

На правах рукописи



Лобанова Ирина Сергеевна

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗЦОВ
ИЗ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА
ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ СРЕДСТВ КАПИЛЛЯРНОГО
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ**

Специальность: 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Суржиков Анатолий Петрович

Официальные оппоненты: Бобров Алексей Леонидович,
доктор технических наук, Федеральное
государственное бюджетное образовательное
учреждение «Сибирский государственный
университет путей сообщения», г. Новосибирск,
доцент кафедры «Электротехника, диагностика и
сертификация»

Матвиенко Олег Викторович,
доктор физико-математических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Томский государственный архитектурно-
строительный университет», профессор кафедры
теоретической механики

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт физики прочности и
материаловедения Сибирского отделения
Российской академии наук

Защита состоится «4» декабря 2018 г. в 13:00 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.269.09 при ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский Томский политехнический университет»
по адресу: Россия, 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215 (актовый зал).

С диссертационной работой можно ознакомиться в научно-технической
библиотеке федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский
политехнический университет» по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 55 и на сайте
<http://portal.tpu.ru/council/916>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук



Шевелева Е.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Одной из важнейших задач промышленности является повышение качества продукции. Важным средством решения этой задачи является активное использование методов неразрушающего контроля, как при изготовлении продукции, так и в процессе ее эксплуатации.

Среди физических методов контроля в настоящее время большое распространение получили капиллярные методы контроля. Метод капиллярной дефектоскопии широко распространен в процессах изготовления, восстановительного ремонта и технического обслуживания изделий в энергетической, нефтяной, транспортной, авиационной промышленности и машиностроении. Метод капиллярной дефектоскопии хорошо зарекомендовал себя при выявлении поверхностных дефектов в стенках трубопроводов и других технических систем, работающих под давлением. Контролю этим методом подлежат изделия и детали любой формы и размеров, выполненные из любых материалов. Для некоторых изделий из немагнитных и неметаллических материалов, деталей сложной формы – этот метод является одним из немногих способов определения пригодности деталей и установок к работе.

Основными средствами капиллярного неразрушающего контроля являются дефектоскопические материалы и контрольные образцы.

Дефектоскопические материалы, для проверки их работоспособности, следует подвергать контролю. Способность дефектоскопических материалов к выявлению дефектов проверяют на образцах с поверхностными трещинами известных размеров. Форму, материал и технологию изготовления выбирают таким образом, чтобы обеспечить стабильность размеров трещин и свойств материала в течение установленного срока их службы, а также стойкость образцов против коррозии при воздействии дефектоскопических материалов.

В настоящее время на рынке представлено достаточное количество контрольных образцов и тест-панелей, выполненных из высококачественной стали, которые применяются для определения работоспособности и оценки качества дефектоскопических материалов, а также сравнения наборов дефектоскопических материалов между собой. А т.к. капиллярные методы контроля позволяют обнаруживать дефекты в изделиях, выполненных из разных материалов, в т.ч. из стекла, керамики, пластмассы, то наличие неметаллических образцов, предназначенных для испытаний средств капиллярного неразрушающего контроля, является **актуальной задачей**.

Цель диссертационной работы – разработка и исследование образцов из неметаллического материала для испытаний средств капиллярного неразрушающего контроля.

Для достижения данной цели были поставлены следующие **задачи**:

- проведение анализа существующих способов изготовления образцов для испытания средств капиллярного неразрушающего контроля;

- разработка образцов из неметаллических материалов для испытаний средств капиллярной дефектоскопии с заданными параметрами дефектов (шириной, глубиной, длиной);
- определение метрологических характеристик образцов;
- исследование эксплуатационных характеристик разработанных образцов из неметалла (многократность использования);
- оценка влияния температуры на метрологические характеристики неметаллических образцов для испытаний;
- оценка возможности применения образцов для задач капиллярной дефектоскопии.

Объект исследования: капиллярный неразрушающий контроль материалов и изделий.

Предмет исследования: неметаллические испытательные образцы капиллярного неразрушающего контроля.

Методы исследования:

В работе были использованы экспериментальные и аналитические методы, методы математического и физического моделирования, статистические методы обработки экспериментальных данных.

Достоверность и обоснованность результатов работы

обеспечивается систематическим характером исследования, применением проверенных методик измерения, воспроизводимостью полученных результатов, использования сертифицированного программного обеспечения, совпадением экспериментальных данных с результатами математического моделирования.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Эпоксидный материал в качестве материала испытательных образцов для капиллярной дефектоскопии, исключаящий окисление поверхности и щелевую коррозию, а так же обеспечивающий полную выявляемость дефектов и возможность контроля остатков дефектоскопических материалов.
2. Программный комплекс, позволяющий смоделировать движение жидкостей в щелевидных тупиковых и сквозных капиллярах с учетом параметров самой жидкости, материала, из которого выполнен капилляр, и его размеров, шероховатости поверхности, а также угла наклона капилляра относительно горизонтали.
3. Способ изготовления контрольных образцов для капиллярной дефектоскопии, заключающийся в изготовлении образцов с заданными параметрами дефекта (глубиной, шириной, длиной) получаемые путем вытравливания фольги, определенного размера из заготовки.
4. Основные метрологические параметры и эксплуатационные характеристики разработанных образцов для испытаний средств капиллярного контроля, такие как ширина, длина и глубина дефекта, степень многократности применения образцов и влияния температурных воздействий.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Предложено использование в капиллярном контроле испытательных образцов из неметаллических материалов и разработан способ их изготовления.
2. Построена математическая модель движения жидкости в капиллярах с параллельными стенками на основе модифицированного уравнения Порхаева с помощью специально разработанного программного комплекса.
3. Определена пригодность разработанных испытательных образцов для задач капиллярной дефектоскопии:
 - определения работоспособности применяемых дефектоскопических материалов и дефектоскопов;
 - оценки чувствительности капиллярного контроля;
 - отработки технологии капиллярного контроля изделий на образцах из эпоксидного материала;
 - сравнения наборов дефектоскопических материалов между собой;
 - при обучении специалистов и сдаче практического экзамена при аттестации персонала в области неразрушающего контроля по капиллярному методу.
4. Исследованы эксплуатационные и метрологические характеристики контрольных образцов, изготовленных способом вытравливания.

Практическая значимость:

Результаты работы внедрены в технологический процесс контроля объектов капиллярной дефектоскопии в ООО «Аттестационный региональный центр специалистов неразрушающего контроля» (г. Томск), ООО «Эксперт» (г. Томск), и в образовательный процесс отделения «Контроль и диагностика» инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности Томского политехнического университета.

Получен патент РФ на способ изготовления контрольных образцов для капиллярной дефектоскопии

Апробация работы

Результаты диссертационной работы докладывались на конференциях российского и международного уровней:

- всероссийская научно-практическая конференция школьников, студентов, аспирантов и молодых ученых «Исследования молодых – регионам» в рамках фестиваля научной мысли «Регионы России», Новокузнецкий филиал ТПУ, 2012, г. Новокузнецк;
- всероссийская молодежная школа-конференция «Неразрушающий контроль» ТПУ, 2013, Томск;
- международная научная конференция «Стандартные образцы в измерениях и технологиях», 2013, ИРА УТК, г. Екатеринбург;
- всероссийская школа-конференция с международным участием «Информационные технологии неразрушающего контроля», 2015, ТПУ, г. Томск;

- международная конференция «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее», 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, ТПУ, г. Томск;

- всероссийская конференция с международным участием «Информационно-измерительная техника и технологии», 2016, ТПУ, г. Томск.

Публикации

Соискателем было опубликовано 22 работ, по теме диссертации - 22, в том числе в рецензируемых изданиях из списка ВАК 10, в изданиях, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science – 9. Получен 1 патент РФ на способ изготовления.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 132 информационных источника, четырех приложений. Содержит 141 страницу текста, 109 рисунков и 23 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность, научная новизна и практическая значимость проблемы. Сформулированы цели и задачи работы, приведена ее краткая характеристика, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации определены области применения неметаллических материалов такие как авиа-, судо-, автомобиле- и ракетостроение, строительство и пр. Применение в различных областях хозяйства обусловлено их прочностными, упругими и прочими свойствами относительно традиционных металлов. К числу наиболее перспективных относятся наполненные и ненаполненные полимерные материалы, такие как пластики, эластомеры, волокна, композиты. В качестве основы многих композитных материалов применяют эпоксидные смолы. Они атмосферостойки, обладают химической инертностью и удовлетворительной стойкостью к воздействию повышенных температур, имеют высокую усталостную прочность, устойчивы к коррозии.

Для обеспечения надежной и безопасной эксплуатации ответственных конструкций необходимо применение методов неразрушающего контроля на всех этапах жизненного цикла. Одним из таких методов является капиллярный метод неразрушающего контроля.

Капиллярный метод позволяет обнаружить поверхностные и сквозные дефекты деталей и конструкций из композитов: подмятия, царапины, выкрашивания по кромкам отверстий и гнезд, сколы, а также внутренние дефекты, выходящие на поверхность объектов контроля с раскрытием от 0,4 мкм и более, глубиной – 0,01 мм и более, и протяженностью от 0,1 мм и более крупные. С помощью данного метода обнаруживают несплошности в паяных

соединениях, печатных платах, изоляционных покрытиях проводов, элементах глубоководных аппаратов, в судостроении.

Определены основные средства капиллярного неразрушающего контроля такие как дефектоскопические материалы и образцы, предназначенные для их испытаний. Образцы представляют собой контрольные образцы и тест-панели с дефектами заранее известных размеров, предназначенные для определения работоспособности применяемых дефектоскопических материалов и дефектоскопов; оценки чувствительности контроля и пр. Выявлено, что образцы для испытаний средств капиллярного неразрушающего контроля бывают двух видов: натурные образцы и имитаторы дефектов. Натурные образцы представляют собой объекты контроля, трещины в которых получают, подвергая, в основном гальванические покрытия, термической обработке, шлифованию, различным видам деформирования. Как правило, имитаторы дефектов представляют собой пластины и капилляры, дефект в которых заменен зазором определенного размера. Имитаторы дефектов применяются для исследовательских целей.

Указаны некоторые недостатки, предлагаемых в настоящее время на рынке, образцов. Например, реальный выход при производстве контрольных образцов, удовлетворяющих необходимым требованиям параметров дефектов (ширины раскрытия, длины и глубины), достаточно мал. Образцы для капиллярного контроля с трещинами при использовании постепенно стареют и приходят в негодное состояние. Одной из причин этого является накапливание в полостях трещин остатков применяемых дефектоскопических материалов, в основном пенетранта и проявителя, что в итоге уменьшает свободный объем полостей трещин, препятствует их заполнению и выявлению капиллярным методом. Еще одной причиной старения образцов из жаропрочной и коррозионностойкой сталей является окисление и интенсивная щелевая коррозия металла, что также впоследствии будет препятствовать проникновению пенетранта в полости дефектов.

А так как испытательные образцы должны быть изготовлены из того же материала, что и сам объект контроля, то было бы целесообразным иметь образцы из эпоксидного материала, свободные от указанных недостатков.

Вторая глава посвящена вопросу применения эпоксидного материала в качестве материала образца.

В работе предложен программный комплекс, реализующий численное решение модифицированного уравнения Порхаева, формула 1. Данный комплекс позволяет смоделировать движение жидкостей в тупиковых и сквозных щелевидных капиллярах с учетом параметров жидкости (вязкость, плотность, коэффициент поверхностного натяжения, угол смачивания), размеров капилляра, шероховатости поверхности, а также угла наклона капилляра относительно горизонтали.

$$h_1'' + \frac{1}{h_1} (h_1')^2 + \frac{8\mu(r, r_a)}{r^2(h_1)\rho} h_1' - \frac{2\sigma(h_1)a(h_1)\cos(\theta_s(h_1))}{r(h_1)\rho h_1} + \frac{p_a}{\rho(h_0 - h_1)} + g \sin(\alpha) = 0, \quad (1)$$

где μ – коэффициент динамической сдвиговой вязкости, σ – коэффициент поверхностного натяжения, r – размер капилляра, r_a – радиус макромолекулы, h – глубина заполнения, h_0 – полная глубина капилляра, p_a – атмосферное давление, θ_s – угол смачивания, a – коэффициент шероховатости поверхности, g – ускорение свободного падения, α – угол наклона капилляра.

На рисунке 1 представлена интерфейсная часть комплекса для проведения компьютерного моделирования процессов.

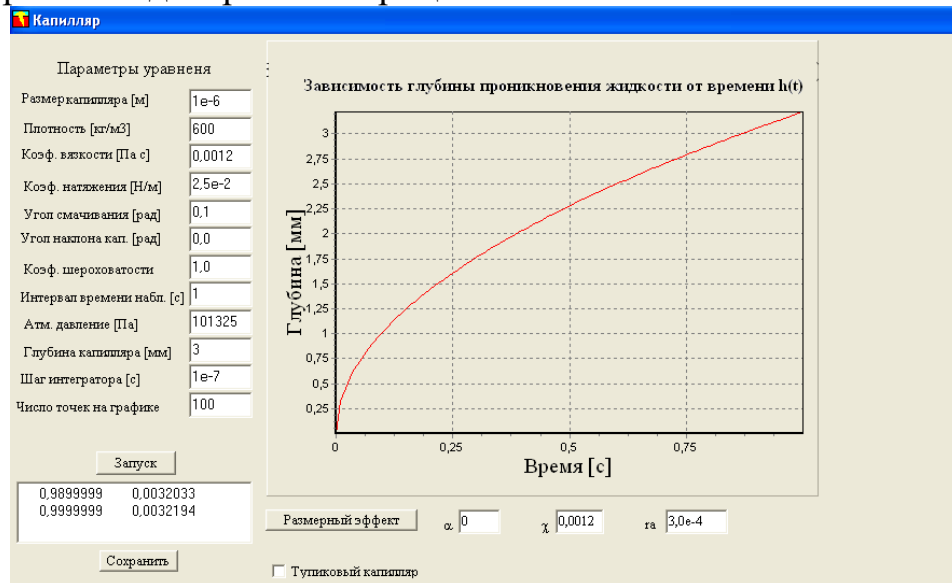


Рисунок 1 – Интерфейсная часть комплекса для проведения компьютерного моделирования

В левой части формы расположены элементы для ввода параметров задачи, такие как:

- размер капилляра (единица измерения - м);
- плотность жидкости (единица измерения – кг/м³);
- коэффициент динамической вязкости (единица измерения - Па×с);
- коэффициент поверхностного натяжения (единица измерения – Н/м);
- краевой угол смачивания (единица измерения - радиан);
- угол наклона капилляра относительно горизонтали (единица измерения - радиан);
- коэффициент шероховатости поверхности (безразмерная величина);
- интервал времени наблюдения движения жидкости (единица измерения - секунда);
- атмосферное давление (единица измерения - Па);
- глубина капилляра (единица измерения - мм). Здесь следует отметить, что этот параметр вступает в силу, если выбран режим «Тупиковый капилляр», иначе – все расчеты будут проводиться как для сквозного;
- шаг интегратора (единица измерения - секунда);

- число точек на графике. Такой параметр необходим чтобы сводить результаты моделирования на общем графике при вариации параметров задачи. В противном случае, автоматический выбор шага интегрирования по времени формирует результирующие файлы разной длины.

В правой части пользовательского интерфейса расположена панель для графического представления результатов моделирования. Под панелью расположены:

- переключатель выбора типа капилляра (сквозной или тупиковый);
- интерфейсные элементы для ввода параметров, позволяющих вычислить коэффициенты вязкости жидкости при учете размеров молекул и их трения – качения на поверхности капилляра, для капилляров шириной менее 1 мкм.

С помощью предложенного программного комплекса, исследовано движение жидкостей в сквозных и тупиковых капиллярах, с размерами 900 мкм и 300 мкм, и построены зависимости глубины проникновения жидкости от времени в капилляры из стали, так как большинство образцов для испытаний изготовлены из этого материала, эпоксидного материала – как материала для изготовления образцов из неметаллического материала, а также стекла – для проверки работоспособности применяемой математической модели. В качестве проникающих жидкостей спирт и керосин, как основные составляющие дефектоскопических материалов.

В таблице 1 представлены значения основных параметров уравнения.

Таблица 1 – Значения основных параметров уравнения

Жидкость	Коэф. динам. вязкости, Па*с, 10^{-3}	Коэф. поверхностного натяжения, Н/м, 10^{-3}	Краевой угол смачивания, град.			Плотность жидкости, кг/м ³	Коэф. влияния шероховатости поверхности		
			Сталь	Стекло	Эпокс. матер.		Сталь	Стекло	Эпокс. матер.
Керосин	1,85	24,00	37	25	30	800	0,95	1,0	0,96
Этил. спирт	1,22	22,80	32	17	26	789			

На основе полученных зависимостей выявлено, что жидкости быстрее проникают в капилляры из неметаллического материала, в данном случае из стекла и эпоксидного материала, чем в капилляры из стали. Угол наклона капилляров относительно горизонтали оказывает слабое влияние на глубину проникновения жидкостей. Отличие составляет только 2-ом знаке после запятой, кривые совпадают. С уменьшением размера капилляра время проникновения жидкости на определенную глубину возрастает прямо пропорционально.

Движение жидкостей в тупиковых капиллярах ограничивает газ, запертый в полости дефекта. В работах авторов Прохоренко П.П., Мигун Н.П. и пр. описано, что глубина проникновения жидкости в тонкий щелевидный капилляр составляет около 10 % от полной глубины капилляра, а с увеличением ширины

капилляра глубина проникновения жидкости уменьшается. Результаты моделирования согласуются с уже известными значениями.

Так, процент заполнения капилляров с размером 900 мкм составляет около 1 %, в капилляры шириной 300 мкм – около 2-2,5 % от полной глубины капилляра. С уменьшением поперечного размера капилляра, процент заполнения жидкостью увеличивается, и составляет около 10 % от его полной глубины.

Таким образом, исследовано, что в капиллярах из эпоксидного материала жидкости текут аналогично течению жидкостей в стекле и стали, что позволяет говорить о возможности использования эпоксидного материала в качестве материала образца.

Моделирование движения жидкости в капиллярах, с помощью программного комплекса «Капилляр», было подтверждено экспериментально.

В основу эксперимента по изучению движения жидкостей было положено применение в качестве имитатора дефектов стеклянных капиллярных трубочек квадратного сечения с размерами 300 мкм и 900 мкм. Капилляры фиксировали в зажимном устройстве под углами 0° и 90° .

Расхождение результатов моделирования процессов движения жидкостей с результатами, полученными в ходе эксперимента, составляет около 2 секунд. Отличие результатов лежит в структуре самой поверхности, т.к. образуются рельефы сложной формы, что заметно уменьшает скорость проникновения жидкостей.

Для глубокого математического моделирования таких процессов недостаточно аппарата классических дифференциальных уравнений с базисом функций, которые не имеют производных в любой точке. Достойной теорией построения таких функций является теория фракталов. Представляя кривую отрезками прямой, каждый из которых получен из единичной меры путем выбора ее третьей части позволяет выстроить метрику для измерения длины. В конечном итоге получается кривая, для которой отсутствует операция дифференцирования в любой точке. Для определения меры фрактальной размерности необходимо исследовать кривую, найти самоподобный элемент, как показано на рисунке 2, с помощью которого можно более точно описать кривую.

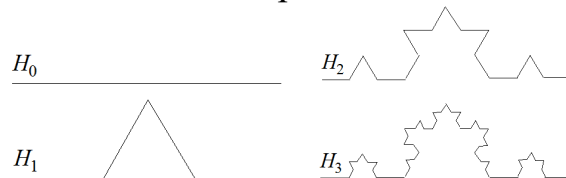


Рисунок 2 – Триадная кривая Коха

На рисунке 2 H_0 соответствует фрактальной размерности 1, H_1 соответствует размерности 1,33, H_2 - $1,33 \cdot 1,33$ и т.д.

Для каждого материала мера фрактальной размерности своя. Для стекла было предложено использовать меру равную $1/3$, т.е. длина стеклянного капилляра, из-за рельефа поверхности, увеличится в 1,33 раза.

На рисунках 3 - 4 представлено сравнение результатов движения спирта в капиллярах ориентированных под углами 0° и 90° к горизонтали, полученных путем моделирования процессов движения жидкостей в капиллярах из стекла с учетом фрактальной размерности и экспериментально.

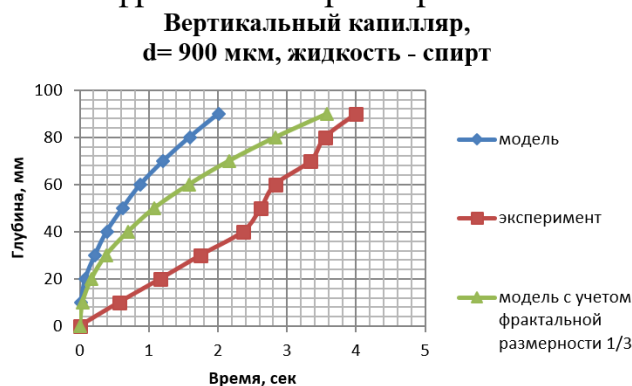


Рисунок 3 – Зависимость глубины проникновения жидкости в вертикальные капилляры от времени с учетом фрактальной размерности равной $1/3$

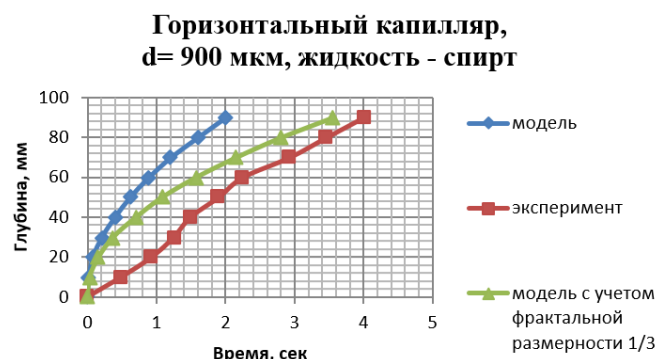


Рисунок 4 – Зависимость глубины проникновения жидкости в горизонтальные капилляры от времени с учетом фрактальной размерности равной $1/3$

С учетом геометрии поверхности стеклянного капилляра расхождение результатов моделирования с экспериментальными данными сократилось в среднем до 0,5 секунд. Следовательно, предлагаемая математическая модель движения жидкостей в капиллярах с учетом фрактальных размерностей разного порядка работоспособна.

В третьей главе диссертации предложен способ изготовления контрольных образцов и тест-панелей с заданными параметрами дефектов (шириной, длиной и глубиной), выполненных из неметаллического материала. В качестве основы образца был выбран эпоксидный клей (раствор эпоксидной смолы с отвердителем), вытравливаемая полоска фольги играла роль дефекта.

Способ реализуется следующим образом: на двух противоположных сторонах прямоугольной формы 1, как показано на рисунке 5, прорезаются пазы 2 одинаковой глубины перпендикулярно основанию формы 1. Пазы необходимы для размещения в них полосок фольги 4, как показано на рисунке 6, предварительно покрытых тонким слоем эпоксидного клея 6.

Полоски фольги 4 устанавливаются в пазы 2 формы 1, и форма заливается приготовленным эпоксидным клеем 3 таким образом, чтобы нижняя часть полоски фольги 4 была погружена в эпоксидный клей на 1-2 мм, а верхняя часть 7 – оставалась не залитой. После полного затвердевания эпоксидного клея полученный брусок 8 извлекается из формы, как показано на рисунке 7.

Сначала производится механическая обработка (шлифовка, полировка) поверхности 9, из которой выходит не залитая часть полоски фольги 4, а затем – вытравливание фольги в растворе хлорного железа.

Так как обработанный образец является практически прозрачным, то существует возможность контроля ширины h' оставшейся нижней части полоски

фольги, которая, в конечном итоге, будет определять глубину h'' дефекта, как показано на рисунке 8.

Ширина и длина полученного дефекта в готовом образце определялась на измерительном металлографическом микроскопе.

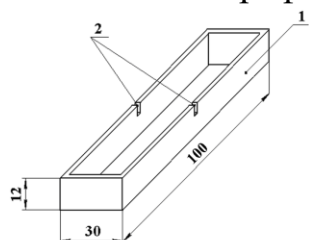


Рисунок 5 - Прямоугольная форма для изготовления контрольного образца

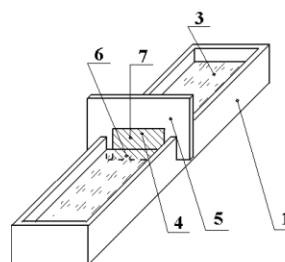


Рисунок 6 - Форма для контрольного образца, залитая эпоксидным клеем, с установленной полоской фольги, покрытой тонким слоем эпоксидного клея

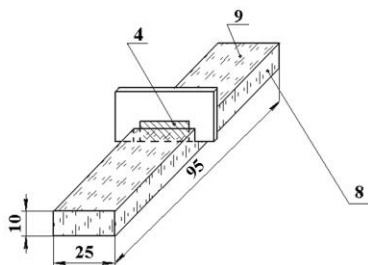


Рисунок 7 - Эпоксидный брусок после затвердевания

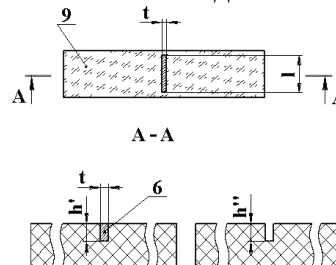


Рисунок 8 - Контрольный образец с шириной раскрытия t , глубиной раскрытия h' и длиной l до и после травления хлорным железом

Предложенный способ изготовления контрольных образцов был осуществлен с применением эпоксидной смолы ЭД-6 (ЭД-20), отвердителя (полиэтиленполиамин), алюминиевой фольги толщиной 5 и 10 мкм, потали толщиной около 1 мкм, длиной 20 мм и шириной 5 мм. На данный способ изготовления контрольных образцов был получен патент РФ №2426110.

Предложенный способ изготовления образцов позволяет реализовать на одном образце несколько дефектов, соответствующих разным классам чувствительности, что поможет сократить количество используемых при капиллярном контроле образцов.

Также с помощью описанного выше способа изготовления можно получать тест-панели, предназначенные для сравнения наборов дефектоскопических материалов между собой, как с запертыми дефектами, так и рассекающими поверхность от одной грани до другой, как показано на рисунках 9 - 10

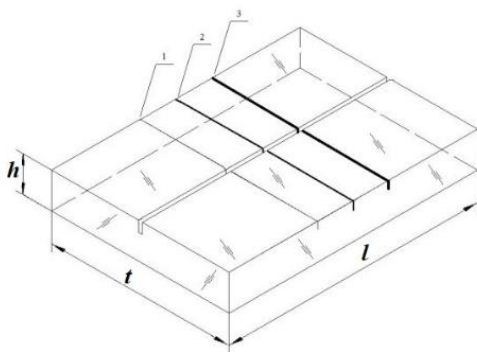


Рисунок 9 - Неметаллическая тест-панель с дефектами, выходящими на торцы, соответствующими I, II, III классам чувствительности

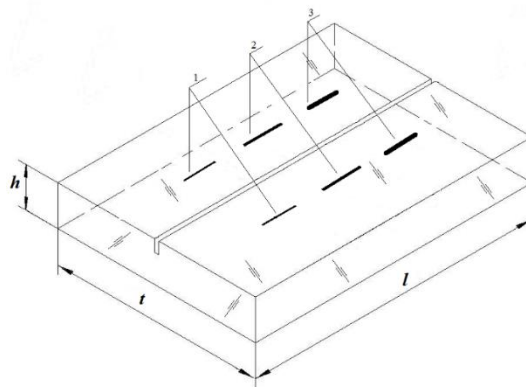


Рисунок 10 - Неметаллическая тест-панель с запертыми дефектами, соответствующими I, II, III классам чувствительности

Преимуществом является то, что тест-панель может выполнять роль универсального контрольного образца, т.к. дефекты выполнены с нормированными параметрами по разным классам чувствительности.

Предложенный способ изготовления контрольных образцов и тест-панелей позволяет создавать образцы для испытаний средств капиллярного неразрушающего контроля из неметаллического материала. Они просты в изготовлении и экономически выгодны. Дефекты получаются с заданными параметрами длины, глубины и ширины. Отсутствует коррозия. Прозрачность материала образца позволяет качественно проводить очистку, что в свою очередь продлевает срок их эксплуатации, т.к. остатки дефектоскопических материалов легко заметны.

Предложенный способ изготовления (вытравливанием) позволяет выполнять образцы с очень близкими значениями длины, ширины и глубины дефектов, что важно, как при создании тест-панелей, т.к. дефекты одинаковы на обеих сторонах пластины, так и при создании пары образцов «рабочий - арбитражный».

Четвертая глава диссертации посвящена вопросу исследования метрологических (ширина, глубина и длина трещин) и эксплуатационных характеристик (многократности использования) образцов из неметаллических материалов для испытаний средств капиллярного неразрушающего контроля. Рассмотрена возможность использования таких образцов для проверки работоспособности дефектоскопических материалов и оценки чувствительности капиллярного контроля, а также пригодности таких образцов для инструментальной и субъективной оценки.

Исследовано влияние температуры в диапазоне от $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ на ширину дефектов, а также стабильность ширины дефектов при воздействии температуры в указанном диапазоне. Проведена аналогия между металлическими и неметаллическими испытательными образцами.

Для проведения исследований были выбраны по 5 образцов с единичной трещиной из металлического и неметаллического материала. Трещины в

металлических образцах были получены путем азотирования, в неметаллических – вытравливанием. Трещины на образцах соответствовали II и III классу чувствительности капиллярного контроля в соответствии с ГОСТ 18442-80. Ширину трещин измеряли на чистых образцах на микроскопе МС-50 с разрешающей способностью 1 мкм.

Методика измерения ширины трещин при аттестации образцов, предназначенных для проверки работоспособности дефектоскопических материалов и для оценки чувствительности контроля, несколько отличается. И в том и в другом случае ширину трещин измеряют на микроскопе в направлении, поперечном ее контуру. Измерения осуществляют на чистых образцах, т.е. до проведения на них технологии капиллярного контроля.

Измерение ширины трещин на образцах, предназначенных для проверки работоспособности дефектоскопических материалов, проводят в 3-5 точках по длине трещины. Для оценки чувствительности контроля ширину дефектов требуется знать точнее. Как правило, трещины имеют небольшие изломы, изгибы и непостоянную ширину. Все это влияет на выявляемость трещин. Поэтому в набор образцов для оценки чувствительности контроля должны подбираться однотипные образцы по возможности с прямыми трещинами. Поэтому измерения ширины трещин на образцах, предназначенных для оценки чувствительности контроля, проводят в 30-60 точках по длине трещины. Затем полученные результаты подвергают статистической обработке с указанием минимального и максимального значений ширины дефекта, среднего и преимущественного значений, а также коэффициента вариации измеренных значений.

В таблицах 2 и 3 представлены результаты статистической обработки результатов измерений ширины дефектов контрольных образцов из металла и эпоксидного материала для оценки чувствительности капиллярного контроля.

Таблица 2 – Статическая обработка результатов измерений ширины дефектов контрольных образцов из металла для оценки чувствительности капиллярного контроля

Характеристика раскрытия трещин на образцах						
Номер образца	Номер трещины	Раскрытие трещин, мкм				Коэф. вариации, %
		Мин.	Макс	Среднее при P=0,95	Преим.	
70	1	1,0	9,0	$4,3 \pm 0,5$	4,8	45,8
72	1	1,0	16,0	$6,2 \pm 0,9$	4,9	57,2
15	1	1,0	16,0	$6,5 \pm 1,1$	5,3	65,5
113	1	1,0	6,0	$3,1 \pm 0,3$	2,9	44,2
E50	1	1,0	8,0	$4,5 \pm 0,4$	4,7	34,7

Таблица 3 – Статическая обработка результатов измерений ширины дефектов контрольных образцов из неметаллического материала для оценки чувствительности капиллярного контроля

Характеристика раскрытия трещин на образцах						
Номер образца	Номер трещины	Раскрытие трещин, мкм				Коэф. вариации, %
		Мин.	Макс.	Среднее при P=0,95	Преим.	
11ф	1	12,0	24,0	$17,8 \pm 0,6$	17,7	12,7
12ф	1	20,0	30,0	$24,6 \pm 0,1$	19,0	9,0
13ф	1	12,0	22,0	$18,4 \pm 0,5$	18,7	11,1
14ф	1	12,0	22,0	$17,8 \pm 0,6$	17,8	12,4
15ф	1	15,0	28,0	$23,6 \pm 0,7$	24,5	11,8

На рисунках 11 - 12 представлены результаты измерений ширины дефектов на металлическом и неметаллическом образцах.

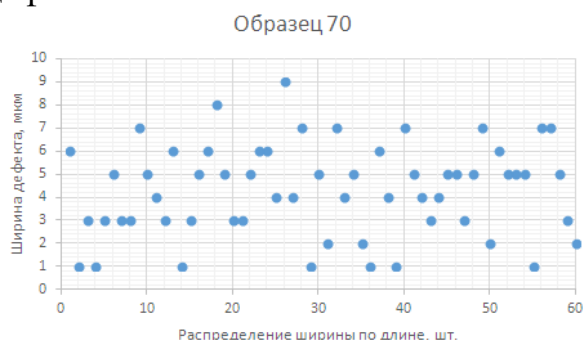


Рисунок 11 - Распределение ширины по длине на образце №70 из металла

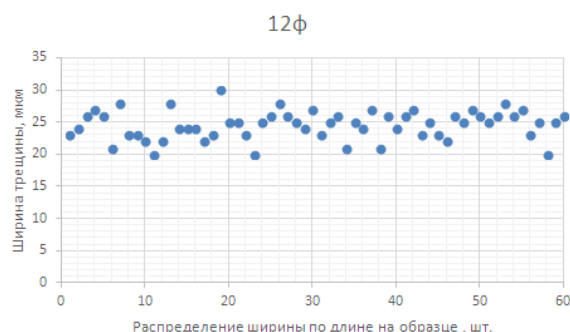


Рисунок 12 - Распределение ширины по длине на образце №12ф из эпокс.материала

Из рисунка 12 видно, что распределение значений ширины дефекта на образце из эпоксидного материала не значительно, отклонение от среднего (коэффициент вариации измеренных значений) составляет 9%. Отклонение значений ширины дефекта от среднего на металлическом образце №70 велико и составляет 45,8%. Трещины в металлических образцах имеют небольшие изломы, тогда как в образцах из эпоксидного материала дефект практически прямолинеен.

Следующим этапом по определению метрологических характеристик образцов было определение глубины дефектов. На металлических образцах с

запертыми дефектами, глубину трещин принимают равной толщине хрупкого слоя. На образцах с дефектами, пересекающих поверхность от одной грани до другой, глубину трещин измеряют на боковых гранях непосредственно по материалу образца и рассчитывают среднее арифметическое значение. Глубина дефектов на образцах из металлического материала не измерялась, использовались данные приведенные в паспорте на контрольные образцы.

В образцах из эпоксидного материала с дефектами, пересекающими поверхность от одной грани до другой, глубину дефектов определяли по материалу образца. Для измерения глубины трещин в образцах с запертыми дефектами использовались следующие варианты.

Вариант 1. Подготовленный брусок из эпоксидного материала с приклеенными полосками фольги необходимой толщины помещался в форму и заливался эпоксидным клеем до требуемого уровня. Глубина дефекта соответствовала размеру вытравливаемой фольги.

Вариант 2. В образце прорезаются отверстия или паз, глубина которых соответствует ширине приклеенных полосок фольги. В процессе обработки рабочей поверхности заготовки уменьшается глубина отверстий и одновременно уменьшается ширина металлических полосок. Измеряя глубину индикаторным глубиномером на выносных опорах (предел измерений от 0 до 10 мм и разрешающей способностью 10 мкм) или приспособлением для измерения глубины подрезов существует возможность контроля ширины металлических полосок.

В таблице 4 представлены некоторые результаты измерений глубины трещин на испытательных образцах. Образцы под №№ 12ф и ТП1 изготовлены из эпоксидного материала, под №№ 70 и 113 – из стали.

Таблица 4 - Глубина трещин на контрольных образцах и тест-панелях

№ образца	Трещины, шт.	Глубина, мм	Примечание
12ф	1	2,34	Измеренное
ТП1	1	1,57	Измеренное
	2	1,60	Измеренное
	3	1,43	Измеренное
	4	1,46	Измеренное
	5	1,53	Измеренное
	6	1,57	Измеренное
70	1	0,3	Паспортные данные
113	1	не указана	Паспортные данные

Полости дефектов на образцах, с течением времени, могут заполняться остатками полимеризующихся дефектоскопических материалов, что приводит к неадекватным результатам капиллярного контроля. Поэтому следующим этапом было определение ресурса использования образцов из эпоксидного материала.

На исследуемых образцах из металла и эпоксидного материала выполнялась технология цветного капиллярного контроля 100 раз, с последующей очисткой образца в ультразвуковой ванне УЗВ 2/150 ТН. Оценивалась полнота, протяженность и яркость, полученного индикаторного следа, как описано в ГОСТ 18442-80. Измерения проводили с помощью микроскопа МС-50. В таблице 5 представлены результаты многократности использования испытательных образцов.

Таблица 5 – Многократность использования образцов

№ образца	Длина, мм	Минимальное значение, мм	Минимальное определяемое на образцах, мм
70	24,5	23,3	23,0
72	25,0	23,7	23,5
0	24,0	22,8	23,0
21	24,0	22,8	23,0

Таким образом, из таблицы 5 понятно, что образцы из эпоксидного материала показали полную выявляемость дефектов, т.к. образцы практически прозрачны и существует возможность контроля остатков дефектоскопических материалов в полостях дефектов. На образце №72 из стали при повторении технологии капиллярного контроля 100 раз, минимальное значение длины обнаруживаемого индикаторного следа составило 23,5 мм, при допустимом уровне протяженности индикаторного следа 23,7 мм. Это может быть обусловлено тем, что трещина имеет изломы, и остатки полимеризующихся дефектоскопических материалов трудно извлечь из полости дефектов. Они заполняют трещину, тем самым уменьшая протяженность индикаторного следа с каждым последующим процессом капиллярного контроля.

Также необходимо было определить стабильность, полученных дефектов на образцах из эпоксидного материала при воздействии температуры в диапазоне от -10 °С до +40°С. Такой диапазон обусловлен рабочими температурами применяемых дефектоскопических материалов.

Результаты измерения проводили в одних и тех же координатных точках по длине дефекта на контрольном образце, отмеченных карандашом. На рисунке 13 представлены результаты сравнения влияния температуры на ширину раскрытия трещин на образцах из эпоксидного материала под №№ 12ф и 15ф, и образцов из стали №№70 и 72.

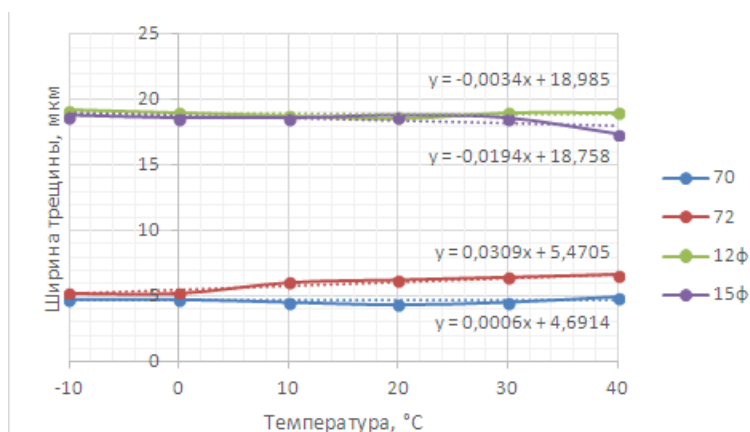


Рисунок 13 - Влияние температуры на ширину раскрытия трещин

Из графика видно, что в диапазоне температур от -10°C до $+40^{\circ}\text{C}$ ширина дефекта практически неизменна, т.к. зависимости прямолинейны.

В работе также были рассмотрены вопросы применимости испытательных образцов из неметаллического материала для сравнения наборов дефектоскопических материалов между собой на основе субъективной и инструментальной оценок. В качестве исследуемых наборов дефектоскопических материалов применялись наборы фирм Sherwin, Bycotest, Spotcheck, Chemetall и R-test.

На субъективную оценку качества влияет множество факторов, например, психо-физическое состояние оператора, его квалификация, культурно-социальная принадлежность, освещенность рабочего места и пр. Для исключения мешающих факторов применяют методы инструментальной оценки.

В основу применяемой инструментальной оценки положено применение RGB модели для создания программного кода распознавания наиболее яркого индикаторного следа, т.е. чем насыщеннее и контрастнее цвет красного индикаторного следа, тем лучше.

Для выполнения инструментальной оценки качества наборов дефектоскопических материалов исходное цифровое изображение было переведено в оттенки серого (для упрощения) и сохранено на диск в виде bmp-файла. Затем с помощью программной среды MathCad изображение было преобразовано в матрицу (рисунок 14), которая содержит в себе значения цветов всех точек изображения. На основе полученных матриц были построены 3D – поверхности, как показано на рисунке 15.

		34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46
1	47	48	52	49	48	47	48	47	47	50	48	47	48	
2	48	48	52	49	48	49	46	46	48	49	47	51	46	
3	48	47	50	48	46	47	46	46	48	47	46	52	50	
4	48	46	46	46	45	45	44	44	46	45	46	48	47	
5	44	44	47	39	44	53	50	47	45	43	46	51	46	
6	91	82	82	78	91	86	85	97	104	102	114	126	131	
7	179	157	160	173	182	162	150	182	200	186	194	194	194	
8	139	133	157	188	197	167	138	184	188	171	170	179	181	
9	59	61	86	99	98	87	77	91	94	84	77	80	80	
10	49	51	53	55	50	54	56	53	56	56	58	53	51	
11	49	49	50	49	52	52	50	52	55	54	54	53	51	
12	50	51	52	50	50	49	48	48	55	53	51	52	46	
13	53	51	50	50	47	51	46	43	46	50	50	52	45	
14	51	51	47	47	56	54	47	49	44	48	48	47	46	
15	47	48	48	48	52	51	47	46	46	46	46	47	48	
16	44	47	49	47	46	47	47	43	47	47	46	45	51	
17	45	49	51	50	46	45	45	44	45	45	44	45	55	
18	47	47	53	49	46	45	43	45	45	43	45	47	...	

Рисунок 14 – Фрагмент матрицы графического изображения индикаторного следа ТП№2 при обработке наборами фирм «Bycotest» и «Spotcheck»

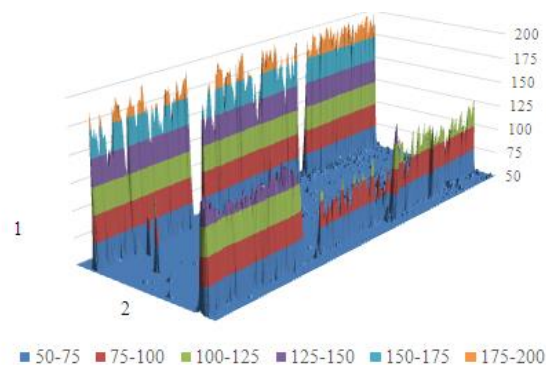


Рисунок 15 – 3D-поверхность индикаторных следов при выполнении технологии контроля наборами 1 - Bycotest, 2 – Spotcheck

Из рисунка 15 видно, что индикаторный след, полученный с помощью дефектоскопического набора Bycotest ярче, содержит в себе максимальные значения (диапазон 175-200 единиц), когда след, полученный с помощью дефектоскопического набора Spotcheck – лишь значения из диапазона 125-150 единиц. Следовательно, первый набор обладает более высокими свойствами цветности, чем второй.

В заключении сформулированы выводы по диссертационной работе.

В приложении диссертации приведены акты реализации научных положений и выводов кандидатской диссертации; сертификат о калибровке средства измерений.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложен программный комплекс, реализующий численное решение модифицированного уравнения Порхаева. Данный комплекс позволяет моделировать движение жидкостей в тупиковых и сквозных щелевидных капиллярах с учетом параметров самой жидкости, материала, из которого выполнен капилляр, и его размеров, шероховатости поверхности, а также угла наклона капилляра относительно горизонтали.

2. На основе фрактальной размерности установлена теоретическая зависимость глубины проникновения жидкости в капилляры с плоскими параллельными стенками от времени $l = l(t)$, позволяющая рассчитать кинетику впитывания на всех его стадиях, которая бы совпадала с экспериментальными данными.

3. На основе моделирования процесса движения жидкостей в щелевидных капиллярах, а также анализа информационных источников, предложено использовать эпоксидный материал в качестве материала образца. Применение эпоксидного материала исключает окисление поверхности и щелевую коррозию, а так же обеспечивает полную выявляемость дефектов и возможность контроля остатков дефектоскопических материалов.

4. Предложен способ изготовления образцов для испытаний средств капиллярного неразрушающего контроля, таких как контрольные образцы и тест-панели, путем вытравливания фольги разной толщины из эпоксидной заготовки, позволяющий реализовать дефекты с заданными параметрами: длиной, шириной и глубиной. Также существует возможность реализации нескольких дефектов на одном образце с шириной раскрытия, соответствующих разным классам чувствительности, что сокращает количество используемых образцов.

5. Способ изготовления позволяет реализовать однотипные образцы со стабильными по длине и практически прямыми параметрами трещины, на основании чего, можно судить о пригодности образцов для оценки чувствительности капиллярного контроля, а также сравнения наборов дефектоскопических материалов между собой.

6. Приведены результаты исследования влияния температуры на ширину трещин в диапазоне от -10°C до $+40^{\circ}\text{C}$. Установлено, что в диапазоне указанных температур ширина трещины остается практически неизменной.

7. В виду возможности контроля остатков дефектоскопических материалов и отсутствия целевой коррозии, образцы, изготовленные способом вытравливания, позволяют увеличить ресурс использования до 100 раз при применении капиллярной дефектоскопии цветным методом.

8. Доказано, что образцы из эпоксидного материала, могут быть использованы для: проверки работоспособности применяемых дефектоскопических материалов; оценки чувствительности контроля; сравнения наборов дефектоскопических материалов между собой; при отработке технологии контроля изделий, изготовленных из эпоксидного материала; при обучении и аттестации персонала в области неразрушающего контроля по капиллярному методу.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах: Издания из перечня ВАК

1. Конарева, И. С. Контрольные образцы из неметаллических материалов для капиллярной дефектоскопии / Н. П. Калиниченко, А. Н. Калиниченко, И. С. Конарева // Дефектоскопия, 2011. - №10. – С.19 - 23.

2. Конарева, И. С. Метрологические и эксплуатационные характеристики контрольных образцов для капиллярной дефектоскопии / Н. П. Калиниченко, И. С. Конарева, С. С. Борисов, А. Я. Дерик // Вестник науки Сибири, 2012. – № 4(5). – С.144 - 148.

3. Лобанова, И. С. Технология изготовления контрольных образцов из неметаллов для капиллярной дефектоскопии / Н. П. Калиниченко, А. Н. Калиниченко, И. С. Лобанова, Борисов С. С. // Дефектоскопия, 2013. - №11. – С.72 – 76.

4. Лобанова, И. С. Измерение шероховатости поверхности с помощью измерителей неровностей / Н. П. Калиниченко, А. Н. Калиниченко, И. С. Лобанова, Б. Б. Мойзес, Е. С. Григорьева // Контроль. Диагностика, 2013. - №9. – С. 68 – 72.

5. Лобанова, И.С. Технология изготовления и исследование образцов для испытаний средств капиллярного неразрушающего контроля из неметаллов / Н. П. Калиниченко, А. Н. Калиниченко, И. С. Лобанова, А. Ю. Попова, С. С. Борисов // Измерительная техника, 2014. - №5. – С. 8 – 10.

6. Лобанова, И. С. Тест-панель из неметалла для капиллярной дефектоскопии / Н. П. Калиниченко, А. Н. Калиниченко, И. С. Лобанова // Контроль. Диагностика, 2014. - №13. – С. 93 – 96.

7. Лобанова, И. С. Универсальные тест-панели из неметалла для капиллярной дефектоскопии / Н. П. Калиниченко, А. Н. Калиниченко, И. С. Лобанова, А. А. Зайцева // Дефектоскопия, 2015. - №10. – С. 49 – 53.

8. Лобанова, И. С. Моделирование проникновения жидкостей в несплошности изделий из неметаллических материалов / И. С. Лобанова, В. А. Мещеряков, Н. П. Калиниченко, А. Н. Калиниченко, М. С. Киселева // Ползуновский вестник, 2016. - №4 – 2, С. 103 - 107.

9. Лобанова, И. С. Определение возможности применения неметаллических контрольных образцов для оценки работоспособности дефектоскопических материалов и оценки чувствительности капиллярного контроля / И. С. Лобанова, А. Н. Калиниченко, Н. П. Калиниченко, Е. С. Камышева // Стандартные образцы, 2017. - Т.13. - №1. – С. 37 – 42.

Издания, индексируемые базами данных Scopus и Web of Science

1. Konareva, I. S. Reference specimens of nonmetallic materials for penetrant nondestructive testing / N. P. Kalinichenko, A. N. Kalinichenko, I. S. Konareva // Russian journal of nondestructive testing, 2011. - V. 47. - №10. - P. 663-666.

2. Lobanova, I. S. Methods for the Manufacture of Nonmetallic Reference Specimens for Liquid Penetrant Inspection / N. P. Kalinichenko, A. N. Kalinichenko, I. S. Lobanova, S. S. Borisov // Russian journal of nondestructive testing, 2013. - V.49. - №11. - P. 668-672.

3. Lobanova, I.S. Manufacturing technology and investigation of samples for testing instruments for the capillary nondestructive testing / N. P. Kalinichenko, A. N. Kalinichenko, I. S. Lobanova, A. Yu. Popova, S.S. Borisov // Measurement techniques, 2014. - V. 57. - №5. - P. 484-488.

4. Lobanova, I. S. Universal test-panels from a nonmetal for capillary nondestructive testing / N. P. Kalinichenko, A. N. Kalinichenko, I. S. Lobanova, Zaitseva A.A. // Russian journal of nondestructive testing. 2015. V. 51. №10. P. 639-643

5. Lobanova, I. S. Universal reference test blocks for liquid penetrant testing / N. P. Kalinichenko, A. N. Kalinichenko, I. S. Lobanova, A. A. Zaitseva // Key engineering materials, 2016. - V.685. - P. 355-359.

6. Lobanova, I. S. The methods of manufacturing nonmetallic test-blocks on different sensitivity classes / N. P. Kalinichenko, A. N. Kalinichenko, I. S. Lobanova, A. A. Zaitseva, E. L. Loboda // Journal of physics: Conference series, 2016. - V.671. - P. 1-5. - Article number 012033.

7. Lobanova, I. S. Possibility of Using Nonmetallic Check Samples to Assess the Sensitivity of Penetrant Testing / N. P. Kalinichenko, I. S. Lobanova, A. N. Kalinichenko, E. L. Loboda and T. Jakubec // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2016. – V.132. – P.1-5. - Article number 012020.

8. Lobanova, I. S. Determination of the depth of closed blind cracks in non-metal check samples and test panels for penetrant testing / N. P. Kalinichenko, I. S. Lobanova, A. N. Kalinichenko, A. A. Zaitseva, E. L. Loboda // MATEC Web of Conferences, 2016. - №7. – P. 1-6. -Article number 01024.

Материалы конференции:

1. Конарева, И. С. Контрольные образцы для капиллярного контроля из неметаллических материалов / Н. П. Калиниченко, А. Н. Калиниченко, И. С. Конарева, М. О. Викторова // Исследования молодых – регионам: сборник трудов II Всероссийской научно-практической конференции школьников, студентов, аспирантов и молодых ученых в рамках фестиваля научной мысли «Регионы России», г. Новокузнецк, 2-6 апреля, 2012, Томский политехнический университет, Т.2. – С. 168-170.

2. Лобанова, И.С. Испытательные образцы для капиллярной дефектоскопии / Н. П. Калиниченко, И. С. Лобанова, А. Н. Калиниченко // Неразрушающий контроль: сборник научных трудов всероссийской молодежной школы-конференции, Томск, 16-18 августа 2013. – Томск: ТПУ, 2013. - С. 36-40.

3. Лобанова, И. С. Контрольные образцы для капиллярной дефектоскопии / Н. П. Калиниченко, И. С. Лобанова, А. Н. Калиниченко // Стандартные образцы в измерениях и технологиях: сборник трудов I Международной научной конференции. Часть 1, Екатеринбург, 10-14 сентября 2013. Екатеринбург. ИРА УТК, 2013 – С. 178 – 180.

4. Лобанова, И.С. Способ изготовления контрольных образцов для капиллярной дефектоскопии из неметаллов по разным классам чувствительности / Н. П. Калиниченко, И. С. Лобанова, А. Н. Калиниченко, В. С. Могильницкий // Информационные технологии неразрушающего контроля: сборник трудов Российской школы конференции с международным участием, Томск, 27-30 октября 2015. – Томск: ТПУ, 2015 – С. 115-118.

Разное

1. Конарева, И.С. Способ изготовления контрольных образцов для капиллярной дефектоскопии / Н. П. Калиниченко, А. Н. Калиниченко, И. С. Конарева // Патент РФ на изобретение - 2426110. опубл. 10.08.2011.

2. Лобанова, И.С. Образцы для испытаний средств капиллярного неразрушающего контроля / Н. П. Калиниченко, И. С. Лобанова, А. Н. Калиниченко: Учебное пособие. – Томск: ТПУ, 2014. – 82 с.