

УДК 620.179

*А.Н. Головков¹, С.И. Куличкова¹, И.И. Кудинов¹, Д.С. Скоробогатько¹***АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ КОНТРОЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ
ДЛЯ ПРОВЕРКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ
ДЕФЕКТОСКОПИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ
ПРИ ПРОВЕДЕНИИ КАПИЛЛЯРНОГО
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-95-103

Приведен анализ существующих на российском рынке контрольных образцов для капиллярного контроля, предназначенных для оценки чувствительности наборов дефектоскопических материалов и проверки правильности выполнения технологического процесса в целом. Кратко описана технология изготовления контрольных образцов. Рассмотрены недостатки и достоинства данных образцов как отечественного, так и зарубежного производства. На основе проведенного анализа сделаны выводы о целесообразности создания новых образцов, учитывающих конструкционные, производственные и эксплуатационные особенности деталей.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, капиллярный контроль, чувствительность, порог чувствительности, контрольные образцы, вероятность обнаружения дефектов.

*A.N. Golovkov¹, S.I. Kulichkova¹, I.I. Kudinov¹, D.S. Skorobogatkо¹***ANALYSIS OF EXISTING TEST PIECES
FOR TESTING OF SENSITIVITY OF FLAW DETECTION MATERIALS
DURING PENETRANT TESTING (review)**

Presents an analysis of existing on the russian market test pieces for penetrant testing, designed to assess the sensitivity of sets of flaw detection materials and verify the correctness of the process as a whole. The technology of manufacturing test pieces is briefly described. The advantages and disadvantages of these pieces, both domestic and foreign production. On the basis of the conducted analysis the conclusions about expediency of creation of the new pieces considering structural, production and operational features of details are drawn.

Keywords: nondestructive testing, penetrant testing, sensitivity, sensitivity threshold, test pieces, probability of detection.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

В настоящее время в авиационной промышленности предъявляется все больше требований к надежности изделий, поэтому значительно возросла номенклатура деталей, поверхности которых подвергаются 100%-ному контролю. При проектировании и эксплуатации деталей Главный конструктор в зависимости от назначения и условий ее эксплуатации учитывает размер допустимых и недопустимых дефектов, поэтому в конструкторской документации для контроля поверхности изделия закладывается метод с требуемым классом чувствительности, достаточным для обнаружения заданного дефекта [1–3].

Одним из самых востребованных и чувствительных методов, с помощью которого обнаруживают поверхностные несплошности материала, является капиллярный метод неразрушающего контроля. Основным физическим свойством контроля является капиллярное заполнение жидкостью, обладающей высокой проникающей способностью, полостей тупиковых и сквозных поверхностных несплошностей материала объектов контроля, с последующей регистрацией образующихся индикаторных следов в месте расположения дефекта визуальным способом или с помощью оптических приспособлений [4, 5].

Чувствительность метода капиллярной дефектоскопии является условной и определяется наименьшими значениями раскрытия, глубины и протяженности надежно выявляемых реальных или искусственно инициированных дефектов по их индикаторному следу. Чувствительность определяется максимальной (нижний порог) и минимальной (верхний порог) величиной раскрытия протяженного дефекта. Порог чувствительности капиллярного метода контроля зависит также от условий контроля и дефектоскопических материалов.

Чувствительность капиллярного метода в соответствии с ГОСТ 18442–80 «Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования» обозначается классами в зависимости от ширины раскрытия дефекта [6].

Материалы и методы

Для оценки чувствительности дефектоскопических материалов и контроля всего технологического процесса, в том числе автоматизированного [7], при капиллярной дефектоскопии, также как и при магнитопорошковой [8], применяются контрольные образцы, представляющие собой металлические пластины с заданной шероховатостью поверхности и нанесенными на них искусственными дефектами. Технология изготовления таких образцов заключается в получении поверхностных трещин заданной глубины, ширина раскрытия которых соответствует заявленному классу чувствительности используемого метода, при этом должна обеспечиваться стабильность геометрических параметров дефекта и свойств материала в течение всего срока эксплуатации, а также стойкость образцов к коррозии при воздействии дефектоскопических материалов. Согласно одному из способов, приведенному в российском стандарте, образцы изготавливают из листовой легированной стали в виде пластин толщиной от 3 до 4 мм [9]. Пластины рихтуют, шлифуют, азотируют с одной стороны на глубину от 0,3 до 0,4 мм и помещают в специальное приспособление для разрушения азотированного слоя, которое устанавливают в тиски и плавно зажимают до появления характерного хруста. Благодаря азотированию поверхностный слой становится хрупким, что способствует появлению трещин, проникающих на всю глубину азотированного слоя, при деформационном воздействии на образец со стороны, противоположной азотированной (рис. 1).



Рис. 1. Контрольный образец, изготовленный по ГОСТ 18442–80

Трещины в азотированном слое можно получить и деформацией заготовки, помещенной на матрицу, путем вдавливания стального шарика, который устанавливают сверху в центре заготовки. Со стороны, противоположной шарика, пластина растрескивается на глубину азотированного слоя. В результате деформационного воздействия в образце возникают трещины. Протяженность и максимальная ширина раскрытия трещин обуславливается усилием нагружения, а также размерами матрицы, шарика и пластины (рис. 2).

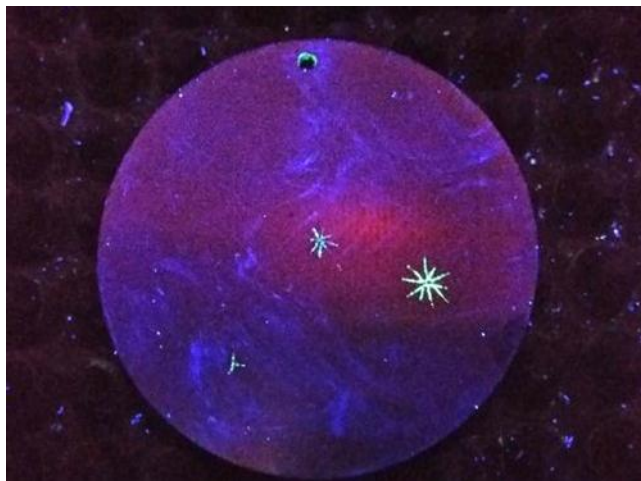


Рис. 2. Контрольный образец с трещиной, полученной надавливанием

Используются также контрольные образцы с трещинами, возникшими при быстром охлаждении неравномерно нагретых пластин из инструментальной стали. Центральная зона такой пластины подвергается нагреванию газовой горелкой до температуры 800–850°C, затем пластина охлаждается, что способствует образованию поверхностных трещин, располагающихся концентрически и в радиальном направлении. Могут применяться также образцы из инструментальной стали с трещинами, возникшими из-за снижения прочности границ зерен при сильном перегреве, граничащем с пережогом (до температуры 1200°C). Такие трещины не имеют определенной ориентировки и иногда образуют сетку (рис. 3).

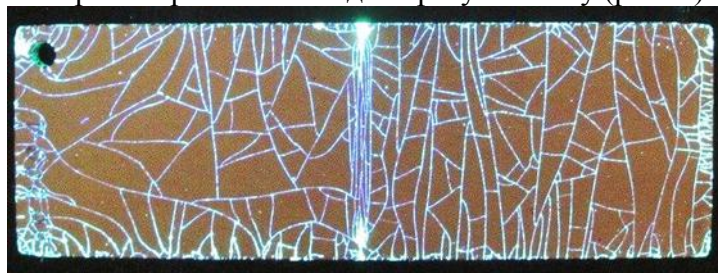


Рис. 3. Контрольный образец с трещинами, полученными при быстром охлаждении

Недостатком этих способов изготовления образцов является окисление полостей дефектов в процессе их изготовления. Из-за того, что полости трещин частично заполнены оксидами, скорость выявления узких трещин мала, что затрудняет оценку чувствительности материалов. Кроме того, такие образцы быстро выходят из строя из-за коррозии и загрязнения полостей трещин и подлежат частой замене. Еще одним типом контрольных образцов являются образцы с трещинами в хромовом покрытии, полученными нагреванием образцов до 100–150°C. В этом случае трещины возникают из-за разности коэффициентов линейного теплового расширения хрома и основы.

Ширина трещин на таких образцах может составлять доли микрометра. Нагреванием могут быть получены трещины на образцах в виде стержней, ступенчато покрытых электролитическим хромом толщиной 0,005; 0,01; 0,03; 0,05 и 0,1 мм. Использование таких образцов позволяет определить глубину трещин.

Наряду с перечисленными способами изготовления контрольных образцов применяют образцы, собранные из двух цилиндров равного диаметра, просверленных по оси и плотно насаженных один за другим на стальной стержень (разборные образцы со щелями-имитаторами трещин). Два соприкасающихся основания цилиндров имеют кольцеобразные хорошо обработанные ступени, которые при контакте образуют тонкую кольцевую щель – имитатор трещины. Цилиндры сжимают гайкой с помощью тарированного ключа. Для создания определенного зазора между цилиндрами зажимают полоски фольги толщиной от 0,0025 до 0,010 мм. Такой контрольный образец, снабженный тарированной пружиной (рис. 4), обеспечивает необходимое усилие сжатия без тарированного ключа. Образец также позволяет проводить тщательную очистку полостей. Однако вследствие большого объема зазоров, отличия шероховатости стенок щелей от шероховатости естественных трещин и других особенностей, влияющих на характер проявления дефектов, разборные образцы применяют ограниченно.

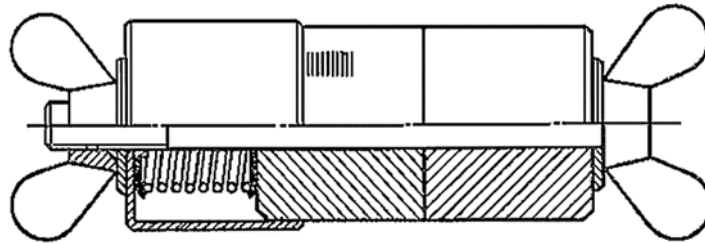


Рис. 4. Образец с щелями-имитаторами трещин

Поскольку капиллярные методы контроля позволяют обнаруживать дефекты в изделиях, выполненных из разных материалов (стекла, керамики, пластмассы), то актуальной задачей стало создание контрольных образцов, выполненных из неметаллических материалов. Так, специалистами федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» разработаны и исследованы образцы из неметаллического материала с заданными параметрами дефектов (шириной, глубиной, длиной). На основании полученных экспериментальных данных в качестве материала предложен эпоксидный материал, исключая окисление поверхности и щелевую коррозию, а также обеспечивающий полную выявляемость дефектов и возможность контроля остатков дефектоскопических материалов [10]. Способ изготовления образцов реализуется следующим образом: на двух противоположных сторонах прямоугольной формы прорезают пазы одинаковой глубины перпендикулярно основанию формы, для размещения в них полосок фольги. Далее форму заливают эпоксидным клеем. После полного затвердения эпоксидного клея полученный брусок извлекают из формы, а поверхность, из которой выходит незалитая часть полоски фольги, подвергают шлифовке с последующим вытравливанием фольги в растворе хлорного железа.

По мнению разработчиков технологии изготовления образцов, с помощью описанного ранее способа можно также получить тест-панели как с «запертыми» дефектами, так и рассекающими поверхность от одной грани до другой (рис. 5).

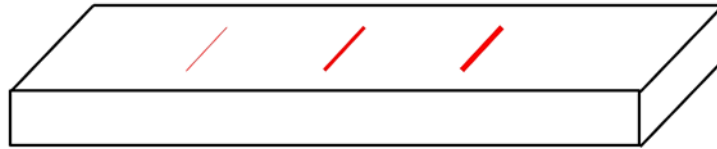


Рис. 5. Контрольный образец из неметаллического материала

В нормативных документах авиационной отрасли РФ предусмотрено применение контрольных образцов, имеющих искусственно-инициированную одиночную тупиковую трещину с величиной раскрытия в соответствии с установленным классом чувствительности. Подобные образцы могут применяться только для определения чувствительности дефектоскопических материалов в соответствии с ГОСТ 18442–80. Единственным нормируемым параметром искусственного дефекта в таких образцах являются ширина раскрытия и длина дефекта, которые определяются металлографическим способом. Отечественные образцы для определения чувствительности достаточно просты в изготовлении и удобны в эксплуатации, однако созданные в них трещины при контроле не учитывают природу образования дефекта, материал и качество обработки поверхности контролируемой детали (шероховатость).

В международной практике помимо величины раскрытия дефекта нормируемым параметром является его глубина, которая также является важным фактором при его выявлении с точки зрения образования достаточного для обнаружения невооруженным глазом слоя индикаторного вещества на контролируемой поверхности. В соответствии с требованиями зарубежных стандартов, для изучения и сравнения чувствительности различных пенетрантных систем, за рубежом используют парные контрольные образцы *1*, описанные в ГОСТ Р ИСО 3452-3–2009, таких фирм-производителей, как Magnaflux (Великобритания) и Helling (Германия). Образец представляет собой латунную пластину с нанесенным никель-хромовым покрытием заданной толщины, на котором созданы параллельные трещины. Данные панели изготовлены с очень мелкими поперечными трещинами заданной глубины на всю ширину образца (10, 20, 30 и 50 мкм) (рис. 6) [11].

Рис. 6. Контрольный образец *1*

Оценку уровня чувствительности дефектоскопических материалов осуществляли по результатам сравнения выявленных дефектов с дефектограммой, приведенной в паспорте на контрольный образец [12–15].

По зарубежным стандартам для проверки соответствующего функционирования всех стадий процесса капиллярного контроля с использованием различных люминесцентных или цветных пенетрантов используется тест-образец PSM-5. Он позволяет быстро и надежно выявить любое заметное отклонение, приводящее к снижению чувствительности пенетрантной системы. Данный образец выполнен из

нержавеющей стали. С одной стороны на образце имеется хромированный участок, который содержит пять звездообразных трещин на одинаковом расстоянии друг от друга, инициированных по мере увеличения размера (диаметра растрескивания). При контроле они проявляются в виде звездообразных индикаций. Самый большой дефект становится видимым при использовании низкочувствительных пенетрантных систем. Самый маленький дефект довольно трудно определить даже при использовании высокочувствительных пенетрантных систем. По данному образцу также можно качественно оценить, что все элементы пенетрантной системы работают правильно. Другой участок образца имеет шероховатую поверхность для проведения качественных испытаний на смываемость [16].

По зарубежным стандартам контрольный образец 2, описанный в ГОСТ Р ИСО 3452-3-2009, представляет собой панель, которая также служит для контроля смываемости пенетрантных систем и мониторингирования всего технологического процесса. Образец изготовлен из аустенитной стали, рабочая сторона которого хромирована и поделена на две части. Одна часть имеет четыре участка с различной шероховатостью поверхности R_a : 2,5; 5; 10 и 15 мкм. Пять звездообразных трещин получены методом нагружения и располагаются на второй части образца (рис. 7) [11].

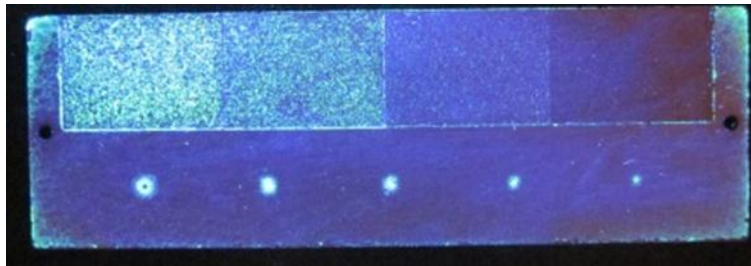


Рис. 7. Контрольный образец 2

Образцы PSM-5 и 2 являются средством оценки всего технологического процесса капиллярного контроля по установленному классу чувствительности. Их не рекомендуется использовать для определения чувствительности наборов дефектоскопических материалов.

В зарубежных образцах, описанных в стандарте ГОСТ Р ИСО 3452-3-2009 и предназначенных для определения чувствительности наборов дефектоскопических материалов, отмечен существенный недостаток – искусственные дефекты в образцах имеют выход на торцевую поверхность, что не совсем соответствует реальным дефектам, образующимся в процессе производства и эксплуатации авиационной техники. Поэтому с их помощью невозможно гарантировать выявление дефектов на натурном объекте с таким же раскрытием, что и на образце. Еще одним существенным недостатком является то, что в предлагаемом комплекте испытательных панелей отсутствуют образцы, работающие по 3 и 4 классу (минимальная величина раскрытия дефекта от 10 до 100 и от 100 до 500 мкм соответственно – по ГОСТ 18442-80 [6]). Однако панели с величиной раскрытия дефекта 50 мкм рекомендуют для контроля пенетрантных систем с низкой чувствительностью. В соответствии с требованиями российского стандарта, данные панели не пригодны для определения порога чувствительности дефектоскопического материала с заявленным пониженным уровнем чувствительности, так как ширина раскрытия имитированных дефектов составляет 2,5 мкм при глубине 50 мкм.

Результаты и обсуждение

По результатам проведенного анализа видно, что, проверяя дефектоскопический набор на чувствительность с использованием существующих контрольных образцов, невозможно утверждать, что такая же чувствительность будет гарантирована при проведении контроля по заданному технологическому процессу. Известно, что на яркость и контрастность индикации от дефекта влияет много факторов: продолжительность проникновения пенетранта, различные интенсифицирующие способы заполнения, время проявления, количество и тип нанесенного проявителя, материал и шероховатость объекта контроля, геометрические характеристики и тип дефекта [17]. Часть данных факторов невозможно учесть с использованием существующих образцов с дефектами отечественного и зарубежного производства. В качестве эталонов целесообразно использовать образцы из того же материала, что и контролируемые детали, с учетом природы образования дефекта, материала и обработки поверхности контролируемой детали (шероховатость), с дефектами, величина раскрытия которых близка к порогу чувствительности применяемого метода капиллярной дефектоскопии [18, 19]. С целью оценки чувствительности наборов дефектоскопических материалов для капиллярных методов контроля необходимо выявлять реальные несплошности, изготовленные на образцах с различными типами дефектов. Из существующих образцов наиболее востребованы хромированные образцы, обладающие высокой стойкостью к коррозии и относительной стабильностью размеров трещин в течение всего периода эксплуатации. Количество трещин на данных образцах может быть разным, но густая сетка трещин затрудняет оценку отдельных элементов рисунка, а на выявляемость одиночных трещин большое влияние могут оказать различные случайные факторы. Поэтому в производственных условиях целесообразно применять контрольные образцы с несколькими одиночными трещинами (термическими, усталостными, шлифовочными, деформационными).

За рубежом помимо оценки чувствительности проводится оценка качества капиллярного контроля с использованием кривых вероятности обнаружения дефектов $POD(a)$. Для проведения данной оценки используют образцы из различных сплавов с дефектами типа трещин от малоциклового усталости, а также натурные образцы с выращенными на них производственными и эксплуатационными дефектами. Для получения достоверной кривой $POD(a)$ также предлагают образцы, полученные по технологии Trueflaw [20], позволяющей получать на натуральных образцах со сложной геометрической формой дефекты с определенными геометрическими размерами (длина, глубина и ширина раскрытия), максимально похожие на натурные. По результатам контроля полученных образцов строятся кривые $POD(a)$, позволяющие оценить качество контроля.

В 2015 г. специалистами ФГУП «ЦИАМ» им. П.И. Баранова проведена работа по определению размеров выявляемых трещин от малоциклового усталости в дисках турбины авиационного двигателя при проведении капиллярного люминесцентного контроля ЛЮМ1-ОВ, а также влияния обработки поверхности на вероятность обнаружения дефекта [21]. Исследования проводили на образцах из сплава ЭП741НП с трещинами от малоциклового усталости различного размера, расположенных вдоль и перпендикулярно направлению обработки поверхности, так же как и на дисках турбины авиационного двигателя. По результатам контроля построены вероятностные кривые выявляемости дефектов. Установлено, что трещины, расположенные перпендикулярно направлению обработки, выявляются лучше, чем трещины, ориентированные вдоль направления обработки. Полученные данные могут быть применены для оценки вероятности обнаружения окружных и радиальных трещин в дисках турбин авиационного двигателя при соблюдении аналогичных режимов контроля.

По результатам проведенных работ, направленных на построение кривых вероятности обнаружения дефектов, установлено, что размер выявляемых натуральных дефектов не соответствует размеру гарантированно выявляемого дефекта, полученному на образце для оценки чувствительности.

Заключения

Имеющиеся в настоящее время образцы, используемые на российских предприятиях для проверки чувствительности капиллярного контроля, достаточно просты в изготовлении, но часто не отражают природы образования дефекта и состояния поверхности детали в местах их расположения. Кроме того, при их изготовлении невозможно получить строго одинаковые размеры трещин для создания идентичных образцов – контрольного и арбитражного.

Наиболее опасными дефектами, при наличии которых детали, как правило, не пригодны к эксплуатации и часто даже не подлежат ремонту, являются трещины различного происхождения. Контрольные образцы с трещинами, полученными с учетом природы образования дефекта при изготовлении той или иной детали, в большей степени могут обеспечить наглядность результатов проверки чувствительности и всего технологического процесса.

С учетом зарубежного опыта оценки качества и чувствительности капиллярного контроля по кривым вероятности обнаружения дефектов POD(a) и полученных результатов исследований специалистов ФГУП «ЦИАМ», с целью повышения надежности неразрушающего контроля целесообразно применять данный способ оценки качества и чувствительности на российских предприятиях авиационной отрасли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
3. Каблов Е.Н. Россия на рынке интеллектуальных ресурсов // Эксперт. 2015. №28 (951). С. 48–51.
4. Ключев В.В., Евлампиев А.И., Попов Е.Д. и др. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник. М.: Машиностроение, 2003. 656 с.
5. Беда П.И., Выборнов Б.И., Глазков Ю.Н. и др. Неразрушающий контроль металлов и изделий. М.: Машиностроение, 1976. 456 с.
6. ГОСТ 18442–80. Неразрушающий контроль. Капиллярные методы. М.: Изд-во стандартов, 1987. 24 с.
7. Куличкова С.И., Головков А.Н., Кудинов И.И., Лаптев А.С. Современные дефектоскопические материалы, оборудование и автоматизация процесса капиллярного неразрушающего контроля // Контроль. Диагностика. 2019. №2. С. 52–57. DOI: 10.14489/td.2019.02.pp 052-057.
8. Кадосов А.Д., Леднев И.С., Павлова Т.Д., Головков А.Н. Контрольные образцы для определения работоспособности магнитопорошковых дефектоскопов и магнитных индикаторов (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2019. №5 (77). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.09.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-76-84.
9. ОСТ1 90282–79. Качество продукции. Неразрушающий контроль. Капиллярные методы. М.: ВИАМ, 1979. 50 с.

10. Лобанова И.С., Калиниченко А.Н., Калиниченко Н.П., Камышева Е.Н. Определение возможности применения неметаллических контрольных образцов для оценки работоспособности дефектоскопических материалов и оценки чувствительности капиллярного контроля // *Reference Materials*. 2017. Vol. 13. No. 1. P. 37–42.
11. ГОСТ Р ИСО 3452-3–2009. Контроль неразрушающий. Проникающий контроль. Часть 3. Испытательные образцы. М.: Стандартинформ, 2011. 12 с.
12. Caturano G., Cavaccini G., Ciliberto A., Pianese V. Probability of Detection for Penetrant Testing in Industrial Environment // *Applied and Industrial Mathematics*. 2010. Vol. 3. No. 3. P. 186–195.
13. Lively J.A. Fluorescent penetrant inspection probability of detection demonstrations performed for space propulsion // *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*. 2003. Vol. 22. P. 1891–1898.
14. Rummel W.D., Matzkanin G.A. Nondestructive evaluation: NDE capabilities data book. Texas Research Institute Austin, 1997. 598 p.
15. Rental V.K., Mylavaran P., Gautam J., Kumar V. NDE Reliability using Laboratory Induced Natural Fatigue Cracks // 7th European-American Workshop on Reliability of NDE. Germany, Potsdam, 2017. P. 1–8. URL: <https://www.ndt.net/search/docs.php3?showForm=off&id=21793> (дата обращения: 04.09.2019).
16. Magnaflux. Магнитопорошковый контроль. Капиллярный контроль [Электронный ресурс]. URL: <https://docplayer.ru/63036394-Капиллярный-контроль-основна...lyarnyy-kontrol.html> (дата обращения: 04.09.2019).
17. Филинов М.В., Прохоренко П.П. Физические основы и средства капиллярной дефектоскопии. М.: Физматлит, 2008. 306 с.
18. Луценко А.Н., Славин А.В., Ерасов В.С., Хвацкий К.К. Прочностные испытания и исследования авиационных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 527–546. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-527-546.
19. Калашников В.С., Кашапов О.С., Павлова Т.В., Истракова А.Р. Исследование сварных соединений сплава ВТ41, полученных методом ЭЛС // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №S5. С. 81–88. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s5-81-88.
20. Kemppainen M., Virkkunen I. Production of Real Flaws in Probability of Detection (POD-) Samples for Aerospace Applications // 4th International Symposium on NDT in Aerospace. 2012. P. 1–7. URL: <http://2012.ndt-aerospace.com/Proceedings/Th1A-POD-I> (дата обращения: 04.09.2019).
21. Кудинов И.И., Цыкунов Н.В., Якубин С.П. Определение размеров выявляемых трещин в дисках турбины авиационного двигателя при проведении капиллярного контроля // Сб. тез. докл. Всерос. науч.-техн. конф. «Авиадвигатели XXI века» (Москва, 24–27 нояб. 2015 г.). М.: ЦИАМ имени П.И. Баранова, 2015. С. 502–503.