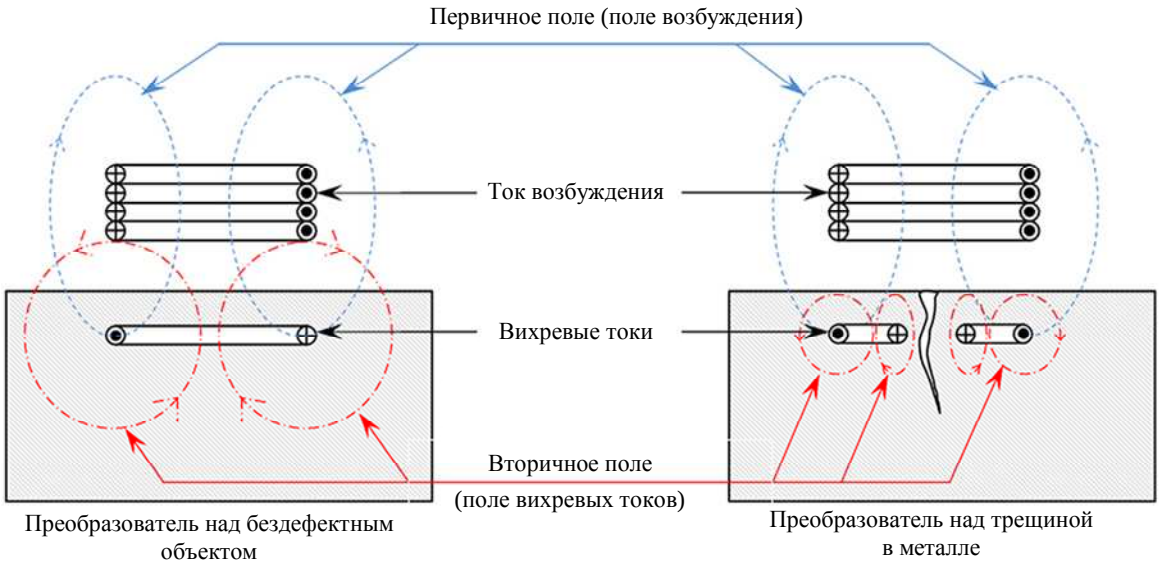

Рис. 1

Один виток с током создает очень слабое поле возбуждения, поэтому в вихретоковых преобразователях (ВТП) используют индуктивные катушки, число витков в которых может варьироваться от нескольких единиц до нескольких тысяч в зависимости от назначения преобразователя. Помимо этого катушки для ВТП часто мотают на магнитопроводах (обычно на ферритовых стержнях), что позволяет локализовать ЭМ-поле в зоне магнитопровода, увеличив тем самым абсолютную чувствительность и обеспечив точечное воздействие преобразователя на объект контроля.

В зависимости от задач неразрушающего контроля и особенностей аппаратуры выбирают преобразователи определенного типа [1]. Преобразователи, в которых используется одна катушка и для создания ЭМ-поля, и для измерения, называются параметрическими абсолютными. Если два параметрических датчика включаются по дифференциальной схеме, то такие преобразователи называются параметрическими дифференциальными. Дифференциальное включение датчиков позволяет увеличить чувствительность ВТП к дефектам и отстроиться от ряда мешающих факторов. Если в преобразователе одна катушка создает ЭМ-поле, а другая катушка отвечает за измерение, то такой преобразователь называется трансформаторным абсолютным. Трансформаторные датчики тоже могут быть включены по дифференциальной схеме, при этом возбуждающая катушка в таких преобразователях может быть и одна, а вот измерительных – две и более. Существует также деление преобразователей по размещению их относительно объекта контроля. Так, выделяют преобразователи накладные, которым нужен односторонний доступ к объекту контроля; проходные, которые проходят либо снаружи объекта, охватывая его, либо помещаются внутрь (по принципу «снаряда»); и комбинированные ВТП.

Наибольшее распространение и популярность получили преобразователи накладного типа, так как они позволяют проводить контроль локально при одностороннем доступе к объекту. Преобразователи накладного типа дают высокую чувствительность к микродефектам. Чувствительность преобразователя к микродефектам тем выше, чем меньше радиус обмотки катушки. Такие преобразователи обычно собирают в корпус, напоминающий по форме шариковую ручку или фломастер, поэтому их еще называют преобразователями «карандашного» типа. Достоинствами таких преобразователей являются:

– простота изготовления и низкая стоимость;

– локальность контроля, сопоставимая с диаметром катушки ВТП;

– высокая чувствительность к дефектам;

– высокая универсальность.

Тем не менее, одно из достоинств формирует основной недостаток данных преобразователей. Ввиду локальности контроля требуется последовательное сканирование детали с шагом, не превышающим диаметр катушки преобразователя. В погоне за улучшением чувствительности производители стремятся минимизировать сами датчики. Так, например, в авиации одними из самых распространенных датчиков являются датчики с диаметром катушки 1 и 0.5 мм. Это подразумевает последовательное сканирование деталей с шагом 1 и 0.5 мм соответственно. Кроме того, часто в нормативных документах предписывают проводить контроль, перемещая преобразователь в двух взаимно перпендикулярных траекториях. При этом скорость ручного контроля, как правило, не превышает 50…100 мм/с. Несложно показать, что для контроля 1 м^2 поверхности детали преобразователем с диаметром катушки 1 мм потребуется не менее 2.5 ч (при скорости 100 мм/с). Если эту деталь необходимо проверять в двух взаимно перпендикулярных траекториях преобразователем с диаметром катушки 0.5 мм, то потребуется уже не менее 10 ч работы (и это без учета времени на разметку детали на шаги сканирования). Поэтому на практике при ручном контроле шаг сканирования и скорость часто не соблюдаются. В этом и заключается два основных недостатка ручного вихретокового контроля датчиками «карандашного» типа – низкая производительность и человеческий фактор.

В последнее десятилетие на рынке стали появляться многоканальные вихретоковые сканеры иностранного производства [2], [3], которые весьма компактны, но при этом позволяют контролировать сразу большую плоскость. Линия контроля таких сканеров может достигать 100 мм (и даже больше), при этом конструктивно обеспечено перекрытие зон нулевой видимости, что позволяет не проводить контроль в двух взаимно перпендикулярных траекториях. Выдерживать шаг в 100 мм гораздо проще, чем шаг в 1 мм. Большинство из этих сканеров основано на принципе объединения нескольких катушек ВТП в один корпус, поэтому их еще называют «матричными». ВТП в составе этих сканеров могут быть трансформаторные или параметрические. За счет

Таблица 1

Характеристики		Примечания
Протяженность линии сплошного контроля, мм	От 20 до 320	В зависимости от типа и назначения сканера
Скорость контроля, мм/с	От 30 до 500	
Рабочий зазор (между объектом контроля и поверхностью сканирования), мм	До 10 мм	
Характеристики порогового дефекта: длина, мм глубина, мм раскрытие, мм	 От 2 до 10 от 0.3 до 1 0.05	
Количество каналов, шт.	От 8 до 32	
Типы применяемых датчиков	Трансформаторные дифференциальные и абсолютные	См. рис. 2
Интерфейсы связи	RS-485 USB	В зависимости от назначения

применения датчиков маленького диаметра удается добиться очень хорошей чувствительности. Однако при этом значительно возрастают требования к рабочему зазору, так как с уменьшением диаметра ВТП уменьшается и диапазон рабочих зазоров [4]. По этой же причине увеличивается чувствительность сканера к рывкам во время контроля, так как неравномерность контроля чаще всего приводит к кратковременному перекосу сканера относительно объекта. Использование сложных алгоритмов обработки сигналов в некоторой степени позволяет решить эти проблемы, но не избавляет от них.

Применение матричных сканеров ограничивается жесткостью исполнения рабочей поверхности (поверхности контроля). Датчики, как правило, жестко закреплены друг относительно друга, поэтому сканеры изготавливаются под объект определенной формы и не являются универсальными. Тем не менее, в рамках одного предприятия, как правило, осуществляется контроль деталей фиксированной формы. Например, при контроле труб необходимо использовать сканеры контроля труб определенных диаметров. Если стоит задача контроля обшивок судов или планеров, то подойдет сканер с плоской рабочей поверхностью.

Многоканальные сканеры вихретокового контроля отечественного производства. С 2006 по 2010 гг. специалистами и инженерами компаний «Алтек» (Санкт-Петербург) и «Интрон» (Москва) проводились работы по созданию многоканальных сканеров вихретокового контроля. Плодом сотрудничества двух компаний стало создание сканеров, превосходящих импортные по ряду характеристик. Принятые технические решения позволили создать гибкую платформу, на базе которой можно разрабатывать сканеры для контроля деталей с очень сложным профилем. В табл. 1 приведены некоторые характеристики данных сканеров.

Разработанные сканеры состоят из двух основных блоков: блока цифровой обработки сигналов (ЦОС) и блока вихретоковых преобразователей (рис. 2). Блок ЦОС отвечает за связь сканера с дефектоскопом, генерацию сигналов, съем и фильтрацию данных с измерительных обмоток ВТП, анализ зазора, передачу данных в дефектоскоп. Использование интерфейса RS-485 позволяет подключать последовательно до 256 сканеров в одну цепь, что расширяет возможность создания сложных диагностических комплексов вихретокового контроля. Блок ЦОС обеспечивает 32 канала вихретокового контроля для одного сканера. Реализован интерфейс USB, позволяющий подключать сканер непосредственно к компьютеру (ПК).

Передача данных в цифровом виде позволяет добиться минимальной длины аналогового тракта. При размещении всей электронной части в центральном блоке дефектоскопа из многоэлементного сканера выходит толстый кабель (объединяющий провода от всех ВТП), что крайне неудобно при контроле. Так, например, в 64-канальных сканерах канадской фирмы «Eddify» кабель содержит 130 жил. Кроме того, аналоговый тракт гораздо сильнее подвержен влиянию помех, чем цифровой. В описываемой разработке из сканера выходит цифровой сигнал, что позволяет добиться высокой помехозащищенности.

Блок ВТП условно можно разбить на равные по длине зоны, в каждой из которых располагается группа преобразователей, выполняющих свои функции. В рамках одной зоны располагаются

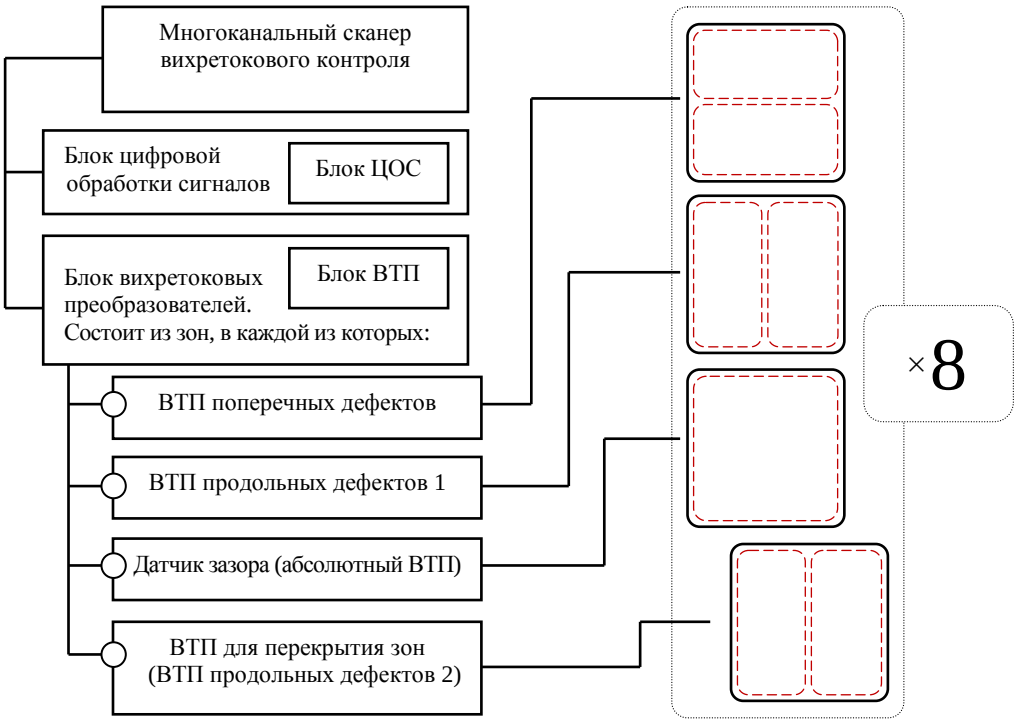

Рис. 2

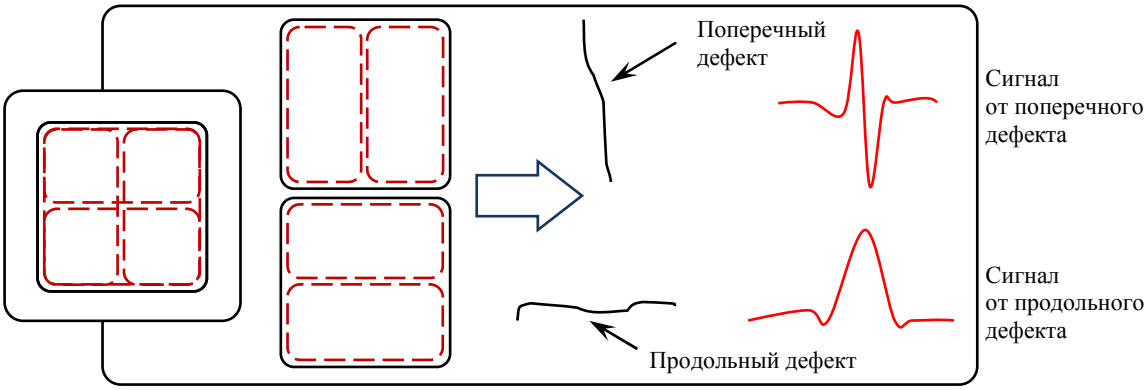

Рис. 3

два дефектоскопических дифференциальных ВТП и один абсолютный ВТП, выполняющий роль датчика зазора. Еще один дифференциальный датчик обеспечивает перекрытие между зонами, а также перекрывает зону нулевой видимости датчика продольных дефектов (рис. 2).

Использование дифференциальных преобразователей трансформаторного типа позволяет увеличить размер возбуждающей обмотки без последствий для чувствительности [5]. В свою очередь, увеличение размеров возбуждающей катушки приводит к увеличению размеров контролируемой зоны. Тем самым удается повысить производительность контроля.

Датчики дифференциального типа чувствительны к дефектам определенной ориентации. Поэтому при разработке закладывалось требование обнаружения продольных и поперечных дефектов. В соответствии с этим условием внутри одной зоны располагаются датчики как продольных, так и поперечных дефектов (рис. 3). Дифференциальная связь в них взаимно перпендикулярна. Это решение гарантирует обнаружение дефектов любой ориентации с высокой чувствительностью, свойственной датчикам дифференциального типа.

Абсолютные преобразователи предназначены для отслеживания зазора в режиме реального времени (т. е. являются датчиками зазора). Датчики зазора распределены равномерно по всей длине сканера, что позволяет контролировать перекосы сканера и изменения геометрии объекта контроля непосредственно во время проведения контроля. Сигнал с датчика зазора, пройдя через аттенюатор, фильтр и аналого-цифровой преобразователь, поступает на вход микроконтроллера, где происходит

Таблица 2

Состав колесной пары	Расчетное время ручного контроля, мин		Время контроля комплексом «Peleng Automat», мин
	Минимальная толщина обода колеса (25 мм)	Максимальная толщина обода колеса (70 мм)	
Без тормозных дисков	337 (5 ч 37 мин)	613 (10 ч 13 мин)	12…15
С тормозными дисками	381 (6 ч 21 мин)	717 (11 ч 57 мин)	12…15

оценка текущего зазора путем сравнения с опорным сигналом. В случае если зазор изменился относительно начального значения, происходит автоматическая корректировка усиления.

Так как в одной зоне располагаются 4 ВТП, а блок ЦОС рассчитан на 32 датчика, то в одном сканере реализуется до 8 зон контроля. Размер зоны контроля определяется характеристиками выявляемых дефектов. Чем меньше размеры дефектов, тем меньше должен быть сам преобразователь. Так, например, при выявлении трещин протяженностью более 5 мм размер зоны контроля составит 20 мм (квадратная зона со сторонами 20 мм). Для такой зоны эквивалентный диаметр измерительной обмотки будет равен 10 мм. За счет использования дифференциальных ВТП удается обнаруживать дефекты, протяженность которых в 2 раза меньше размера измерительной обмотки. Таким образом, имея 8 зон по 20 мм, можно получить 160 мм сплошного контроля на дефекты любой ориентации протяженностью от 5 мм. Соответственно, при контроле объекта на наличие трещин протяженностью от 10 мм протяженность линии сплошного контроля одного сканера возрастает до 320 мм (табл. 2).

Описанные сканеры применялись на практике в комплексе автоматизированного ультразвукового и вихретокового контроля колесных пар железнодорожных вагонов «Peleng Automat». Их использование позволило значительно повысить производительность неразрушающего контроля в депо. В табл. 3 представлен сравнительный анализ по временным затратам на контроль одной колесной пары вихретоковым методом контроля при проведении работ вручную и при автоматизированном контроле комплексом «Peleng Automat». Получено значительное увеличение производительности. При проведении контроля исключен человеческий фактор.

Таблица 3

Параметр сканера	Значение, мм			
Длина линии сплошного контроля сканера	320	160	80	64
Минимальная длина обнаруживаемого дефекта	10	5	2.5	2

Вихретоковый метод неразрушающего контроля обладает высоким потенциалом для развития. Применение ручных многоканальных устройств началось совсем недавно и подразумевает длительный процесс доработок и модернизаций.

На сегодняшний день получены хорошие результаты применения многоканальных сканеров вихретокового контроля в таких отраслях, как железнодорожный транспорт, металлопрокатное производство, авиационная промышленность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль Т. 2: в 2 кн. Кн. 2: Вихретоковый контроль / Ю. К. Федосенко, В. Г. Герасимов, А. Д. Покровский, Ю. Я. Останин; под ред. В. В. Клюева. М.: Машиностроение, 2006.

2. Вихретоковый контроль с использованием матрицы датчиков / Ч. Эдди, Дж. Биттнер, Б. Лепаж, А. Ламар // В мире НК. 2007. № 2 (36). С. 12–14.

3. Борисков Ю. В., Козлов В. Р. Преимущества применения технологии вихретоковых матриц по сравнению с классическим вихретоковым контролем // Территория NDT. 2014. № 2. С. 56–59.

4. Герасимов В. Г., Покровский А. Д., Сухоруков В. В. Неразрушающий контроль. Кн. 3: Электромагнитный контроль / под ред. В. В. Сухорукова. М.: Высш. шк., 1992.

5. Rosell A., Persson G. Modelling of a differential sensor in eddy current non-destructive evalution // Proc. of the COMSOL Conf. 2011. COMSOL Conf. Stuttgart, Germany, 2011. URL: https://www.comsol.com/paper/download/83651/rosell_paper.pdf. (дата обращения 14.04.2016).

A. V. Grabovskiy, G. A. Petrov
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

MULTI-CHANNEL EDDY CURRENT SCANNERS

Presents the problems of nondestructive testing of steel products against the background of increasing production. Provides an overview of modern means of eddy current testing. Describes domestic development, which allows to significantly increase performance of eddy current testing. Presents the examples of usage of this development in the industries.

Eddy current testing, nondestructive testing, multi-channel scanners

УДК 681.7.069.24:620.193.82:069.44

А. Н. Геращенко
Тель-Авивский университет (г. Тель-Авив, Израиль)

И. Ю. Кирцидели
Ботанический институт им. В. Л. Комарова РАН

В. А. Парфенов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Удаление биологических загрязнений с поверхности памятников из камня при помощи лазерной обработки (лазерная очистка мрамора и известняка от микроскопических грибов: практические аспекты)[1]

Приводятся результаты экспериментальных исследований по разработке лазерной технологии удаления микроскопических грибов с каменных поверхностей. В работе использовался импульсный твердотельный Nd:YAG-лазер с длиной волны 1.064 мкм и модельные образцы камня из мрамора и известняка. Цель работы состояла в оптимизации выходных параметров лазеров для определения доз облучения, при которых происходит механическое удаление и инактивация этих микроорганизмов.

Биологические поражения памятников, микроскопические грибы, микромицеты, лазерная очистка, реставрация

Одной из главных причин разрушения памятников истории и культуры из камня является появление на их поверхности биологических загрязнений. Лазерная очистка может рассматриваться как перспективный метод борьбы с микроорганизмами-биодеструкторами [лит.].

В модельных экспериментах споры микроскопических грибов обрабатывались при помощи импульсного Nd:YAG-лазера с длиной волны 1064 нм. Была показана возможность полного удаления микромицетов под действием лазерного излучения [лит.]. При этом даже в тех случаях, когда споры грибов оставались внешне неповрежденными, было выявлено значительное подавление их жизнеспособности. Таким образом, метод лазерной обработки помимо задачи очистки поверхности памятников позволяет решить также задачу инактивации микроорганизмов.

Как продолжение обсуждения проведенных авторами исследований, в данной статье рассматривается возможность использования лазера для удаления микромицетов в реальных условиях, т. е. с поверхности мрамора и известняка. Был изменен не только тип подложки, но изучалось влияние лазерного излучения как на споры, так и на мицелий грибов. Результаты этих исследований приведены далее.

[1] Продолжение. Начало в № 6 за 2016 г.