

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ВЫЯВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В ДЕТАЛЯХ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЕФЕКТОСКОПИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ ОТЕЧЕСТВЕННОГО И ЗАРУБЕЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА

© 2021 г. Е.Н. Каблов¹, О.Г. Оспенникова¹, И.И. Кудинов¹, А.Н. Головков¹, А.С. Генералов¹, А.В. Князев¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов», государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ), Россия 105005 Москва, ул. Радио, 17
E-mail: viamlab622@gmail.com

Поступила в редакцию 23.10.2020; после доработки 13.11.2020
Принята к публикации 20.11.2020

Проведена работа по оценке эффективности выявления эксплуатационных дефектов при проведении капиллярного контроля деталей авиационной техники из жаропрочных сплавов с использованием дефектоскопических жидкостей отечественного и зарубежного производства, выявляющие дефекты с величиной раскрытия 1 мкм и менее. Рассмотрены два взаимодополняющих подхода качественной оценки эффективности различных наборов дефектоскопических материалов, рекомендуемых к применению при проведении капиллярного контроля в производстве и эксплуатации деталей авиационной техники, с целью выбора набора, выявляющего дефекты определенного вида с наименьшими размерами. Первый подход основан на оценке основных дефектоскопических свойств проникающих многокомпонентных жидкостей, обеспечивающих их проникновение в полости поверхностных дефектов, а второй — на экспериментальном получении параметров выявляемости дефектов с вероятностью 50 и 90 % при доверительной вероятности 50 % и с вероятностью 90 % при доверительной вероятности 95 %.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, капиллярный контроль, дефектоскопические материалы, образец, трещина, вероятность обнаружения.

DOI: 10.31857/S0130308221010073

ВВЕДЕНИЕ

Для создания авиационной техники, имеющей конкурентоспособные показатели ресурса, необходимо более полное использование эксплуатационных возможностей материала деталей и узлов. Современные российские и международные документы по сертификации газотурбинных двигателей дополняют ранее применявшийся подход к определению ресурса их основных деталей (в частности, дисков турбины и компрессора из никелевых жаропрочных сплавов) требованием подтверждения назначенного ресурса с использованием концепции безопасного развития дефекта. Этот подход учитывает, среди прочего, вероятность пропуска дефекта при проведении неразрушающего контроля детали в условиях ремонта двигателя. Таким образом, эффективность неразрушающего контроля основных деталей двигателя стала напрямую определять его ресурс и периодичность проведения ремонта. Применение при контроле высокочувствительных методов, обнаруживающих дефекты с минимальными геометрическими размерами и с высокой вероятностью обнаружения, в этих условиях становится столь же действенным способом повышения конкурентоспособности двигателя, как и применение современных материалов с высокими показателями трещиностойкости, статической и циклической прочности [1—5].

Одним из основных высокочувствительных методов неразрушающего контроля в производстве и эксплуатации, позволяющим обнаруживать поверхностные дефекты с минимальной шириной раскрытия менее 1 мкм, является капиллярный люминесцентный метод. При проведении данного контроля часто возникает вопрос о возможности обнаружения дефекта определенной длины и глубины, которые необходимы конструкторам для проведения ресурсных и прочностных расчетов. Использование современных образцов [6] для проверки чувствительности контроля не позволяет дать даже приблизительный ответ на заданный вопрос, так как полученные в них дефекты значительно отличаются от натуральных дефектов в авиационных деталях: природой образования, материалом образца и окончательной обработкой поверхности, которая в процессе изготовления детали формирует на поверхности напряженно-деформированное состояние. Выявление данных дефектов на образцах не гарантирует выявления натуральных дефектов с аналогичными геометрическими характеристиками на поверхностях различных деталей.

В отечественных литературных источниках для выбора методов капиллярного контроля приведены минимально обнаруживаемые значения протяженности, глубины и ширины раскрытия дефекта у выхода на поверхность [7]. Опыт использования капиллярного контроля показывает, что данные значения не относятся к размерам гарантированно выявляемых дефектов, поэтому не могут учитываться в полной мере для анализа и сравнения методов контроля.

Поскольку образование различных дефектов носит случайный характер, а также их расположение, формы и размеры, то статистически удобно проводить вероятностную оценку их выявляемости для сравнения различных методов и методик неразрушающего контроля. Данную оценку для капиллярного контроля можно проводить по результатам экспериментальных исследований с использованием образцов или деталей с искусственными или естественными дефектами определенного типа и размера. Результатом оценки будет являться график зависимости вероятности обнаружения дефекта (P) от линейного геометрического параметра (например, длина дефекта), характеризующий конкретную технологию контроля. Для построения данной зависимости используется обобщенная линейная модель. Этот способ, распространенный в статистической обработке бинарных данных, позволяет свести задачу к линейной регрессии. Для биномиального распределения различают следующие виды обобщенных линейных моделей: $\text{logit } f(X)$, $\text{probit } f(X)$, $\text{cloglog } f(X)$ и $\text{loglog } f(X)$. Данные зависимости представляют собой сигмовидную функцию (рис. 1), асимптотически приближающаяся к нулю слева и к единице справа, которая наилучшим образом описывают исходные бинарные данные капиллярного контроля. Бинарные данные, показанные на рис. 1 точками, очевидно, принимают возможные значения: только «0», если дефект пропущен, или «1», если дефект обнаружен [8].

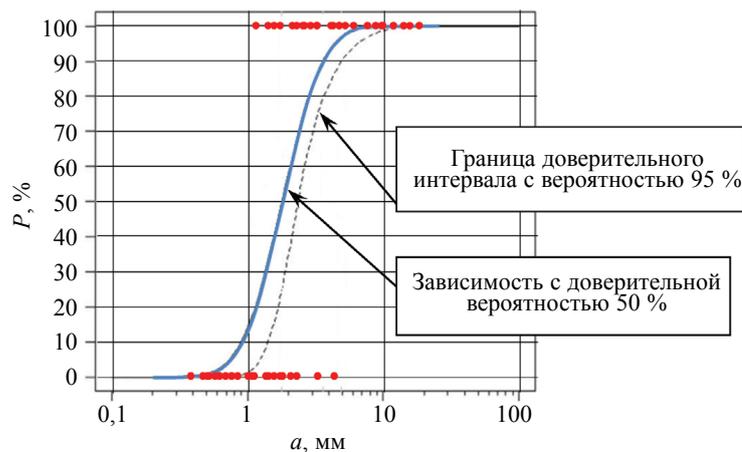


Рис. 1. Пример зависимости вероятности обнаружения дефекта (P) от его размера (a).

Полученная зависимость имеет доверительную вероятность 50%, а при прочностных расчетах в качестве достоверно обнаруживаемого дефекта рекомендуется применять, учитывать размер дефекта, выявляемого с вероятностью 90% при доверительной вероятности 95% ($a_{90/95}$), поэтому получение зависимости сопровождается построением границ доверительного интервала с доверительной вероятностью 95%, показанной на рис. 1 штриховой линией [9]. Подробно алгоритм и математическая модель построения зависимостей и доверительного интервала описаны в MIL-HDBK-1823A [8].

За рубежом параметры вероятности обнаружения дефектов также широко используются для сравнения существующих методов и технологий неразрушающего контроля. В отечественных и иностранных литературных источниках приводятся кривые вероятности обнаружения дефектов капиллярными методами контроля, полученные для различных наборов дефектоскопических материалов [10], технологий капиллярного контроля с учетом применения различного оборудования, величины интенсивности ультрафиолетового излучения при осмотре объектов контроля, влияния процесса травления [11], а также с учетом влияния направления окончательной механической обработки поверхности [12].

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ КАПИЛЛЯРНОГО КОНТРОЛЯ

Для построения кривых вероятности обнаружения дефектов $POD(a)$ при доверительной вероятности 50 и 95% необходимо провести экспериментальное исследование с использованием, по крайней мере, 60 дефектов на образцах или натуральных деталях [13]. Достоверность оценки кривых увеличивается с увеличением количества дефектов.

Опыт статистической обработки бинарных результатов капиллярного контроля показал, что наилучшим образом экспериментальные данные описываются с использованием обобщенных линейных статистических моделей, таких как $probit f(X)$ или $logit f(X)$:

$$probit f(X) = g(y) = \Phi^{-1}(p), \quad (1)$$

где $g(y)$ — $probit$ функция связи; $y = \beta_0 + \beta_1 X$, β_1 и β_0 — коэффициенты линейной регрессии; $\Phi^{-1}(p)$ — функция обратная нормальной функции распределения; $p = N(x, \mu, \sigma)$ — функция нормального распределения; μ и σ — математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение нормального распределения вероятностей; X — размер дефектов (длина).

$$logit f(X) = g(y) = \log(p/(1-p)), \quad (2)$$

где $g(y)$ — $logit$ функция связи; $p = 1/(1+e^{-z})$ — логистическая функция; $z = \beta_0 + \beta_1 X$; β_1 и β_0 — коэффициенты линейной регрессии; X — размер дефектов (длина).

Используя данные функции, строят диаграммы вероятности обнаружения дефектов с доверительной вероятностью 50 и 95%. Из этих диаграмм получают числовые параметры вероятности обнаружения дефектов, удобные для анализа полученных результатов: $a_{50/50}$, $a_{90/50}$ и $a_{90/95}$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Определение основных дефектоскопических свойств проникающих многокомпонентных жидкостей, обеспечивающих их проникновение в полости поверхностных дефектов

Оценка дефектоскопических свойств жидкостей получила широкое применение при разработке и создании проникающих многокомпонентных составов для капиллярного контроля. Дефектоскопические свойства жидкостей, такие как вязкость и смачиваемость, влияют на формирование индикаторного рисунка и обнаружение дефектов, за счет увеличения степени заполнения полостей дефектов смачивающей жидкостью [14].

В паспортах прилагаемых к отечественным и зарубежным наборам дефектоскопических материалов отсутствует информация о физических характеристиках многокомпонентных композиций жидкостей, обеспечивающих выявление дефектов с заданной чувствительностью. Данная информация была бы также полезна для качественного сравнения наборов и интерпретации полученных результатов контроля. С этой целью проведены измерения динамической вязкости, краевого угла смачивания проникающих многокомпонентных жидкостей отечественного и зарубежного производства, а также определен параметр динамического изменения диаметра пятна, растекающегося по горизонтальной поверхности контролируемого образца.

Для косвенного определения внутреннего взаимодействия слоев проникающих жидкостей, имеющих очень низкие значения динамической вязкости, использовался вискозиметр Брукфильда со специальным шпинделем и адаптером.

Для косвенного определения величины взаимодействий на межфазной границе «проникающая жидкость — поверхность образца из жаропрочного сплава» определялись такие параметры как краевой угол смачивания, с использованием оптического анализатора контактного угла смачивания, и диаметр пятна, растекающегося по горизонтальной поверхности контролируемого образца от капли объемом 2 мкл, нанесенной с помощью пипеточного дозатора.

Степень адсорбционного взаимодействия определялась путем сравнения образованных пятен в ультрафиолетовом свете длиной волны 365 нм.

Определение параметров выявляемости дефектов выбранными наборами дефектоскопических материалов

Для оценки эффективности выявления эксплуатационных дефектов в деталях авиационной техники из жаропрочного сплава были проведены экспериментальные исследования на образцах из жаропрочного сплава с трещинами малоциклового усталости различного размера длиной

от 0,5 до 13 мм в количестве 60 шт., с использованием постэммульгируемого набора дефектоскопических жидкостей отечественного производства (ЛЮМ1-ОВ), соответствующего 1-му классу чувствительности, согласно ГОСТ 18442 [15], в составе которого пленкообразующий проявитель, и жидкостей зарубежного производства (фирмы SHERWIN), отнесенный к 4-му классу чувствительности, согласно ISO 3452-2 [16], в составе которого используется порошковый проявитель. Дефекты на образцах получены циклическим нагружением на испытательных машинах. Так как на выявление трещин капиллярным методом влияет напряженно-деформированное состояние, после изготовления образцов с помощью рентгенодифракционного метода проведены измерения поверхностных напряжений, которые составили минус 505 ± 130 МПа. Полученные данные соответствуют типичным значениям сжимающих напряжений на поверхностях критических зон деталей авиационных двигателей из жаропрочных сплавов. Вид образца с искусственным дефектом показан на рис. 2.

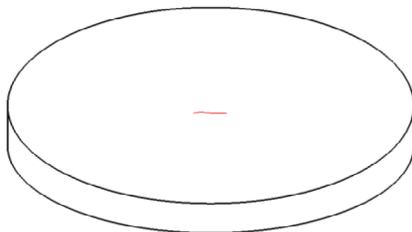


Рис. 2. Вид образца с искусственным дефектом.

Контроль комплекта образцов с трещинами МЦУ в количестве 60 шт. проводился 2-мя дефектоскопистами с использованием исследуемых наборов дефектоскопических материалов, по режимам, рекомендованным производителями и технологической документацией, описывающей процесс капиллярного контроля. Вначале контроль образцов проводился с использованием зарубежного набора, затем отечественного. После сравнительных испытаний наборов было проведено два экспертных контроля. Первый проводился с целью сравнения результатов, полученных при первичном аттестационном контроле, по технологии, приведенной в паспорте, что гарантировало определение работоспособности образцов и рассмотрение их в выборке для проведения вероятностных расчетов. Второй проводился с использованием перспективных технологий, позволяющих повысить выявляемость дефектов, за счет интенсификации заполнения полостей дефектов проникающей жидкостью [17], что определяло возможность выявления обнаруженных дефектов по стандартным технологиям на данных образцах.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ основных физических свойств проникающих многокомпонентных жидкостей, обеспечивающих их проникновение в полости поверхностных дефектов

Значение динамической вязкости для проникающей жидкости ЛЖ-6А при температуре $26,5$ °С составило $5,11$ мПа·с, а для проникающей жидкости зарубежного производства — $17,9$ мПа·с при температуре $26,2$ °С.

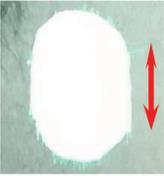
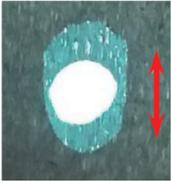
Получено значение краевого угла близкое к 0° для проникающих жидкостей отечественного и зарубежного производства, что говорит о высоком адсорбционном взаимодействии с поверхностью твердого тела. Результаты эксперимента в виде значений диаметров пятен пенетрантов, растекшихся по поверхности участка образца за промежуток времени 5 мин, представлены в табл. 1. Стрелкой показано направление механической обработки поверхности образца из жаропрочного сплава.

Из табл. 1 видно, что величина взаимодействия зарубежного пенетранта с поверхностью образца выше, чем у пенетранта отечественного производства. Следует отметить, что у пятна пенетранта отечественного производства есть характерный неярко люминесцентный «ореол», что говорит о протекании активных процессов испарения низкокипящего растворителя, входящего в состав жидкости.

Таким образом, анализируя полученные данные физических свойств, можно сделать вывод, что, обладая более высокой (в сравнении с пенетрантом отечественной разработки) вязкостью, за-

Таблица 1

Оценка адсорбционных свойств исследуемых проникающих жидкостей с поверхностью образца

Проникающая жидкость	Вид пятна в УФ освещении	Макс. размер свечения, мм
Зарубежный пенетрант		9,34
Отечественный пенетрант		7,82 (3,26)

Зарубежный пенетрант обеспечивает высокую степень взаимодействия с поверхностью образца, а за счет высокой яркости люминесценции повышает «видимость» индикаторного рисунка, сохраняя его за счет меньшей летучести входящих в состав растворителей.

Однако полученные данные исследуемых свойств не позволяют в полном объеме оценить их влияния на конечную характеристику дефектоскопических материалов — выявляемость дефектов.

Анализ параметров выявляемости дефектов выбранными наборами дефектоскопических материалов

Наиболее показательные результаты контроля обнаруженных (условное обозначение — «1») и необнаруженных (условное обозначение — «0») дефектов при контроле наборами отечественного и зарубежного производства приведены в табл. 2. Также приведены результаты выявления трещин при экспертном контроле с использованием интенсификации процесса заполнения полостей дефектов проникающей жидкостью.

Таблица 2

Результаты капиллярного контроля с использованием наборов отечественного (ЛЮМ1-ОВ) и зарубежного производства участков с дефектами

№ п/п	Набор отечественного производства	0 / 1	Набор зарубежного производства	0 / 1	Экспертный контроль	Протяженность трещины, мм
1		0		0		0,9
2		1		0		1,7
3		1		0		5,3
4		1		1		7,0

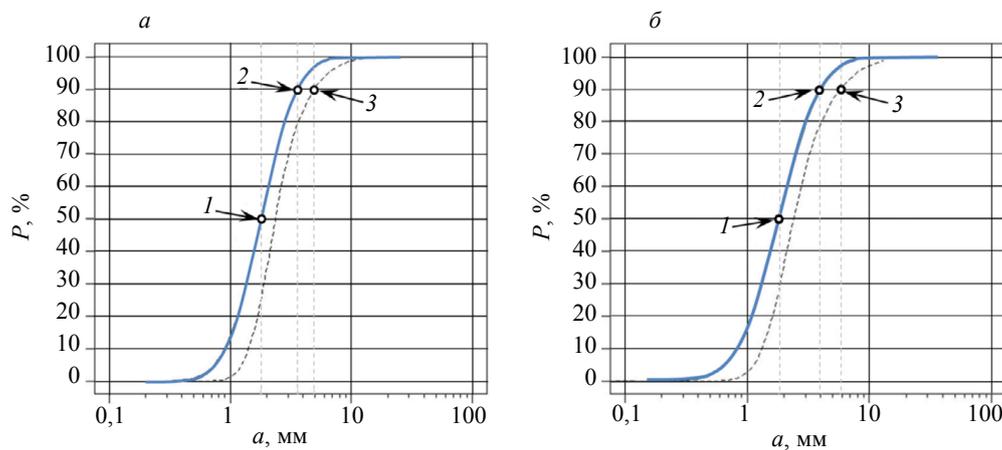


Рис. 3. Вероятность обнаружения усталостных трещин в образцах из жаропрочного сплава (1 — $a_{50/50}$; 2 — $a_{90/50}$; 3 — $a_{90/95}$):
а — отечественный набор; б — зарубежный набор.

По полученным данным проведены расчеты вероятности обнаружения усталостных трещин для каждого набора дефектоскопических материалов. Построены суммарные кривые вероятности по результатам контролей 2-х дефектоскопистов для каждого из наборов дефектоскопических материалов. На рис. 3 показаны диаграммы выявляемости трещин малоциклового усталости капиллярным люминесцентным методом контроля на образцах из жаропрочного сплава с использованием наборов отечественного и зарубежного производства. Параметры вероятности обнаружения трещин МЦУ с вероятностью 50 и 90 % при доверительной вероятности 50 % и с вероятностью 90 % при доверительной вероятности 95 % приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры вероятностной оценки обнаружения трещин с использованием дефектоскопических наборов отечественного и зарубежного производства

Вероятность обнаружения трещины, % / при доверительной вероятности, %	Номер точки на рисунке	Длина трещины, мм	
		Контроль набором ЛЮМ1-ОВ	Контроль зарубежным набором
50/50	1	1,79	1,83
90/50	2	3,60	4,03
90/95	3	4,95	5,78

Следует отметить, что свечения от дефектов с большой протяженностью, полученные с использованием зарубежного набора дефектоскопических материалов, шире, а с использованием набора отечественного производства над дефектами формируется индикаторные рисунки узкие с четкими границами. По мере приближения к концам трещины наблюдалось расширение индикаторных полос, что связано с проявлением концевого капиллярного эффекта из-за сужения полости трещины к ее концам. При «сухом» методе проявления, с использованием пористого сорбента зарубежного производства, наблюдалось формирование над трещинами индикаторных рисунков узловатого характера. Резкая изменчивость ширины индикаторных полос, прерывистое строение и неравномерная интенсивность люминесценции связана с ограниченностью контакта с индикаторной жидкостью, выходящей преимущественно из отдельных точек капиллярной полости [18]. Различия в размерах индикаторного рисунка от небольших дефектов не наблюдалось, что связано с небольшим объемом индикаторной жидкости в полости трещины. Максимальный размер дефекта, пропущенный с использованием отечественного набора дефектоскопических материалов, составил 4,5 мм, зарубежного — 5,3 мм, а минимально выявленный размер составил 1,7 и 1,9 мм соответственно.

ВЫВОДЫ

Проведена работа по оценке эффективности выявления эксплуатационных дефектов в деталях авиационной техники из жаропрочного сплава с использованием дефектоскопических жидкостей отечественного и зарубежного производства.

Предложены два подхода качественной оценки эффективности различных наборов дефектоскопических материалов, рекомендуемых к применению при проведении капиллярного контроля в производстве и эксплуатации авиационных деталей, с целью выбора набора, выявляющего дефекты определенного вида с наименьшими размерами.

Показаны дефектоскопические свойства многокомпонентных проникающих жидкостей, входящих в набор данных материалов, влияющих на формирование индикаторного рисунка и соответственно обнаружение дефектов.

По результатам оценки параметров вероятности обнаружения трещин МЦУ на образцах из жаропрочного сплава, имеющих на поверхности остаточные сжимающие напряжения, капиллярными люминесцентными методами контроля установлено, что данные дефекты выявляются лучше с использованием постэммульгируемого отечественного набора дефектоскопических материалов ЛЮМ1-ОВ, имеющего в составе пленочный проявитель ПР-1, чем материалов зарубежного производства с использованием порошкового проявителя.

Получение меньших значений параметров вероятности обнаружения трещин МЦУ с использованием зарубежного набора, вероятно, связано, в том числе, с отсутствием достаточного технологического опыта при обработке поверхностей образцов данными дефектоскопическими материалами.

Полученные данные могут быть применены при выборе наборов для обнаружения трещин малочикловой усталости капиллярным методом неразрушающего контроля в деталях авиационной техники из жаропрочного сплава, имеющих аналогичное состояние поверхности и геометрию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авиационные правила. Часть 33. Нормы летной годности двигателей воздушных судов. 2014.
2. Каблов Е.Н. Россия на рынке интеллектуальных ресурсов // Эксперт. 2015. № 28 (951). С. 48—51.
3. 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. С. 3—33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33
4. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // Металлы Евразии. 2012. № 3. С. 10—15.
5. Луценко А.Н., Перов Н.С., Чабина Е.Б. Новые этапы развития Испытательного центра // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 460—468. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-460-468
6. Головков А.Н., Куличкова С.И., Кудинов И.И., Скоробогатько Д.С. Анализ существующих контрольных образцов для проверки чувствительности дефектоскопических материалов при проведении капиллярного неразрушающего контроля (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2019. № 11. Ст. 95. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 03.03.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-95-103
7. Беда П.И., Выборнов Б.И. и др. Неразрушающий контроль металлов и изделий. М.: Машиностроение, 1976. 456 с.
8. MIL-HDBK-1823A «Nondestructive evaluation system reliability assessment», департамент обороны США, 2009.
9. ОСТ 1 01207-2012 Отраслевой (авиационный) стандарт. Двигатели газотурбинные авиационные. Неразрушающий контроль основных деталей. Общие требования.
10. A Comparison of the Capability of Sensitivity Level 3 and Sensitivity Level 4 Fluorescent Penetrants to Detect Fatigue Cracks in Various Metals / Bradford H. Parker Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD.
11. Nondestructive Testing Handbook «Liquid Penetrant Testing». V. 2. 3rd edition — ASNT.
12. Кудинов И.И., Цыкунов Н.В., Якубин С.П. Определение размеров выявляемых трещин в дисках турбины авиационного двигателя при проведении капиллярного контроля / Всероссийская научно-техническая конференция «авиадвигатели XXI века» Сб. тезисов докладов. М.: ЦИАМ имени П.И. Баранова. 24—27 ноября, 2015. С. 502—503.
13. Чертищев В.Ю. Оценка вероятности обнаружения дефектов акустическими методами в зависимости от их размера в конструкциях из ПКМ для выходных данных контроля в виде бинарных величин // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 3. С. 65—79 DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-65-79
14. Мигун Н.П., Гнусин А.Б. Тепловые воздействия при капиллярном неразрушающем контроле. Минск: Беларус. навука, 2011. 131 с. ISBN 978-985-08-1341-1.

15. ГОСТ 18442—80 «Неразрушающий контроль. Капиллярные методы». Изд-во стандартов, 1987. 24 с.
16. ISO 3452-2:2013 Non-destructive testing-Penetrant testing-Part 2: Testing of penetrant materials. 2013. 32 p.
17. Кудинов И.И., Головков А.Н., Куличкова С.И., Скоробогатько Д.С. Оценка эффективности применения различных способов интенсификации процесса капиллярного контроля с применением отечественного набора дефектоскопических материалов // Дефектоскопия. 2019. № 11. С. 59—66. DOI: 10.1134/S0130308219110071
18. Ospennikova O.G., Kudinov I.I. et al. Research of Defectoscopic Properties of Powder Compositions for Increasing Efficiency and Reliability of Penetrant Testing of Complex Shaped // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 3. P. 291—297. [Оспенникова О.Г., Кудинов И.И., Головков А.Н., Куличкова С.И., Скоробогатько Д.С. Исследование дефектоскопических свойств порошковых композиций для повышения эффективности и надежности капиллярного контроля деталей сложной конфигурации // Дефектоскопия. 2020. № 3. С. 72—78. DOI: 10.31857/S0130308220030094]