

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

На правах рукописи

Лобанова Ирина Сергеевна

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

05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и
изделий»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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

Томск 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ГЛАВА 1. СПОСОБЫ РЕАЛИЗАЦИИ ОБРАЗЦОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ СРЕДСТВ КАПИЛЛЯРНОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ	11
1.1. Области применения неметаллических материалов	11
1.2. Неразрушающий контроль качества изделий из неметаллических материалов	14
1.3. Основные средства капиллярного неразрушающего контроля	19
1.4. Образцы для испытаний средств капиллярного неразрушающего контроля	23
1.5. Выводы по главе 1	31
ГЛАВА 2. ГИДРОДИНАМИКА ЗАПОЛНЕНИЯ ЖИДКОСТЯМИ П-ОБРАЗНЫХ ТИПОВ ДЕФЕКТОВ	33
2.1. Заполнение жидкостями тупиковых и сквозных капилляров с плоскими параллельными стенками	35
2.2. Интерфейс пользователя программы моделирования процессов течения жидкостей от времени	40
2.3. Модельные эксперименты	43
2.4. Натурные эксперименты	59
2.5. Обсуждение результатов	61
2.6. Выводы по главе 2	74
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ОБРАЗЦОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ СРЕДСТВ КАПИЛЛЯРНОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ИЗ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА	76
3.1. Способ изготовления контрольных образцов	77
3.2. Тест-панели из неметаллического материала	82
3.3. Выводы по главе 3	85
ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ СРЕДСТВ КАПИЛЛЯРНОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ	87
4.1. Метрологические характеристики	88
4.2. Исследование эксплуатационных характеристик неметаллических образцов для испытаний средств капиллярной дефектоскопии	106

4.3. Сравнение качества дефектоскопических материалов с помощью образцов для испытаний средств капиллярного неразрушающего контроля	112
4.4. Выводы по главе 4.....	120
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	122
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	124
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Сертификат о калибровке средства измерений.....	138
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Акты использования результатов диссертационных исследований	139

ВВЕДЕНИЕ

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. Капиллярная дефектоскопия широко распространена в процессах изготовления, восстановительного ремонта и технического обслуживания изделий в энергетической, нефтяной, транспортной, авиационной промышленности и машиностроении. Метод 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 неметаллических и немагнитных 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 образцы, предназначенные для испытаний средств капиллярного неразрушающего контроля.

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 неметаллических образцов (многократность использования);
- оценка влияния температуры на метрологические характеристики неметаллических испытательных образцов;
- 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, исключая 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, 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

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 образцов.

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 работы, 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 один патент РФ на способ изготовления.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 132 источника, 2 приложения. Работа содержит 141 страницу текста, 109 рисунков, 23 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цель и задачи исследования, сформулированы научная новизна и практическая значимость результатов исследования, представлены основные

положения, выносимые на защиту, приведен личный вклад автора и описана структура работы.

В первой главе диссертации представлен обзор областей применения неметаллических материалов. Основой многих из них являются эпоксидные смолы. Указаны дефекты, возникающие в неметаллических материалах и методы неразрушающего контроля изделий из них. Определены основные средства капиллярного неразрушающего контроля, такие как дефектоскопические материалы и образцы для их испытаний. Описаны способы изготовления металлических испытательных образцов путем их азотирования, деформации, изгиба и пр., указаны причины старения таких образцов. Предложено разработать образец из неметаллического материала свободный от указанных недостатков.

Во второй главе представлена математическая модель движения жидкостей в капиллярах с плоскими параллельными стенками. Представлен программный комплекс, на основе модифицированного уравнения Порхаева, позволяющий моделировать процесс заполнения жидкостями тупиковых и сквозных капилляров с учетом параметров самой жидкости, размеров капилляра, шероховатости поверхности, угла наклона капилляра относительно горизонтали. С помощью данного программного комплекса смоделировано движение жидкостей в капиллярах из стали, стекла и эпоксидного материала. Установлена теоретическая зависимость глубины заполнения капилляров от времени на основе теории фракталов. Работоспособность применяемой математической модели подтверждена экспериментально. Определено, что время заполнения жидкостью капилляров из неметаллических материалов меньше, чем в таких же капиллярах из металла. Обоснована возможность применения эпоксидного материала в качестве материала образца.

В третьей главе предложен способ изготовления образцов для испытаний средств капиллярного неразрушающего контроля (контрольных образцов и тест-панелей), с заданными параметрами длины, глубины и ширины дефектов, путем

вытравливания полосок необходимого размера из эпоксидной заготовки. Данный способ позволяет реализовать на одном образце, как единичный дефект, так и несколько, соответствующих разным классам чувствительности капиллярного контроля, а также изготавливать тест-панели, предназначенные для сравнения наборов дефектоскопических материалов между собой.

В четвертой главе представлены результаты исследований метрологических и эксплуатационных характеристик образцов из эпоксидного материала. Проведена аналогия с образцами из металлического материала. Определена пригодность образцов из эпоксидного клея для задач капиллярной дефектоскопии, такие как проверка работоспособности применяемых дефектоскопических материалов и дефектоскопов, сравнение наборов между собой, оценка чувствительности контроля.

ГЛАВА 1. СПОСОБЫ РЕАЛИЗАЦИИ ОБРАЗЦОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ СРЕДСТВ КАПИЛЛЯРНОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

1.1. Области применения неметаллических материалов

В настоящее время композиционные материалы находят все более широкое применение в промышленности, например, в самолето-, ракетостроении, судостроении и пр. [1-3]. Стремительное развитие техники заставляет конструкторов предъявлять все более жесткие требования к материалам, предназначенным для использования в этих отраслях промышленности.

Повышенная механическая прочность и надежность, уменьшение или даже полное исключение вредного влияния вибрации, хорошая устойчивость к воздействию высоких и низких температур, различных атмосферных явлений, а также негорючесть, химическая инертность и высокая звуко- и теплоизолирующая способность материалов – вот основные требования, предъявляемые к конструкционным материалам, используемых в самолето-, ракето- и судостроении.

Традиционно используемые материалы – титановые сплавы и нержавеющие стали. Они удовлетворяют большинству из перечисленных выше требований и постоянно улучшаются металлургами, однако прогресс не стоит на месте, и более перспективными для этих целей являются неметаллические материалы.

Неметаллические материалы превосходят по своим прочностным, упругим и прочим свойствам традиционные металлы. К числу наиболее перспективных относятся полимерные материалы, такие как пластики, эластомеры, волокна [4].

Полимерные материалы разделяют на наполненные и ненаполненные. Ненаполненными полимерными материалами считают те, которые состоят только из полимера и некоторых специальных добавок. К ним относятся полиэтиленовая пленка, полистирольные изделия и др. Наполненными полимерными материалами принято считать те, в которых имеются усиливающие элементы в виде нитей,

волокон или хлопьев более прочного материала. Примерами таких материалов можно считать пластики, армированные борными, углеродными, стеклянными волокнами, жгутами или тканями на их основе. Такие материалы называют композитами. Рост применения композитов в авиации и прежде всего в военных самолетах в основном происходит за счет расширения объема их использования в открытых частях планера: хвостовом оперении, крыле, фюзеляже. Для вертолетов важным направлением является использования композитов для производства приводных валов и лопастей главного и хвостового винтов.

В связи с постепенным накоплением экспериментальных данных об эксплуатационных свойствах композитов, а также опыта, в разработке и эксплуатации различного рода конструкций, привели к тому, что в большом числе самолетов гражданской авиации, таких как DC-10, Boeing 727, -737, -747, 757, 767, A-310, а также вертолетов Сикорски S-76, Сикорски SH-53D и др., используются детали и узлы, выполненные из композиционных материалов. Например, стенки лонжерона, панели фиксированные задние, интерцепторы, внутренний и внешний элероны, законцовка киля, рули направления и высоты, облицовка грузового отсека, зализ крыла, обтекатель системы выпуска закрылков, обшивки крыла, стрингеры, обшивка гондолы [5].

С целью снижения массы машин железнодорожного, автомобильного и городского транспорта так же используют неметаллические материалы.

На железнодорожном транспорте армированные пластики нашли ограниченное применение. Это стеклопластиковые контейнеры для перевозки грузов, в т.ч. для перевозки химически активных жидкостей.

В пассажирских поездах композиты применяются в основном для отделки салонов сидений, перегородок, трубопроводов, головных обтекателей вагонов. В автомобилестроении применяются для изготовления элементов кузова, контейнеров и цистерн для перевозки грузов, прицепов, а также структурных компонентов двигателя. В судостроении и строительстве подлодок неметаллические материалы практически полностью заменили дерево и алюминий, из-за отсутствия гниения и коррозии, хорошему сопротивлению

действиям морской среды и прочих форм разрушения. Неметаллические материалы нашли свое применение в радиоэлектронных устройствах: одно- и многослойные платы печатного монтажа, защитных колпаках радиолокационных антенн, в системах телекоммуникационной связи. В строительстве для ремонта сооружений гражданской инфраструктуры, такие как мосты, гаражи, автомобильные стоянки, общественные и жилые здания, ветровые и шумовые обтекатели и пр., ремонта корродирующих труб. В военном деле - в качестве обмотки снарядов торпед, орудийных и ружейных стволов [6-10].

Также неметаллические материалы широко применяются при строительстве яхт, катеров, прогулочных лодок, траулеров, спасательных шлюпок, минных тральщиков и миноискателей, некоторых элементов глубоководных аппаратов.

Часто в производстве применяют неметаллические материалы на основе эпоксидных смол. Такие материалы атмосферостойки, химически инертны, удовлетворительно стойки к воздействию повышенных температур, обладают высокой усталостной прочностью и устойчивостью к коррозии.

Композиты на основе эпоксидных смол, армированные стекловолокном, принято использовать главным образом для изготовления вторичных элементов конструкций – дверей, панелей, обтекателей. Так, подфюзеляжный аэродинамический обтекатель самолета «Boeing 747» собран из трехслойных панелей со средним слоем из нейлоновых сот и обшивками из эпоксидного стеклопластика. Другими примерами использования материалов на основе эпоксидных смол являются материалы для зализа крыла и деталей интерьера самолетов гражданской авиации. В области ракетостроения из композитов на основе эпоксидного материала изготавливают передние и хвостовые обтекатели ступеней ракет.

Однако эпоксидные смолы, наполненные стекловолокном, имеют слишком низкий модуль упругости, чтобы быть использованными в ответственных конструктивных узлах самолетов. Более перспективными в этом отношении оказались эпоксидные смолы, наполненные волокнами элементного бора. Например, фирма «Дуглас» предложила использовать борэпоксидные композиты

для изготовления крыльев военного самолета марки А-4 вместо алюминиевых сплавов. В самолетах марки General Dynamics F-111, выпускаемого до 1998 года, применялись борэпоксидные стабилизаторы, передние кромки и законцовки крыльев. Однако из-за высокой стоимости борэпоксидного материала, волокна бора было предложено заменить на более дешевое углеродное [1].

Углепластик применяют при конструировании вертикальных стабилизаторов, элеронов и интерцепторов сверхзвуковых самолетов.

Углеэпоксидные композиционные материалы нашли применение и в космической технике, в качестве жестких конструкций спутников.

Эпоксидные композиционные материалы имеют и свои недостатки. Большинство из них не может работать при температурах свыше 150 °С продолжительное время. Причина этого – малая температурная устойчивость полимерных молекул из которых состоит эпоксидная смола.

Очевидным фактом является то, что обеспечение надежной и безопасной эксплуатации ответственных конструкций из таких материалов требуется разработки и применения на всех стадиях жизненного цикла конструкций специальных методов неразрушающего контроля.

1.2. Неразрушающий контроль качества изделий из неметаллических материалов

Обеспечение высокого качества и надежности изделий из неметаллических материалов невозможно без применения эффективных современных методов неразрушающего контроля на всех стадиях производственного цикла: проектировании, изготовлении, эксплуатации [11].

В настоящее время в практике неразрушающего контроля неметаллических материалов для выявления дефектов в композитах, керамике, стекле, бетоне, резине и пр. нашли применение практически все методы и способы, традиционно применяемые в условиях производства, испытании и эксплуатации деталей и агрегатов [12-14].

Для неразрушающего контроля деталей из неметаллических материалов в условиях производства и эксплуатации применяют различные методы, основанные на взаимодействии проникающих излучений или физических полей с контролируемым объектом. Выявление дефектов в конструкциях из композиционных материалов возможно акустическим, радиационным (рентгеновским), тепловым, радиоволновым, оптическим, электрическим, проникающих веществ и прочими методами неразрушающего контроля [15-17].

Акустический метод контроля композиционных материалов применяется для поиска внутренних дефектов таких как: расслоения, трещины, раковины, инородные включения, выкрашивания по кромкам отверстий и гнезд, а также отрыв поверхностных слоев при механической обработке деталей из композиционных материалов, отверстия, возникающие при механической обработке и сборке деталей. Наибольшее распространение получили низкочастотные методы, в которых применяется сухой контакт преобразователя с поверхностью объекта контроля [18-23].

Оптический метод контроля позволяет обнаруживать дефекты, выходящие на поверхность. Одним из известных оптических методов неразрушающего контроля является метод голографической интерферометрии. Данный метод основан на регистрации интерференционной картины, получаемой при когерентном воздействии рассеянной объектом контроля волны и опорной волны с последующим восстановлением изображения контролируемого объекта. Метод применим для выявления непрочиев в клееных слоистых и сотовых конструкциях размером до 7 м с разрешающей способностью до 1 мм [16].

Радиационный метод наиболее распространенный и понятный метод контроля ответственных деталей. Он широко применяется при контроле композитов. Используют как рентгеновский метод, так и метод радиоактивных изотопов. Наиболее предпочтительным методом является рентгеновский метод. Изделие при этом помещается в поле рентгеновского источника и подвергается просвечиванию. Данный метод особенно эффективен для выявления пустот, посторонних материалов, различных включений, структурных неоднородностей,

таких как пропуски и обрывы армирующих элементов [16, 24]. Однако, дефекты, которые не приводят к значительным изменениям общей толщины композиционных материалов в направлении просвечивания (трещины, расслоения, ориентированные перпендикулярно пучка излучения) не могут быть обнаружены при рентгеновском контроле. Для таких материалов может быть использован *капиллярно-радиационный метод*, при котором контрастность элементов просвечиваемого объекта повышается путем введения жидкого рентгенконтрастного пенетранта. Рентгенконтрастный пенетрант наносится на поверхность объекта контроля, выдерживается 30 минут, а затем удаляется с поверхности абсорбирующей тканью. В этом случае рентгеновское излучение, проходящее через несплошность, заполненную таким пенетрантом. Достаточно сильно поглощается, что позволяет обнаруживать повреждения, которые невозможно выявить обычным просвечиванием. Естественно, применение такого метода предполагает наличие поверхностных или сквозных повреждений, обеспечивающих капиллярными силами доступ пенетранта в полости расслоений или трещин [16].

Рентгеновская томография применяется практически для любых материалов и объектов, если позволяет геометрия объектов контроля. Технология предоставляет возможность объемных исследований внутренней структуры. Ее развитием стала компьютерная микротомография, обеспечивающая разрешающую способность до нескольких микрометров. Это позволяет выявлять отдельные волокна и их обрывы. Практическое применение томографии для диагностики композитов усложняется большими габаритами контролируемых изделий, для которых необходимо получить порядка 360 - 720 снимков при круговом сканировании при вращении на 360° [16, 25].

Термография – одно из перспективных направлений неразрушающего контроля конструкций из композиционных материалов. В основу метода положен анализ признаков наличия дефектов по изменениям температурных полей с использованием инфракрасной техники. Термография фиксирует изменения температуры на уровне 0,01 °С. Поэтому даже при механическом

нагружении фиксируются места концентрации энергии, где может находиться пластическая деформация с выделением тепла. Зафиксировав температурное поле на поверхности, можно определить местоположение концентратора энергии относительно поверхности изделия. Решив обратную задачу нестационарной теплопроводности, можно определить местоположение и размер дефекта [16].

Радиоволновый метод контроля позволяет выявлять дефекты, типа расслоений, трещин, инородных включений, в изделиях из полимерных материалов, являющихся диэлектриками, например, стекло, резина, теплозащитные материалы, огнеупоры и пр. Данный метод основан на взаимодействии радиоволн с материалом объекта контроля, причем при этом происходят процессы поглощения, дифракции, отражения и преломления волн [16].

Шерография – электронная система спекл-интерферометрии, применяемая для выявления внутренних микродефектов [16, 19].

Капиллярная дефектоскопия является старейшим и самым чувствительным методом неразрушающего контроля. Метод контроля проникающими веществами используется во многих отраслях промышленности для обнаружения невидимых глазу несплошностей различного происхождения на поверхности деталей из любых непористых материалов [16, 18, 28 - 32]. Капиллярный метод неразрушающего контроля используется для проверки широкого спектра деталей: от гранитных блоков до критических компонентов авиационных двигателей [33].

Данный 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 [34]. С помощью данного метода обнаруживают дефекты типа поры и трещины в паяных соединениях, печатных платах, изоляционных покрытиях проводов, элементах глубоководных аппаратов, в судостроении.

Метод основан на проникновении индикаторной жидкости в полости дефектов с последующим ее извлечением проявителем из несплошностей с целью образования индикаторного рисунка дефекта и созданием контрастного фона между дефектной и бездефектной поверхностью контролируемой детали (рисунок 1.1 - 1.2) [35].

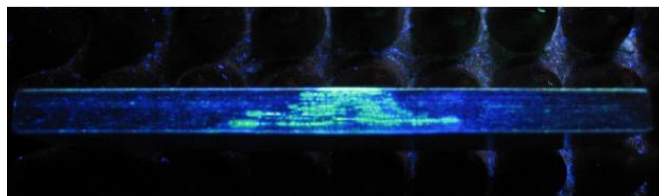


Рисунок 1.1 - Результат исследования поперечного сечения образца из углепластика ВКУ 17КЭ01 с ударным повреждением капиллярным методом



Рисунок 1.2 - Дефекты на поверхности изделия из фторопласта, обнаруженные капиллярным контролем

Достоинством метода является то, что точно фиксируется местоположение дефекта, его ориентация и размеры. Его эффективность в большой степени зависит от правильности соблюдения технологических режимов всех стадий, которые определяются физико-химическими процессами, протекающими при проведении контроля.

Наиболее эффективен капиллярный метод для неразрушающего контроля больших площадей, особенно со сложной геометрией и в случаях массовых производств. Технология процесса контроля проста и не требует дорогостоящего оборудования.

Тем не менее, существуют некоторые факторы, влияющие на чувствительность контроля, такие как загрязнение полостей дефектов остатками лакокрасочного покрытия, коррозионных отложений, влагой, смазкой, льдом, слоем деформированного материала и прочими веществами [32 - 40].

1.3. Основные средства капиллярного неразрушающего контроля

Основными средствами капиллярного неразрушающего контроля можно считать дефектоскопические материалы и образцы, предназначенные для испытаний средств капиллярного контроля.

В настоящее время на российском рынке представлено большое разнообразие дефектоскопических материалов для различных условий применения, с различным поведением на однотипных дефектах и соотношением цена – качество.

Дефектоскопическими называются материалы (рисунок 1.3), применяемые при капиллярном неразрушающем контроле и предназначенные для заполнения полостей дефектов, нейтрализации или удаления избытка проникающего вещества с поверхности объекта контроля и извлечения или проявления его остатков из трещины с целью получения первичной информации о наличии несплошности в объекте контроля.



Рисунок 1.3 - Набор дефектоскопических материалов
а) пенетрант, б) очиститель, в) проявитель

Для выполнения процесса капиллярного контроля, согласно ГОСТ 18442-80 [40], необходимы следующие материалы: пенетрант, очиститель и проявитель [41].

Пенетранты или проникающие жидкости в зависимости от их физического состояния, колористических и технологических признаков подразделяют:

- по способу получения первичной информации на цветные и люминесцентные;
- по способу удаления различают водосмываемые, постэмульгируемые и смываемые очистителем;
- по рабочему диапазону температур разделяют на низкотемпературные (стабильно работающие в диапазоне температур от $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$), для нормальных температур (от $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $80\text{ }^{\circ}\text{C}$) и высокотемпературные (от $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+180\dots+250\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Очиститель предназначен для удаления избытка пенетранта с поверхности объекта контроля (самостоятельно или в сочетании с органическим растворителем или водой) перед нанесением проявителя. В качестве очистителей используют растворители, моющие составы и чистые жидкости.

Проявитель применяется для извлечения индикаторного пенетранта из капиллярной полости трещины с целью образования четкого индикаторного рисунка и создания контрастирующего фона с ним. Проявители в зависимости от физического состояния подразделяют на: порошковые, суспензионные, пленочные.

Оценку качества дефектоскопических материалов производят по эффективности выявления дефектов определенных типов и размеров.

При комплексной проверке дефектоскопических материалов проверяют одновременно свойства пенетранта, очистителя и проявителя в условиях, приближенных к условиям проявления на контрольных образцах и тест-панелях с дефектами заранее известных размеров (рисунки 1.4 - 1.6) [41 - 45].

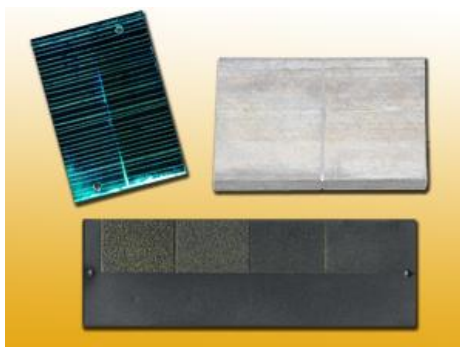


Рисунок 1.4 - Контрольные образцы и тест-блоки Karl Deutsch



Рисунок 1.5 - Эталонный образец для цветной дефектоскопии



Рисунок 1.6 - Алюминиевая тест-панель Magnaflux для сравнения пенетрантов

Испытательные образцы бывают двух видов: натурные образцы и имитаторы дефектов.

Натурные образцы представляют собой объекты контроля с дефектами известных размеров. Трещины в них получают, подвергая хрупкое покрытие 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.

подавляющее большинство образцов, применяемых при капиллярном контроле, являются индикаторами дефектов. При их использовании никакой параметр не измеряется. Результат применения образцов не может быть сопоставлен с заданным значением какой-либо физической величины.

Контрольные образцы постоянно используются на рабочих местах контроля деталей, узлов, конструкций, а также в заводских лабораториях для:

- ежедневной оценки работоспособности средств контроля (дефектоскопов, дефектоскопических материалов и пр.) на рабочих местах и периодической их проверки;
- входного контроля дефектоскопических материалов;
- экспресс - проверки чувствительности технологии контроля;

- отработки технологии контроля деталей при разработке технологических карт и инструкций контроля;

- оценки правильности исполнения технологии контроля дефектоскопистами при плановых проверках технологии изготовления и ремонта продукции инженерно-техническим составом заводов, а также внешними инспекционными комиссиями;

- учебных целей при подготовке, переподготовке и аттестации специалистов [34].

Форму, материал и технологию изготовления образцов выбирают таким образом, чтобы обеспечить стабильность размеров трещин и свойств материалов в течение установленного срока их службы, а также стойкость образцов против коррозии при воздействии дефектоскопических материалов. Образцы должны иметь чистую поверхность, полости трещин также должны быть свободны от загрязнений.

Как показано на рисунке 1.7, существуют различные способы изготовления образцов для испытаний средств капиллярного метода неразрушающего контроля [46].

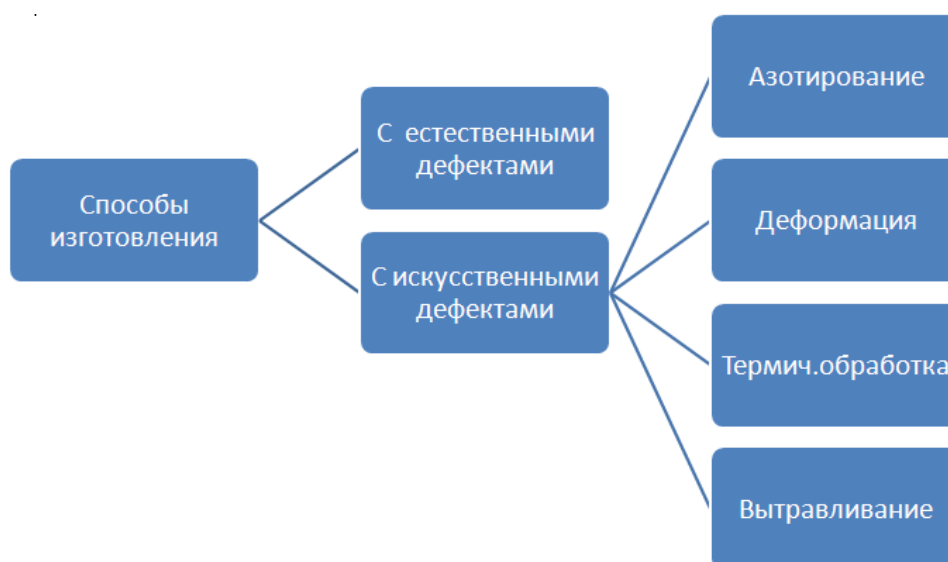


Рисунок - 1.7 Способы изготовления образцов для испытаний средств капиллярного неразрушающего контроля

Рассмотрим способы изготовления более подробно.

1.4. Образцы для испытаний средств капиллярного неразрушающего контроля

1.4.1. Натурные образцы

ГОСТ 23349 - 84 [47] дает определение *естественных образцов* – объекты контроля или их части с естественными дефектами, представленными на рисунке 1.8. В качестве таких контрольных образцов применяют забракованные детали с мелкими трещинами, как правило, не видимыми глазом. Это могут быть образцы с закатами, волосовинами, шлифовочными, закаточными и др. трещинами, полученными в процессе механической, термической и других видов обработки деталей в условиях производства, с усталостными трещинами, образовавшиеся при механических испытаниях или при эксплуатации изделий, а также с деформационными трещинами, полученными при изгибе или другой деформации образцов.



Рисунок - 1.8. Объект контроля с естественными дефектами

Известны способы изготовления контрольных образцов методом *изгиба образца*. Стальной образец, в котором заранее прорезаны пазы, рисунок 1.9, или проплавлен шов аргонодуговой сваркой без применения присадочной проволоки [37], изгибают на специальном устройстве. Длина и глубина определяется параметрами фрезы и паза.

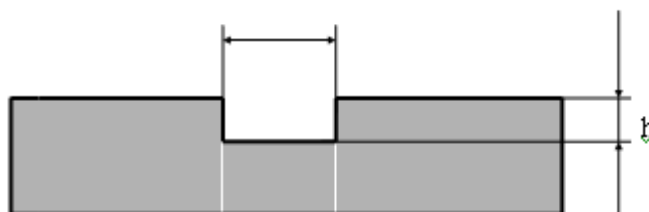


Рисунок 1.9 - Контрольный образец с дефектами, полученными при изгибе образца

Изготовление образцов методом *термической обработки*, согласно ГОСТ 23349-84 [47], заключается в следующем: образец из полосовой инструментальной стали шлифуют с обильным количеством охлаждающей жидкости, а затем нагревают. После чего на образце образуются трещины термического характера. Либо согласно этому же стандарту [47] образец сначала нагревают до 1000°C, а затем охлаждают в воде. Ширину трещин измеряют на металлографическом микроскопе. Вид образца представлен на рисунке 1.10.

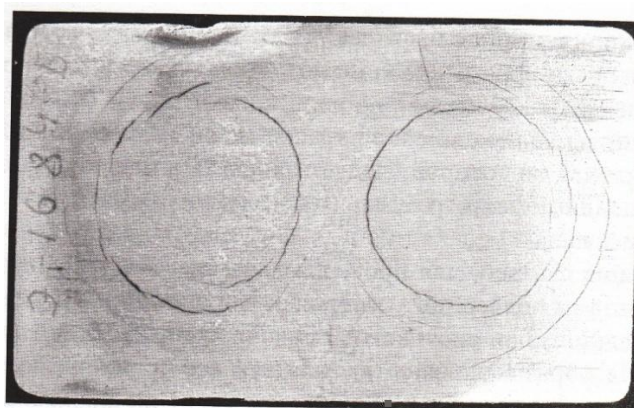


Рисунок 1.10 - Образец в виде металлической пластины с трещинами, полученными путем многократного нагревания и резкого охлаждения

В работах авторов Б.С. Санько, Н.Н. Качанова, А.П. Дегтярева, К.С. Фурмана, И.М. Бакшта, Джеймса Олбургера (James R. Alburger), Н.П. Калинина, А.Н. Катаева, А.К. Денель и прочих [48-58] описаны способы изготовления образцов путем азотирования, т.е. нанесения хрупкого материала на более твердое основание (рисунки 1.11 – 1.12). Данные образцы характеризуются высокой устойчивостью против коррозии и стабильностью размеров трещин в течение длительного времени. Трещины в таких образцах получают, подвергая последние гальванической или термической обработке, шлифованию, деформированию (растяжению или изгибу).

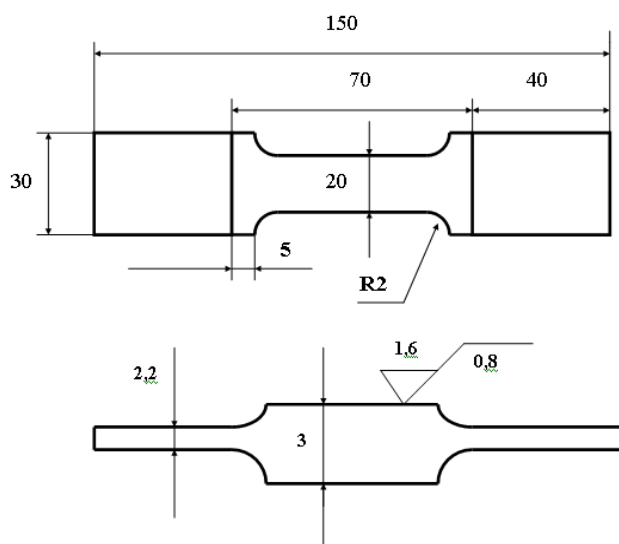


Рисунок 1.11 - Контрольный образец, с дефектами, полученными при растяжении азотированного образца

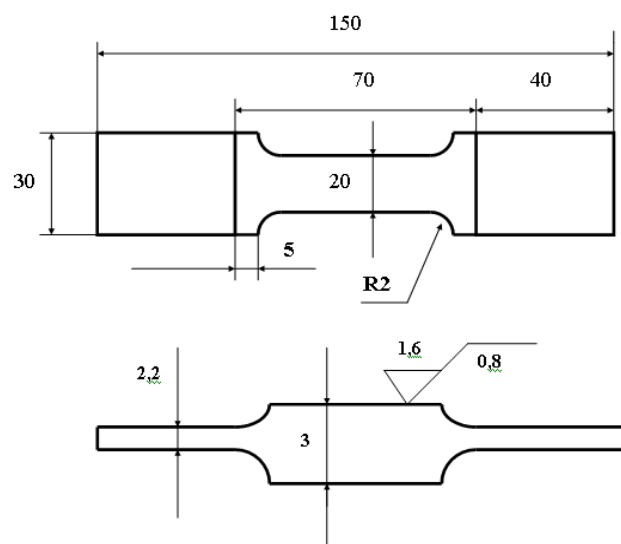


Рисунок 1.12 - Контрольный образец, с дефектами, полученными при растяжении азотированного образца

В ГОСТ 18442-80 [40] представлен способ изготовления образца методом *вибронагружения*. Данный способ заключается в создании в ударном образце усталостной трещины с глубиной около 1 мм. Трещина выращивается на вибраторе. Фактическая же глубина дефекта определяется после разрушения образца с помощью лупы Бринелля.

1.4.2. Имитаторы дефектов

Имитаторы дефектов применяются в основном при создании новых дефектоскопических материалов для исследовательских целей, таких как изучение смачивающей способности пенетранта по отношению к конкретному конструкционному материалу, проверка технологической эффективности и отработка технологических приемов использования новых материалов и т.д. а также для количественных оценок (глубина проникновения и пр.) [38].

С одной стороны, на имитаторе дефектов легко повторить эксперимент, так как многие имитаторы являются разборными и материалы легко полностью удалить, с другой стороны, - моделируемые имитаторами дефекты далеки от реальных, и поэтому поведение пенетранта можно проследить лишь с некоторым

приближением. Последний фактор привел к тому, что на практике в основном используются тест – объекты с максимально приближенными к натурным дефектам [38].

Для количественного анализа и сравнения заполнения индикаторными жидкостями капиллярных щелей в СССР А.С. Боровиковым применялся имитатор капиллярной щели, как показано на рисунке 1.13. Он состоял из закрепленных под углом друг к другу металлической и стеклянной пластин. На торце стеклянной пластины были нанесены деления.

На имитаторе исследовалось распространение фронта жидкости вдоль глубины полости. Изучалась также связь заполняемости капиллярных полостей с величиной поперечного размера индикаторной полосы либо определялась геометрическая составляющая коэффициента чувствительности капиллярных методов дефектоскопии в статических условиях при воздействии вакуума и ультразвука [37].

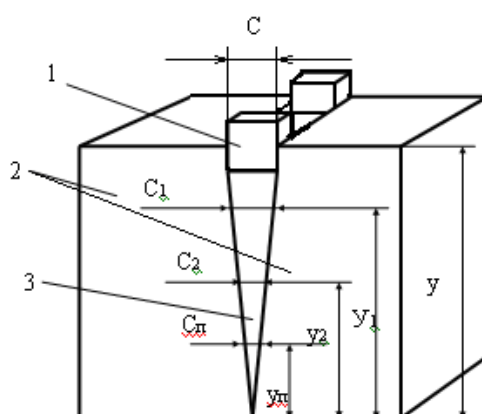


Рисунок 1.13 - Схема приспособления для получения клиновидной щели

Известны способы изготовления контрольных образцов в виде *образцов со щелями, имитирующими трещины*. Формы и размеры образцов со щелями, имитирующими трещины, установлены ГОСТ 23349-84 [47]. Разработанный образец со щелями имитаторами трещин представляет собой два цилиндра 2 и 3 равного диаметра, просверленных по оси и плотно посаженных один за другим на стальной стрежень 1, как показано на рисунке 1.14 [47].

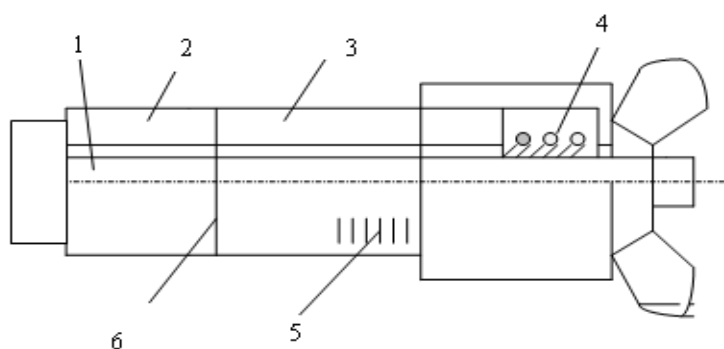


Рисунок 1.14 - Разборный контрольный образец для имитации трещин

Соприкасающиеся поверхности цилиндров имеют хорошо обработанные кольцеобразные ступени. Когда цилиндры сжимаются, эти ступени образуют тонкую кольцевую щель 6. Для создания определенного зазора, ширину которого измеряют по шкале 5, между цилиндрами зажимают полоски фольги толщиной до 0,01 мм. Усилие сжатия устанавливают пружиной 4 или тарированным ключом. Дефектоскопические составы считают годными, если длина индикаторного следа, получаемого на контрольном образце, составляет не менее 50 % длины зазора. Разработанные образцы вследствие большого объема зазоров, различной шероховатости стенок щелей, наличия реальных трещин и других особенностей, влияющих на выявляемость дефектов, имеют ограниченное применение.

Эталонирование чувствительности методов осуществляется на *эталонах чувствительности* с естественными или искусственными дефектами. Натурные образцы, используемые в качестве эталонов, имеют главным образом трещины шлифовочного, термического, усталостного или хрупкого происхождения. Более удобными являются разборные эталоны, имитирующие трещины, имеющие различные раскрытия и протяженности, т.е. в имитаторах трещину заменяют зазором [37].

Применяют плоскокольцевые, цилиндрические и плоские разборные эталоны. Преимущество эталонов чувствительности состоит в том, что они могут быть многократно использованы и позволяют визуализировать процесс проникновения пенетранта.

1.4.3. Тест-панели

Тест-панели используют для сравнения наборов дефектоскопических материалов между собой, а также оценки чувствительности капиллярного контроля.

Тест-панели классифицируются по исполнению и функциональному назначению. Тест-панели по исполнению условно разделяют на натурные и имитаторы, по функциональному назначению – компараторы и мониторы.

Компараторы предназначены для определения чувствительности наборов дефектоскопических материалов в некоторых стандартных условиях.

Мониторы применяют для слежения за качеством и правильностью выполнения всего процесса капиллярной дефектоскопии объектов контроля

Типичным представителем компараторов является пара панелей изготовленных по японскому стандарту JIS Z2343 [59].

Объект представляет собой бронзовую пластину $100 \times 70 \times 2$ мм с нанесенным никель-хромовым покрытием заданной толщины, на котором затем создают параллельные трещины путем приложения растягивающего усилия в направлении, перпендикулярном предполагаемому направлению трещин. Глубина трещин определяется толщиной слоя покрытия. После создания трещин производится разрезание пластины симметрично пополам в направлении, перпендикулярном направлению трещин, и таким образом создается комплект из двух тест-панелей, обладающих очень высоким подобием. Тест-панель по японскому стандарту показана на рисунке 1.15.

Выпускаются четыре вида объектов с глубиной трещин 50, 30, 20 и 10 мкм; при этом десятимикронные панели используются для контроля характеристик высокочувствительных пенетрантов, пятидесятимикронные - соответственно, для испытаний пенетрантов низкой чувствительности (т.н. технологического класса). Допуск толщины покрытия - 10 %. Раскрытие трещины в среднем составляет 0,05 от толщины покрытия [45].



Рисунок 1.15 - Комплект никель-хромовых тест-панелей с эталонной фотографией полученных дефектов

Также известен способ изготовления компараторов путем термической обработки образца. На рисунке 1.16 приведен увеличенный рисунок трещин на американском образце АСМТ/АСМЕV6, где трещины имеют термоударное происхождение. Образец представляет собой дюралевую пластинку 50×80 мм. Посередине пластинка имеет канавку, сделанную фрезой. Наличие канавки позволяет оценивать не только способность дефектоскопических наборов к обнаружению дефектов, но и сравнивать разные наборы. Если экраном по канавке разделить образец на две части и каждую из них независимо обрабатывать разными дефектоскопическими наборами, то после проявления хорошо видна разница между наборами [60].

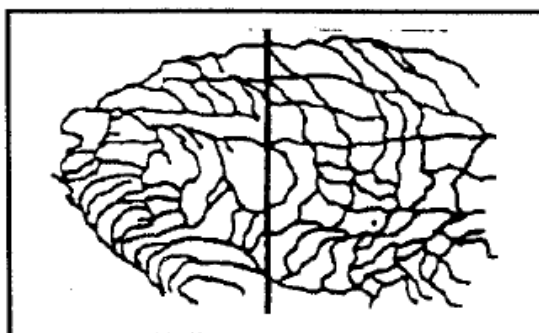


Рисунок 1.16 - Увеличенный рисунок следа дефекта, полученного термоударом на образце АСМТ/АСМЕV/6 (США)

Этот образец в течение длительного времени является самым распространенным в странах, использующих стандарт ASTM [24].

Трещины можно получить многократным нагреванием паяльной лампой одного и того же места на детали, забракованной по износу или из-за деформации, либо стальной или алюминиевой пластине и резко охлаждая их в воде.

Типичным представителем мониторов дефектоскопических систем является тест-панель второго типа по ГОСТ Р ИСО 3452-3 [45]. Такая тест-панель предназначена для определения эксплуатационной пригодности контрастных и люминесцентных наборов дефектоскопических материалов при непрерывной эксплуатации на линиях капиллярного контроля.

Она представляет собой прямоугольную никелированную пластину из коррозионно-стойкой стали размерами $155,0 \times 50,0 \times 2,5$, покрытую дополнительно тонким слоем хрома. Тест-панель имеет 4 поля с различной шероховатостью, позволяющее точнее судить о смываемости пенетранта. Клип включает в себя поля с параметрами шероховатости $R_a = 2,5; 5,0; 10,0$ и $15,0$ мкм. Поле дефектов содержит пять звездообразных центров трещин.

Тест-панель маркируется серийным номером и снабжается сертификатом, отражающим точные диаметры звездообразных сеток трещин. Изображение тест-панели показано на рисунке 1.17.



Рисунок 1.17 – Тест-панель 2 типа по ISO 3452 - 3

Еще одним представителем мониторов пенетрантных систем считают тест-панели PSM-5. У такой панели существуют два поля. Одно из них хромированная полоса с пятью звездообразными центрами трещин, полученные ударным

вдавливанием шарика с обратной стороны, на равном расстоянии друг от друга, с другой – поле однородной шероховатости.

Центры трещин располагаются по мере возрастания их диаметров: 6,4 мм, 4,0 мм, 2,4 мм, 1,6 мм и 1 мм. Наибольший диаметр становится видимым при обработке панели низкокачественным пенетрантом, наименьший – высококачественным. Абсолютно идентичных панелей такого вида не существует, рисунок трещин варьируется от панели к панели.

По PSM-5 можно определить, правильно ли работают: станция очистки, пенетрант, эмульгатор, станция промывки и сушки, проявитель, правильно ли выдерживают все временные интервалы

1.5. Выводы по главе 1

В настоящее время на рынке представлено достаточное количество испытательных образцов, изготовленных из высококачественной стали, которые применяются для оценки качества дефектоскопических материалов. Следует указать на ряд недостатков, присущих контрольным образцам из металлов. Во-первых, реальный выход при производстве контрольных образцов, удовлетворяющих необходимым требованиям параметров дефектов (ширины раскрытия, длины и глубины), достаточно мал.

Во-вторых, образцы с трещинами для капиллярного контроля 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. Это уменьшает свободный объем полостей трещин, препятствует их заполнению пенетрантом и выявлению капиллярным методом. После сушки нагреванием в трещинах может снижаться смачиваемость следов проявителей вновь применяемыми пенетрантами и ухудшение выявляемости трещин. При нагревании образцов до 100 - 200 °С следы дефектоскопических материалов в

трещинах полимеризуются и становятся нерастворимыми в органических растворителях. Это требует тщательной очистки образцов перед сушкой.

Другой причиной старения образцов из жаропрочной и коррозионностойкой сталей является окисление и интенсивная щелевая коррозия металла. В результате этих процессов в полостях трещин, в основном у выхода на поверхность образцов, образуются Fe_3O_4 , Fe_2O_3 , $\text{Fe}(\text{OH})_3$, $\text{Fe}(\text{OH})_2$, $\text{Cr}(\text{OH})_3$, $\text{Cr}(\text{OH})_2$, Cr_2O_3 и другие соединения. В среднем объем этих соединений примерно в 3 раза превышает объем неокисленного металла. При их накоплении они переходят в сжатое состояние, становятся плотными и непроницаемыми. Пенетрант не может заполнять такие трещины. Поэтому при капиллярном контроле образцов они перестают выявляться.

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.

ГЛАВА 2. ГИДРОДИНАМИКА ЗАПОЛНЕНИЯ ЖИДКОСТЯМИ II-ОБРАЗНЫХ ТИПОВ ДЕФЕКТОВ

Сообщение полости дефекта с окружающей контролируемое тело средой является необходимым условием работоспособности капиллярных методов контроля. Поэтому стадии нанесения пенетранта на контролируемую поверхность предшествует ее предварительная очистка, обеспечивающая доступ жидкости вглубь дефектов, устья которых были загрязнены. Очевидно, чем быстрее и глубже заполняются дефекты жидкостью, тем эффективнее процесс контроля. Известно, что чем лучше смачивается поверхность жидкостью, тем глубже она проникает в дефект, а чем меньше вязкость жидкости, тем быстрее протекает процесс [90].

Течение жидкости в сквозных капиллярах имеет место при использовании методов течеискания жидкими проникающим веществами. Изображение сквозного капилляра показано на рисунке 2.1. Методами капиллярной дефектоскопии выявляются тупиковые дефекты, рисунок 2.2, составляющие большинство дефектов объектов машиностроения, железнодорожной, автомобильной, авиационной и космической техники, атомной энергетики [90].

Условно капиллярные дефекты подразделяют на следующие виды: поры, имеющие сечение близкое к круглому; трещины с параллельными стенками в виде щели или прорези; трещины с непараллельными стенками, конического сечения. В основном же трещины имеют произвольную геометрию [39]. Соответственно основными моделируемыми типами дефектов являются трещины конические и цилиндрические, с параллельными и непараллельными стенками, произвольной геометрии.

Рассмотрим моделирование движения жидкости в трещине с параллельными стенками.

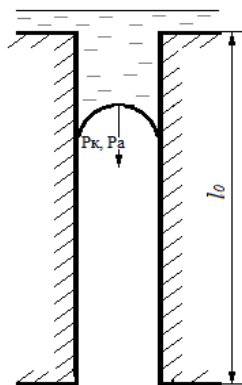


Рисунок 2.1 - Сквозной капилляр

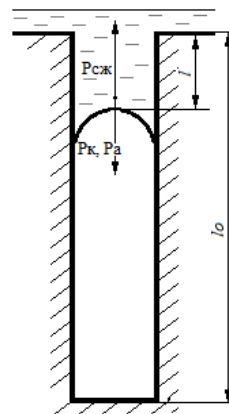


Рисунок 2.2 - Тупиковый капилляр

Заполнение жидкостью плоских капиллярных каналов типа трещин, показанном на рис. 2.1 происходит лишь при условии одновременного касания жидкостью по всей длине устья трещины, когда образуется равноудаленный от поверхности фронт жидкости.

Заполнение тупиковых капилляров, таких как трещины, поры, непровары и пр., отличается от сквозного тем, что процессу проникновения жидкости препятствует запертый в полости дефектов газ, как показано на рисунке 2.2. Поэтому выявление закономерностей заполнения жидкостями тупиковых капилляров на предельную глубину, продолжительность заполнения жидкостью полости на заданную глубину является актуальной задачей [61-63].

На рисунках 2.1 – 2.2 l_0 - полная глубина капилляра, l – предельная глубина заполнения капилляра жидкостью, P_k – капиллярное давление, P_a – атмосферное давление, $P_{сж}$ – давление сжатого в полости капилляра газа.

В главе исследовано заполнение жидкостями сквозных и тупиковых капилляров в изделиях из стали, стеклянного и эпоксидного материалов. Представлено сравнение математической модели движения жидкости в тупиковых и сквозных капиллярах с движением жидкости в реальных объектах контроля.

2.1. Заполнение жидкостями тупиковых и сквозных капилляров с плоскими параллельными стенками

Сформулируем задачу следующим образом. Построить и решить уравнение движения жидкости в щелевидном капилляре с учетом его наклона относительно горизонтали, шероховатости поверхности, гетерогенности структуры (наличия участков с различными параметрами смачивания), аналитического изменения размера капилляра на различных участках в предположении движения жидкости близкого к ламинарному.

Следуя уравнению Навье-Стокса для ньютоновской несжимаемой жидкости, с учетом присутствия только сил тяжести и пренебрегая процессами растворения и диффузии газа, можно записать следующим образом (уравнение 2.1):

$$-\mu \nabla \times \nabla \times \vec{v} - \nabla p = \rho \left[\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \frac{1}{2} \nabla (\vec{v}^2) \right], \quad (2.1)$$

где μ - коэффициент динамической сдвиговой вязкости, \vec{v} - вектор скорости, ∇p - градиент давления. Градиент давления составная величина. Он складывается из трех составляющих, представленных уравнением 2.2:

$$\nabla p = \frac{1}{l} (p_k + p_a - p_c) \quad (2.2)$$

где p_a - атмосферное давление, p_k - капиллярное давление. Третья составляющая p_c - давление сжатого газа в тупиковой области капилляра (появляется в закороченных капиллярах). Давление сжатого газа описывается простым соотношением 2.3:

$$p_c = p_a \frac{h_0}{h_0 - h}, \quad (2.3)$$

где h_0 – глубина капилляра, h – глубина заполнения.

Будем считать, что капиллярная составляющая давления есть функция только размера капилляра, коэффициента поверхностного натяжения, краевого угла смачивания, плотности жидкости, шероховатости стенок и является

постоянной величиной при условии однородности капилляра или носит разный характер в случае переменного угла смачивания, что показано уравнением 2.4 [64]:

$$p_k = \frac{2\sigma \cos(\theta)}{r} \quad (2.4)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения, θ - переменный в общем случае и учитывающий шероховатость поверхности угол смачивания, r – размер капилляра. С учетом этого можно записать выражение для градиента давления (2.5):

$$\nabla p = \frac{1}{l} \left[\frac{2\sigma \cos(\theta)}{R} + p_a \left(1 - \frac{h_0}{h_0 - h} \right) \right]. \quad (2.5)$$

Переход от уравнения Навье-Стокса для скорости заполнения капилляра к зависимости глубины проникновения жидкости в капилляр, приводит к модифицированному уравнению Порхаева, формула 2.6 [65-67]:

$$\frac{d^2 h_1}{dt^2} + \frac{1}{h_1} \left(\frac{dh_1}{dt} \right)^2 + \frac{8\mu}{r^2 \rho} \frac{dh_1}{dt} - \frac{2\sigma \cos(\theta_0)}{\rho h_1 r} + \frac{p_a}{\rho(h_0 - h_1)} + g \sin(\alpha) = 0, \quad (2.6)$$

где ρ – плотность жидкости, r – размер капилляра, σ – коэффициент поверхностного натяжения, θ_0 - угол смачивания на гладкой поверхности, g – ускорение свободного падения, h_1 – глубина смачивания, α – угол наклона капилляра.

Коэффициент шероховатости поверхности, формула 2.7 в уравнении Венцеля–Дерягина [68-69] выражается через отношение площадей шероховатой поверхности к идеально гладкой:

$$a = S_s / S_0, \quad (2.7)$$

С учетом шероховатой поверхности уравнение будет иметь вид:

$$\frac{d^2 h_1}{dt^2} + \frac{1}{h_1} \left(\frac{dh_1}{dt} \right)^2 + \frac{8\mu}{r^2 \rho} \frac{dh_1}{dt} - \frac{2\sigma a \cos(\theta_s)}{\rho h_1 r} + \frac{p_a}{\rho(h_0 - h_1)} + g \sin(\alpha) = 0, \quad (2.8)$$

$$\theta_s = \arccos(a \cos(\theta_0)).$$

Увеличение шероховатости поверхности для хорошо смачиваемых материалов приводит к уменьшению краевого угла, уравнение 2.9.

Уравнение можно записать так:

$$h_1'' + \frac{1}{h_1} (h_1')^2 + \frac{8\mu}{r^2 \rho} h_1' - \frac{2\sigma a \cos(\theta_0)}{r \rho h_1} + \frac{P_a}{\rho(h_0 - h_1)} + g \sin(\alpha) = 0, \quad (2.9)$$

При решении задачи можно оценить степень неоднородности поверхности капилляра, т.е. наличия участков с различными параметрами смачивания. Уравнение Касси-Бакстера позволяет рассматривать участки с различными углами смачивания, описанного следующим образом (2.10) [70]:

$$\cos(\theta) = x \cos(\theta_1) + (1-x) \cos(\theta_2). \quad (2.10)$$

где x – общая длина участков капилляра, характеризующихся краевым углом θ_1 , $(1-x)$ – краевым углом θ_2 . Уравнение Касси-Бакстера можно обобщить на случай большого числа областей с различными углами смачивания (2.11):

$$\cos(\Theta) = \sum_{i=1}^n \Delta x_i \cos(\Theta_i), \quad \sum_{i=1}^n \Delta x_i = 1. \quad (2.11)$$

В этом случае, при интегрировании уравнения необходимо контролировать границы областей с различными углами смачивания и вычислять начальные значения первой производной. Учет неоднородности позволяет рассматривать капилляры в многослойных полимерных материалах, формула 2.12:

Уравнение можно записать так:

$$h_1'' + \frac{1}{h_1} (h_1')^2 + \frac{8\mu(r, ra)}{r^2(h_1)\rho} h_1' - \frac{2\sigma(h_1)a(h_1)\cos(\theta_s(h_1))}{r(h_1)\rho h_1} + \frac{P_a}{\rho(h_0 - h_1)} + g \sin(\alpha) = 0, \quad (2.12)$$

где ra – радиус макромолекулы,

Это уравнение позволяет устанавливать зависимость коэффициента динамической сдвиговой вязкости жидкости в процессе сужения или расширения радиуса капилляра и учесть размерные эффекты¹. Зависимость размера капилляра

¹ Под размерными эффектами понимают эффект увеличения вязкости полярных жидкостей, таких как пенетранты, вода, спирты и пр., при их течении в микрокапиллярах с уменьшением радиуса последних.

r , σ – коэффициента поверхностного натяжения, θ_s - угла смачивания от глубины капилляра, позволяет производить моделирование с учетом континуального изменения этих параметров в процессе впитывания жидкости в капилляр.

Представим дифференциальное уравнение второго порядка в виде системы уравнений первого порядка (2.13), что позволит применить методы численного интегрирования. Для этого обозначим первую производную именем h_2 :

$$\begin{cases} h_2 = h_1', \\ h_2' + \frac{1}{h_1} h_2^2 + \frac{8\mu}{r^2 \rho} h_2 - \frac{2\sigma a \cos(\theta_s)}{r \rho h_1} + \frac{P_a}{\rho(h_0 - h_1)} + g \sin(\alpha) = 0, \end{cases} \quad (2.13)$$

Тогда каноническая форма записи системы уравнений будет иметь вид, представленный системой 2.14:

$$\begin{cases} h_1' = h_2, \\ h_2' = -\frac{1}{h_1} h_2^2 - \frac{8\mu}{r^2 \rho} h_2 + \frac{2\sigma a \cos(\theta_s)}{r \rho h_1} - \frac{P_a}{\rho(h_0 - h_1)} - g \sin(\alpha), \end{cases} \quad (2.14)$$

$$h_2' = -\frac{1}{h_1} h_2^2 + \frac{1}{r \rho} \left[\frac{2\sigma a \cos(\theta_s)}{h_1} - \frac{8\mu}{r} h_2 \right] - \frac{P_a}{\rho(h_0 - h_1)} - g \sin(\alpha),$$

Для формулировки краевой задачи необходимо получить условия для функции h_1 , и её первой производной в начальный момент времени интегрирования. Предположим, что в начальный момент времени величины второй производной и квадрат первой производной в силу инерции процессов впитывания малы. Пренебрегаем и последним слагаемым в левой части уравнения (2.14), т.к. в этот момент угол наклона капилляра не играет значения. Тогда можно записать формулу 2.15:

$$h_1 dh_1 = \frac{r \sigma a \cos(\Theta)}{4\mu} dt. \quad (2.15)$$

Интегрируя это уравнение получим:

$$\frac{1}{2} h_1^2 = \frac{r \sigma a \cos(\Theta)}{4\mu} t. \quad (2.16)$$

Приходим к известному соотношению, представленному формулой 2.17, известному как уравнение Уошборна [71] :

$$h_1 = \sqrt{\frac{r\sigma a \cos(\Theta)}{2\mu}} t. \quad (2.17)$$

Запишем конечно-разностную аппроксимацию первой производной с учетом того, что начальная глубина проникновения жидкости в капилляр равна нулю, как показано соотношением 2.18.

$$\frac{dh}{dt} \approx \frac{\Delta h}{\Delta t} = \frac{h_1 - h_0}{t_1 - t_0} = \frac{h}{t_1 - t_0}. \quad (2.18)$$

В этом случае первое слагаемое в уравнении позволяет сформулировать соотношение начального шага численного интегрирования системы дифференциальных уравнений (2.19):

$$\frac{1}{\Delta h} \left(\frac{\Delta h}{t_1 - t_0} \right)^2 = \frac{\Delta h}{(t_1 - t_0)^2}. \quad (2.19)$$

Система уравнений 2.13 с начальными условиями относится к классу жестких вычислительных задач. Поэтому применение явных методов интегрирования приводит к необходимости существенного уменьшения шага интегрирования. В свою очередь, уменьшение шага интегрирования приводит к возрастанию количества вычислений и увеличению погрешности из-за ограниченного размера разрядной сетки хранения данных в компьютере. Мы убедились в этом, используя интегратор Рунге – Кутты четвертого порядка и применяя метод оценки погрешности по первой формуле Рунге [72]. При таком подходе можно наблюдать величину шага интегрирования. Существенное уменьшение шага интегрирования требуется при уменьшении радиуса капилляра. Вычислительные эксперименты показали, если радиус капилляра выбирать больше чем 10^{-5} метра, минимальный начальный шаг интегратора (для погрешности вычислений не хуже 10^{-6}) оказался равным 10^{-5} секунд. Уменьшения

радиуса капилляра до 10^{-7} метра, приводит к уменьшению шага интегрирования на 2 порядка. При этом ухудшения погрешности вычислений удалось избежать путем применения типа данных – *extended (80)*. Нами был опробован неявный метод интегрирования по схеме Гира [72]. Однако и этот метод не позволяет осуществить начальный этап интегрирования в силу использования шагов схемы Рунге – Кутты.

2.2. Интерфейс пользователя программы моделирования процессов течения жидкостей от времени

В основу программного комплекса, позволяющего моделировать процессы движения жидкостей в тупиковых и сквозных щелевидных капиллярах было положено модифицированное уравнение Порхаева (2.12)

На рисунке 2.3 представлена интерфейсная часть комплекса для проведения компьютерного моделирования процессов.

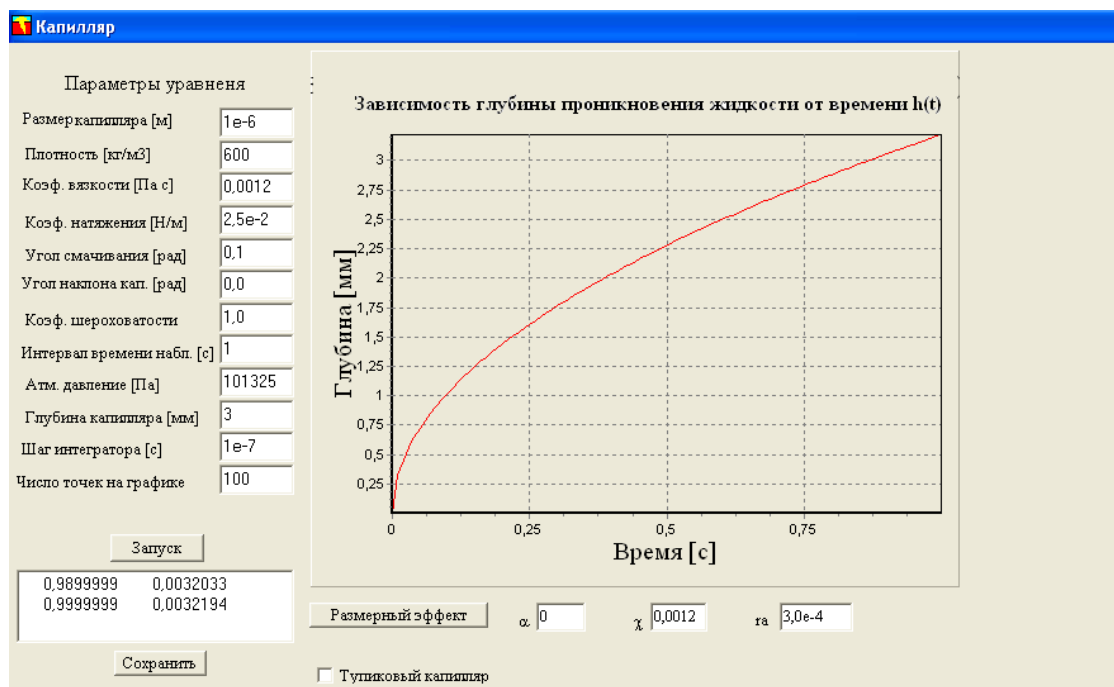


Рисунок 2.3 – Интерфейсная часть комплекса для проведения компьютерного моделирования

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

- размер капилляра (единица измерения - м);
 - плотность жидкости (единица измерения – кг/м^3);
 - коэффициент динамической вязкости (единица измерения - $\text{Па}\cdot\text{с}$);
 - 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). Несмотря на то, что метод автоматически выбирает шаг интегрирования на старте, желательно, задавать его начальное значение. Это связано с тем, что дифференциальное уравнение относится, как было сказано ранее, к разряду жестких и имеет особенность для точки $h = 0$;
 - число точек на графике. Такой параметр необходим чтобы сводить результаты моделирования, а на общем графике при вариации параметров задачи. В противном случае, автоматический выбор шага интегрирования по времени формирует результирующие файлы разной длины.
- В нижней части располагается поле вывода текущих значений времени и глубины заполнения капилляра. Поле представляет собой упрощенный текстовый редактор с возможностью просмотра всех промежуточных значений и оперирования ими при необходимости. Параллельно с выводом данные можно записать в файл для дальнейшего использования.

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.

Запуск программы осуществляется клавишей «Запуск». Длительность процесса вычислений его возможность зависит от параметров задачи. Если в процессе моделирования на экране монитора появляется следующее сообщение (рисунок 2.4),

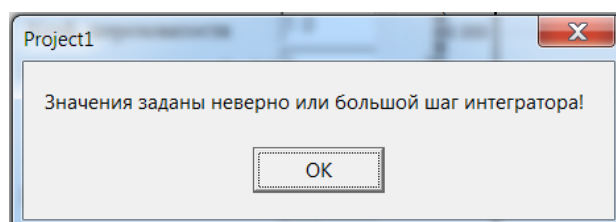


Рисунок 2.4 – Сообщение об ошибке ввода численных параметров уравнения

то надо обратить внимание на два обстоятельства:

- числовые значения параметров задачи набраны с ошибками (например: в качестве разделителя целой от дробной части использована точка; использован символ кириллицы «е» в математической нотации порядка числа; вместо цифры введена буква);

- начальный шаг интегрирования слишком большой для проведения модельного эксперимента (чаще всего это проявляется на тонких капиллярах). В дифференциальном уравнении радиус капилляра входит в знаменатель многих его слагаемых [73 - 74].

2.3. Модельные эксперименты

Сформулируем задачу: необходимо узнать, отличается ли движение жидкости в тупиковых и сквозных капиллярных трубках из металлических и неметаллических материалов.

Моделировалось движение жидкости в тупиковых и сквозных капилляров из стали, т.к. большинство образцов для испытаний средств капиллярного неразрушающего контроля изготавливают из этого материала; эпоксидного клея – как материал для изготовления образцов из неметаллического материала; стекла – для проверки работоспособности применяемой математической модели. Размеры исследуемых образцов: ширина 900 мкм и 300 мкм, и глубиной – 90 мм. В качестве проникающих жидкостей - керосин и этиловый спирт, как основные составляющие дефектоскопических материалов, как описано в патентах авторов Морозова и др, Денеля и пр., Шервина (Sherwin) [75 - 78].

Краевые углы смачивания для пар стекло - керосин, стекло - этиловый спирт, сталь – керосин, сталь – этиловый спирт, измеренные методом отрыва капли Осиповым А.О. и Осиповым О.П., Гогониным И.И., были представлены в работах [79 - 80] и составляли $\theta_{ст-кер} = 25^\circ$, $\theta_{ст-сп} = 17^\circ$, $\theta_{сталь-сп} = 32^\circ$, $\theta_{сталь-кер} = 37^\circ$. Для пары эпоксидный материал – спирт угол смачивания $\theta_{эп.-сп} = 26^\circ$, для пары эпоксидный материал – керосин $\theta_{эп.-кер} = 30^\circ$.

Коэффициент влияния шероховатости определялся поверхности с помощью следующей формулы (2.20), описанной на сайте [81]:

$$a = 1 - 0,22lgR_z (lg \frac{\sigma_b}{20} - 1) \quad (2.20)$$

где σ_b – предел прочности, МПа, R_z – высота неровностей, мкм.

В таблице представлены значения основных параметров уравнения.

Таблица 2.1 – Значения основных параметров уравнения

Жидкость	Коэф. динам. вязкости, Па*с, 10^{-3}	Коэф. поверхност. 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			

С помощью описанного выше программного комплекса можно, с точностью до сотых долей секунды, определить время заполнения t на определенную глубину l капилляров из любых материалов различными жидкостями.

2.3.1. Сквозной капилляр

В таблицах 2.2 – 2.5 представлены результаты моделирования движения жидкостей в П-образных капиллярах из стали, стекла и эпоксидного материала, ориентированных под углами 0° и 90° относительно горизонтали.

Таблица 2.2 – Моделирование движения жидкости в сквозных вертикальных капиллярах. Жидкость – керосин.

Глубина капилляра, мм	Время заполнения капилляра жидкостью, сек					
	сталь		стекло		эпоксидный материал	
	900 мкм	300 мкм	900 мкм	300 мкм	900 мкм	300 мкм
0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10,0	0,03	0,11	0,04	0,09	0,05	0,10
20,0	0,17	0,54	0,16	0,49	0,20	0,50
30,0	0,42	1,26	0,36	1,10	0,40	1,10
40,0	0,73	2,21	0,60	1,90	0,70	2,00
50,0	1,15	3,41	0,96	2,90	1,04	3,10
60,0	1,64	4,91	1,36	4,10	1,50	4,50
70,0	2,24	6,65	1,87	5,60	2,04	6,10
80,0	2,91	8,70	2,47	7,30	2,64	8,00
90,0	3,74	11,03	3,07	9,30	3,40	10,00

Таблица 2.3 – Моделирование движения жидкости в сквозных вертикальных капиллярах. Жидкость – спирт.

Глубина капилляра. мм	Время заполнения капилляра жидкостью, сек					
	сталь		стекло		эпоксидный материал	
	900 мкм	300 мкм	900 мкм	300 мкм	900 мкм	300 мкм
0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10,0	0,02	0,08	0,02	0,06	0,02	0,09
20,0	0,10	0,37	0,08	0,30	0,09	0,35
30,0	0,25	0,80	0,22	0,68	0,24	0,74
40,0	0,46	1,44	0,39	1,20	0,43	1,33
50,0	0,73	2,24	0,62	1,87	0,68	2,07
60,0	1,10	3,20	0,88	2,70	0,99	2,98
70,0	1,45	4,34	1,21	3,67	1,35	4,05
80,0	1,89	5,68	1,59	4,80	1,77	5,32
90,0	2,40	7,20	2,01	6,00	2,24	6,71

Таблица 2.4 – Моделирование движения жидкости в сквозных горизонтальных капиллярах. Жидкость – керосин.

Глубина капилляра. мм	Время заполнения капилляра жидкостью, сек					
	сталь		стекло		эпоксидный материал	
	900 мкм	300 мкм	900 мкм	300 мкм	900 мкм	300 мкм
0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10,0	0,05	0,10	0,04	0,10	0,03	0,10
20,0	0,18	0,54	0,14	0,50	0,18	0,49
30,0	0,40	1,27	0,35	1,05	0,38	1,16
40,0	0,72	2,20	0,63	1,85	0,65	1,97
50,0	1,13	3,40	0,95	2,85	1,03	3,13
60,0	1,62	4,89	1,34	4,10	1,47	4,45
70,0	2,23	6,65	1,86	5,59	2,03	6,10
80,0	2,89	8,69	2,41	7,30	2,65	7,90
90,0	3,65	11,00	3,07	9,20	3,35	10,00

Таблица 2.5 – Моделирование движения жидкости в сквозных горизонтальных капиллярах. Жидкость – спирт.

Глубина капилляра, мм	Время заполнения капилляра жидкостью, сек					
	сталь		стекло		эпоксидный материал	
	900 мкм	300 мкм	900 мкм	300 мкм	900 мкм	300 мкм
0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10,0	0,05	0,10	0,02	0,08	0,01	0,08
20,0	0,18	0,55	0,08	0,32	0,15	0,36
30,0	0,37	1,16	0,21	0,67	0,24	0,76
40,0	0,68	2,09	0,40	1,21	0,44	1,35
50,0	1,10	3,19	0,62	1,89	0,68	2,07
60,0	1,53	4,61	0,89	2,70	0,99	3,02
70,0	2,07	6,26	1,21	3,70	1,35	4,05
80,0	2,72	8,19	1,60	4,81	1,76	5,31
90,0	3,45	10,33	2,00	6,07	2,20	6,70

На рисунке 2.5 показано движение спирта в щелевидных капиллярах с поперечным размером 900 мкм. Из графика видно, что спирт лучше проникает в капилляры из неметаллического материала, в данном случае из стекла и эпоксидного материала, чуть хуже – для стали. В случае моделирования процессов движения керосина в капиллярах из тех же материалов результаты получились схожими (рисунки 2.6 – 2.7).

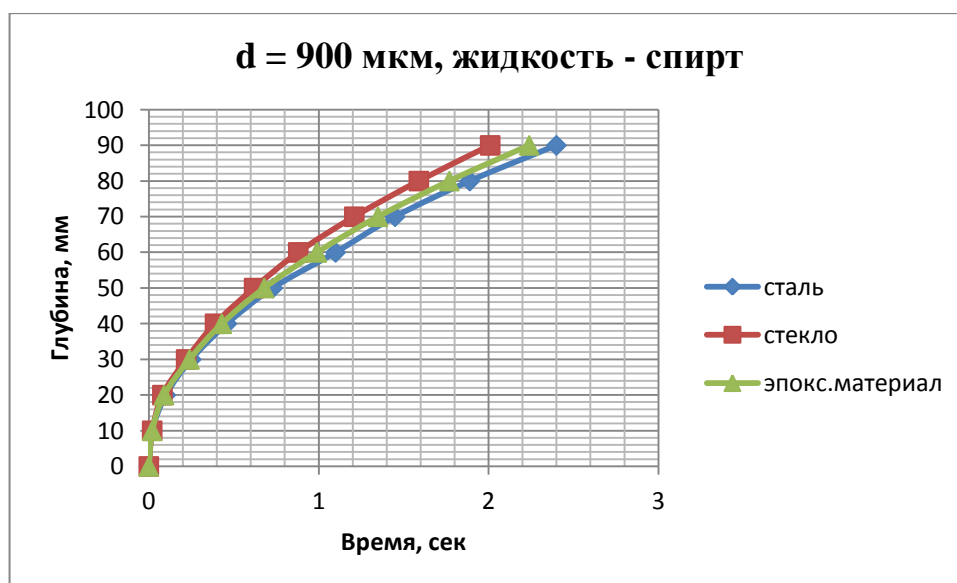


Рисунок 2.5 – Зависимость глубины проникновения спирта от времени в капиллярах из стали, стекла и эпоксидного материала

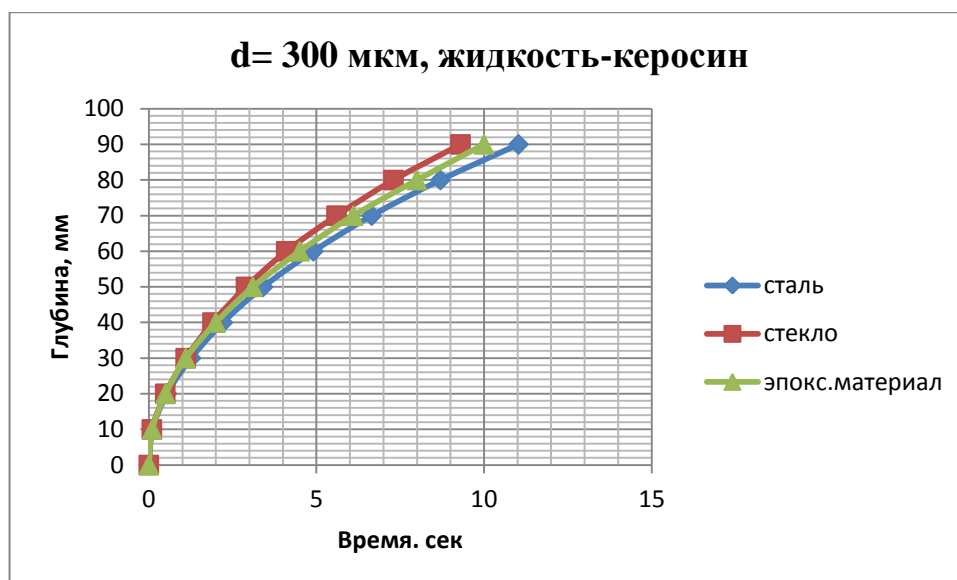


Рисунок 2.6 – Зависимость глубины проникновения керосина от времени, d = 300 МКМ

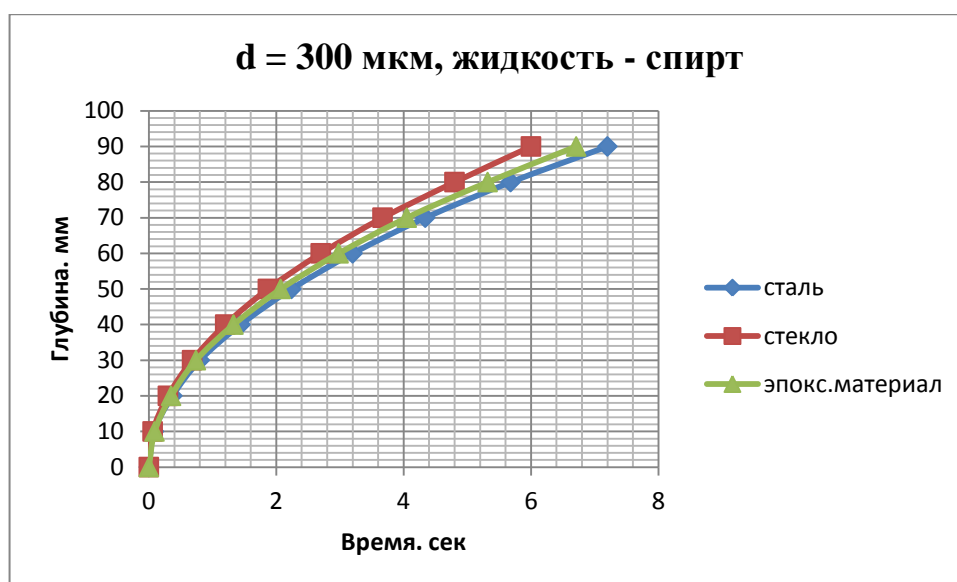


Рисунок 2.7 – Зависимость глубины проникновения керосина от времени, d = 300 МКМ

На рисунке 2.8 изображен график зависимости глубины проникновения жидкостей в капилляры из эпоксидного материала с размером 900 мкм. Спирт быстрее заполняет капилляры на заданную глубину, чем керосин. При моделировании процессов заполнения жидкостями сквозных капилляров из стали и стекла, графики зависимостей, показанные на рисунках 2.9 – 2.13, получились аналогичными.

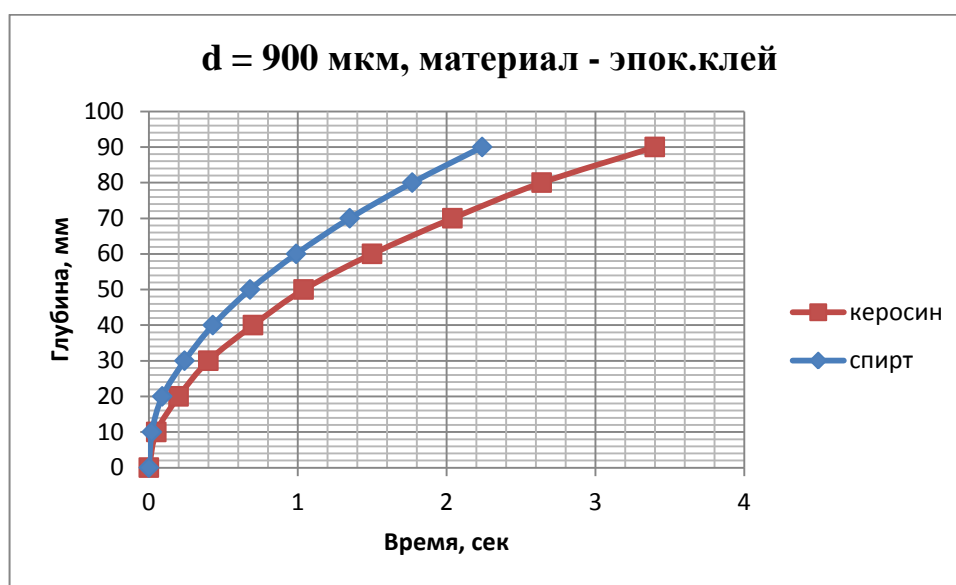


Рисунок 2.8 – Зависимость глубины проникновения керосина и спирта от времени в капилляры из эпоксидного материала, $d = 900$ мкм

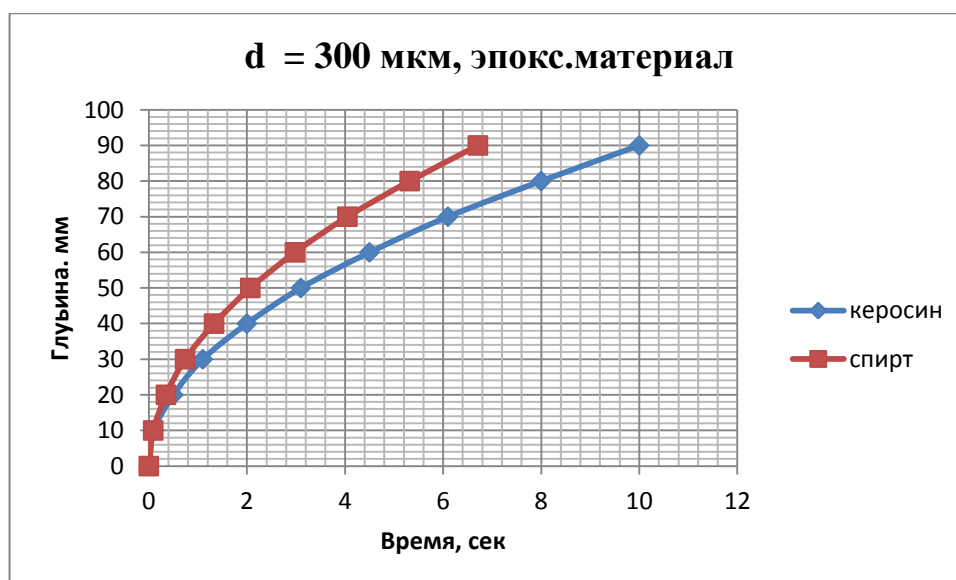


Рисунок 2.9 – Зависимость глубины проникновения жидкостей от времени в капилляры из эпоксидного материала, $d = 300$ мкм

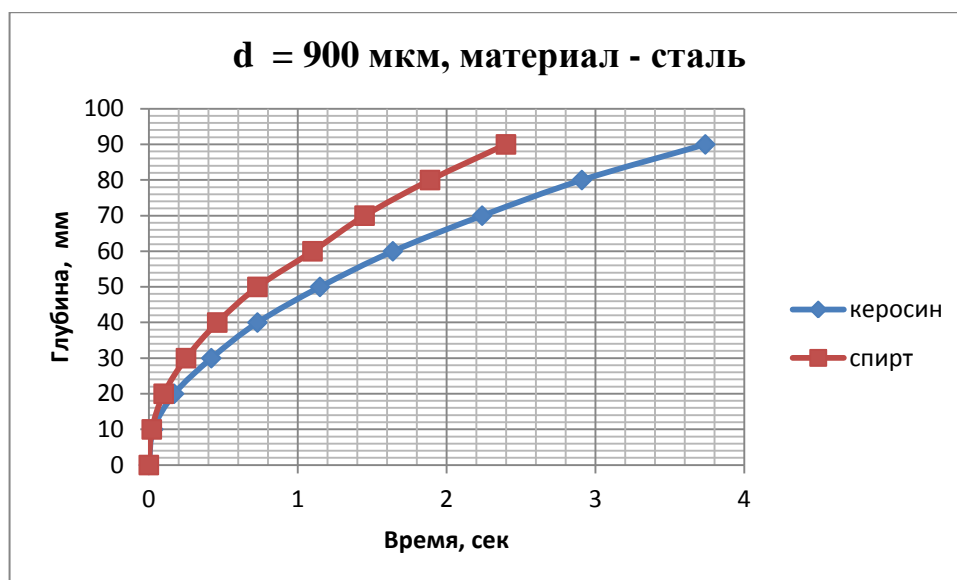


Рисунок 2.10 – Зависимость глубины проникновения жидкостей от времени в стальные капилляры, $d = 900$ мкм

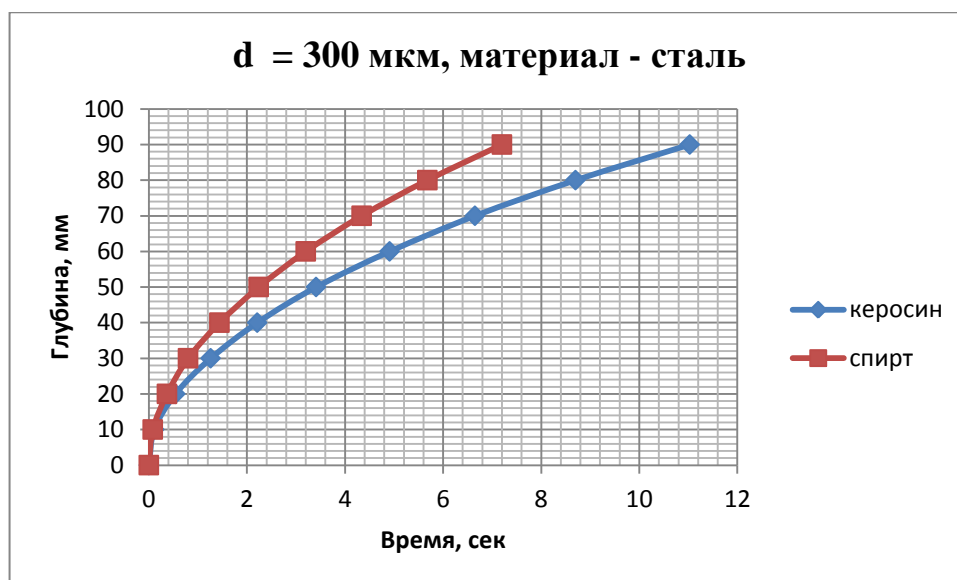


Рисунок 2.11 – Зависимость глубины проникновения жидкостей от времени в стальные капилляры. $d = 300$ мкм

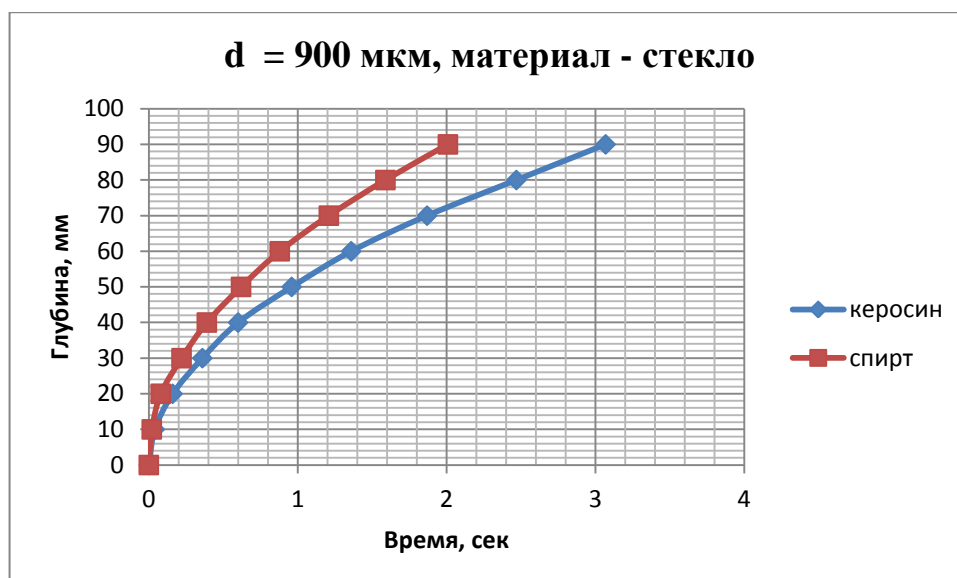


Рисунок 2.12 – Зависимость глубины проникновения жидкостей от времени в стеклянные капилляры, $d = 900$ мкм

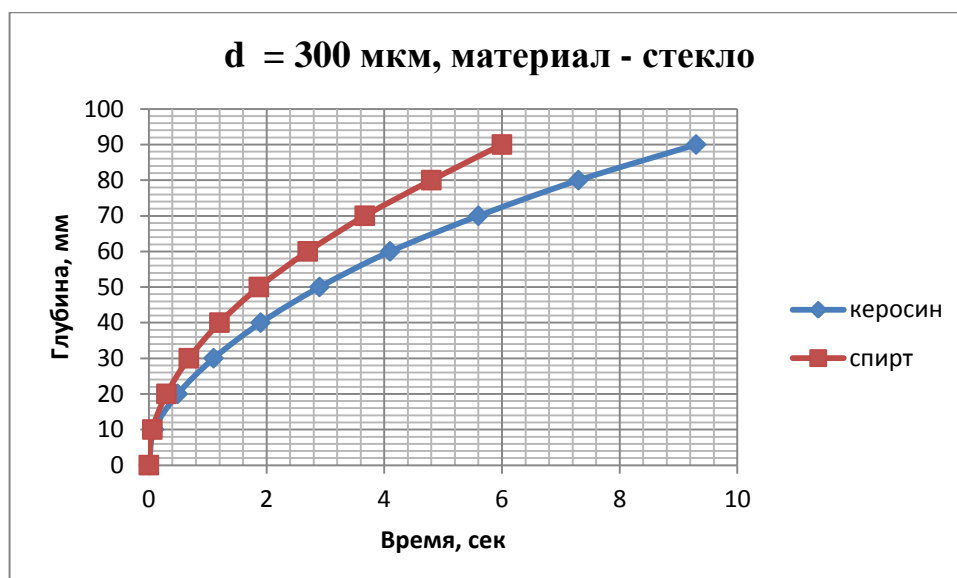


Рисунок 2.13 – Зависимость глубины проникновения жидкостей от времени в стеклянные капилляры, $d = 300$ мкм

График, представленный на рисунке 2.14, показывает зависимость глубины проникновения спирта от времени в зависимости от угла наклона капилляра относительно горизонтали. Отличие в глубинах проникновения жидкостей составляет только 2–ом знаке после запятой, кривые совпадают.

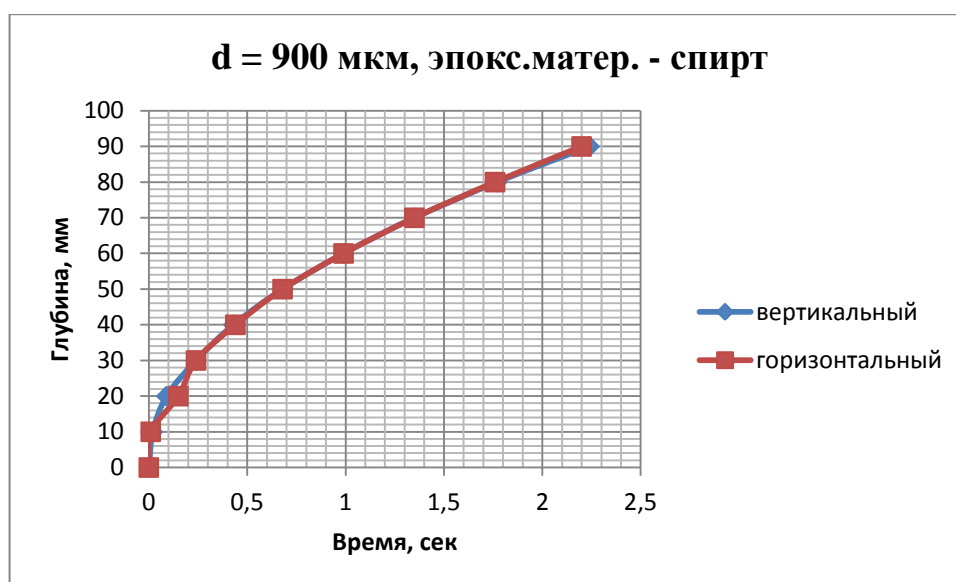


Рисунок 2.14 – Зависимость глубины проникновения спирта от времени в капилляр из эпоксидного материала зависимости от угла наклона относительно горизонтали

На рисунке 2.15 показаны зависимости глубины проникновения спирта от размера капилляров. С уменьшением размера капилляра, время проникновения жидкости на определенную глубину возрастает прямо пропорционально. Результаты, полученные на эпоксидном материале, соотносятся с результатами, полученными на стекле и стали, с применением разных жидкостей, как показано на рисунках 2.16 – 2.20.

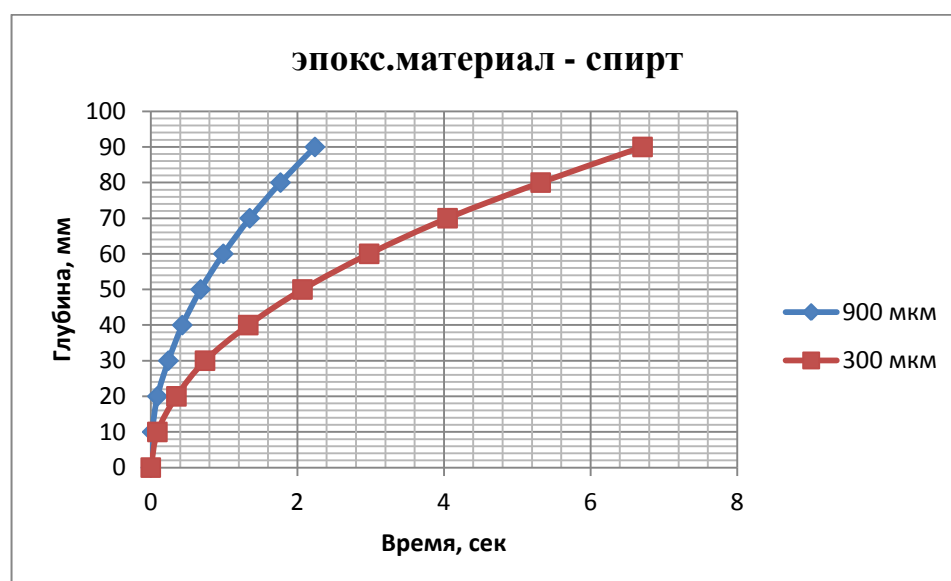


Рисунок 2.15 – Зависимость глубины проникновения спирта от времени в капиллярах из эпоксидного материала с размерами 300 мкм и 900 мкм

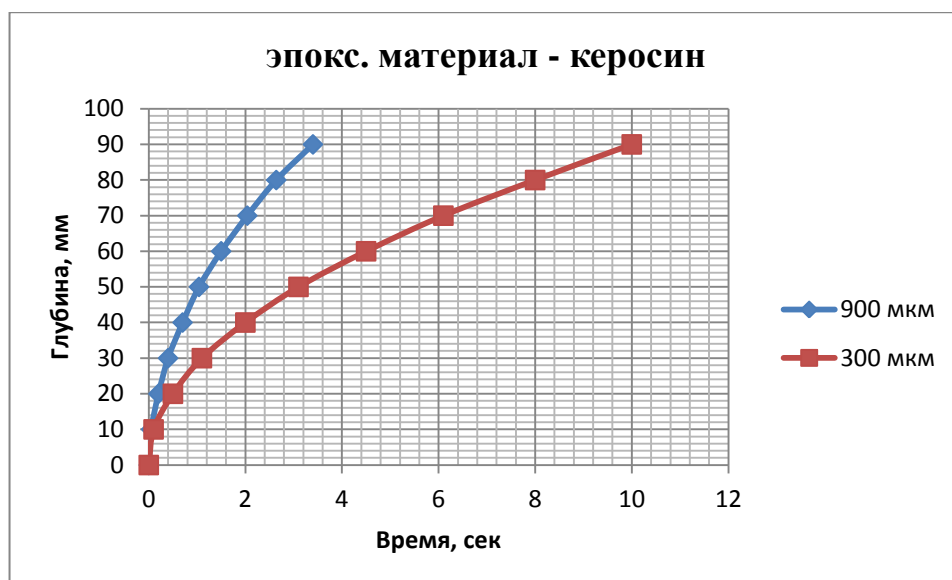


Рисунок 2.16 – Зависимость глубины проникновения керосина от времени в капилляры из эпоксидного материала с размерами $d = 900$ мкм и $d = 300$ мкм

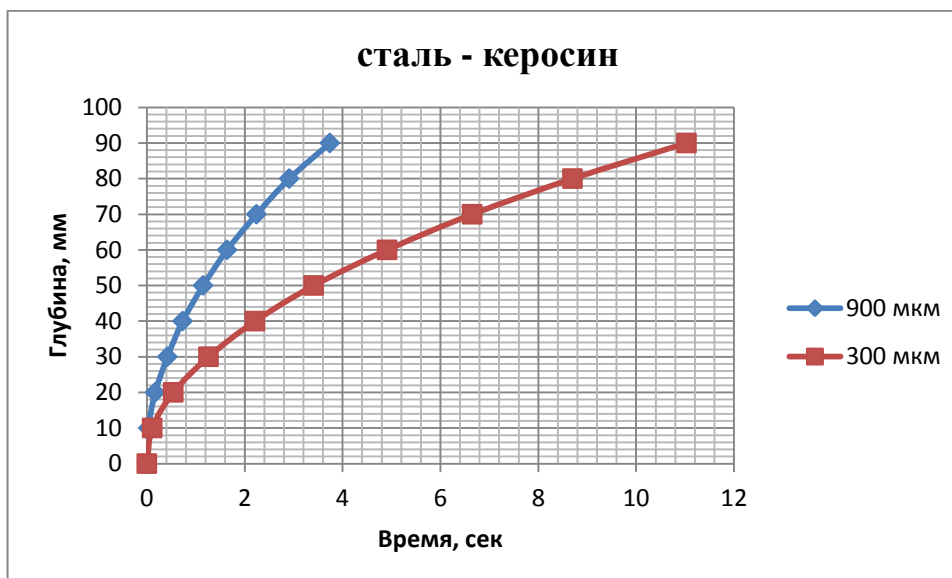


Рисунок 2.17 – Зависимость глубины проникновения керосина от времени в стальные капилляры с размерами $d = 900$ мкм и $d = 300$ мкм

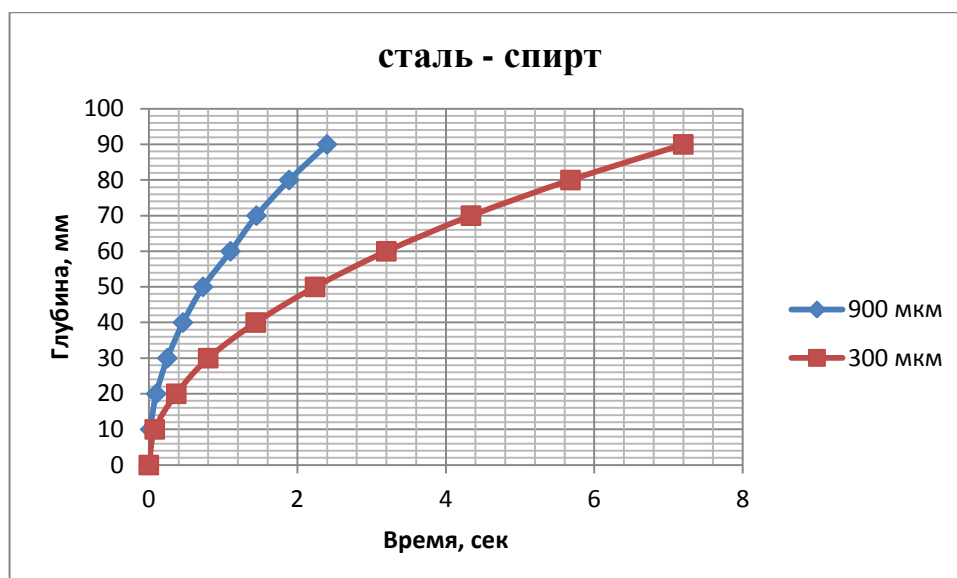


Рисунок 2.18 – Зависимость глубины проникновения спирта от времени в стальные капилляры с размерами $d = 900$ мкм и $d = 300$ мкм

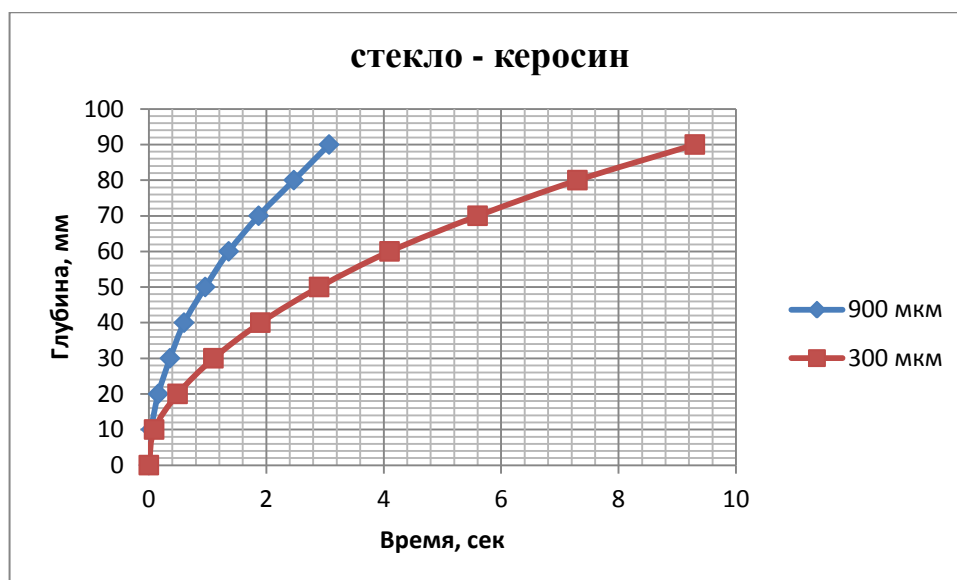


Рисунок 2.19 – Зависимость глубины проникновения керосина от времени в стеклянные капилляры с размерами $d = 900$ мкм и $d = 300$ мкм

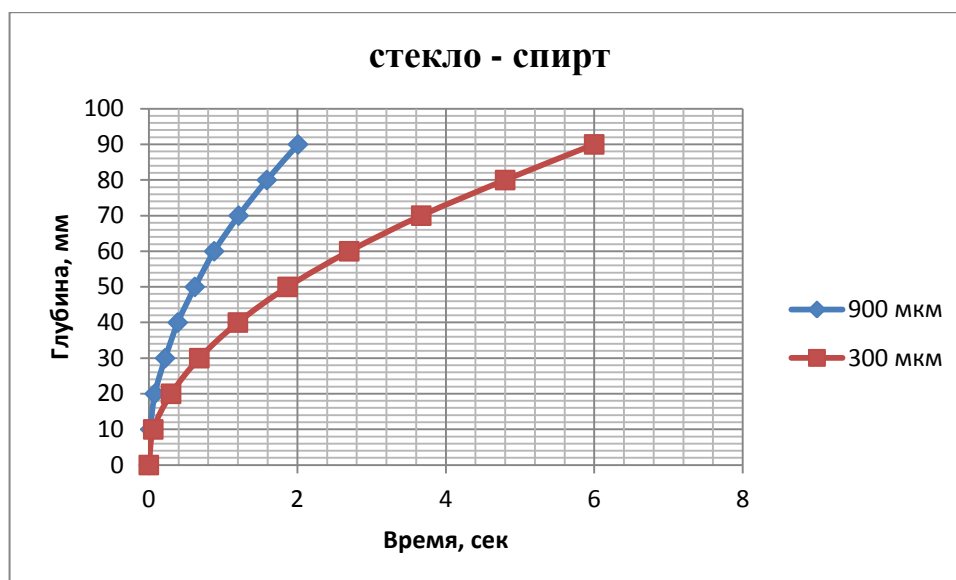


Рисунок 2.20 – Зависимость глубины проникновения спирта от времени в стеклянные капилляры с размерами $d = 900$ мкм и $d = 300$ мкм

2.3.2. Тупиковый капилляр

Движение жидкостей в тупиковых капиллярах ограничивает газ, чаще всего воздух, запертый в конце капилляра [82 - 90]. 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. Предложенный программный комплекс позволяет построить модель движения жидкостей в тупиковых капиллярах.

В таблицах 2.6 – 2.9 представлены результаты моделирования движения жидкости в тупиковых капиллярах из стали, стекла и эпоксидного материала, с шириной 300 мкм и 900 мкм, длиной 90 мм, с учетом угла наклона капилляра относительно горизонтали.

Таблица 2.6 – Моделирование движения жидкостей в тупиковых вертикальных капиллярах. Жидкость - керосин

Время, сек	Глубина проникновения жидкости, мм					
	Сталь		Стекло		Эпоксидный материал	
	900 мкм	300 мкм	900 мкм	300 мкм	900 мкм	300 мкм
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,04	0,71	1,13	0,85	1,46	0,81	1,43
0,08	0,71	1,62	0,85	1,84	0,81	1,78
0,12	0,71	1,79	0,85	2,05	0,81	1,97
0,16	0,71	1,96	0,85	2,18	0,81	2,10
0,20	0,71	2,00	0,85	2,27	0,81	2,18
0,25	0,71	2,04	0,85	2,34	0,81	2,24
0,29	0,71	2,06	0,85	2,38	0,81	2,28
0,33	0,71	2,07	0,85	2,42	0,81	2,31
0,37	0,71	2,08	0,85	2,44	0,81	2,33
0,41	0,71	2,08	0,85	2,46	0,81	2,35
0,45	0,71	2,08	0,85	2,47	0,81	2,36
1,00	0,71	2,08	0,85	2,47	0,81	2,36

Таблица 2.7 – Моделирование движения жидкостей в тупиковых вертикальных капиллярах. Жидкость - спирт

Время, сек	Глубина проникновения жидкости, мм					
	Сталь		Стекло		Эпоксидный материал	
	900 мкм	300 мкм	900 мкм	300 мкм	900 мкм	300 мкм
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,04	0,71	1,40	0,81	1,63	0,77	1,58
0,08	0,72	1,80	0,81	1,98	0,77	1,91
0,12	0,72	2,00	0,81	2,15	0,77	2,06
0,16	0,72	2,05	0,81	2,24	0,77	2,15
0,20	0,72	2,08	0,81	2,30	0,77	2,2
0,25	0,72	2,10	0,81	2,33	0,77	2,23
0,29	0,72	2,11	0,81	2,35	0,77	2,25
0,33	0,72	2,12	0,81	2,36	0,77	2,26
0,37	0,72	2,12	0,81	2,37	0,77	2,26
0,41	0,72	2,12	0,81	2,38	0,77	2,26
0,45	0,72	2,12	0,81	2,39	0,77	2,26
1,00	0,72	2,12	0,81	2,39	0,77	2,26

Таблица 2.8 – Моделирование движения жидкостей в тупиковых горизонтальных капиллярах. Жидкость - керосин

Время, сек	Глубина проникновения жидкости, мм					
	Сталь		Стекло		Эпоксидный материал	
	900 мкм	300 мкм	900 мкм	300 мкм	900 мкм	300 мкм
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,04	0,71	1,31	0,85	1,46	0,78	1,39
0,08	0,71	1,62	0,85	1,84	0,78	1,73
0,12	0,71	1,79	0,85	2,05	0,78	1,92
0,16	0,71	1,89	0,85	2,18	0,78	2,04
0,20	0,71	1,96	0,85	2,27	0,78	2,12
0,25	0,71	2,00	0,85	2,34	0,78	2,17
0,29	0,71	2,04	0,85	2,38	0,78	2,21
0,33	0,71	2,06	0,85	2,42	0,78	2,23
0,37	0,71	2,07	0,85	2,44	0,78	2,27
0,41	0,71	2,08	0,85	2,46	0,78	2,27
0,45	0,71	2,08	0,85	2,47	0,78	2,27
1,00	0,71	2,08	0,85	2,47	0,78	2,27

Таблица 2.9 – Моделирование движения жидкостей в тупиковых горизонтальных капиллярах. Жидкость - спирт

Время, сек	Глубина проникновения жидкости, мм					
	Сталь		Стекло		Эпоксидный материал	
	900 мкм	300 мкм	900 мкм	300 мкм	900 мкм	300 мкм
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,04	0,68	1,44	0,85	1,69	0,77	1,58
0,08	0,68	1,72	0,85	2,06	0,77	1,91
0,12	0,68	1,85	0,85	2,25	0,77	2,06
0,16	0,68	1,92	0,85	2,40	0,77	2,15
0,20	0,68	1,96	0,85	2,41	0,77	2,20
0,25	0,68	1,97	0,85	2,45	0,77	2,23
0,29	0,68	1,98	0,85	2,47	0,77	2,25
0,33	0,68	1,99	0,85	2,48	0,77	2,26
0,37	0,68	2,00	0,85	2,49	0,77	2,26
0,41	0,68	2,00	0,85	2,49	0,77	2,26
0,45	0,68	2,00	0,85	2,49	0,77	2,26
1,00	0,68	2,00	0,85	2,49	0,77	2,26

На рисунке 2.21 представлен график зависимости процента заполнения жидкостью П-образных капилляров, образованных в стали, стекле и эпоксидном материале от ширины этих дефектов. 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 размера капилляра, процент заполнения жидкостью увеличивается, рисунки 2.21 - 2.22. Результаты моделирования для капилляров с размерами соответствующими II классу чувствительности капиллярного контроля представлены в статье Лобановой И.С., Мещерякова В.А., Калиниченко А.Н. [74]. В данной работе исследовалась зависимость глубины проникновения жидкости в тупиковые капилляры шириной 5 мкм и глубинами 10, 7, 5 и 3 мм. Из графика, показанного на рисунке 2.10 видно, что глубина проникновения жидкости в тупиковые капилляры по II классу чувствительности составляет около 10 %.

На рисунке 2.21 показано, что глубина проникновения спирта в капилляры из стекла немного больше, чем в капилляры из стали и эпоксидного материала. График зависимости процента заполнения капилляров керосином получился схожим.

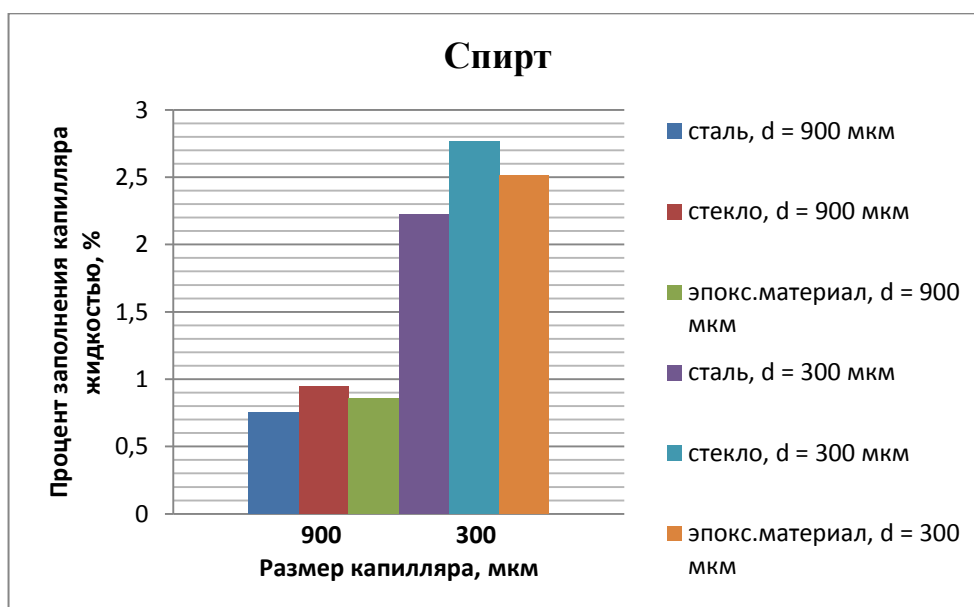


Рисунок 2.21 - Зависимость глубины заполнения капилляров керосином от времени с учетом их ширины

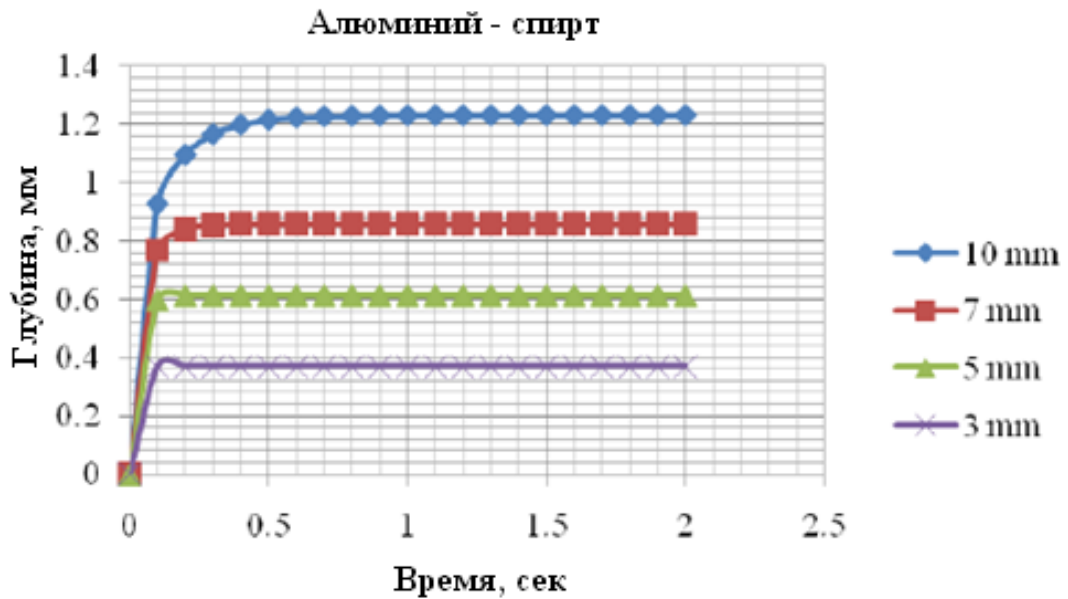


Рисунок 2.22 – Зависимость глубины проникновения спирта в капилляры, соответствующие II классу чувствительности, из алюминия

На рисунке 2.23 показаны модельные зависимости глубины проникновения спирта от времени в тупиковых капиллярах с поперечным размером 900 мкм и 300 мкм для выбранных материалов и жидкостей с учетом размера капилляров. Зависимости глубины проникновения керосина от времени получились схожими (рисунок 2.24).

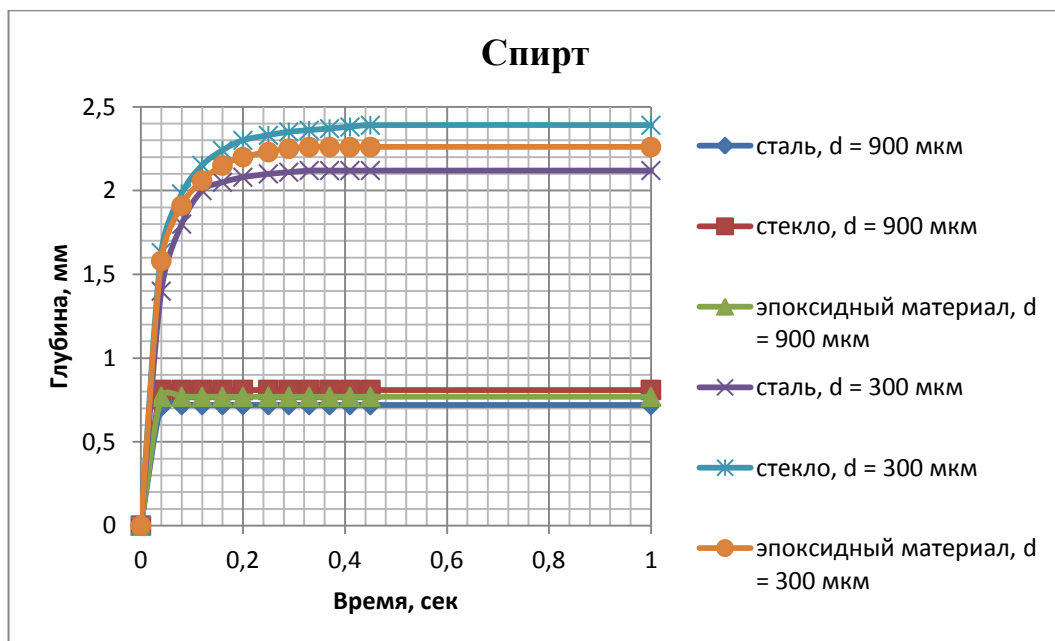


Рисунок 2.23 – Моделирование движения керосина в вертикальных капиллярах, выполненных из стали, стекла и эпоксидного материала

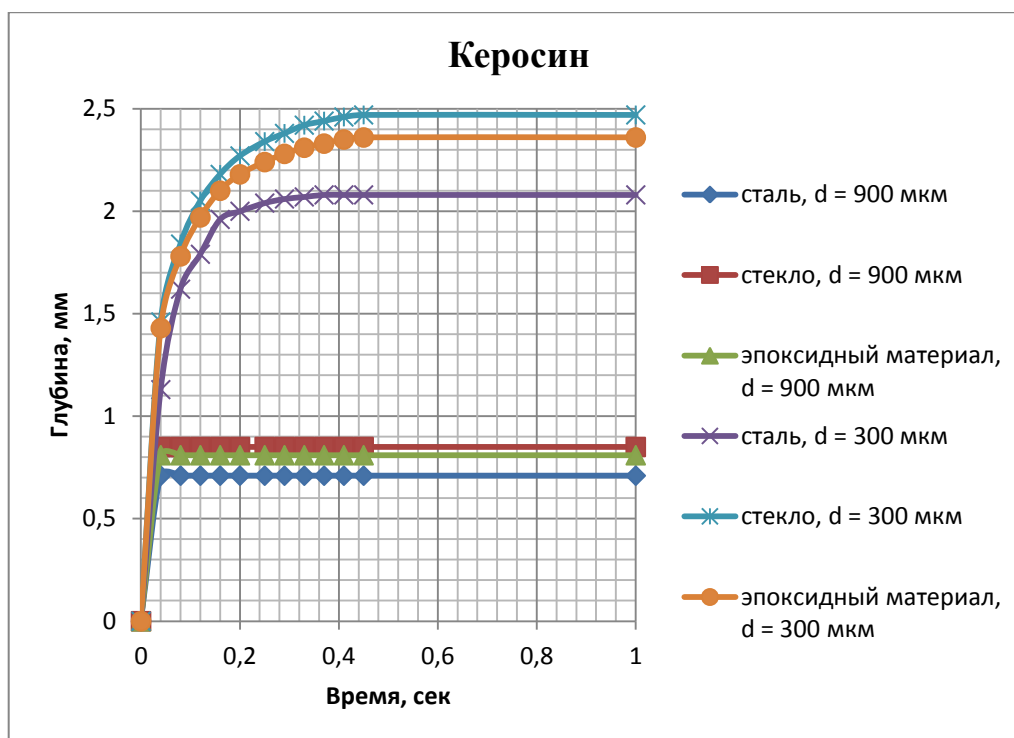


Рисунок 2.24 – Зависимость глубины проникновения керосина от времени в вертикальные капилляры

Из графиков моделирования процесса движения жидкостей видно, что в капиллярах из эпоксидного материала жидкости текут не хуже, чем в стали, что позволит говорить о возможности использования эпоксидного материала в качестве материала образца.

2.4. Натурные эксперименты

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. Движение жидкостей в таких капиллярах легко заметно, т.к. трубочки прозрачны. На стеклянные капилляры с размерами 300 мкм и 900 мкм, соответственно, наносились деления с шагом 10 мм, как показано на рисунке 2.25. Капилляры фиксировали в зажимном устройстве под углами 0° и 90° к

горизонтали. Время, за которое жидкости, спирт и керосин, проникали на определенную глубину, фиксировалось с помощью секундомера. Эксперимент повторялся 10 раз для каждого размера капилляра, и определялось среднее значение времени заполнения.

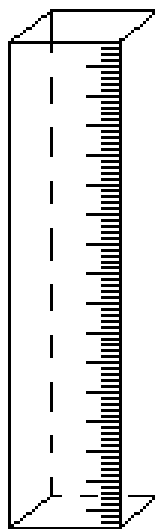


Рисунок 2.25 - Стекло́нный капилля́р с нанесенной разметкой

В таблице 2.10 представлены результаты эксперимента по определению глубины проникновения жидкостей в капиллярах от времени.

Таблица 2.10 – Экспериментальные значения времени заполнения жидкостями сквозных капилляров

Глубина капилляра, мм	Время заполнения капилляра жидкостью, сек							
	Жидкость - спирт				Жидкость - керосин			
	вертикальный		горизонтальный		вертикальный		горизонтальный	
	900 мкм	300 мкм	900 мкм	300 мкм	900 мкм	300 мкм	900 мкм	300 мкм
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10,0	0,6	1,4	0,5	1,2	0,6	1,2	0,9	1,2
20,0	1,2	2,1	0,9	2,3	1,1	2,4	1,3	2,4
30,0	1,7	2,8	1,2	3,3	1,9	4,3	1,7	4,0
40,0	2,4	3,6	1,5	4,0	2,2	5,5	2,0	5,2
50,0	2,6	4,3	1,9	5,0	2,6	6,9	2,4	6,7
60,0	2,8	5,2	2,3	6,2	3,0	8,2	2,9	8,3
70,0	3,3	6,2	2,9	7,0	3,5	9,2	3,5	9,2
80,0	3,6	7,0	3,5	7,7	4,2	10,1	3,9	10,2
90,0	4,0	8,0	4,0	8,4	4,8	11,3	4,3	11,3

Эксперимент по определению глубин проникновения жидкостей на стали и эпоксидном материале не был выполнен, т.к. визуально движение жидкостей в таких капиллярах не заметно [91].

2.5. Обсуждение результатов

На рисунках 2.26 – 2.27 показано сравнение результатов заполнения жидкостями щелевидных сквозных капилляров с шириной 900 мкм и 300 мкм, полученных при математическом моделировании и в ходе эксперимента.

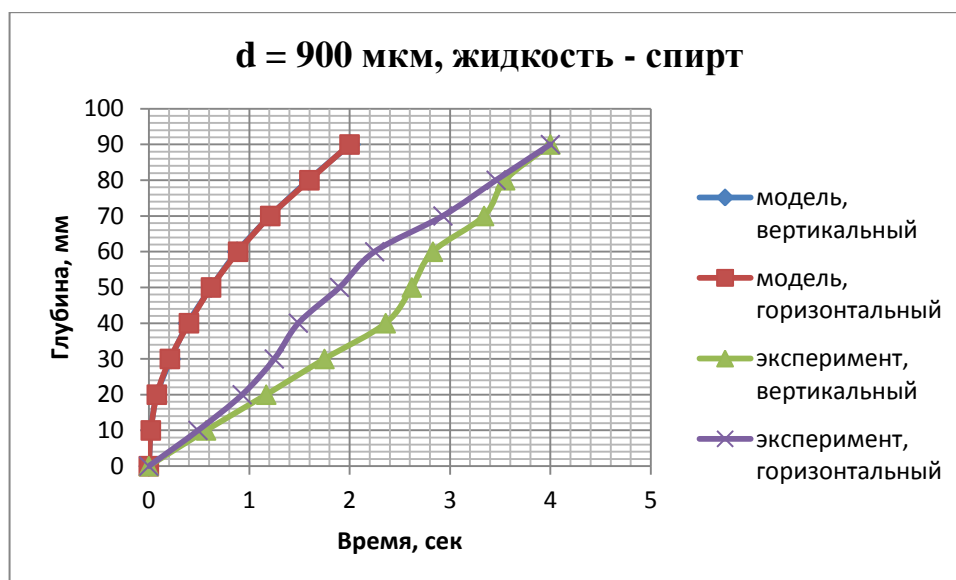


Рисунок 2.26 – Зависимости глубины проникновения спирта от времени в стеклянные капилляры с размером 900 мкм, полученные экспериментально и с помощью программного комплекса

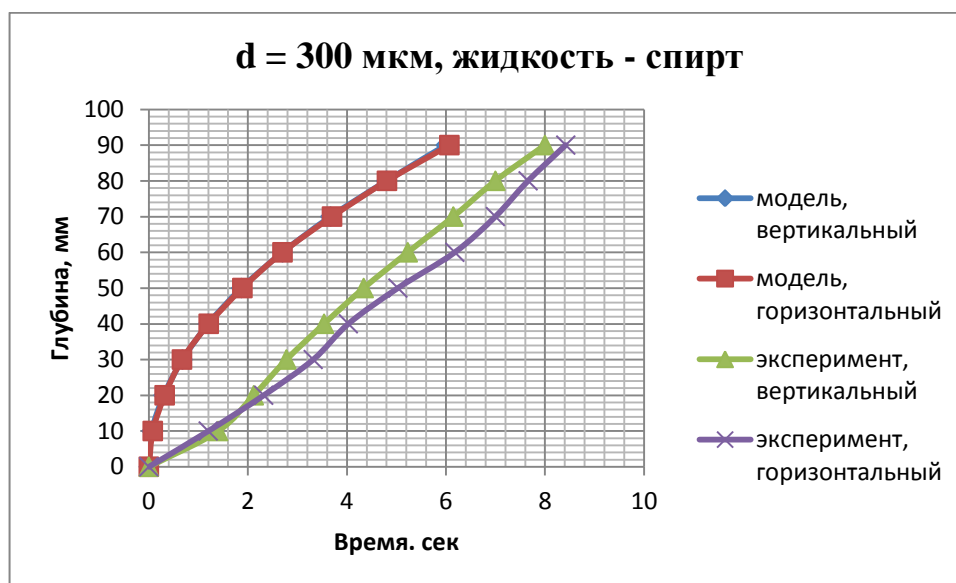


Рисунок 2.27 – Зависимости глубины проникновения спирта от времени в стеклянные капилляры с размером 300 мкм, полученные экспериментально и с помощью программного комплекса

Аналогичные зависимости были получены при сравнении результатов, полученных в ходе моделирования и эксперимента, с другой жидкостью – керосином, как показано на рисунках 2.28 – 2.29.

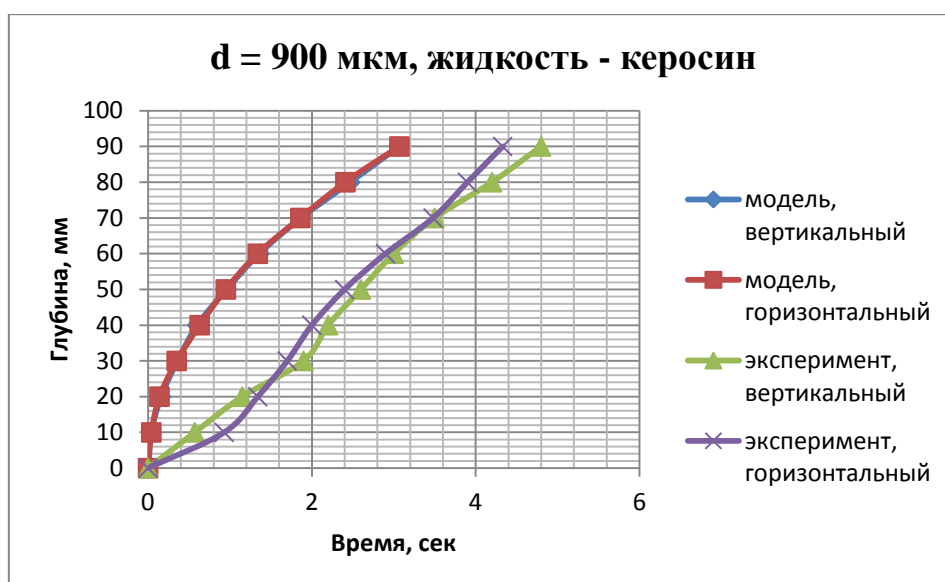


Рисунок 2.28 - Зависимости глубины проникновения керосина от времени в сквозные стеклянные капилляры с размером 900 мкм, полученные экспериментально и с помощью программного комплекса

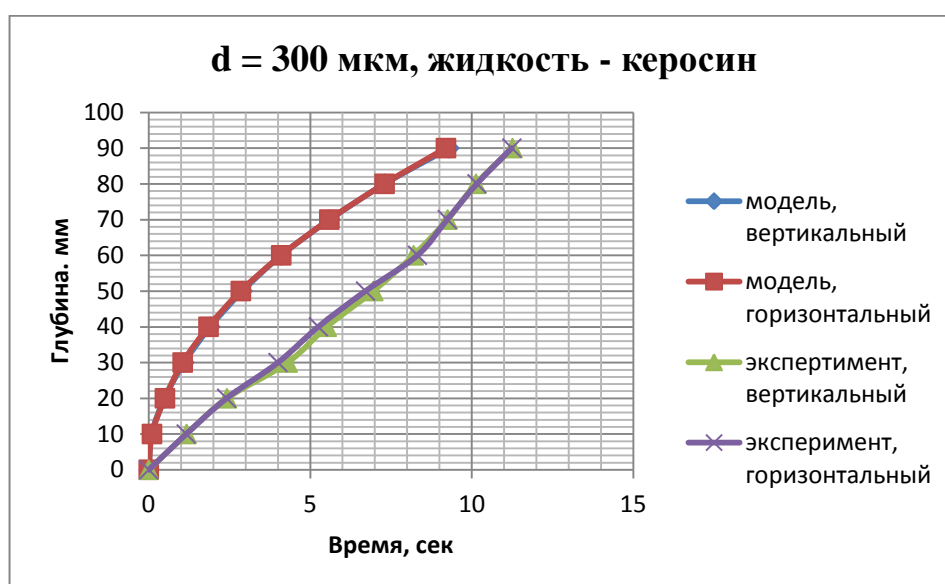


Рисунок 2.29- Зависимости глубины проникновения керосина от времени в сквозные стеклянные капилляры с размером 300 мкм, полученные экспериментально и с помощью программного комплекса

Установлено, что при моделировании процессов заполнения жидкостями сквозных капилляров, ориентированных под углами 90° и 0° относительно горизонтали, скорости движения совпадают. Экспериментальные значения зависимостей глубины проникновения жидкостей от времени, при горизонтальной и вертикальной ориентации капилляров, тоже близки.

Из графиков, представленных на рисунке 2.26 - 2.29, видно, что с увеличением размера капилляра уменьшается время прохождения жидкостью очередной отметки, т.е. увеличивается скорость движения жидкости в капилляре.

Расхождение результатов модельных экспериментов 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 в капилляры.

До настоящего времени не была установлена теоретическая зависимость $l = l(t)$, позволяющая рассчитать кинетику впитывания в любых капиллярах на всех его стадиях, которая с высокой точностью совпадала бы с экспериментальными данными [90 - 91].

При заполнении жидкостью полостей реальных трещин вследствие наличия в них различных отклонений от плоскопараллельности стенок и неодновременного касания жидкостью устья трещины могут образовываться поверхности сложной формы, что заметно увеличивает время проникновения жидкости в капилляр, и соответственно, уменьшает скорость проникновения жидкости в капилляры (рисунок 2.30) [92 - 94].

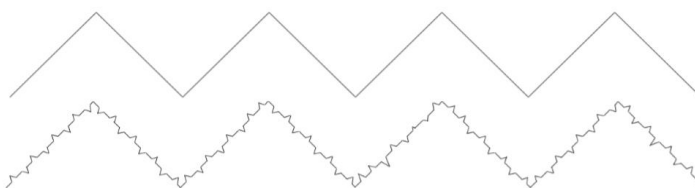


Рисунок 2.30 - Схематическое изображение модельной шероховатой поверхности: верхний профиль – наблюдаемая шероховатость без учета микро- и нанонеоднородностей, нижний профиль – условное изображение истинной структуры шероховатой поверхности с учетом микро и нано-рельефа [95]

Однако приближение модели движения жидкости к реальным условиям является неотвратимым процессом. Поэтому 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, построенной на теории множеств. Представляя кривую отрезками прямой, каждый из которых получен из единичной меры путем выбора ее третьей части в бесконечном итерационном процессе, что позволяет выстроить метрику для измерения длины. В конечном итоге получается кривая, для которой отсутствует операция дифференцирования в любой точке [96 - 97].

При учете фрактальной топологии поверхности капилляра, даже в проекции на ее одномерный вариант, можно отметить значительное увеличение длины пути капиллярного движения жидкости в приповерхностном слое. Как показано на рисунках 2.31 – 2.33 [98 - 100], рельеф поверхности достаточно сложен, следовательно, это уже не плоскость, а объем и фрактальная поверхность [101].

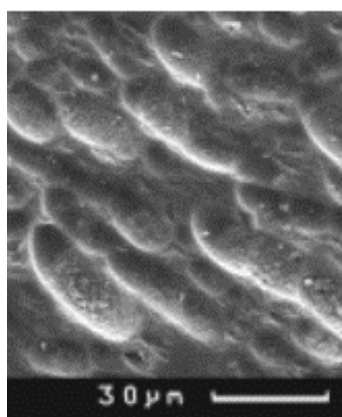


Рисунок 2.31 - Дефекты поверхности кварцевого стекла [98].

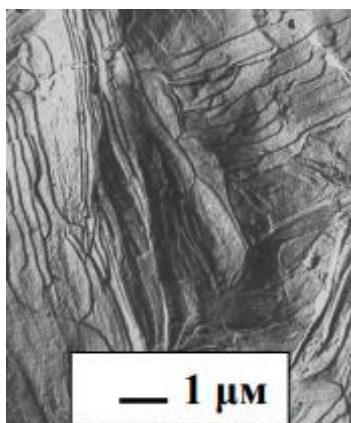


Рисунок 2.32 - Микрофотография полиэтилена [99].

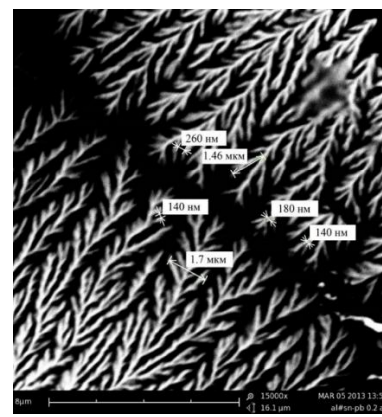


Рисунок 2.33 - Фотография границы подложки алюминия, смачиваемой расплавами Sn - Pb [100].

Для определения меры фрактальной размерности применяется понятие топологической размерности [101]. Топологическая размерность – число независимых координат, представленных следующим образом: 1 - линия, 2 - квадрат, 3 - куб. В теорию фракталов входят понятия индуктивной и комбинаторной размерности, основанные на теории множеств. Пустому множеству приписывается размерность – 1 (нет объекта), а любое конечное множество действительных чисел имеет нулевую размерность, что соответствует геометрической фигуре - линии. Индуктивная размерность равная 1 означает, что в окрестности каждой точки можно построить окрестность с размерностью 0.

Индуктивная размерность $N+1$ означает, что в каждой окрестности точки множества можно построить окрестность размерностью N . Этот подход позволяет вводить понятие дробной размерности, когда кривая линия уже не одномерна, но еще и не плоскость [102].

Общепринятое понятие размерности объекта есть показатель степени, задающий способ определения размера его внутренней области (каков закон роста его внутренней области).

Фрактальная размерность определяется следующим образом (2.21):

$$d_f = \lim_{\Delta h \rightarrow 0} \frac{\ln N(\Delta h)}{\ln \Delta h}, \quad (2.21)$$

где Δh – отрезок оси h , $N(\Delta h)$ – число прямоугольников размером $\Delta R/\Delta h$ необходимых для покрытия выбранного отрезка оси подобными прямоугольниками [103].

Фрактальная размерность триадной кривой Коха, например, представленной на рисунке 2.34 и вычисленная по этой формуле, равна $d_f = 1.26$, винеровского процесса - $d_f = 1.5$. Зная фрактальную размерность объекта, можно вычислить площадь поверхности или длину пути. Длина пути вычисляется по формуле 2.22:

$$L = \delta^{1-d_f}, \quad (2.22)$$

где δ – мера.

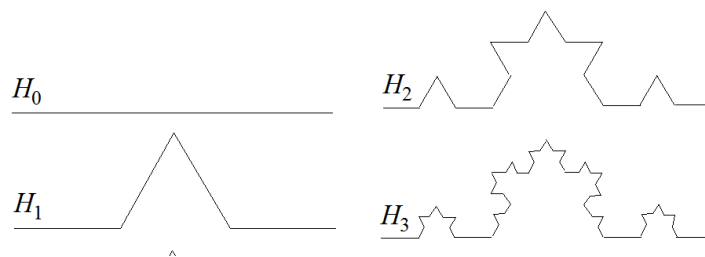


Рисунок 2.34 - Триадная кривая Коха

Для определения меры необходимо исследовать кривую, найти самоподобный элемент, с помощью которого можно более точно описать кривую. Мера для триадной кривой Коха H_1 представленной на рисунке 2.34, равна $1/3$. Следовательно, длина кривой $L=1,33$ и длина капилляра, представленная с помощью такого фрактального элемента, увеличится на этот коэффициент. Если в

качестве меры использовать самоподобный элемент кривой Коха H_2 , то мера будет равна $1/3 \times 1/3$ и длина кривой будет еще больше. Этот процесс безграничен. В абстрактном представлении, длина кривой будет стремиться к бесконечности (как длина береговой линии Норвегии изрезанной фиордами). В отличие от абстрактных (математических объектов), реальным объектам природы присущ минимальный масштаб, это связано с его структурой (молекулярной, атомной и пр.). Этот масштаб является границей для генерации самоподобных мер.

Параметр шероховатости поверхности, приведенный в литературе по капиллярному движению жидкости, не решает проблемы расхождения экспериментальных и теоретических значений времени заполнения капилляров. Решение этой проблемы надо искать в структуре поверхности. Сравнение экспериментальных и теоретических данных по времени заполнения капилляров, позволяет определить фрактальную размерность поверхности капилляра.

Предложено использовать меру фрактальной поверхности размерности $1/3$, т.е. длина стеклянного капилляра, из-за рельефа поверхности, увеличится на коэффициент 1,33.

В таблицах 2.11 - 2.14 представлены результаты компьютерного моделирования движения жидкостей с учетом увеличения длины пути, пройденного жидкостью.

Таблица 2.11 - Сравнение результатов эксперимента и моделирования движения жидкости в сквозных вертикальных капиллярах. Жидкость – спирт

Глубина капилляра, мм	Время заполнения капилляра жидкостью, сек					
	Модель		Эксперимент		Модель, с учетом фрактальной размерности 1/3	
	900 мкм	300 мкм	900 мкм	300 мкм	900 мкм	300 мкм
0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10,0	0,02	0,06	0,60	1,40	0,04	0,16
20,0	0,08	0,30	1,20	2,10	0,17	0,52
30,0	0,22	0,68	1,70	2,80	0,38	1,16
40,0	0,39	1,20	2,40	3,60	0,70	2,12
50,0	0,62	1,87	2,60	4,30	1,08	3,32
60,0	0,88	2,70	2,80	5,20	1,58	4,75
70,0	1,21	3,67	3,30	6,20	2,16	6,47
80,0	1,59	4,80	3,60	7,00	2,83	8,47
90,0	2,01	6,00	4,00	8,00	3,58	10,71

Таблица 2.12 - Сравнение результатов эксперимента и моделирования движения жидкости в сквозных горизонтальных капиллярах. Жидкость – спирт

Глубина капилляра, мм	Время заполнения капилляра жидкостью, сек					
	Модель		Эксперимент		Модель, с учетом фрактальной размерности 1/3	
	900 мкм	300 мкм	900 мкм	300 мкм	900 мкм	300 мкм
0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10,0	0,02	0,08	0,50	1,20	0,03	0,12
20,0	0,08	0,32	0,90	2,30	0,16	0,52
30,0	0,21	0,67	1,20	3,30	0,37	1,16
40,0	0,40	1,21	1,50	4,00	0,70	2,12
50,0	0,62	1,89	1,90	5,00	1,08	3,13
60,0	0,89	2,70	2,30	6,20	1,57	4,00
70,0	1,21	3,70	2,90	7,00	2,15	5,20
80,0	1,60	4,81	3,50	7,70	2,80	7,43
90,0	2,00	6,07	4,00	8,40	3,55	9,70

Таблица 2.13 - Сравнение результатов эксперимента и моделирования движения жидкости в сквозных вертикальных капиллярах. Жидкость – керосин

Глубина капилляра, мм	Время заполнения капилляра жидкостью, сек					
	Модель		Эксперимент		Модель, с учетом фрактальной размерности 1/3	
	900 мкм	300 мкм	900 мкм	300 мкм	900 мкм	300 мкм
0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10,0	0,04	0,09	0,60	1,20	0,06	0,17
20,0	0,16	0,49	1,10	2,40	0,26	0,80
30,0	0,36	1,10	1,90	4,30	0,58	1,81
40,0	0,60	1,90	2,20	5,50	1,08	3,23
50,0	0,96	2,90	2,60	6,90	1,68	5,04
60,0	1,36	4,10	3,00	8,20	2,42	6,00
70,0	1,87	5,60	3,50	9,20	3,30	8,00
80,0	2,47	7,30	4,20	10,10	4,32	10,00
90,0	3,07	9,30	4,80	11,30	5,48	12,00

Таблица 2.14 - Сравнение результатов эксперимента и моделирования движения жидкости в сквозных горизонтальных капиллярах. Жидкость – керосин

Глубина капилляра, мм	Время заполнения капилляра жидкостью, сек					
	Модель		Эксперимент		Модель, с учетом фрактальной размерности 1/3	
	900 мкм	300 мкм	900 мкм	300 мкм	900 мкм	300 мкм
0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10,0	0,04	0,10	0,90	1,20	0,05	0,22
20,0	0,14	0,50	1,30	2,40	0,25	0,80
30,0	0,35	1,05	1,70	4,00	0,58	1,76
40,0	0,63	1,85	2,00	5,20	1,07	3,23
50,0	0,95	2,85	2,40	6,70	1,65	4,50
60,0	1,34	4,10	2,90	8,30	2,40	6,00
70,0	1,86	5,59	3,50	9,20	3,00	8,00
80,0	2,41	7,30	3,90	10,20	3,50	10,00
90,0	3,07	9,20	4,30	11,30	4,00	12,00

Графическая интерпретация результатов представлена на рисунках 2.35 - 2.42.

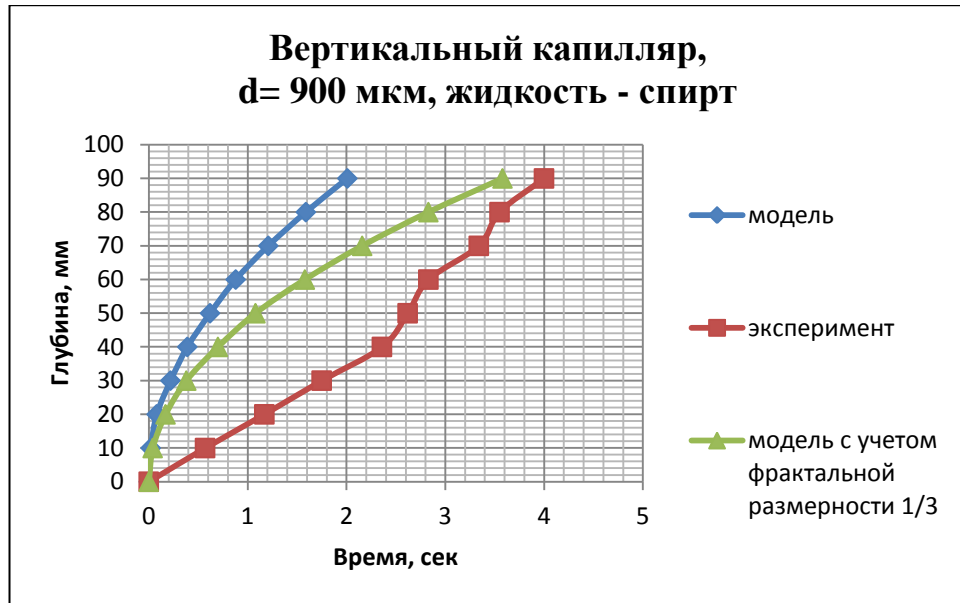


Рисунок 2.35 – Зависимость глубины проникновения спирта в вертикальные капилляры с размером $d = 900$ мкм от времени с учетом фрактальной размерности равной $1/3$

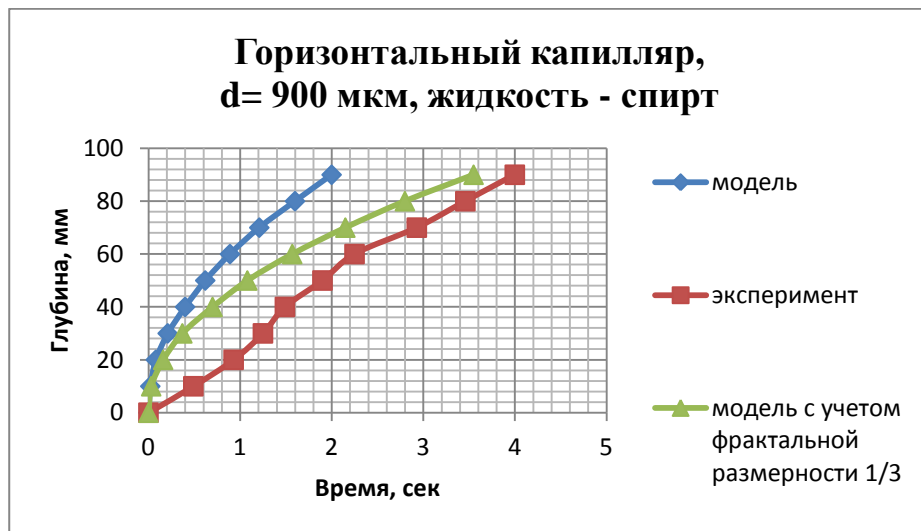


Рисунок 2.36 – Зависимость глубины проникновения спирта в горизонтальные капилляры с размером $d = 900$ мкм от времени с учетом фрактальной размерности равной $1/3$

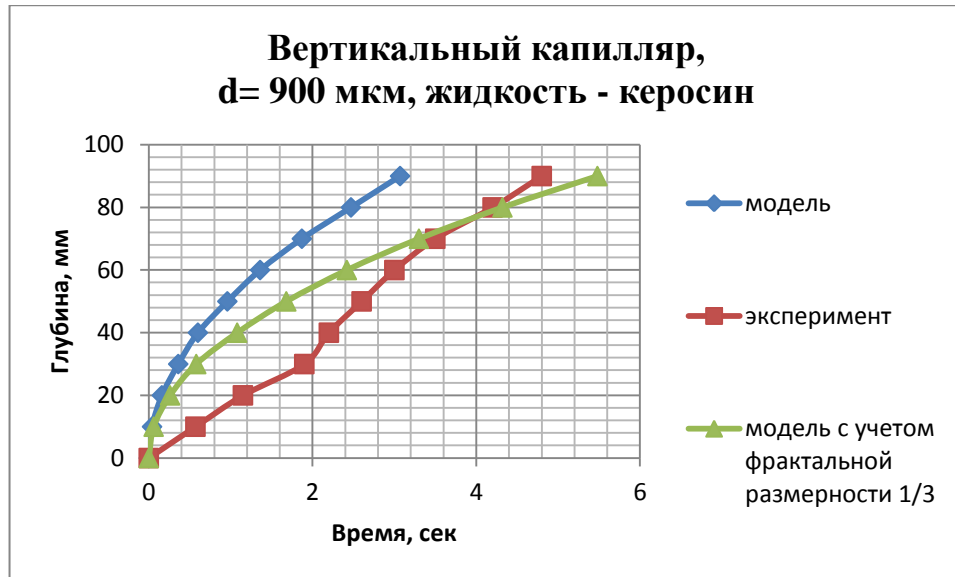


Рисунок 2.37 - Зависимость глубины проникновения керосина в вертикальные капилляры с размером $d = 900$ мкм от времени с учетом фрактальной размерности равной $1/3$

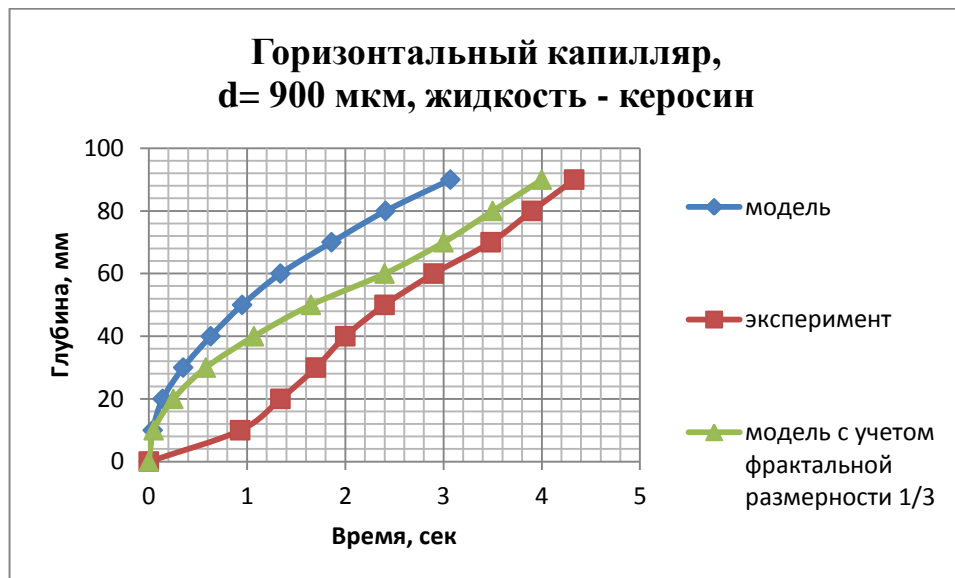


Рисунок 2.38 - Зависимость глубины проникновения керосина в горизонтальные капилляры с размером $d = 900$ мкм от времени с учетом фрактальной размерности равной $1/3$

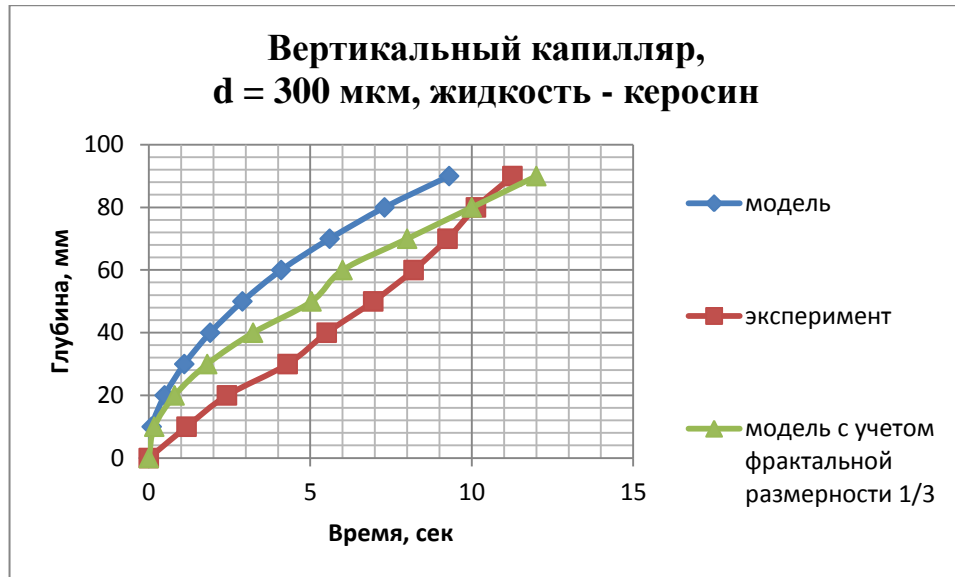


Рисунок 2.39 - Зависимость глубины проникновения керосина в вертикальные капилляры $d = 300$ мкм от времени с учетом фрактальной размерности равной $1/3$

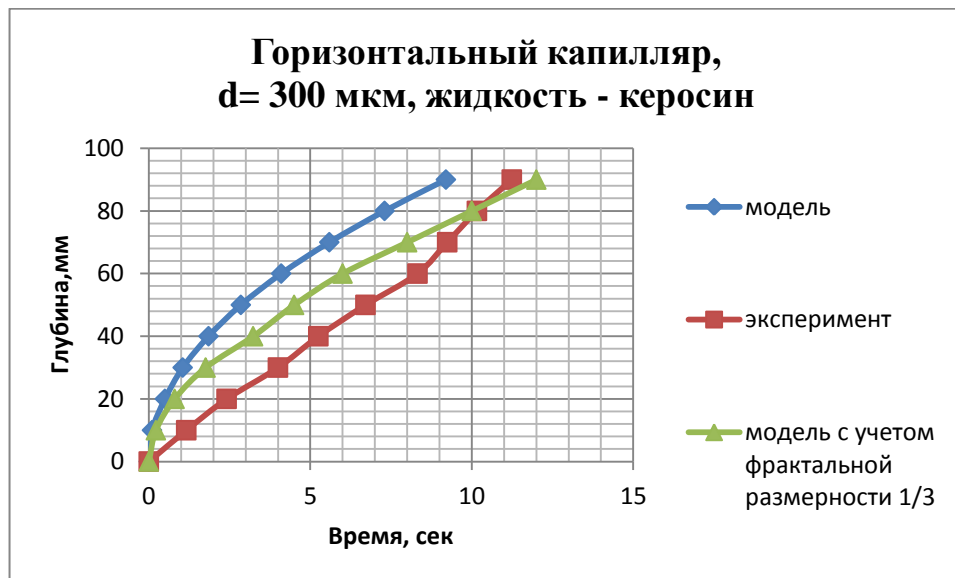


Рисунок 2.40 - Зависимость глубины проникновения жидкости в горизонтальные капилляры с размером $d = 300$ мкм от времени с учетом фрактальной размерности равной $1/3$

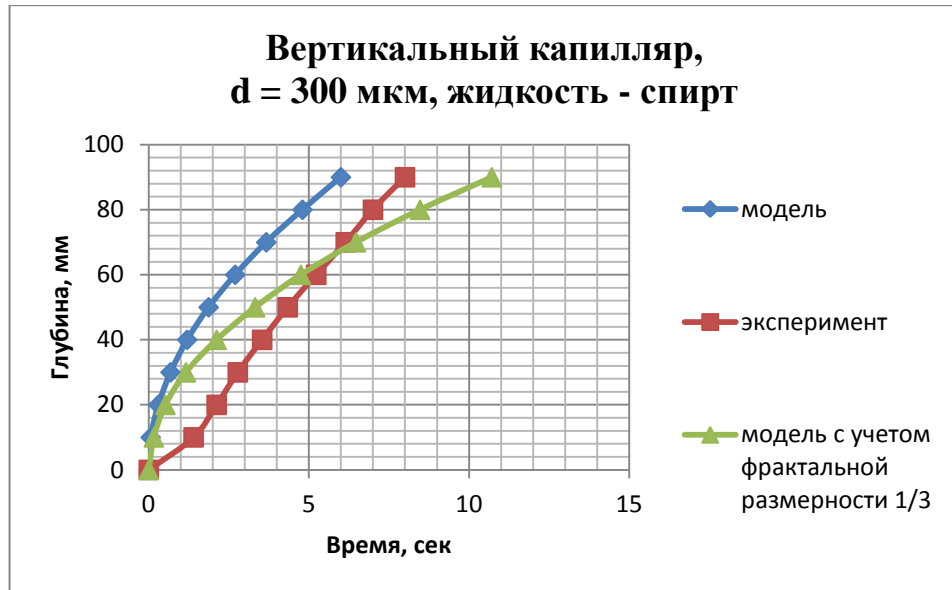


Рисунок 2.41 - Зависимость глубины проникновения спирта в вертикальные капилляры с размером $d = 900$ мкм от времени с учетом фрактальной размерности равной $1/3$

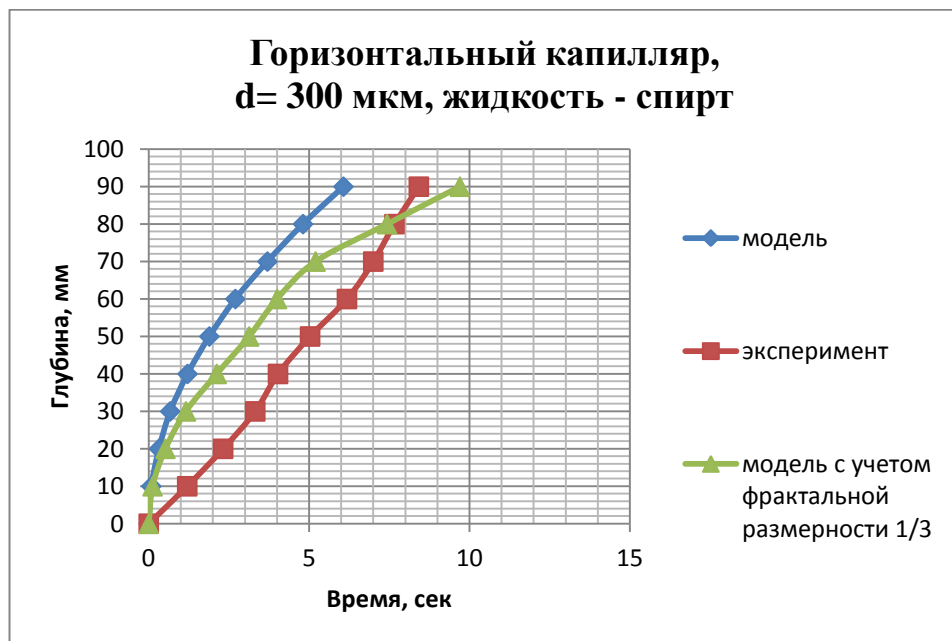


Рисунок 2.42 - Зависимость глубины проникновения жидкости в горизонтальные капилляры с размером $d = 300$ мкм от времени с учетом фрактальной размерности равной $1/3$

Применение фрактальной размерности позволило приблизить теоретическую зависимость между глубиной проникновения жидкости и временем заполнения капилляров этой жидкостью. Таким образом, работоспособность применяемой математической модели была подтверждена

экспериментально на стеклянных капиллярах, следовательно, можно утверждать, что движение жидкостей в других материалах будет схожим.

2.6. Выводы по главе 2

Представлена математическая модель, описывающая движение жидкостей в щелевидных капиллярах.

Предложен 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, а также угла наклона капилляра относительно горизонтали.

Построены математические модели движения жидкостей, таких как спирт и керосин, в капиллярах их стекла, стали и эпоксидного материала. Получено, что движения жидкостей в таких материалах схожи. Соответственно, существует возможность применения эпоксидного материала в качестве материала испытательных образцов.

Скорости движения зависят от параметров самой жидкости, размера капилляра и материала, шероховатости поверхности. От угла наклона капилляра относительно горизонтали глубина проникновения жидкости почти не зависит (разница только в сотых долях миллиметра).

Установлено, что спирт и керосин проникают быстрее в капилляры из неметаллических материалов, чем в металлические капилляры. Данный факт может привести к ускорению технологического процесса капиллярного контроля неметаллических материалов.

Обосновано расхождение результатов моделирования процесса движения жидкостей в капиллярах с результатами, полученными в ходе эксперимента. Отличие результатов лежит в структуре самой поверхности, т.к. образуются рельефы сложной формы, что заметно увеличивает время проникновения жидкостей в капилляры. Предложено использовать меру фрактальной

размерности $1/3$. С учетом геометрии поверхности, расхождение результатов моделирования с экспериментальными данными, в среднем составило около 0,5 секунд.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ОБРАЗЦОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ СРЕДСТВ КАПИЛЛЯРНОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ИЗ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Как было описано выше, образцы для испытаний средств капиллярного неразрушающего контроля можно классифицировать на естественные и комбинированные образцы, образцы со щелями, имитирующими трещины и полученные при азотировании, вибронагрузении или изгибе. Наибольшее распространение получили стальные образцы, полученные методом азотирования. Такие образцы характеризуются высокой устойчивостью против коррозии и стабильностью размеров трещин в течение длительного времени. Трещины в таких образцах получают, подвергая их растяжению или изгибу, термической обработке или деформированию. Однако недостатком такого метода является то, что трещины в азотированном слое возникают в непредсказуемых местах с неопределенной плотностью распределения на единицу поверхности образца. Число дефектов и расстояние между ними не определено. Также исключена возможность изготовления образца, содержащего ряд дефектов с определенной зависимостью ширины и глубины от величины прилагаемой нагрузки, как описано в работах [104 - 106].

Недостатками таких способов изготовления является то, что изгиб образца в процессе нагружения приводит к его искривлению вследствие некоторой остаточной деформации, что в свою очередь приводит к произвольному изменению ширины раскрытия трещин по длине. Таким образом, изготовление образцов для испытаний средств капиллярного неразрушающего контроля является актуальной задачей.

В последнее время неметаллические материалы все чаще применяют при изготовлении ответственных деталей и узлов, т.к. по прочностным характеристикам они схожи с металлами, но имеют меньшую массу. В качестве основы или матрицы многих полимерных материалов используют эпоксидную

смолу. А т.к. оценку качества и работоспособность дефектоскопических материалов желательно проводит на образцах выполненных из того же материала, что и само изделие, то было бы целесообразно изготовить образцы из эпоксидного материала.

3.1. Способ изготовления контрольных образцов

Предложен способ изготовления образцов для испытаний средств капиллярного неразрушающего контроля 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 3.1, прорезаются пазы 2 одинаковой глубины перпендикулярно основанию формы 1. Пазы необходимы для размещения в них полоски фольги 4, как показано на рисунке 3.2, предварительно покрытой тонким слоем эпоксидного клея 5. Форма 1 перед заливкой эпоксидного раствора смазывается изнутри жиром (например, техническим вазелином) с целью свободного отделения впоследствии затвердевшего эпоксидного бруска 8, как показано на рисунке 3.3 от формы 1.

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 – остается не залитой. После полного затвердевания эпоксидного клея полученный брусок 8 извлекается из формы, как показано на рисунке 3.3.

В первую очередь производится механическая обработка (шлифовка, полировка) поверхности 9, из которой выходит не залитая часть полоски фольги 4. Так как обработанный образец является практически прозрачным, то существует возможность контроля ширины h' оставшейся нижней части полоски

фольги, согласно рисунка 3.4, которая, в конечном итоге, будет определять глубину h'' дефекта.

После получения требуемых параметров (необходимой шероховатости поверхности 9, как показано на рисунке 3.4, ширины h' остающейся нижней части 6 полоски фольги 4), эпоксидный брусок помещают в ванночку и полностью заливают его раствором на основе хлорного железа. Травление осуществляется в течение 2 часов. В результате получается дефект с заданными параметрами длиной, шириной и глубиной, согласно рисунка 3.4.

Контроль ширины раскрытия t , как показано на рисунке 3.4, полученного дефекта производился с помощью измерительного металлографического микроскопа. Отличие полученного раскрытия дефекта t от реальной толщины применяемой полоски фольги 4 определялось погрешностью измерения микроскопа. Длина l получаемого дефекта была равна длине применяемой полоски фольги 4 и определялась длиной индикаторного следа после осуществления технологического процесса капиллярного контроля с применением набора дефектоскопических материалов Sherwin.

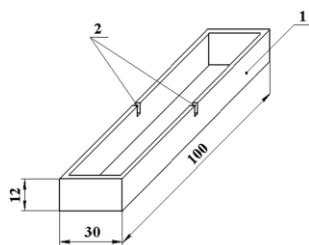


Рисунок 3.1 - Прямоугольная форма для изготовления контрольного образца

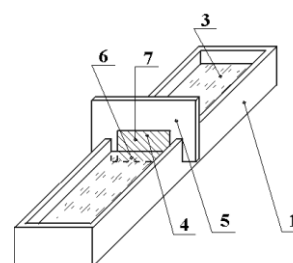


Рисунок 3.2 - Форма для контрольного образца, залитая эпоксидным клеем, с установленной полоской фольги, покрытой тонким слоем эпоксидного клея

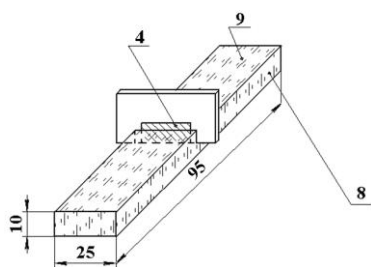


Рисунок 3.3 - Эпоксидный брусок после затвердевания

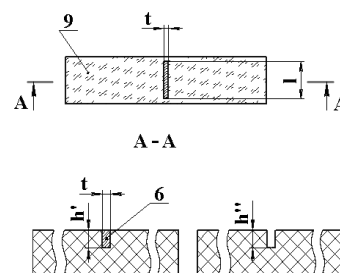


Рисунок 3.4 - Контрольный образец с шириной t , глубиной h' и длиной l до и после травления хлорным железом

Предложенный способ был осуществлен с применением эпоксидной смолы ЭД-6 (ЭД-20), отвердителя (полиэтиленполиамина), алюминиевой фольги толщиной 5 и 10 мкм, потали (имитатора сусального золота) толщиной около 1 мкм, каждая длиной 20 мм и шириной 5 мм. Аналогичным образом были изготовлены контрольные образцы с дефектами, имеющими ширину раскрытия 1 и 20 мкм (рисунки 3.5 - 3.6), как описано в [107 - 109].

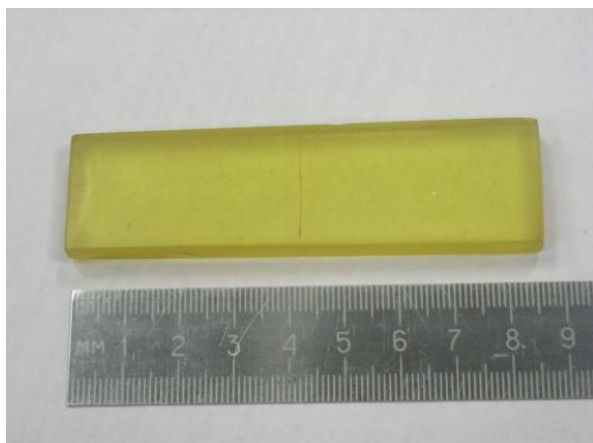


Рисунок 3.5 - Контрольный образец из эпоксидного клея

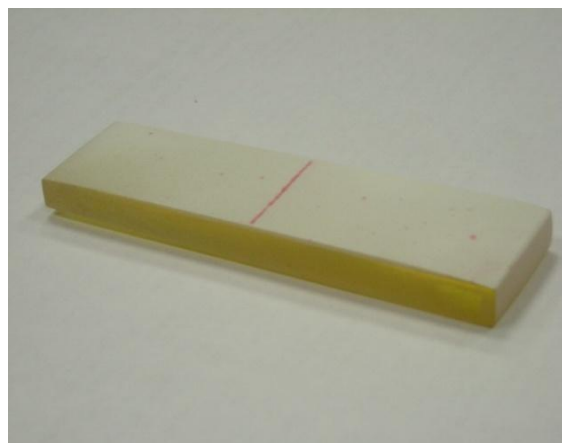


Рисунок 3.6 - Вид контрольного образца после контроля дефектоскопического материала «Sherwin»

Хорошей заменой потали, при изготовлении контрольных образцов таким способом, стали уже готовые пластины с осажденным на них тонким слоем металла. Толщина такого слоя около 1 мкм. На рисунке 3.7 L, H, T – габаритные размеры формы (высота, глубина и ширина соответственно), h, l, t – габаритные размеры пластины (высота, глубина и ширина соответственно), t' – ширина осажденного металла, как описано в статьях [110 - 111].

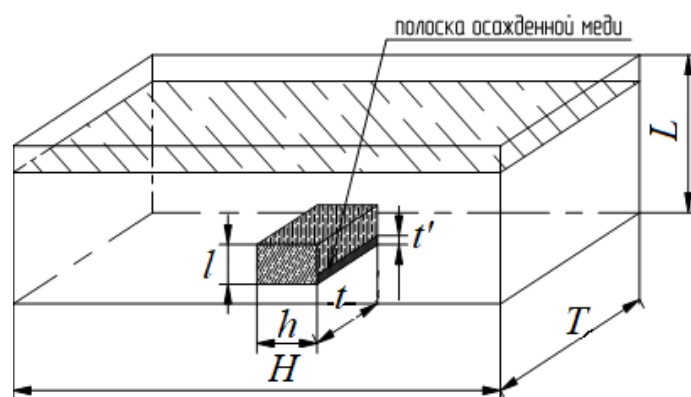


Рисунок 3.7 - Промежуточный этап изготовления контрольного образца из неметалла с использованием подготовительного бруска с нанесенной полоской меди

При изготовлении образцов таким способом возникают некоторые трудности, связанные с образованием пузырьков воздуха, образующихся при перемешивании эпоксидной смолы с отвердителем, которые в итоге ухудшают качество рабочей поверхности контрольного образца. Частично устранить пузырьки из эпоксидного клея можно путем вакуумирования, воздействием ультразвука или нагреванием. Получить более ощутимый эффект избавления от пузырьков на поверхности образца возможно при использовании донной поверхности в качестве рабочей. Первоначальные стадии изготовления в данном варианте ничем не отличаются от способа описанного выше. Однако полоски фольги необходимой толщины, как показано на рисунке 3.8, устанавливаются в подготовленную форму таким образом, чтобы сторона с фольгой касалась дна. Применяя рассмотренные выше приемы уменьшения количества пузырьков в объеме эпоксидного клея, добиваются подъема оставшихся пузырьков воздуха в верхний слой клея. При последующей обработке затвердевшего бруска произойдет окончательная ликвидация пузырьков, которые будут расположены в верхней части бруска.

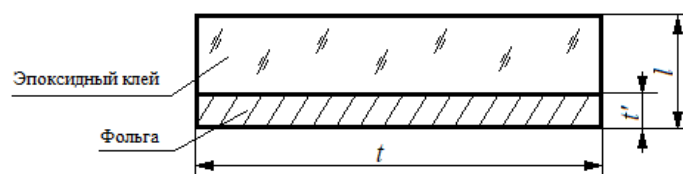


Рисунок 3.8 - Алюминиевая фольга, покрытая эпоксидным клеем
 t – ширина заготовки, l – высота заготовки, t' – ширина осажденного металла (фольги)

При проверке дефектоскопических материалов по каждому классу чувствительности необходимо использовать по два контрольных образца с трещинами одинакового характера и примерно равных размеров, в связи с тем, что с течением времени они теряют работоспособность [112 - 113].

Первый образец, его называют рабочим, применяют постоянно, а второй - арбитражный используют при неудовлетворительном выявлении трещин на рабочем образце. Таким образом, для достоверной работы капиллярным методом по трем (I, II, III) классам чувствительности необходимо иметь шесть контрольных образцов, так как в реальной действительности из производимых контрольных образцов выбирают, как правило, те, которые содержат одну трещину с раскрытием по определенному классу [114 - 117].

С помощью способа изготовления контрольных образцов из неметаллических материалов с заданными параметрами дефектов существует возможность реализации искусственных дефектов в виде трещин по трем (I, II, III) классам чувствительности на одном контрольном образце. Это становится возможным при использовании фольги разной толщины, соответствующей классам чувствительности капиллярного контроля.

Схема и внешний вид контрольного образца, изготовленного по данному варианту, приведен на рисунке 3.9 (а, б).



а) б)
Рисунок 3.9 - Универсальный контрольный образец
а) чертеж, б) фотография образца

Данный способ изготовления контрольных образцов, а далее и тест-панелей, позволяет получать как запертые трещины, так и рассекающие поверхность от одной грани до другой.

3.2. Тест-панели из неметаллического материала

Как известно, тест-панели предназначены для сравнения чувствительности двух пенетрантных систем, как представлено в работах [43 – 45, 59, 60, 117 - 119].

В соответствии со стандартными методиками использования пенетрантов [42], испытуемый пенетрант наносится на одну пластину, а референсный, принятый за образец, – на другую. При наличии в наборе дефектоскопических материалов взаимозаменяемых очистителей, проявителей и эмульгаторов процесс необходимо повторить для каждого их них, постоянно сравнивая полученную картину дефектов с картиной, полученной на другой пластине с помощью референсного набора дефектоскопических материалов.

Исследования по разработке контрольных образцов из неметаллических материалов, описанных в работах [109 - 116], позволяют реализовать тест-панель, которая содержит несколько трещин различных классов чувствительности.

Основные этапы изготовления образцов из эпоксидного материала были

приведены ранее. Однако при изготовлении тест-панелей есть некоторые технологические нюансы, требующие детального рассмотрения.

Суть производства заключается в следующем: в донной поверхности одноразовых форм, с размерами, определяющими габариты будущей тест-панели, делаются прорезы, в которые вставляются предварительно подготовленные полоски фольги или пластины осажденного металла, одинакового размера. Ширина фольги соответствует разным классам чувствительности капиллярного контроля. Затем они вставляются в пазы, как показано на рисунке 3.10. Длина пластины должна быть на 5-7 мм больше ширины формы [120 - 122].

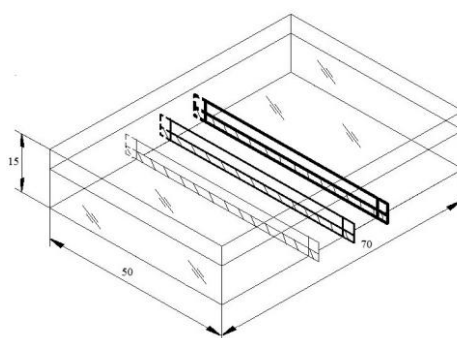


Рисунок 3.10 - Форма тест-панели, с размещенными в них полосками фольги

Далее технология изготовления совпадает с описанной выше технологией изготовления контрольных образцов. После затвердевания, заготовку вынимают из формы, обрабатывают до требуемых параметров глубины трещины и шероховатости поверхности, а остатки напыленного серебра, потали или фольги, вытравливают с помощью раствора хлорного железа.

В этом варианте изготовления, трещины выходят на торцы образца, что дает возможность контролировать и измерять глубину трещин. Финишную обработку рабочей поверхности бруска необходимо завершать абразивным материалом минимальной зернистости для обеспечения минимального фона рабочей поверхности при использовании тест-панели в дальнейшей работе. Завершающим этапом работы с образцом является создание канавки, разделяющей тест-панель на две симметричные части.

На рисунках 3.11 – 3.12 изображена тест-панель с дефектами, выходящим на торцы объекта.

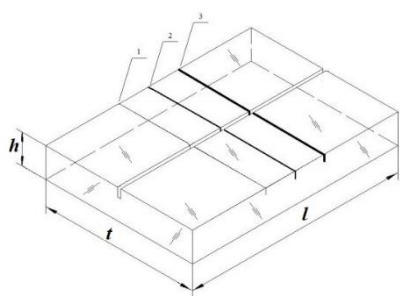
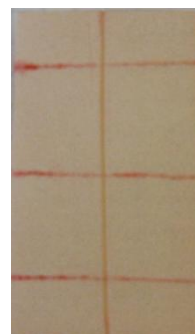


Рисунок 3.11 -
Неметаллическая тест-панель
с дефектами, выходящими на
торцы, соответствующими I,
II, III классам
чувствительности



а) б)

Рисунок 3.12 - Неметаллическая тест-панель с
нанесенными на нее дефектоскопическими
материалами
а) Вycotest, б) Sherwin

При обработке заготовки возникают такие недостатки как завал краев и кромок, что может привести к неравномерности ширины полосок, а в итоге и глубины трещин.

Выходящие на торцы панели дефекты могут приводить к завышенным результатам контроля, т.к. в отличие от реальных дефектов, имеющих запертый вид, воздух, находящийся в полостях дефектов может беспрепятственно выдавливаться жидкостью.

Существенно снизить неравномерность глубины трещин можно, если металлические полоски располагать, по возможности, дальше от краев заготовки. Так как полоски будут располагаться в центральной части заготовки, на значительном расстоянии от краев, то и ширина оставшейся части металлических полосок после обработки и вытравливания будет практически одинакова. На рисунке 3.13 показана тест-панель с запертыми дефектами.

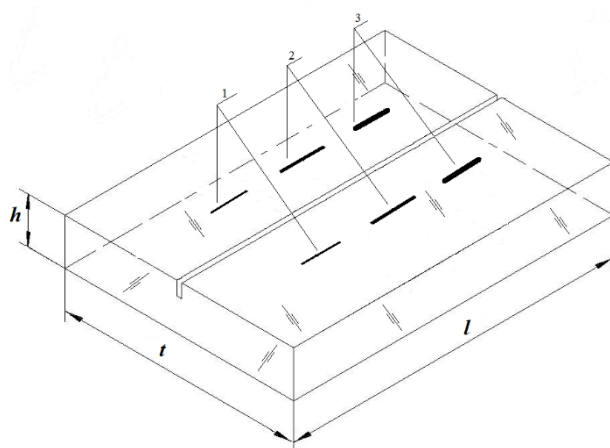


Рисунок 3.13 - Неметаллическая тест-панель с запертыми дефектами, соответствующими I, II, III классам чувствительности

Разрезание тест-панели пополам, как показано на рис. 3.12 - 3.13 позволяет оценивать способность наборов дефектоскопических материалов к обнаружению дефектов, а также сравнивать их между собой.

Другим преимуществом является то, что тест-панель может выполнять роль универсального контрольного образца, т.к. дефекты выполнены с нормированными параметрами по разным классам чувствительности [123 – 125].

3.3. Выводы по главе 3

Предложенный способ изготовления контрольных образцов и тест-панелей позволяет создавать образцы из неметаллического материала. Они просты в изготовлении и экономически выгодны. Дефекты получают 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.

Данный способ позволяет реализовать на одном образце, как единичный дефект, так и несколько, соответствующих разным классам чувствительности капиллярного контроля, что позволяет сократить количество используемых

контрольных образцов, которые требуются пользователю по разным классам чувствительности.

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 контрольных образцов «рабочий - арбитражный».

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ СРЕДСТВ КАПИЛЛЯРНОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Среди разнообразных задач, решаемых с применением образцов, пожалуй, наиболее важными являются определение работоспособности дефектоскопических материалов и оценка чувствительности процесса капиллярного контроля. Работоспособность материалов проверяют в начале каждой смены и при их замене, то есть при поступлении на участок контроля новой порции или новой партии материалов. Оценка работоспособности материалов проводят с учетом заданного уровня чувствительности процесса контроля. Как известно, чувствительность – один из основных показателей технической эффективности капиллярного контроля, характеризующей его способность обнаруживать дефекты, обычно трещины минимальных размеров. При выполнении экспериментов по оценке порога чувствительности капиллярного контроля вероятность выявления дефектов обычно принимают равной 0,9 при доверительной вероятности 0,95, как описано в работах Глазкова Ю.А. [126 - 127].

Из этого следует, что оценка порога чувствительности должна выполняться статистическим экспериментом с использованием набора деталей или образцов с дефектами, обычно трещинами, различных известных размеров, включая предельно малые. Эти детали должны подвергаться многократному контролю с фиксированием выявленных трещин. При оценке чувствительности должен определяться порог выявляющей способности, ее предел, который можно представить формулой 4.1:

$$C = \lim_{n \rightarrow a} C_n, P \quad (4.1)$$

В отличие от оценки чувствительности проверку работоспособности материалов проводят однократно с применением одного-двух образцов с трещинами. При этом на образце может быть одна или несколько трещин с раскрытием близким к порогу чувствительности контроля. Образец контролируют капиллярным методом с использованием испытываемых дефектоскопических материалов по принятой технологии. Работоспособность материалов оценивают по альтернативному признаку – выявлены или нет трещины на образце. Если они выявлены, то оптический и геометрический параметры образовавшегося индикаторного рисунка, обычно не определяют, а оценивают его качество визуально. При этом обращают внимание на полноту выявления трещин, на контраст рисунка (различие яркости и цвета его линий и фона), на его резкость, то есть на степень отчетливости контуров. Индикаторный рисунок сопоставляют с дефектограммой [127].

Размеры трещин измеряют при температуре 20 ± 5 °С. относительной влажности воздуха $58 \pm 20\%$, при отсутствии вибрации микроскопа и пониженном уровне шума в лаборатории. Измерения должен проводить оператор без патологических изменений органа зрения и остротой зрения каждого глаза не менее 0,9.

4.1. Метрологические характеристики

К метрологическим характеристикам контрольных образцов относят геометрические размеры дефекта, а именно глубину, длину и ширину трещины.

4.1.1. Определение ширины трещин

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 контуре. Измерения осуществляют на чистых образцах, т.е. до проведения на них технологии капиллярного контроля.

При аттестации образцов для проверки работоспособности дефектоскопических материалов достаточно проводить измерения в 3...5 точках, в средней части образца. Окончательные результаты измерений заносят в паспорт (свидетельство) на образец в следующем виде, как представлено в 4.2 – 4.3:

$$B \pm \Delta b, P \quad (4.2)$$

или

$$B, B_{\min}, B_{\max}, P \quad (4.3)$$

где B , B_{\min} , B_{\max} – соответственно средний, минимальный и максимальный результаты измерения ширины трещины, мкм; Δb – границы погрешности измерения, мкм; $P = 0,95$ – вероятность, с которой погрешность измерения находится в этих границах, как описано в статье Глазкова Ю.А. [127].

Рекомендуется, чтобы относительная погрешность измерений ширины трещины не превышала $\pm 20\%$.

Для проведения исследований были выбраны несколько контрольных образцов с единичной трещиной, изготовленные из металлического материала, полученные путем азотирования или изгиба, а также неметаллического материала, где дефекты образовывались способом вытравливанием, как описано в главе 3. Трещины на образцах соответствовали II и III классу чувствительности капиллярного контроля в соответствии с ГОСТ 18442-80 [40]. Ширину трещин измеряли на чистых образцах на микроскопе МС-50 с разрешающей способностью 1 мкм.

В таблице 4.1 представлены результаты статистической обработки результатов измерений ширины дефекта на металлических образцах, предназначенных для определения работоспособности дефектоскопических материалов. На рисунках 4.1. – 4.5 интерпретация представленных результатов.

Таблица 4.1 – Статистическая обработка результатов измерений для определения работоспособности дефектоскопических материалов на металлических контрольных образцах

Характеристика раскрытия трещин на образцах					
Номер образца	Номер трещины	Раскрытие трещин, мкм			Коэф. вариации, %
		Мин.	Макс.	Среднее при $P=0,95$	
70	1	1,0	9,0	$5,0 \pm 2,4$	54,5
72	1	2,0	11,0	$6,8 \pm 3,2$	56,5
15	1	3,0	9,0	$6,8 \pm 2,1$	35,1
113	1	1,0	6,0	$3,4 \pm 1,8$	60,9
E50	1	4,0	7,0	$5,2 \pm 1,1$	25,0

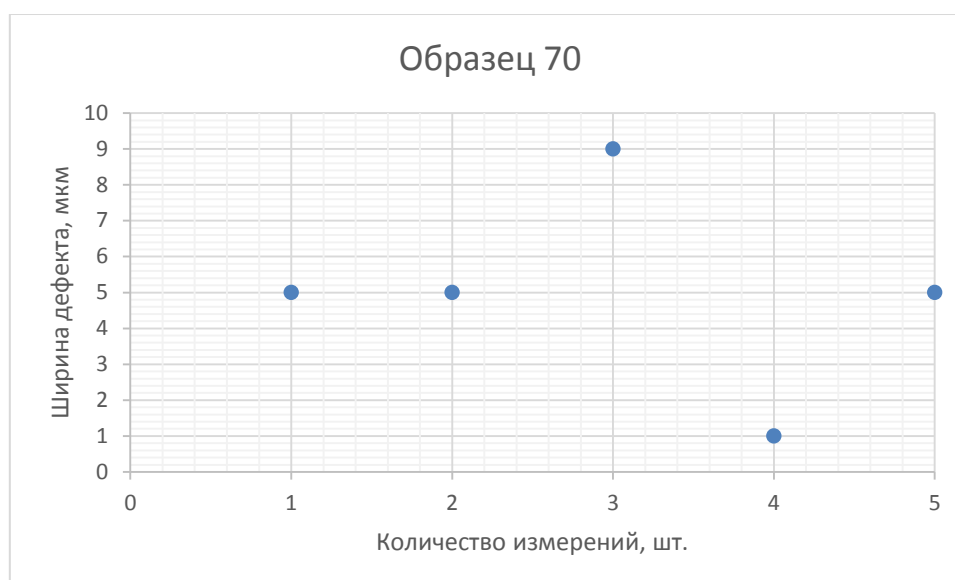


Рисунок 4.1 - Ширина дефекта на образце №70, измеренная в 5 точках

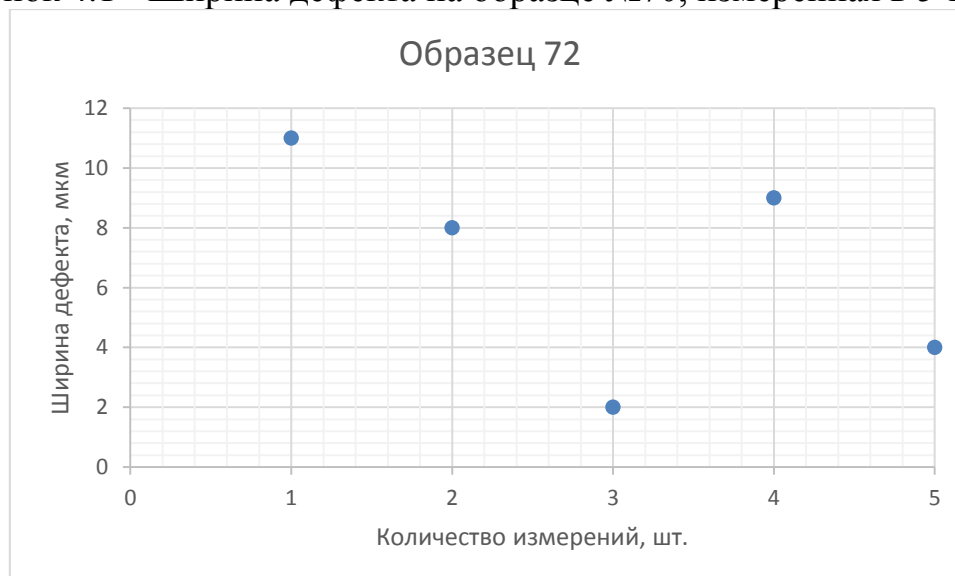


Рисунок 4.2 - Ширина дефекта на образце №72, измеренная в 5 точках

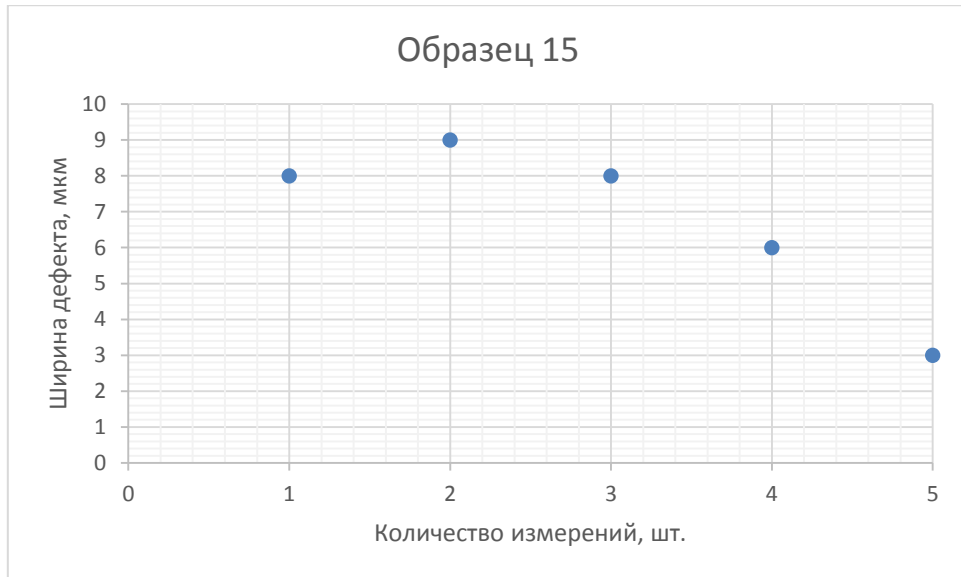


Рисунок 4.3 - Ширина дефекта на образце №15, измеренная в 5 точках



Рисунок 4.4 - Ширина дефекта на образце №113, измеренная в 5 точках

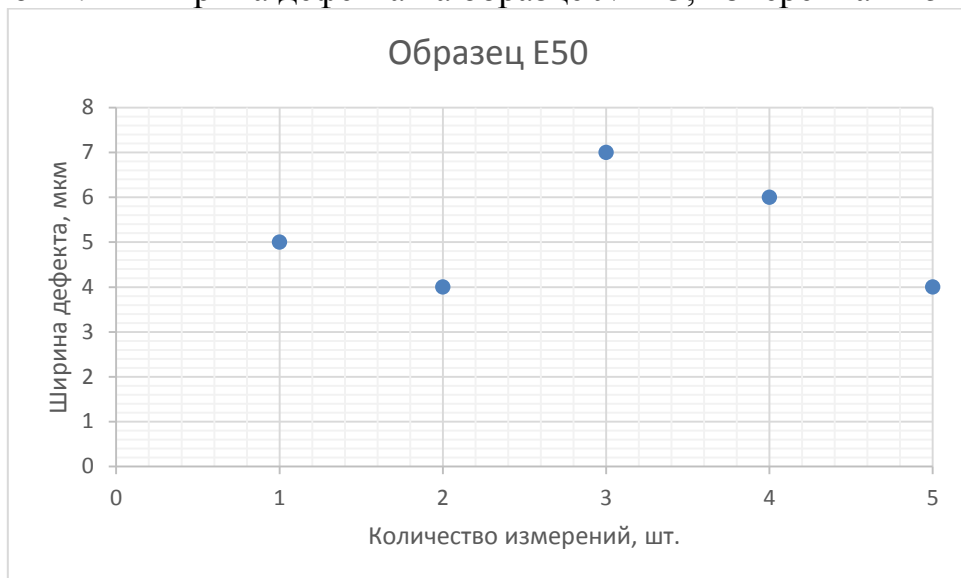


Рисунок 4.5- Ширина дефекта на образце №E50, измеренная в 5 точках

На образцах из металлического материала, дефекты в которых получены путем изгиба пластины, ширина дефекта имеет очень большой размах значений. Например, образец №70 от 1 до 9 мкм по длине трещины.

В таблице 4.2 представлены результаты измерений ширины трещин на образцах, изготовленных из эпоксидного клея. На рисунках 4.6 – 4.10 интерпретация представленных в таблице 4.2 результатов.

Таблица 4.2 – Статистическая обработка результатов измерений для определения работоспособности дефектоскопических материалов на контрольных образцах из эпоксидного клея

Характеристика раскрытия трещин на образцах					
Номер образца	Номер трещины	Раскрытие трещин, мкм			Коэф. вариации, %
		Мин.	Макс.	Среднее при $P=0,95$	
11ф	1	12,0	19,0	$16,0 \pm 2,3$	16,5
12ф	1	22,0	27,0	$24,2 \pm 1,9$	8,9
13ф	1	14,0	19,0	$17,0 \pm 2,4$	16,1
14ф	1	15,0	19,0	$17,0 \pm 1,4$	9,3
15ф	1	23,0	26,0	$24,4 \pm 1,2$	5,4

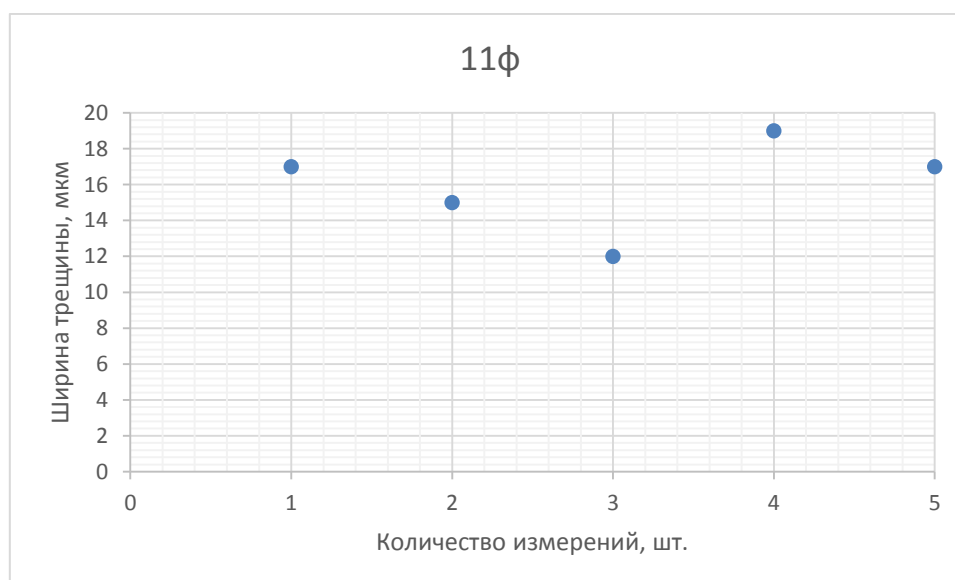


Рисунок 4.6 - Ширина дефекта на образце №11ф, измеренная в 5 точках

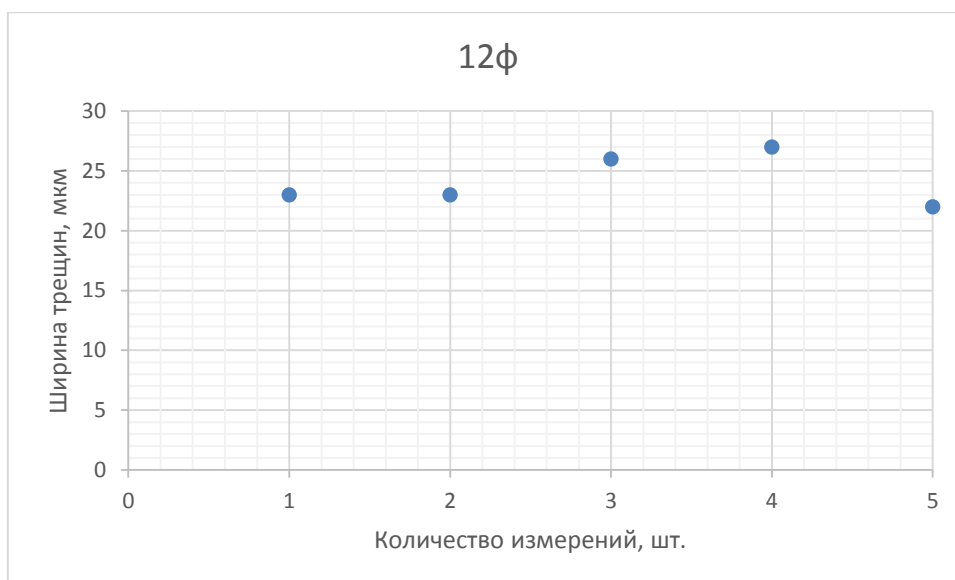


Рисунок 4.7- Ширина дефекта на образце №12φ, измеренная в 5 точках

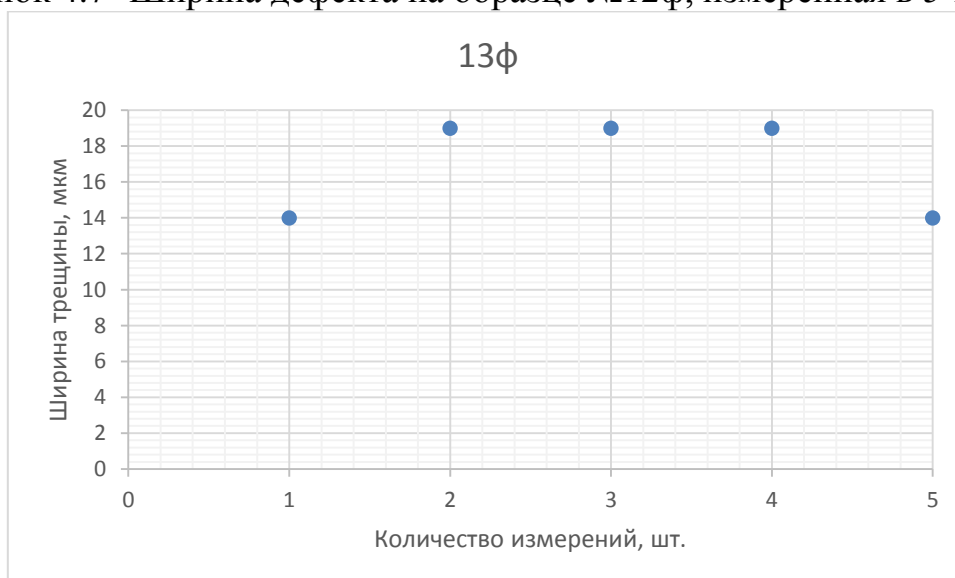


Рисунок 4.8 - Ширина дефекта на образце №13φ, измеренная в 5 точках

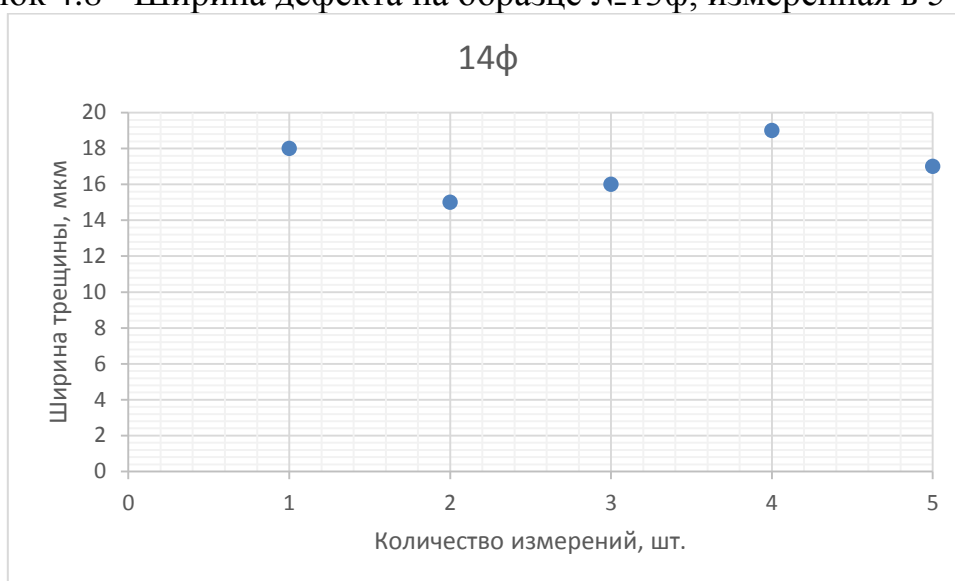


Рисунок 4.9 - Ширина дефекта на образце №14φ, измеренная в 5 точках

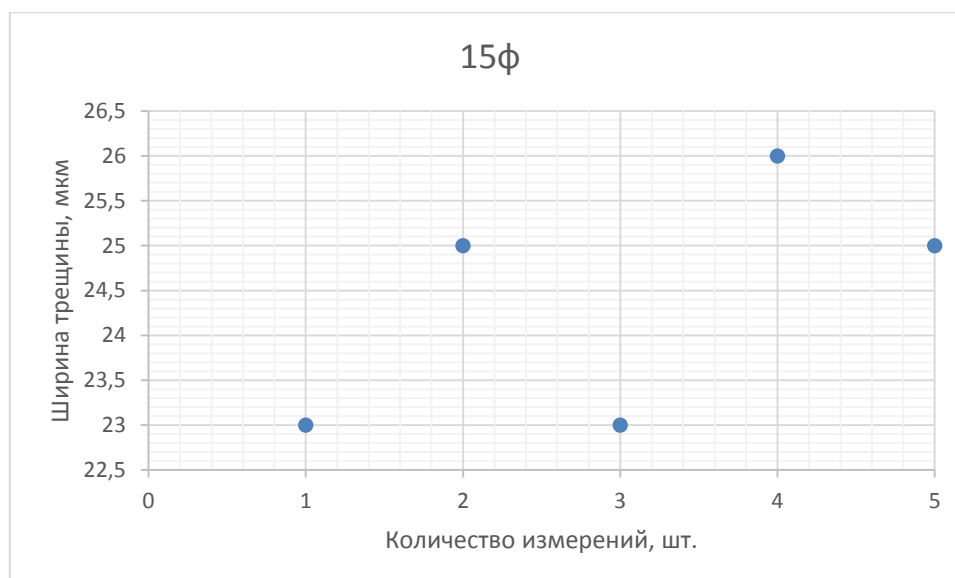


Рисунок 4.10 - Ширина дефекта на образце №15ф, измеренная в 5 точках

На образцах из эпоксидного материала, предназначенных для проверки работоспособности дефектоскопических материалов коэффициент вариации составляет в пределах 10 - 16%, разброс значений не велик.

На образцах, предназначенных для оценки порога чувствительности технологии контроля, ширину трещин 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.

Недостатками образцов из металлического материала является то, что непостоянство возникающих в образце напряжений вызывает переменную глубину и ширину раскрытия трещин по их длине. Изгиб эталона в процессе его нагружения приводит к его искривлению, что приводит к произвольному изменению ширины раскрытия трещин по длине и непрямолинейности, получаемого дефекта, что показано на рисунке 4.11.

Контрольные образцы, получаемые путем вытравливания [107 - 114], позволяют реализовать дефекты с заданными параметрами (шириной раскрытия, длиной и глубиной). Дефект в образце практически прямолинеен, что иллюстрирует рисунок 4.12.

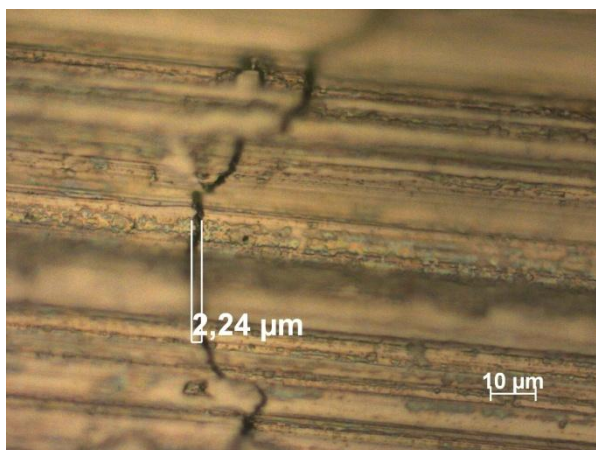


Рисунок 4.11 – Дефект в контрольном образце, полученный путем изгиба



Рисунок 4.12 – Дефект в образце, полученный вытравливанием

Для аттестации образцов ширину раскрытия трещин в зависимости от их длины целесообразно измерять в 30-60 или более случайных точках. Результаты измерений подвергают статистической обработке с целью определения среднего арифметического, средней квадратической погрешности измерений, границ доверительного интервала при заданной вероятности ($P = 0,95$). Рекомендуется, чтобы в этом случае относительная погрешность измерений не превышала 10%. Также указывают размах полученных значений (максимальное и минимальное значение раскрытия трещины), рассчитывают преимущественную ширину трещин B_{np} (формула 4.4) и коэффициент вариации измеренных значений ширины трещины, как описано в статье Глазкова Ю.А. [127].

$$B_{np} = \frac{n_1 a_1 + n_2 a_2 + n_3 a_3 + \dots + n_m a_m}{n_1 + n_2 + n_3 + \dots + n_m} \quad (4.4)$$

где $a_1, a_2, a_3, \dots, a_m$ – идущие подряд одинаковые значения ширины трещины, повторяющиеся 5-8 и более раз; $n_1, n_2, n_3, \dots, n_m$ – количество повторений одинаковых значений ширины трещины в каждой группе; m – общее количество групп, принятых в расчет близких измерений.

Результаты представляют в виде таблицы.

При аттестации образцов для оценки чувствительности контроля были использованы те же образцы, что и для оценки работоспособности дефектоскопических материалов из металлического и неметаллического материалов. Измерения проводились в 60 точках по длине трещины образца. Затем была проведена статистическая обработка результатов измерений. Результаты представлены в таблицах 4.3 и 4.4. и на рисунках 4.13 - 4.22 [129].

Таблица 4.3 - Статистическая обработка результатов измерений ширины раскрытия контрольных образцов из металла для оценки чувствительности капиллярного контроля

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



Рисунок 4.13 – Распределение ширины дефекта по длине на образце №70



Рисунок 4.14 - Распределение ширины дефекта по длине на образце №72



Рисунок 4.15 - Распределение ширины дефекта по длине на образце №15

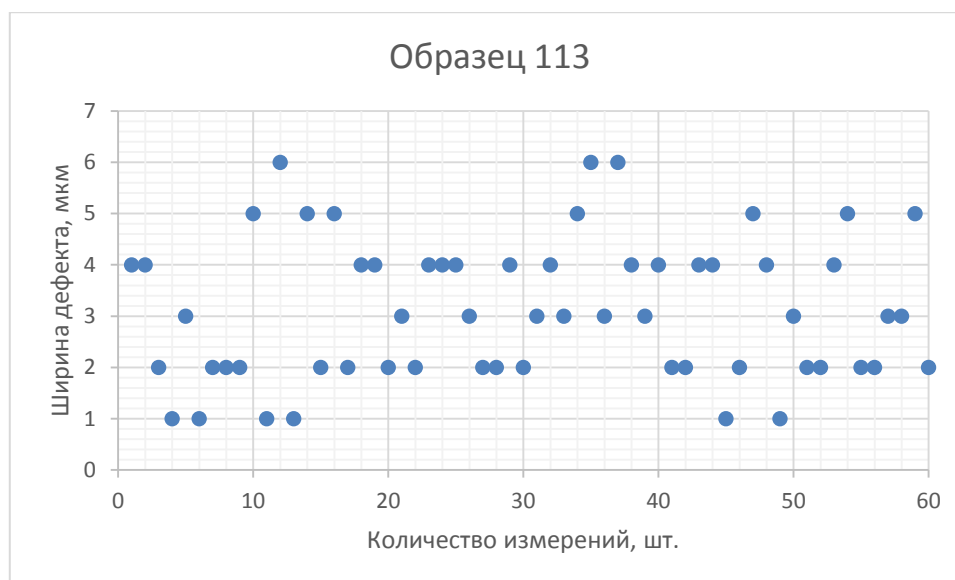


Рисунок 4.16 - Распределение ширины дефекта по длине на образце №113



Рисунок 4.17 - Распределение ширины дефекта по длине на образце E50

Таблица 4.4 - Статистическая обработка результатов измерений ширины раскрытия контрольных образцов из неметалла 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 ± 0,6	17,7	12,7
12ф	1	20,0	30,0	24,6 ± 0,1	19,0	9,0
13ф	1	12,0	22,0	18,4 ± 0,5	18,7	11,1
14ф	1	12,0	22,0	17,8 ± 0,6	17,8	12,4
15ф	1	15,0	28,0	23,6 ± 0,7	24,5	11,8



Рисунок 4.18 - Распределение ширины дефекта по длине на образце №11ф



Рисунок 4.19 - Распределение ширины дефекта по длине на образце №12ф



Рисунок 4.20- Распределение ширины по длине на образце №13ф



Рисунок 4.21 - Распределение ширины дефекта по длине на образце №14ф

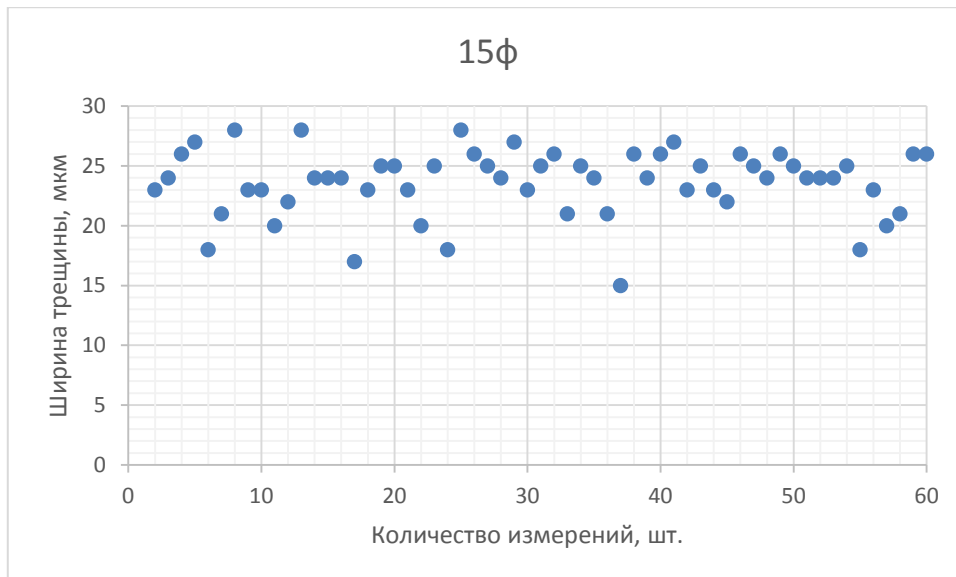


Рисунок 4.22 - Распределение ширины дефекта по длине на образце №15ф

Таким образом, сравнив результаты измерений ширины трещин на металлических образцах и образцах, выполненных из эпоксидного клея можно сделать вывод:

- технология изготовления контрольных образцов и тест-панелей способом, описанным в главе 2, позволяет реализовать однотипные образцы, т.к. параметры ширины трещины стабильны по длине, в отличие от металлических образцов;

- образцы, в которых дефекты получены путем вытравливания, можно использовать как для оценки работоспособности дефектоскопических материалов, так и для оценки чувствительности технологии капиллярного контроля, т.к. трещина в образце является практически прямолинейной (разброс значений или коэффициент вариации в пределах 13%. Для сравнения - коэффициент вариации ширины трещин в металлических образцах, предназначенных для оценки чувствительности контроля составляет около 60%, кроме образца E50, у которого отклонение значений от среднего составляет около 35 % [129].

4.1.2. Определение глубины трещин

На образцах в виде пластин с поперечными трещинами, пересекающими поверхность образцов от одной боковой грани до другой, глубину трещин

измеряют на боковых гранях непосредственно по материалу, либо после выявления трещин методом цветной дефектоскопии. Глубину трещин измеряют трижды на каждой грани образца, а затем рассчитывают среднее арифметическое значение измерений на двух гранях.

Для трещин, выходящих только на одну грань, трещины измеряют на ней, а в паспорте на образец в графе «глубина трещины» указывают «переменная от 0 до ...» (измеренного значения), как описано в статье Глазкова Ю.А. [127].

Полученные результаты измерения глубины трещин представляют в миллиметрах, округляя их до двух знаков после запятой.

При изготовлении и аттестации образцов, в том числе в виде цилиндров или стержней, трещины на которых получены в упрочненном слое или в слое хрупкого покрытия, как правило, за глубину трещин принимают толщину упрочненного слоя или покрытия. Как правило, в паспортах на контрольные образцы для капиллярной дефектоскопии, изготовленных таким способом указывается, что глубина трещины равна толщине азотированного слоя без приведения численных значений. А в последнее время производители контрольных образцов вообще не приводят никакой информации по глубине трещин, т.к. измерение глубин трещин в пределах десятков-сотен микрометров достаточно проблематично.

Как было описано выше, предложенный способ изготовления контрольных образцов и тест-панелей позволят реализовывать с заданными параметрами: длиной, шириной и раскрытием, позволяющий устранить указанный недостаток.

На образцах с открытой трещиной, пересекающей поверхность от одной боковой грани до другой, глубину полученных трещин измеряют на обеих гранях и рассчитывают среднее значение глубины.

При создании контрольных образцов и тест-панелей с запертыми дефектами определение глубины дефектов возможно при использовании следующих вариантов, представленных в статье [130].

Вариант 1. Подготавливается брусок из эпоксидного материала, с меньшими размерами, чем у будущего образца, с приклеенными полосками

фольги необходимой толщины (рисунок 4.23). Затем брусок помещается в форму с размерами, соответствующими габаритам будущей заготовки. После этого форма заливается эпоксидным клеем до необходимого уровня. Глубина дефекта будет равна размеру вытравливаемых полосок фольги.

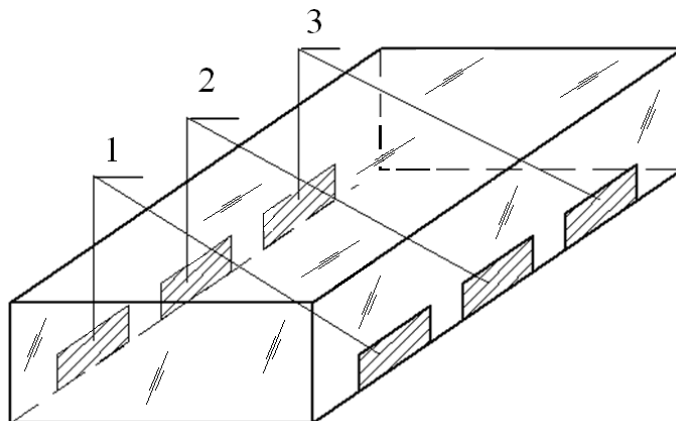


Рисунок 4.23 - Прямоугольный брусок из неметалла с установленными полосками 1, 2, 3, соответствующие разным классам чувствительности капиллярного контроля

Вариант 2. В образце прорезаются отверстия или паз, глубина которых соответствует ширине приклеенных полосок фольги, как показано на рисунке 4.24. В процессе обработки рабочей поверхности заготовки уменьшается глубина отверстий и одновременно уменьшается ширина металлических полосок.

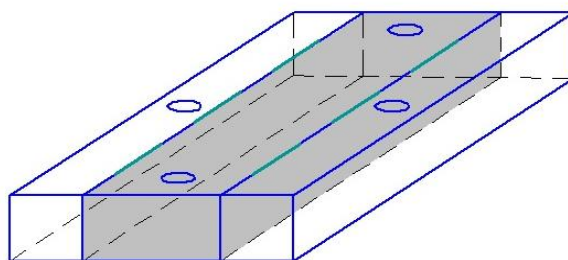


Рисунок 4.24 - Заготовка контрольного образца с просверленными отверстиями

Измеряя глубину индикаторным глубиномером или приспособлением для измерения глубины подрезов, существует возможность контроля ширины металлических полосок. В указанных средствах измерений в качестве отсчетного устройства используется индикатор часового типа с пределом измерений 0-10 мм и разрешающей способностью 10 мкм. Можно также воспользоваться

прецизионным нониусным цифровым штангенциркулем для сварных швов (рисунок 4.25).

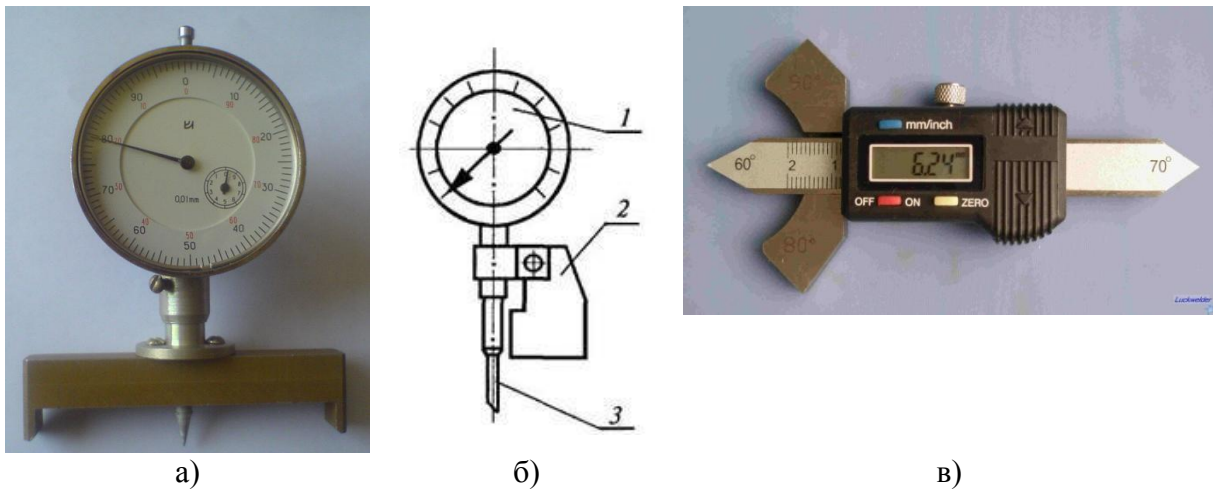


Рисунок 4.25. Средства измерения глубины

а) индикаторный глубиномер на выносных опорах; б) ,в) приспособление для измерения глубины подрезов: 1 – индикатор «0-10» с поворотной шкалой; 2 – опорный кронштейн; 3 – измерительная игла

Выполнение отверстий на разных участках рабочей поверхности заготовки позволяет контролировать и обеспечивать равномерную ширину полосок, в конечном итоге определяющих глубину трещин в контрольных образцах и тест-панелях. Финишную обработку рабочей поверхности бруска завершают абразивным материалом минимальной зернистости для обеспечения минимального фона рабочей поверхности при использовании контрольных образцов или тест-панелей в дальнейшей работе.

Отверстия не будут мешать анализу результатов контроля, т.к. отверстия будут относиться к широко раскрытым с небольшой глубиной, и практически не будут давать индикаторных следов [131].

При определении глубины трещин применялись контрольные образцы из эпоксидного материала под номерами 12ф и 15ф, а также тест-панель ТП1.

Трещины в образцах 12ф и 15ф имеют выход на боковые грани, поэтому глубина, как было описано выше, определялась на обеих сторонах образца трижды и рассчитывалось ее среднее значение.

В тест-панели трещины имеют характер запертых, глубина полученных дефектов определялась с помощью индикаторного глубиномера на выносных опорах. Разрешающая способность глубиномера 10 мкм.

В образцах, изготовленных из металла (№70, 72, 15, 113 и E50), глубина трещин не определялась. Глубина дефектов в образцах из металла равнялась толщине хрупкого слоя и была указана в паспорте на образцы.

Параметры глубины трещин на контрольных образцах и тест-панели, выполненных из эпоксидного материала, указаны в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Глубина трещин в контрольных образцах и тест-панелях

№ образца	Трещины, шт.	Глубина, мм	Примечание
12ф	1	2,34	Измеренное
15ф	1	1,95	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
72	1	0,3	Паспортные данные
15	1	0,3	Паспортные данные
113	1	не указана	Паспортные данные
E50	1	0,3-0,35	Паспортные данные

В приложении А диссертации приведена копия сертификата о калибровке средства измерений №5184/202, на контрольный образец №113 из эпоксидного материала, выданный ФБУ «Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в Томской области» от 29.12. 2017.

4.2. Исследование эксплуатационных характеристик неметаллических образцов для испытаний средств капиллярной дефектоскопии

4.2.1. Многократность использования

Продолжительность работы контрольных образцов зависит от многих факторов: от типа материала образцов, частоты их применения, состава воздушной среды на участке контроля, колебаний температуры и влажности, качества жидкости, используемой для промывки образца, и тщательности этой очистки, количества влаги в нем, условий сушки образца.

В случае использования разливных дефектоскопических материалов, их качество должно контролироваться ежедневно из-за риска ухудшения проникающих свойств этих материалов. Поэтому, оценку качества таких дефектоскопических материалов следует проводить на контрольных образцах перед каждым их использованием. Если используются дефектоскопические материалы из аэрозольных баллончиков, то ухудшение дефектоскопических свойств проявляется реже, следовательно, и контрольные образцы могут использоваться реже. В периоды между применениями образцы хранят в сухой закрытой таре, предохраняющей их от механических повреждений, попадания на них случайных загрязнений, влаги и прочих агрессивных сред.

Исследования на многократность использования контрольных образцов проводились по схеме технологического процесса цветного капиллярного контроля с использованием набора дефектоскопических материалов фирмы «Sherwin» и последующей промывкой в ультразвуковой ванне УЗВ 2/150 ТН с использованием изопропилового спирта. В качестве исследуемых образцов применялись образцы по II классу чувствительности (с шириной дефекта в диапазоне от 1 до 10 мкм) из стали 20 под №№70 и 72, а также, изготовленные из эпоксидного материала №№0 и 21.

Повторение схемы технологического процесса на контрольных образцах проводилось 100 раз (в паспорте на контрольные образцы указано:

«множественность использования 80 раз»). Оценивалась полнота, протяженность и яркость полученного индикаторного следа, как представлено в ГОСТ 18442-80 [26]. Измерения проводили с помощью микроскопа МС-50. Результаты представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Результаты 100 повторений технологии капиллярного контроля на образцах

№ 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 4.6 видно, что образцы из эпоксидного материала показали полную выявляемость, 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 наличием изломов в трещине, следовательно остатки полимеризующихся дефектоскопических материалов трудно извлекаются из полости дефектов. Они заполняют трещину, тем самым уменьшая протяженность индикаторного следа с каждым последующим процессом капиллярного контроля.

4.2.2 Влияние температуры на ширину трещины

В требованиях к выполнению капиллярного контроля указано, что контроль обычно выполняют при температуре от -40 до +40 °С и относительной влажности

не более 90 %. Допускается применять данный метод при других значениях температуры и влажности, если позволяют технические характеристики дефектоскопических материалов, а чувствительность контроля подтверждена на образцах при соответствующих условиях.

Актуальной задачей исследования является необходимость определения стабильности размеров ширины дефектов, полученных на контрольных образцах и тест-панелях, изготовленных способом вытравливания, в диапазоне рабочих температур от -40 до +40 °С.

При проведении климатических испытаний должны выполняться следующие требования:

- время выдержки в верхнем или нижнем значении температуры должно быть достаточным для установления теплового баланса изделия;
- испытуемое изделие не должно подвергаться прямому воздействию излучения от нагревательных элементов.

Испытание на воздействие верхнего значения температуры окружающей среды при эксплуатации изделия можно совмещать с испытанием на воздействие изменения температуры, измеряя при воздействии верхнего или нижнего значения температуры соответственно все необходимые параметры изделий.

Для оценки влияния температуры на раскрытие трещины исследовали контрольные образцы, изготовленные из металла и эпоксидного материала, с единичной трещиной. Исследования проводили в диапазоне температур от -10°С до +40 °С. Такой диапазон температур обусловлен рабочими температурами применения дефектоскопических материалов. Например, диапазон рабочих температур дефектоскопических материалов фирм Sherwin и Helling от +10 до +50 °С. Измерения ширины трещин проводили с помощью микроскопа МС-50. Для стабильности результатов измерения проводили в одних и тех же координатных точках, отмеченных карандашом на образце, по длине дефекта. На рисунке 4.26 представлены результаты сравнения влияния температуры на ширину раскрытия трещин на образцах из эпоксидного материала под №№ 12ф и 15ф, и образцов из стали 20 №№70 и 72.

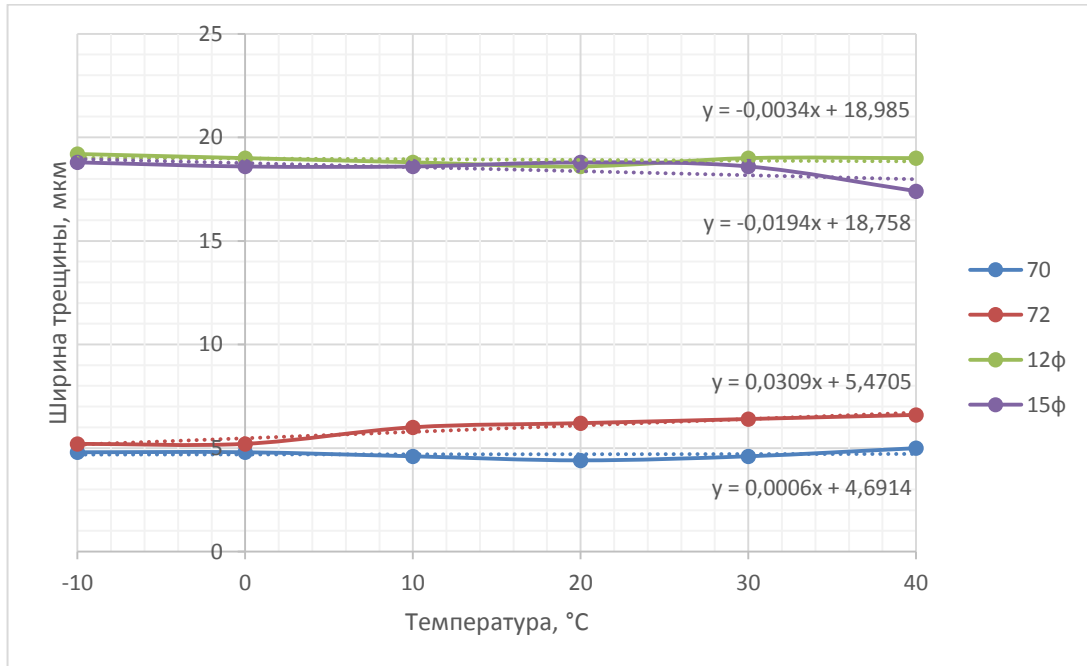


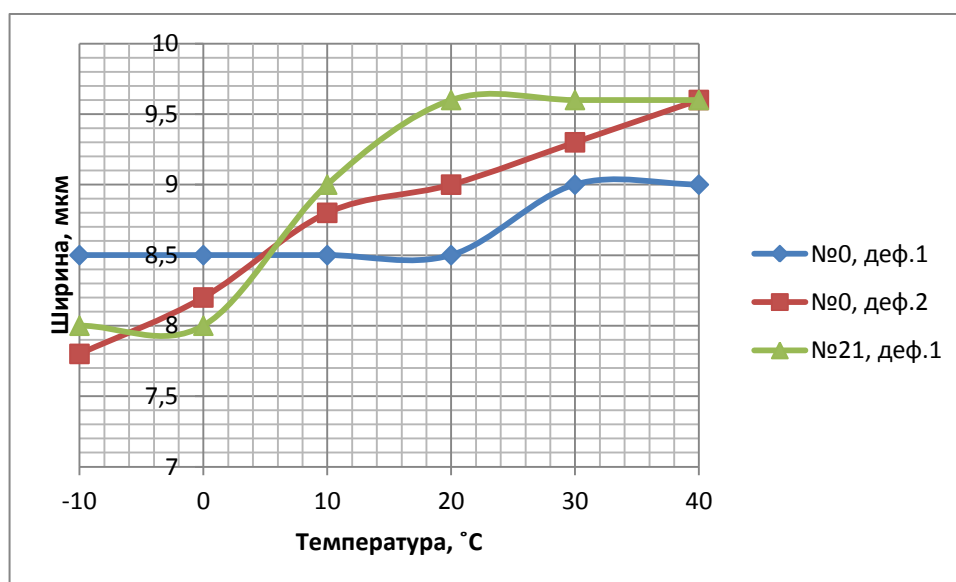
Рисунок.4.26 - Влияние температуры на ширину раскрытия трещин

Из графика видно, что в диапазоне температур от -10°C до $+40^{\circ}\text{C}$ ширина дефекта практически неизменна, т.к. зависимости прямолинейны. В таблице 4.7 представлены результаты воздействия температуры на ширину раскрытия дефекта в образцах из неметаллических материалов.

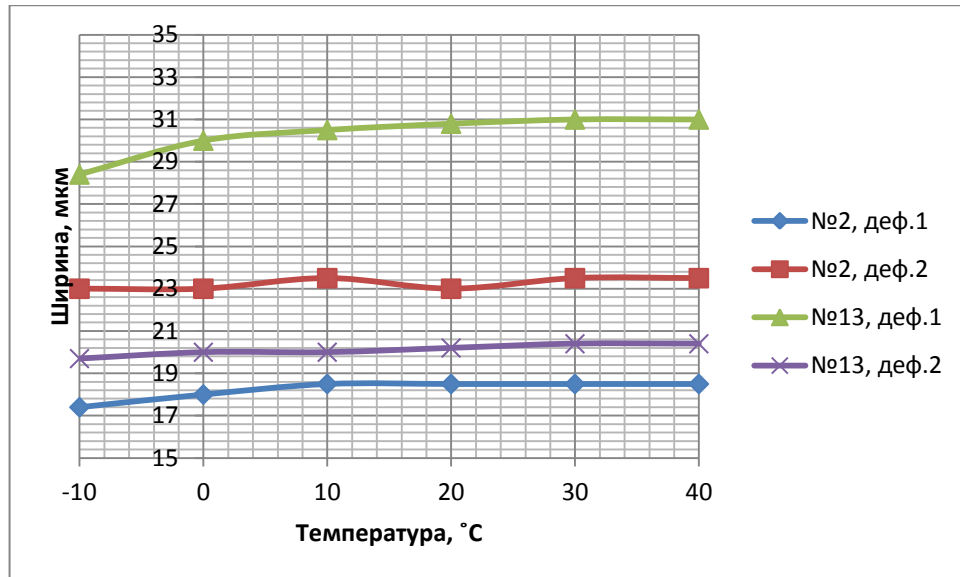
Таблица 4.7 - Воздействие температур на раскрытие дефектов

№ контрольного образца	№ дефекта в контрольном образце	Диапазон температур, °С					
		-10	0	10	20	30	40
		Ширина дефектов, мкм					
0	1	8,5	8,5	8,5	8,5	9,0	9,0
	2	7,8	8,2	8,8	9,0	9,3	9,6
1	1	30,4	30,0	28,0	27,8	30,0	30,2
2	1	17,4	18,0	18,5	18,5	18,5	18,5
	2	23,0	23,0	23,5	23,0	23,5	23,5
13	1	28,4	30,0	30,5	30,8	31,0	31,0
	2	19,7	20,0	20,0	20,2	20,4	20,4
20	1	26,4	26,6	26,6	27,2	27,2	27,4
	2	16,4	16,0	16,8	16,8	17,0	17,0
21	1	8,0	8,0	9,0	9,6	9,6	9,6

На рисунке 4.27 представлена интерпретация результатов влияния температуры на ширину раскрытия дефектов в контрольных образцах из эпоксидного материала.



а)



б)

Рисунок 4.27 – Воздействие температур на ширину дефектов:
 а) образцы с шириной дефектов по II классу чувствительности, б) образцы с шириной дефектов по III классу чувствительности

Диапазон изменения ширины раскрытия трещин под действием температур незначителен и укладывается в границы классов чувствительности капиллярного контроля [115, 132].

Также на образцах из эпоксидного материала определялась стабильность ширины дефектов после воздействия температуры. Каждый образец исследовался при одинаковых условиях. Сначала определялась ширина дефекта при нормальных условиях, затем после нагревания в шкафу до температуры 40°C в течении 15 минут, а затем и через 20 минут после нагревания. Аналогично эксперимент проводился и при охлаждении образцов до температуры -10°C. Эксперимент повторялся 10 раз. В таблице 4.8 приведены результаты статистической обработки данных.

Таблица 4.8 – Статистическая обработка результатов эксперимента по определению влияния температуры на ширину дефектов

№ образца	Температурные условия				
	Нормальные условия	Нагрев до $t = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$	Через 20 мин после нагрева	Охлаждение до $t = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$	Через 20 мин после охлаждения
	Ширина дефекта, мкм				
21ф	$14,6 \pm 0,4$	$15,2 \pm 0,4$	$14,6 \pm 0,4$	$14,2 \pm 0,4$	$14,4 \pm 0,3$
22ф	$10,4 \pm 0,5$	$10,6 \pm 0,6$	$10,4 \pm 0,4$	$9,8 \pm 0,6$	$10,2 \pm 0,5$
23ф	$12,8 \pm 0,2$	$13,5 \pm 0,3$	$13,0 \pm 0,3$	$17,2 \pm 0,3$	$13,2 \pm 0,3$
24ф	$11,6 \pm 0,4$	$12,2 \pm 0,2$	$11,2 \pm 0,4$	$13,4 \pm 0,3$	$12,6 \pm 0,4$
25ф	$11,0 \pm 0,4$	$10,8 \pm 0,5$	$10,2 \pm 0,4$	$14,0 \pm 0,3$	$12,0 \pm 0,4$

4.3. Сравнение качества дефектоскопических материалов с помощью образцов для испытаний средств капиллярного неразрушающего контроля

Наиболее распространенными методами оценки качества изображений являются субъективная и инструментальная оценки. Субъективная оценка осуществляется оператором визуально. Специалист определяет качество изображения либо по заранее определенной шкале (абсолютная субъективная оценка), либо сравнивает наборы изображений между собой и расставляет в ряд по убыванию качества изображения (сравнительная субъективная оценка).

Инструментальная оценка изображений осуществляется с помощью приборов и оборудования, или специально разработанного программного продукта.

4.3.1. Субъективная оценка

Для сравнения качества наборов дефектоскопических материалов между собой применялись разработанные тест-панели из эпоксидного материала. В

качестве исследуемых - наборы фирм Sherwin, Vycotest и Spotcheck, Chemetall и R-test.

На тест-панелях выполнялась технология капиллярного контроля с помощью разных наборов дефектоскопических материалов и фиксировались полученные индикаторные следы.

На рисунке 4.28 изображена тест-панель на левой половине которой выполнялась технология капиллярного контроля набором Vycotest, на правой – Sherwin. Из рисунка 4.28 видно, что изображение индикаторных следов полученных с использованием набора Vycotest ярче, чем с использованием Sherwin.

Рисунок 4.29 демонстрирует изображения индикаторных следов наборами Vycotest и Spotcheck. Индикаторные следы, полученные при обработке тест-панели набором фирмы «Vycotest» контрастнее, чем набором фирмы «Spotcheck». На рисунке 4.30 сравниваются изображения индикаторных следов с применением наборов Sherwin и Chemetall. Из рисунка 4.30 понятно, что индикаторные следы, полученные при выполнении технологии контроля набором фирмы Sherwin контрастнее, чем набором фирмы Chemetall. Следовательно, можно утверждать, что набор дефектоскопических материалов фирмы Sherwin имеет более высокую способность к обнаружению дефектов.

На рисунке 4.31 представлена тест-панель №2, обработанная наборами дефектоскопических материалов Vycotest и набором российского производства R-Тест. Индикаторные следы, полученные на тест-панели с применением набора Vycotest, ярче и насыщеннее тех, что получены с использованием набора российского производства.

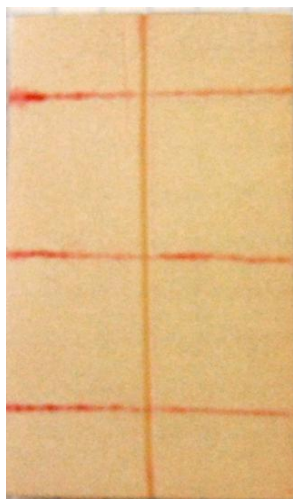


Рисунок 4.28 –Тест-панель №1
обработанная наборами
дефектоскопических материалов.
Левая сторона – Вycotest, правая
сторона – Sherwin

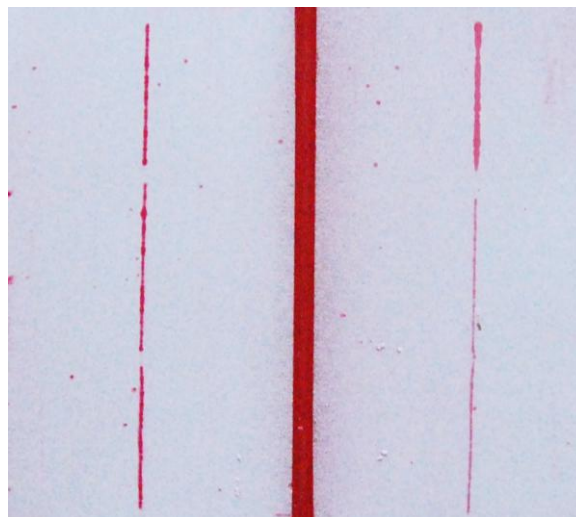


Рисунок 4.29 –Тест-панель №2
обработанная наборами
дефектоскопических материалов.
Левая сторона – Вycotest, правая
сторона – Spotcheck

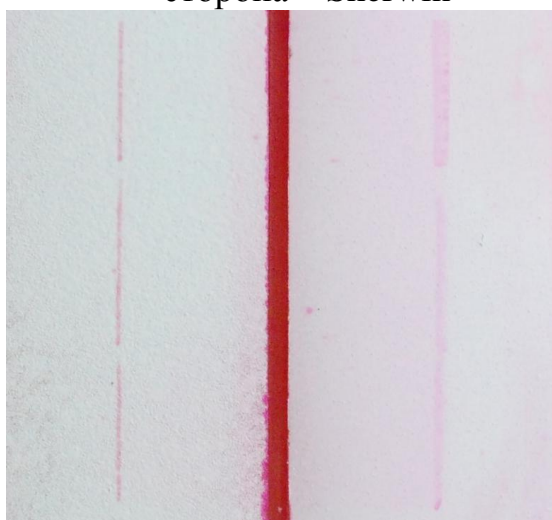


Рисунок 4.30 –Тест-панель №2,
обработанная наборами
дефектоскопических материалов.
Левая сторона – Sherwin, правая
сторона – Chemetall

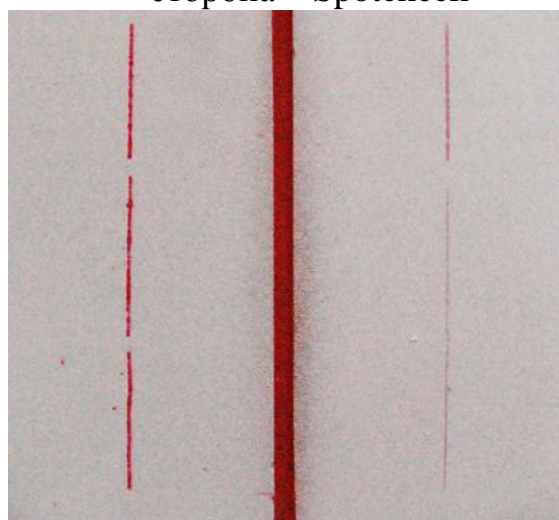


Рисунок 4.31 –Тест-панель №2
обработанная наборами
дефектоскопических материалов.
Левая сторона – Вycotest, правая
сторона – R-test

Таким образом, наиболее яркий индикаторный цвет выдает набор дефектоскопических материалов фирмы Вycotest.

Однако 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.

4.3.2 Инструментальная оценка

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.

Данная цветовая модель является наиболее распространенной и цвета в ней получаются с помощью добавления оттенков к черному цвету. Любое цифровое цветное изображение кодируется как матрица значений векторов RGB (Red – красный, Green – зеленый, Blue – синий). Каждая составляющая вектора может принимать какое-либо значение от 0 до 255, где 0 – это минимальная интенсивность цвета, а 255 – максимальная.

Существует четыре основные характеристики цвета: цветовой тон, яркость, светлость, насыщенность.

Цветовой тон определяет положение цвета в спектре. Яркость показывает насколько сильно излучается световая энергия того или иного цветового тона. Если энергия не излучается вовсе, значит, нет света, следовательно, это черный цвет. Например, цепочка снижения яркости красного цвета: красный – алый – бордовый – бурый – черный. Светлость – степень близости цвета к белому цвету. Насыщенность – это степень близости цвета к серому. Серый цвет образуется путем смешивания в равных количествах основных цветов с понижением их яркости до 50%.

В качестве платформы использовалась программная среда MathCad. Она содержит более сотни операторов и логических функций, предназначенных для численного и символьного решения математических задач различной сложности.

Для выполнения инструментальной оценки качества наборов дефектоскопических материалов исходное цифровое изображение было переведено из цветного изображения в оттенки серого (для упрощения) и сохранено на диск в виде bmp-файла.

Для визуализации инструментальной оценки необходимо преобразовать цифровое изображение в матрицу, которая будет содержать в себе значения цветов всех точек изображения. Для этого был написан программный код MathCAD, коды представлены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Программный код MathCad

$C := \text{READBMP}("C:\text{BR.bmp}")$	– Считывание изображение из файла
$C1 := (C - 256) \cdot (-1)$	– Получение обратной матрицы

Полученные матрицы были скопированы в программу Excel для построения 3D-поверхностей. Пример матрицы представлен на рисунке 4.32.

	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
C1 = 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 4.32 – Фрагмент матрицы графического изображения индикаторного следа ТП№2 при обработке наборами фирм «Vycotest» и «Spotcheck»

Так как была получена обратная матрица, то белому цвету соответствует минимальное значение - 0, а черному – максимальное, 255. Таким образом, выделенный фрагмент на рисунке 4.32 соответствует расположению индикаторного следа.

На рисунке 4.33 представлена полученная 3D – поверхность.

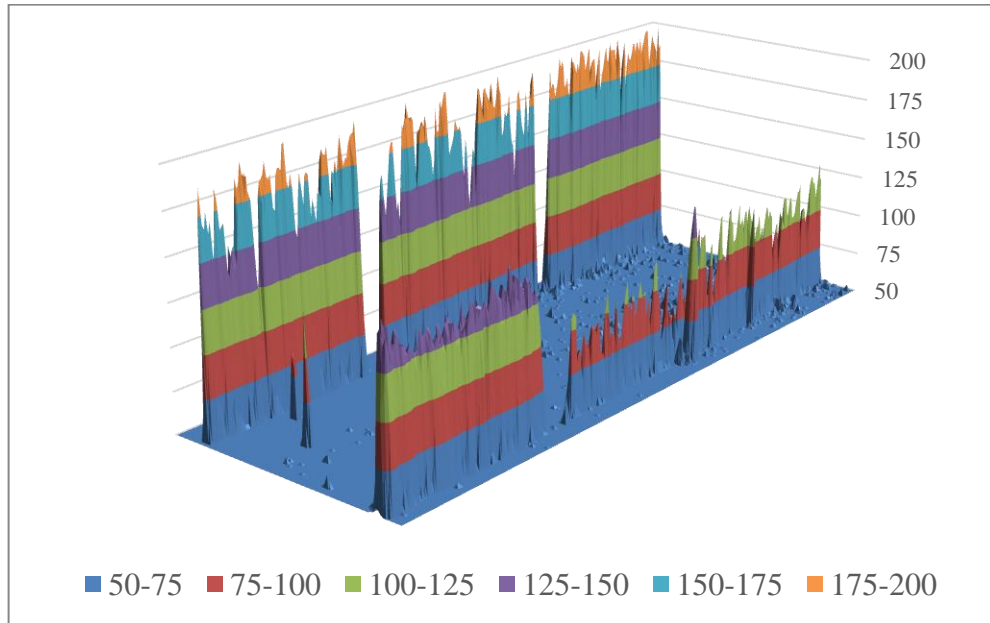


Рисунок 4.33 – 3D-поверхность индикаторных следов при выполнении технологии контроля наборами 1 - Vycotest, 2 – Spotcheck

Из рисунка 4.33 видно, что индикаторный след, полученный с помощью дефектоскопического набора Vycotest, 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.

При рассмотрении рисунка 4.34 можно сделать вывод, что набор Sherwin имеет более высокие свойства, так максимальное значение соответствует диапазону 85-90 единиц относительно набора Chemetall, максимальные значения лежат в диапазоне от 70 до 75 единиц. На рисунке 4.35 представлена матрица изображенной поверхности.

	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98
4	44	44	46	45	46	46	45	48	44	43	43	40	46
5	43	47	50	46	45	44	50	53	44	44	45	45	48
6	48	57	58	43	42	46	51	48	42	47	44	50	54
7	60	63	53	46	58	58	56	51	50	56	57	56	51
8	66	61	58	67	70	73	70	65	68	73	70	55	57
9	71	65	64	73	74	77	74	75	79	78	62	63	87
10	59	53	58	65	66	64	67	77	73	63	59	72	71
11	41	39	48	54	54	52	56	55	50	50	52	57	43
12	43	43	48	52	45	45	46	47	50	48	46	43	43
13	46	47	50	46	44	48	45	46	43	44	49	46	53
14	46	50	49	46	46	48	44	42	42	48	50	47	53
15	41	41	49	48	44	46	45	47	50	47	44	43	42
16	46	43	51	46	45	44	44	46	45	43	45	45	42
17	49	51	47	44	49	47	45	44	45	45	47	50	49
18	40	40	45	51	52	46	44	44	44	39	44	50	47
19	42	40	57	60	45	42	47	45	40	41	46	46	45
20	45	48	53	41	38	47	44	41	43	50	51	45	44
21	49	45	45	40	47	45	41	44	43	47	52	48	...

Рисунок 4.34 – Фрагмент матрицы изображения индикаторного следа при выполнении технологии контроля на тест-панели наборами Sherwin и Chemetall

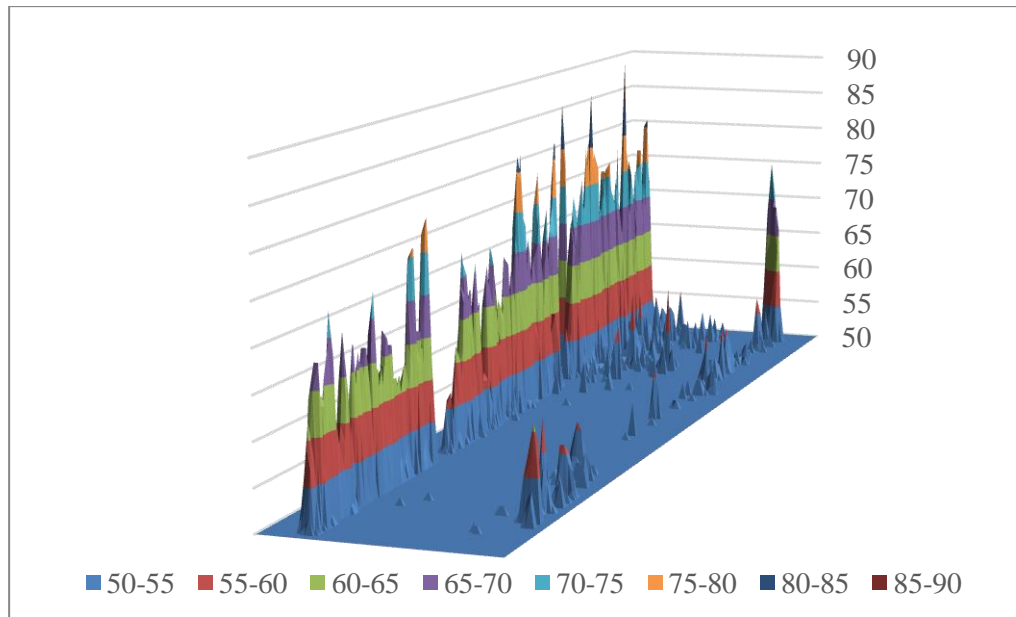


Рисунок 4.35– 3D-поверхность индикаторного следа при выполнении технологии контроля на тест-панели наборами Sherwin и Chemetall

Из рисунка 4.36 видно, что набор фирмы Вусотест обладает более высокими свойствами, относительно набора R-test, так как у первого максимальные значения лежат в диапазоне от 180 до 200, когда у второго – от 120 до 140. На рисунке 4.36 показана построенная 3D – поверхность.

	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
7	76	84	87	81	84	79	83	81	75	74	70	79	79
8	75	78	77	76	78	83	72	77	72	71	71	77	78
9	77	81	77	70	71	71	71	78	78	76	74	75	76
10	73	80	75	77	75	76	77	79	76	77	77	80	79
11	76	78	81	80	81	75	76	83	88	81	84	78	76
12	77	77	78	78	80	73	83	84	82	83	80	75	79
13	73	70	82	88	93	88	82	73	84	95	80	84	85
14	79	76	89	113	150	167	153	147	146	160	156	168	157
15	81	82	101	143	198	213	206	203	206	203	215	207	205
16	75	81	106	142	177	187	188	169	176	186	193	190	197
17	72	80	98	110	112	128	130	118	110	121	124	136	136
18	64	77	84	90	88	89	92	83	85	91	96	86	87
19	67	78	84	83	71	75	83	83	78	79	80	75	76
20	85	86	85	78	76	80	87	89	79	78	74	75	76
21	81	87	86	82	81	84	80	81	82	83	74	77	77
22	79	82	82	76	73	75	84	78	82	78	78	83	88
23	88	81	78	74	77	73	79	77	79	73	83	89	89
24	82	80	75	79	80	75	76	77	82	78	77	83	...

Рисунок 4.36– Фрагмент матрицы изображения индикаторного следа при выполнении технологии контроля на тест-панели наборами Вусотест и R-Тест

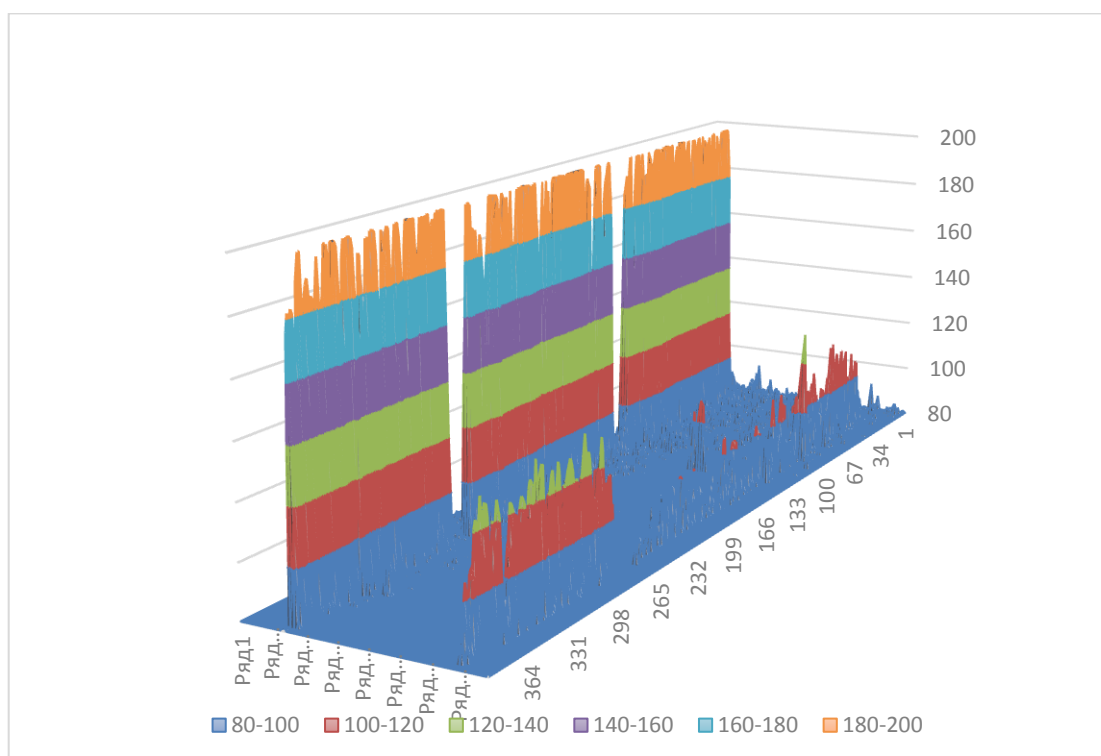


Рисунок 4.37 – 3D-поверхность индикаторного следа при выполнении технологии контроля на тест-панели наборами Вусотест и R-Тест

При сравнении исследуемых наборов дефектоскопических материалов, можно сделать вывод, что лучшим свойствами цветности (т.е. насыщенности красного цвета) является набор фирмы Вусотест, так как у него наибольшее

количество пиков в максимальном диапазоне значений. Наихудшими свойствами обладает набор фирмы Chemetall.

В приложении Б представлены акты реализации научных положений и выводов кандидатской диссертации

4.4. Выводы по главе 4

В главе 4 были определены основные метрологических параметры образцов для испытаний средств капиллярного контроля, такие как длина, ширина и глубина дефекта. Измерены раскрытия трещин и проведена статистическая обработка результатов эксперимента.

Проведены параллели между контрольными образцами, изготовленными из металлического материала и эпоксидного материала.

Установлено, что образцы, дефекты в которых получены путем вытравливания можно использовать как для проверки работоспособности дефектоскопических материалов, так и для оценки чувствительности капиллярного контроля. Трещины в таких образцах являются практически прямолинейными (коэффициент вариации в пределах 13 %). Для сравнения – коэффициент вариации ширины трещин в металлических образцах составляет около 60%.

Определены основные эксплуатационные характеристики испытательных образцов, такие как многократность применения образцов и температурные воздействия.

Исследования на многократность использования образцов проводили по технологии капиллярного контроля 100 раз. Образцы из эпоксидного материала показали полную выявляемость дефектов ввиду прозрачности образцов и возможности контроля остатков дефектоскопических материалов.

Также исследовалось влияние температуры на ширину дефектов и их стабильность в диапазоне от -10°C до $+40^{\circ}\text{C}$. Установлено, что влияние температуры, в указанном диапазоне, на ширину дефекта, практически

отсутствует. Ширина дефектов в образцах из эпоксидного материала, как и в металлических образцах, остается практически неизменной при воздействии как отрицательных, так и положительных температур.

Проведена субъективная и инструментальная оценка наборов дефектоскопических материалов на тест-панелях, изготовленных способом вытравливания. Наиболее предпочтительным способом оценки качества применяемых дефектоскопических материалов является инструментальный, т.к. отсутствуют факторы, влияющие на результат, такие как психо-эмоциональное состояние эксперта, его квалификация, культурно-социальная принадлежность, освещенность рабочего места и пр.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 по разным классам чувствительности на одном образце, что сокращает количество используемых контрольных 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 щелевой коррозии, образцы для испытаний, изготовленные способом вытравливания, позволяют увеличить ресурс использования до 100 раз при применении капиллярной дефектоскопии цветным методом.

8. Доказано, что образцы из эпоксидного материала, полученные путем вытравливания, могут быть использованы для решения следующих задач капиллярной дефектоскопии:

- определения работоспособности применяемых дефектоскопических материалов и дефектоскопов;
- оценки чувствительности контроля;
- сравнения наборов дефектоскопических материалов между собой;
- при отработке технологии контроля на образцах из эпоксидного материала;
- при сдаче практического экзамена по капиллярному методу при аттестации персонала в области неразрушающего контроля, а также при обучении.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Барашков, Н. Н. Полимерные композиты: получение, свойства, применение / Н. Н. Барашков. – М.: Наука, 1984. - 128 с.
2. Неметаллические материалы, применяемые в машиностроении / [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://pereosnastka.ru/articles/nemetallicheskie-materialy-primenyaemye-v-mashinostroenii> (дата обращения 06.08.2018).
3. Каблов, Е. Композиты: сегодня и завтра / Е. Каблов // Металлы Евразии. – 2015. - №1, С. 36 - 39.
4. Балабина, Г. В. Контроль качества сварных соединений из пластмасс в строительстве / Г. В. Балабина, И. Ф. Истратов. – М.: Стройиздат, 1975. - 193 с.
5. Макин, Ю. Н. Основы производства ЛА и АД. Конструкции их композиционных материалов / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://studydoc.ru/doc/2610048/osnovy-proizvodstva-la-i-ad.-konstrukcii-ih-kompozicionnyh> (дата обращения 06.08.2018).
6. Батаев, А. А. Композиционные материалы / А. А. Батаев, В. А. Батаев. – Новосибирск: Изд-во Новосибирского государственного технического университета, 2002. – 378 с.
7. Васильев, В. В. Композиционные материалы: Справочник / Васильев В.В., Протасов В.Д., Болотин В.В. и др. - М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.
8. Францев, М. Э. Эксплуатационные дефекты корпусов стеклопластиковых судов. Часть 1 / М. Э.Францев // Катера и яхты. – 2008. - №2 (212), С. 90 - 93.
9. Францев, М. Э. Эксплуатационные дефекты корпусов стеклопластиковых судов. Часть 2 / М. Э.Францев // Катера и яхты. – 2008. - №3 (213), С. 102 - 105.
10. Российский речной регистр. Правила / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.rivreg.ru/docs/pravila2015/> (дата обращения 06.08.2018).

11. Кербер, М. Л. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учебное пособие / М. Л. Кербер, В. М. Виноградов, Г. С. Головкин и др.: подред. А. А. Берлина. – СПб.: Профессия. 2008. – 560 с.
12. Гершберг, М. В. Неразрушающие методы контроля строительных стеклопластиков / Гершберг М.В., Илюшин С.В., Смирнов В.И. - Л.: Судостроение, 1971. - 199 с.
13. Францев, М. Э. Проектная оценка эксплуатационных нагрузок и характеристик долговечности корпусов судов из композиционных материалов / М.Э. Францев // Морской вестник, 2008. - № 4 (28). – С. 93 - 97.
14. Фролов, А. С. Оценка параметров влагопереноса углепластика авиационного назначения на начальной стали натурной климатической экспозиции / А. С. Фролов, С. В. Панин // Новости материаловедения. Наука и техника, 2004. - №1, С. 1 - 13.
15. Воробей, В. В. Контроль качества изготовления и технология ремонта композитных покрытий / В. В. Воробей, В. Б. Маркин. - Новосибирск: Изд-во Новосибирского государственного технического университета, 2006 – 190 с.
16. Мурашов, В. В. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. Часть 2. Методы выявления дефектов монолитных конструкций из полимерных композиционных материалов / В. В. Мурашов, А. Ф. Румянцев // Контроль. Диагностика, 2007. - №5, С. 31 - 42.
17. Netzelmann, U Nondestructive testing of ceramic automotive valves / U. Netzelmann, H. Reiter, Y. Shi, J. Wang, M. Maisl // Nondestructive Characterization of Materials VIII, 1998. – P. 443-448.
18. Троицкий, В. А. Неразрушающий контроль качества композиционных материалов / В. А. Троицкий, М. Н. Карманов, Н. В. Троицкая // Техническая диагностика и неразрушающий контроль, 2014. - №3. – С 29 – 33.
19. Gholizadeh, S. A review of non-destructive testing methods of composite materials / S. Gholizadeh // Procedia Structural Integrity, 2016. – Vol. 1, P. 50 – 57.

20. Алешин, Н. П. Современное оборудование и технологии неразрушающего контроля ПКМ / Н. П. Алешин, М. В. Григорьев, Н. А. Щипаков // Инженерный вестник, 2015. - №1. - С. 4.
21. Мурашов, В. В. Контроль многослойных клееных конструкций из полимерных композиционных материалов / В.В. Мурашов // Клеи. Герметики. Технологии, 2011. - №10. – С. 16 – 23.
22. Гадайчук, В. Е. Уровни дефектов структуры в изделиях из полимерных композиционных материалов, возникающих в процессе их производства / В. Е. Гадайчук, В. А. Коваленко // Авиационно-космическая техника и технология, 2012. - №6 (93). – С. 5 – 12.
23. Францев, М. Э. Эксплуатационные дефекты корпусов стеклопластиковых судов. Часть 2 / М. Э.Францев // Катера и яхты. – 2008. - №3 (213), С. 102 - 105.
24. Бойцов, Б. В. Методы неразрушающего контроля, применяемые для конструкций из ПКМ / Б. В. Бойцов, С. Л. Васильев, А. Г. Громашев, С. А. Юргенсон // Труды МАИ, 2011. - № 49. – С. 70.
25. Ларин, А. А. Способы оценки работоспособности изделий из композиционных материалов методом компьютерной томографии : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13 / Ларин Алексей Андреевич. – М., 2013. – 22 с.
26. Сайфутдинов. С. М. Капиллярный контроль: история и современное состояние / С.М. Сайфутдинов // NDT World review, 2008. - №1 (39). - С.14 – 18.
27. Мигун, Н. П. Применение фиолетовых светодиодов для люминесцентного капиллярного контроля / Н. П. Мигун, Н. В. Деленковский, А. Б. Гнусин // Неразрушающий контроль и диагностика, 2014. - №1, С. 6 – 13.
28. Энглин, Р. К. Опыт люминесцентного контроля сквозных дефектов на судах из стеклопластика / Р. К. Энглин, Л. Я. Малкес, Н. П. Коваленко // Дефектоскопия, 1967, №2. - С. 69-72.
29. Калиниченко, Н.П. Контроль проникающими вещества. Капиллярный контроль: учебное пособие / Н. П. Калиниченко, В. К. Кулешов, А. Н. Калиниченко. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 203 с.

30. Tarfaoui, M. Residual Strength of Damaged glass/Epoxy Tubular Structures / M. Tarfaoui, P.B. Gning // Journal of Composite Materials, 2007. - Vol.41. - №18, P. 2165-2182.
31. Tarfaoui, M. Scale and Size Effects on Dynamic Response and Damage of Glass/Epoxy Tubular Structures / M. Tarfaoui, P.B. Gning, P. Davies and F. Collombet // Journal of Composite Materials, 2007. - Vol.41. - №5. – P. 547-558.
32. Terry, L. Dye Penetrant Induced Microcracking in High Performance Thermoplastic Polyimide Composites / L. Terry, St. Clair, Jeffrey Hinkley // Journal of Composite Materials, 1998. - Vol.32. - №1. – P. 31 – 48.
33. Разработка методов комплексной диагностики бортовой аппаратуры космических аппаратов на устойчивость к дугообразованию: отчет о прикладных научных исследованиях /А В. Батраков. – г. Томск: Институт сильноточной электроники СО РАН, 2014. -137 с.
34. Глазков, Ю. А. Капиллярный контроль: учебное пособие под общ. ред. В. В. Клюева / Ю.А. Глазков. - М.: Издательский дом «Спектр», 2011. – 144 с.:
35. Генералов, А.С. Определение прочностных свойств углепластиков ультразвуковым реверберационно-сквозным методом, дисс. ... канд. техн. наук: 05.11.13 / Генералов Александр Сергеевич. - М., 2015. – 158 с.
36. Прохоренко, П. П. Тепловые воздействия при капиллярном неразрушающем контроле / П. П. Прохоренко, Н. П. Мигун. - Издательский дом «Белорусская наука», 2011. – 133 с.
37. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8т. / Под общ.ред. В.В. Клюева. –2е изд., перераб. и испр. Т.4: В 3кн. Кн. 3: М.В. Филинов Капиллярный контроль. – М.: Машиностроение, 2006. – 736 с.
38. Study of the Factors Affecting the Sensitivity of Liquid Penetrant Inspections: Review of Literature Published from 1970 to 1998: Final Report / Federal Aviation Administration William J. Hughes Technical Center's - Springfield, Virginia, 2002. – 59 p.
39. Капиллярный неразрушающей контроль / [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://ndt-testing.ru/> (дата обращения 06.08.2018).

40. ГОСТ 18442 – 80 Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1980. – 23 с.
41. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн.1: Общие вопросы. Контроль проникающими веществами: Практ. пособие / А.К. Гурвич, И.Н. Ермолов, С.Г. Сажин; Под ред. В.В. Сухорукова. – М.: Высш. шк., 1992. – 242 с.
42. Научно-технический центр «Эксперт». Неразрушающий контроль / [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.ntsexpert.ru/> (дата обращения 06.08.2018).
43. ГОСТ Р ИСО 3452-1-2011 Контроль неразрушающий. Проникающий контроль. Часть 1. Основные требования. - М.: Стандартиформ, 2012. – 11 с.
44. ГОСТ Р ИСО 3452-1-2009 Контроль неразрушающий. Проникающий контроль. Часть 2. Испытания пенетрантов. – М.: Стандартиформ, 2011. – 10 с.
45. ГОСТ Р ИСО 3452-1-2009 Контроль неразрушающий. Проникающий контроль. Часть 3. Испытательные образцы. – М.: Стандартиформ, 2011. – 7 с.
46. Калиниченко, Н.П. Образцы для испытаний средств капиллярного неразрушающего контроля: учебное пособие / Н. П. Калиниченко, И. С. Лобанова, А. Н. Калиниченко. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. - 87с.
47. ГОСТ 23349-84 Контроль неразрушающий. Дефектоскопы капиллярные. Общие технические требования и методы испытаний. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам. - 1984. – 11 с.
48. Способ изготовления эталонных образцов для капиллярной дефектоскопии // Авторское свидетельство № 555329. 1977 / Б.С. Санько, Н.Н. Качанов, А.П. Дегтярев, А.С. Боровиков, Г.Б. Подымаева.
49. Способ изготовления образца для капиллярной дефектоскопии // Авторское свидетельство № 714265. 1980 / Фурман К.С., Бакшт И.М.
50. Testing panel for inspection penetrants having cracks of controlled depth and width USA // Patent USA № 3791198. 1974 / James R. Alburger.

51. Способ изготовления контрольного образца для дефектоскопии // Авторское свидетельство №1142784. 1983. Бюл. №36 // Калинин Н.П., Катаев А.Н., Денель А.К.

52. . Способ изготовления образца для капиллярной дефектоскопии // Описание изобретения к авторскому свидетельству №945722. 1980. Бюл. №42 / Пронь Н.И., Жилка А.М.

53. Способ изготовления образца с трещиной // Описание изобретения к авторскому свидетельству №750324. 1980 / Романив О.Н., Симинькович В.Н., Гладкий Я.Н., Сорокинский И.С., Зима Ю.В., Степанов В.Г., Литвинов В.Е.

54. Способ изготовления эталонов для капиллярной и порошковой дефектоскопии // Авторское свидетельство №266331. 1970. Бюл. №11 / Козин Е.Г..

55. Surface penetrant inspection test piece having varying thickness plating // Patent USA № 4610157. 1986 / Frank. J. Vicki, Setsuo Shimizu.

56. Test piece for inspection penetrant performance assessment and comparison // Patent USA № 6729175. 2004 / William J. Martin, Downey.

57. Способ получения эталона дефекта для метода капиллярной дефектоскопии // Описание изобретения к авторскому свидетельству №892226. 1981. / Безпяткин П.В., Глаговская Л.С., Козин Ю.Н., Ларионов Р.А., Шептухин А.В.

58. Способ изготовления контрольных образцов для дефектоскопии // Описание изобретения к авторскому свидетельству №787980. 1980. Бюл. 46 / Скорик В.С.

59. JIS Z 2343 Non-destructive testing - Penetrant testing Part 1: General principles - Method for liquid penetrant testing and classification of the penetrant indication (Japanese Standards Association)

60. Техно – НДТ. Неразрушающий контроль / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://t-ndt.ru/katalog/kapillyarnyj-kontrol/obrazczyi-dlya-czvetnoj-defektoskopii-id-59/test-panel-asme-v.html> (дата обращения 06.08.2018).

61. Thamdrup, Lasse Hojlund Experimental investigation of bubble formation during capillary filling of nanoslits // Lasse Hojlund Thamdrup, Fredrik Persson, Henrik Bruus, Anders Kristensen, Henrik Flyvbjerg // Applied physics letters, 2007. – Vol. 91. - Article number 163505. - P.1-4.
62. Tas, N. R. Capillary filling speed of water in nanochannels / N. R. Tas, J. Haneveld, H. V. Jansen, M. Elwenspoek, A. Van den Berg // Applied Physics Letters, 2004. – Vol. 85, P. 3274-3276.
63. Chauvet, Fabien Roles of gas in capillary filling of nanoslits / Fabien Chauvet, Sandrine Geoffroy, Abdelkrim Hamouni, Marc Prat, Pierre Joseph // Soft Matter, 2012. - 8(41). - P. 10738 - 10749.
64. Романенко, И. И. Факторы, влияющие на капиллярное водонасыщение бетонных образцов / И.И. Романенко, Э.М. Пинт, И.Н. Петровнина, К.А. Еличев, М.И. Романенко // Фундаментальные исследования, 2016. - № 10. – Часть 2. – С. 343 - 348.
65. Колесниченко, В. И. Впитывание жидкости в длинный капилляр / В. И. Колесниченко // Сборник научных трудов SWorld, 2013. - Т. 3. - № 2. - С. 3-6.
66. Полищук, Н. В. Влияние влагопереноса на теплоперенос под действием неоднородного электрического поля в капиллярных трубках / Н. В. Полищук, И. М. Панченко, М. С. Панченко // Электронная обработка материалов, 2013. - №6. - С.27 - 38.
67. Порхаев, А.П. Кинетика впитывания жидкостей элементарными капиллярами / А.П. Порхаев // Коллоидный журнал. 1949.Т 11, №5. С.346-353.
68. Qurerre, David Wetting and Roughness [Электронный ресурс]. – режим доступа:<https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev.matsci.38.060407.132434> (дата обращения 06.08.2018).
69. Сумм, Б.Д. Физико-химические основы смачивания и растекания / Б. Д. Сумм, Ю. В. Горюнов. – М.: Химия, 1976. - 273 с.
70. S. Baxter and A.B.D. Cassie. The water repellency of fabrics and a new water repellencytest. // Journal of the Textile Institute, 1945. – Vol. 36. – P. 67 - 90.

71. Воюцкин, С. С. Физико-химические основы пропитывания и импрегирования волокнистых материалов дисперсиями полимеров / С. С. Воюцкин. – Л: Химия, 1969. - 333 с.
72. Мудров, А.Е. Численные методы для ПВМ на языках Бэйсик, Фортран и Паскаль / А. Е. Мудров. – Томск: МП «Раско», 1991. -227с.
73. Лобанова И.С. Моделирование проникновения жидкостей в несплошности изделий из неметаллических материалов / И. С. Лобанова, В. А. Мещеряков, А. Н. Калиниченко, М. С. Киселева // Ползуновский вестник, 2016. - № 4(2). - С. 103-107.
74. Lobanova, I. S. Modeling of liquid flow in surface discontinuities / I. S. Lobanova, V. A. Meshcheryakov, A. N. Kalinichenko // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2018. – Vol. 289, Article number 012023, P. 1-5.
75. Пенетрант для цветной капиллярной дефектоскопии // Патент РФ № 2278372. 2006 // Морозов Г.А., Каблов Е.Н., Соколова Л.Н.
76. Пенетрант для цветной капиллярной дефектоскопии // Патент РФ № 2238543. 2004 // Денель А.К., Соколова Л.Н., Кондрашов Э.К.
77. Fluorescent penetrant composition and method // Patent USA 3735131/ 1972 // Sherwin A.
78. Мигун, Н. П. Впитывание полярных индикаторных жидкостей в тупиковые микротрещины / Н. П. Мигун, И. В. Волович // Весці нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, Серыя фізіка-тэхнічных навук, 2011. - № 2. - С 116 – 123.
79. Осипов, А.О. Проблемы фильтрации и сепарации противоводокристаллизационных жидкостей при прокачке топлива через фильтрованные картонные вставки в условиях отрицательных температур / А. О. Осипов, О. П. Осипов // Научный вестник МГТУ ГА, 2011. - №173. – С.///
80. Способ определения поверхностного натяжения жидкости // Патент РФ №2431822. 2011. Бюл.№29 / Сушко Б.К., Ямалетдинова К.Ш., Гоц С.С., Гимаев Р.Н., Фахретдинов И.Р., Сушко Г.Б.
81. Коэффициент влияния шероховатости поверхности [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

http://mysopromat.ru/uchebnye_kursy/ustalost/raschetnye_metody_otsenki_harakteristi_k_soprotivleniya_ustalosti/metod_kogaeva/vliyanie_sherohovatosti (дата обращения 06.08.2018).

82. Мигун, Н.П. Модель пленочного течения в тупиковом коническом капилляре / Н.П.Мигун, А.И. Шнип // Инженерно-физический журнал, 2002. - Т. 75. - № 6. - С. 145 - 150.

83. Phan, Vinh-Nguyen Analysis of capillary filling in nanochannels with electroviscous effects / Vinh-Nguyen Phan, Chun Yang, Nam-Trung Nguyen // Microfluid Nanofluid, 2009. - №7. - P. 1-12.

84. Phan, Vinh Nguyen Capillary Filling in Closed End Nanochannels / Vinh Nguyen Phan, Nam-Trung Nguyen, Chun Yang, Pierre Joseph, Lyes Djeghlaf, David Bourrier, Anne-Marie Gue // Langmuir, 2010. – Vol. 26. - №16. - P.13251–13255.

85. Thamdrup, Lasse Hojlund Experimental investigation of bubble formation during capillary filling of SiO₂ nanoslits / Lasse Hojlund Thamdrup, Fredrik Persson, Henrik Bruus, Anders Kristensen // Applied physics letters, 2007. – Vol. 91, Article number 163505, P. 1-4.

86. Лесев, В.Н. Теоретическое определение скорости капиллярного впитывания для нанокапилляра / В. Н. Лесев, В. А. Созаев // Известия РАН. Серия физическая, 2016. Т.80. - № 6. - С. 676–678.

87. Зорин З. М., Поверхностные силы в тонких пленках и дисперсных системах / З. М. Зорин, В. Д. Соколов, Н. В. Чураев // сборник докладов IV конференции по поверхностным силам, 1969. - Москва. - С. 214 — 221.

88. Дерягин, Б. В. Поверхностные силы в тонких пленках и устойчивость коллоидов / Б. В. Дерягин, Б. В. Железный, З. М. Зорин, В. Д. Соколов, Н. В. Чураев // сборник докладов IV конференции по поверхностным силам, 1969. – Москва. - С. 90—94.

89. Дерягин Б. В. // Труды Всесоюзной конференции по коллоидной химии. –Киев: 1952. С. 26 -51.

90. Прохоренко, П. П. Введение в теорию капиллярного контроля: под ред. А. С. Боровикова / П. П. Прохоренко, Н. П. Мигун. - Минск: Наука и техника, 1988. — 207 с.
91. Мигун, Н. П. Совершенствование некоторых технологических стадий капиллярного контроля / Н. П. Мигун, И. В. Волович // Неразрушающий контроль и диагностика, 2012. - № 1. - С. 50 – 65.
92. Tsujii, Kaoru Super Oil-Repellent Surfaces / Kaoru Tsujii, Takamasa Yamamoto, Tomohiro Onda, Satoshi Shibuichi // *Angewandte Chemie International Edition.*, 1997. – Vol. 36. - № 9. – P. 1011-1012.
93. Eringen, A. C. Theory of micropolar fluids / A. C. Eringen // *Journal of Mathematics and Mechanics*, 1966. - Vol. 16. - №1. - p. 1 - 16.
94. Сотников, Г.В. Исследование капиллярной пропитки для моделирования реальных процессов в торфяных системах / Г.В. Сотников // *Химия и переработка горючих полезных ископаемых и природных газов*, 2005. - № 6. – С. 85 – 87.
95. Самсонов, М. В. О краевых условиях смачивания для шероховатой твердой поверхности / М. В. Самсонов, В. М. Самсонов // *Межвузовский сборник научных трудов*, 2015. - Выпуск 7. - С.425 - 430.
96. Koch, H.von. Sur une Courbe Continue sans Tangente Obtenue par une Konstruktion Geometrique Elementaire / H. von. Koch // *Arciv for Matematic, Astronomi och Fysik*. 1094. - V. 1. - P. 681-704.
97. Гуревич, В. Теория размерности: пер. с англ. / Гуревич В., Волмен Г.– М.: 1948. - 232 с.
98. Лунин, Б. С. Образование дефектов поверхности кварцевого стекла при термообработке / Б. С. Лунин, С. Н. Торбин. // *Вестник московского университета, сер. 2. Химия*, 2005. - Т. 46. - № 6. – С. 43 – 47.
99. Джейл, Ф. Х. Полимерные монокристаллы / Ф. Х. Джейл. – Л.: Химия, 1968. - 552 с.
100. Далакова, Н. В. Политермы углов смачивания алюминиевых пленок на кремнии расплавами олово-стронций до и после фотонного отжига / Н. В.

Далакова, К. М. Елекоева, А. З. Кашежев, А. Р. Манукянц, М. Х. Понежев, А. Д. Прохоренко, В. А., Созаев // Известия РАН. Сер.физическая, 2014. – Т.78 №4. – С. 512-514.

101. Огар, П. М. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей: фрактальный подход / П.М. Огар, Д.Б. Горохов // Системы. Методы. Технологии, 2010. - №6. – С. 30 - 38.

102. Потапов, А. А. Фракталы в радиофизике и радиолокации / А. А. Потапов. - 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Университетская книга, 2005. - 848с.

103. Кочеткова, А. С. Исследование нанокompозитов на основе поливинилхлорида методами атомно-силовой микроскопии / А. С. Кочеткова, Н. Ю. Ефимов, Е. А. Соснов. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки, 2013. - № 1(165). – С. 114 – 119.

104. Глазков, Ю.А. О механизме старения контрольных образцов для капиллярной дефектоскопии. Часть 1. Влияние на старение образцов дефектоскопических материалов / Ю. А. Глазков // Дефектоскопия, 2005. - №1. С.60 - 66.

105. Глазков, Ю.А. О механизме старения контрольных образцов для капиллярной дефектоскопии. Часть 2. Влияние на старение образцов дефектоскопических материалов / Ю. А. Глазков // Дефектоскопия, 2005. - №1. С.67 – 73.

106. ОСТ 26-5-99. Контроль неразрушающий. Цветной метод контроля сварных соединений, наплавленного и основного металла. – М.: Стандартинформ, 2000. – 43 с.

107. Способ изготовления контрольных образцов для капиллярной дефектоскопии // Патент РФ №2426110 / Калиниченко Н. П., Калиниченко А. Н., Конарева И. С.

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

109. Kalinichenko, N. P. 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.

110. Калиниченко, Н. П. 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 I, Екатеринбург, 10-14 Сентября 2013. - Екатеринбург: ИРА УТК, 2013 - С. 178-180.

111. Калиниченко, Н.П. 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.

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

113. Kalinichenko, N. P. 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.

114. Калиниченко, Н. П. Универсальный контрольный образец для капиллярной дефектоскопии / Н. П. Калиниченко, А. Н. Калиниченко, И. С. Лобанова (Конарева) // Контроль. Диагностика, 2012. - № 11(173). - С. 34 - 36.

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

116. Kalinichenko, N. P. 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.

117. Филинов, М.В. Обзор зарубежных тест-объектов капиллярного контроля на российском рынке / М. В. Филинов // Контроль. Диагностика, 2008. - № 10. - С. 32 - 36.

118. РД-13-06-2006. Методические рекомендации о порядке проведения капиллярного контроля технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах. – М.: НТЦ ПБ, 2011. – 43 с.

119. Test Piece for Inspection penetrant performace assessment and comparison // Patent USA №6311538 B1 / William J. Martin.

120. Калиниченко, Н.П. Тест-панель из неметалла для капиллярной дефектоскопии / Н. П. Калиниченко, А. Н. Калиниченко, И. С. Лобанова // Контроль. Диагностика, 2013. - №13. – С.93 - 96.

121. Калиниченко, Н.П. 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.

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

123. Kalinichenko, N. P 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.

124. Kalinichenko, N. P 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. Article number 012033. - P. 1-5.

125. ПБ 03-440-02 Правила аттестации персонала в области неразрушающего контроля. - ПИО ОБТ.- 56 с.

126. Шелихов, Г.С. К вопросу о контрольных образцах для нужд неразрушающего контроля / Ш.С. Шелихов, Ю.А. Глазков, В.М. Сапунов, А.О. Каксис // Контроль. Диагностика. №5, 2006, с. 7-15.

127. Глазков Ю.А. К вопросу о метрологической аттестации контрольных образцов для капиллярного контроля // Дефектоскопия, 2004. - №9, с. 69 - 73.

128. ГОСТ 8.736-2011 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. 2013. – М.: Стандартинформ. – 10 с.

129. Kalinichenko, N. P 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, T. Jakubec // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016. – Vol. 132. - Article number 012020. - P. 1 – 7.

130. Kalinichenko, N. P 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 - Article number 01024. - P. 1-6.

131. Калиниченко, Н. П. 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.

132. Калиниченко, Н. П. Метрологические и эксплуатационные характеристики контрольных образцов для капиллярной дефектоскопии из неметаллических материалов [Электронный ресурс] / Н. П. Калиниченко, И. С. Конарева, С. С. Борисов, А. Я. Дерик // Вестник науки Сибири, 2012. - №4(5), С. 144-148. Режим доступа: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/436/376>.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Сертификат о калибровке средства измерений

Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии
Федеральное бюджетное учреждение
**«Государственный региональный центр стандартизации,
 метрологии и испытаний в Томской области»**

СЕРТИФИКАТ

О КАЛИБРОВКЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ № 5184/202

Наименование СИ Образец контрольный для капиллярной
дефектоскопии ГОСТ 18442-80

Заводской номер 113

Принадлежащее ООО "АРЦНК"

ИНН 7017197541

Действительные значения метрологических характеристик

Измеренное значение ширины раскрытия дефекта 4,20 мкм

Измеренное значение длины раскрытия дефекта 7,50 мм

Уровень чувствительности II

Условия проведения калибровки температура окружающего
воздуха 21 °С.

Инженер по метрологии М.Ф. Франтова
 Должность М.Ф. Франтова
 специалист М.Ф. Франтова
 калибровочный М.Ф. Франтова
 пункт М.Ф. Франтова
 № 9
 ИНН 7018002507

подпись М.Ф. Франтова
 инициалы, фамилия М.Ф. Франтова

«29» декабря 2017 г.

017261

Система менеджмента качества ФБУ «Томский ЦСМ» сертифицирована на соответствие требованиям стандарта ИСО 9001. 634012, Томская обл., г.Томск, ул.Косарева, 17а.
 Телефон: (3822) 554-486, 562-459. E-mail: tomsk@tcsms.tomsk.ru. Сайт: http://tomskcsm.ru.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Акты использования результатов диссертационных исследований

Общество с ограниченной ответственностью «Эксперт»
ИНН 701 734 49 01
ОГРН 113 701 702 78 83
634006, г. Томск, ул. Северный городок, дом 44, оф. 105

Акт об использовании результатов кандидатской диссертации
Лобановой Ирины Сергеевны

Комиссия в составе председателя Альбах А.А., директора ООО «Эксперт» и членов Семеновой Е.А., ведущего инженера ООО «Эксперт», и Коротковой И.А., ведущего инженера ООО «Эксперт», составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы на тему «Разработка и исследование образцов из неметаллического материала для испытаний средств капиллярного неразрушающего контроля», полученные Лобановой И.С. направлены на решение задач капиллярной дефектоскопии и имеют реальное практическое значение.

Основными результатами диссертационного исследования являются:

- разработанный способ изготовления образцов для испытаний средств капиллярного неразрушающего контроля из эпоксидного материала с заданными параметрами дефектов (длиной, шириной и глубиной); новизна подтверждается наличием патента Российской Федерации на изобретение;
- программный комплекс, позволяющий смоделировать процессы проникновения жидкостей в щелевидные тупиковые и сквозные капилляры.

Образцы, изготовленные предложенным способом, используются в ООО «Эксперт» при решении таких задач как:

- проверка работоспособности дефектоскопических материалов;
- оценка чувствительности контроля;
- сравнение наборов дефектоскопических материалов между собой;
- отработка технологии капиллярного контроля на образцах из неметаллического материала;
- аттестация персонала в области неразрушающего контроля по капиллярному методу.

Предложенный автором программный комплекс позволяет находить скорость впитывания жидкостей, тем самым определяя параметры контроля, например, время выдержки пенетранта.

Председатель комиссии: _____ А.А. Альбах

Члены комиссии: _____ Е.А. Семенова

_____ И.А. Короткова



Исп. К.В. Перфильев 3822 419921

Продолжение приложения Б



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «АТТЕСТАЦИОННЫЙ
РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР СПЕЦИАЛИСТОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ»
(ООО «АРЦ НК»)

ИНН 7017197541 / КПП 701701001
ОГРН 1077017036227
Р/счет 40702810204000008296
Сибирский ф-л ПАО «Промсвязьбанк»
БИК 045004816

Юридический адрес: 634009, г. Томск, ул. Большая Подгорная, 52
Почтовый адрес: 634034, г. Томск, ул. Котовского 26, а/я 485
тел. (3822) 60-16-98, 60-16-68 факс (3822) 60-16-88
e-mail: info@arcnk.ru. http://arcnk.pф

Акт реализации научных положений и выводов
кандидатской диссертации
Лобановой Ирины Сергеевны

Диссертационная работа Лобановой Ирины Сергеевны

«Разработка и исследование образцов из неметаллического материала для испытаний средств капиллярного неразрушающего контроля», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, посвящена решению практических задач капиллярной дефектоскопии, а именно метрологическому сопровождению данного метода неразрушающего контроля, что достаточно востребовано действующими лабораториями НК.

Автором исследованы существующие способы изготовления образцов для испытаний средств капиллярного неразрушающего контроля. На основе моделирования процессов движения жидкостей в капиллярах, определена возможность изготовления образцов из эпоксидного материала. Предложен способ изготовления образцов из неметаллического материала для капиллярной дефектоскопии, на который получен патент Российской Федерации.

На изготовленный, предложенным способом, образец получен сертификат о калибровке средства измерений №5148/202, выданный ФБУ «Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в Томской области».

Научные положения и выводы диссертационной работы Лобановой Ирины Сергеевны обладают достоверностью и имеют достаточно серьезное практическое значение и применение.

Образцы из эпоксидного материала используются в ООО «АРЦ НК» для следующих задач:

- определения работоспособности, применяемых дефектоскопических материалов и дефектоскопов;
- определения чувствительности контроля;
- сравнения наборов дефектоскопических материалов между собой;
- обучения и аттестации персонала в области неразрушающего контроля по капиллярному методу.

Считаю, что результаты диссертационной работы Лобановой И.С. являются заметным вкладом в теорию и практику НК, а сама диссертант заслуживает присвоения ей ученого звания к.т.н.

Директор ООО «АРЦ НК»
д.т.н., с.н.с.

09.08.18г.



Сидуленко О.А.



Продолжение приложения Б

федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

И.о. проректора по научной работе и инновациям ТПУ
«УТВЕРЖДАЮ»
Степанов И.Б.
2018 г.



АКТ
«14» 08 2018г. № 148

Проверка использования результатов кандидатской диссертации «Разработка и исследование образцов из неметаллического материала для испытаний средств капиллярного неразрушающего контроля» Лобановой Ирины Сергеевны, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, в учебной и научной деятельности Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Составлен комиссией:

Председатель: Суржиков А.П., заведующий ОКД ИШНКБ

Члены комиссии: Плотникова И.В., доцент ОКД ИШНКБ

Федоров Е.М., доцент ОКД ИШНКБ.

В период с «08» 08 2018 по «15» 08 2018 комиссия провела проверку об использовании результатов кандидатской диссертации Лобановой И.С. в учебную и научную деятельности ТПУ, и постановила, что разработанный программный комплекс, позволяющий смоделировать движение жидкости в сквозных и тупиковых щелевидных капиллярах, и образцы из неметаллического материала для испытаний средств капиллярного неразрушающего контроля, предназначенные для задач капиллярной дефектоскопии, используются при выполнении лабораторных работ и при решении исследовательских задач по следующим курсам: «Контроль проникающими веществами», «Физические методы контроля», «Методы и средства измерений, испытаний и контроля. Часть 1», «Неразрушающий контроль и диагностика», «Метрологическое обеспечение средств неразрушающего контроля», «УИРС», «НИРС» бакалаврами и магистрами направления «Приборостроение», а также при выполнении выпускных квалификационных работ.

Некоторые результаты диссертационного исследования легли в основу учебного пособия «Образцы для испытаний средств капиллярного неразрушающего контроля» авторов Н.П. Калиниченко, И.С. Лобановой и А.Н. Калиниченко, применяемого при подготовке студентов по направлению «Приборостроение».

По теме диссертации Лобановой И.С. и под ее руководством выполнено 5 бакалаврских работ. Результаты докладывались на конференциях международного уровня. Студенты были награждены дипломами.

Председатель комиссии: Суржиков А.П., заведующий ОКД ИШНКБ

Члены комиссии: Плотникова И.В., доцент ОКД ИШНКБ

Федоров Е.М., доцент ОКД ИШНКБ