

Научная статья

УДК 675.043.42

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-116-127

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ НАНЕСЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ ПРОЯВИТЕЛЕЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ КАПИЛЛЯРНОГО КОНТРОЛЯ

С.И. Куличкова¹, А.Н. Головков¹, И.И. Кудинов¹, Д.С. Скоробогатько¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Приведен анализ эффективности различных способов нанесения порошкового проявителя, входящего в состав набора дефектоскопических материалов с I классом чувствительности, для автоматизированного капиллярного контроля. Описаны технологии контроля с нанесением проявителя при помощи установки электростатического распыления и автоматической установки – шторм-камеры. Приведены результаты сравнительных испытаний двух технологий на образцах с трещинами малоциклового усталости различного размера, а также график зависимости вероятности обнаружения дефекта от его размера, характеризующий конкретную технологию.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, капиллярный контроль, чувствительность, контрольные образцы, порошковый проявитель, электростатическое распыление, вихревой метод нанесения

Для цитирования: Куличкова С.И., Головков А.Н., Кудинов И.И., Скоробогатько Д.С. Оценка эффективности различных способов нанесения порошковых проявителей при проведении капиллярного контроля // Труды ВИАМ. 2022. № 10 (116). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-116-127.

Scientific article

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF VARIOUS METHODS OF APPLYING POWDER DEVELOPERS DURING CAPILLARY CONTROL

S.I. Kulichkova¹, A.N. Golovkov¹, I.I. Kudinov¹, D.S. Skorobogatko¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. Analyzes the effectiveness of various methods of applying a powder developer included in a penetrant materials with level I sensitivity for automated penetrant testing. The technologies of penetrant testing with the application of a powder developer using the electrostatic spraying unit and the automatic storm-camera. The results of comparative tests of two technologies on samples with low-cycle fatigue cracks of various sizes are presented, as well as a graph of the probability of detecting a defect characterizing a specific control technology.

Keywords: non-destructive testing, fluorescent penetrant testing, sensitivity, control samples, powder developer, electrostatic spray, vortex application method

For citation: Kulichkova S.I., Golovkov A.N., Kudinov I.I., Skorobogatko D.S. Evaluation of the effectiveness of various methods of applying powder developers during capillary control. *Trudy VIAM*, 2022, no. 10 (116), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-116-127.

Введение

Одной из задач стратегического развития авиационной отрасли является существенное улучшение качества промышленной продукции. Данная задача может быть успешно решена при условии совершенствования производства и инновационной модернизации диагностики авиационных изделий [1, 2].

В современных условиях на машиностроительных и ремонтных предприятиях для обнаружения нарушения сплошности материала широко применяется дефектоскопия, позволяющая провести оценку целостности изделия и его пригодности к использованию по назначению. Для диагностики поверхностных несплошностей наиболее востребован контроль проникающими веществами.

Несплошности материала выявляют, обнаруживая проникающую жидкость, оставшуюся в его полости после удаления избытка с контролируемой поверхности, при помощи нанесенного проявителя, облегчающего обнаружение местоположения и визуальное восприятие изображения по четкому индикаторному рисунку и созданному фону.

Для гарантированного образования индикации, аналогичной форме несплошности, необходимо извлечь из ее полости жидкость в количестве, достаточном для пропитки всей толщины слоя проявителя. Индикаторные рисунки, образующиеся при контроле, обладают способностью люминесцировать в ультрафиолетовых лучах за счет флуоресцирующих красителей, входящих в состав многокомпонентной проникающей системы, поэтому рисунок обнаружить легче за счет обеспечения его высокой контрастности по отношению к фону.

На процесс извлечения проникающей жидкости из полости несплошности существенное влияние оказывают сорбционные и капиллярные явления, процессы диффузии и растворения. В дефектоскопии с использованием проникающих веществ в качестве проявителей широко применяются сухой порошок, суспензия и проявитель типа краски.

Порошковые проявители представляют собой мелкодисперсный сорбент. Через капиллярные зазоры между частицами порошка проникающая жидкость за счет сорбционных и адсорбционных сил извлекается из полости несплошности, образуя индикаторный рисунок.

Суспензии также являются сорбентами, диспергированными в летучих растворителях либо воде. Возможность их нанесения методом распыления при помощи пульверизатора или аэрозольных баллонов, которые позволяют достичь равномерности нанесения слоя, является преимуществом суспензионного проявителя.

Проявляющие краски представляют собой пигментированный быстросохнущий раствор связующего или пленкообразователя. Формирование индикаторного рисунка происходит за счет процессов диффузии и растворения. Нанесение краски на контролируемую поверхность осуществляется вручную при помощи кисти либо распылением при помощи пульверизатора и аэрозольных баллонов. Наряду с преимуществами, суспензии и проявители типа краски имеют и существенный недостаток – невозможность полностью покрыть детали со сложной геометрической формой, имеющие пазы и отверстия.

В настоящее время в авиационной промышленности предъявляются более высокие требования к прочностным испытаниям и исследованиям авиационных материалов, поэтому значительно увеличилась номенклатура деталей, подвергающихся 100%-ному контролю [3–5].

За рубежом в двигателестроительной области для контроля деталей, имеющих труднодоступные зоны, широко применяются автоматизированные технологии с использованием порошковых проявителей [6–9].

В данной статье приведен анализ эффективности нанесения порошкового проявителя в электрическом поле высокого напряжения (электростатический метод) и метода воздушной взвеси (вихревой) при проведении автоматизированного капиллярного контроля.

Материалы и методы

Важной характеристикой порошков для использования их в капиллярной дефектоскопии являются адсорбционные свойства, которые определяются природой твердого тела, химическим составом и геометрической формой частиц, а также величиной удельной поверхности. Процесс извлечения проникающей жидкости из полости несплошности происходит благодаря ее капиллярному впитыванию, диффузии и растворению газа. Первоначально основной движущей силой процесса является капиллярное давление в пористом слое проявителя $P_{пр}$, которому препятствует капиллярное давление в канале дефекта P_k . Извлечение происходит также за счет давления сжатого воздуха в канале $P_{сж}$. После нанесения проявителя проникающая жидкость соприкасается с частицами порошка (рис. 1), смачивает и окрашивает их, извлекается из несплошности порами проявителя, продвигаясь к внешней поверхности слоя до тех пор, пока не достигнет ее.

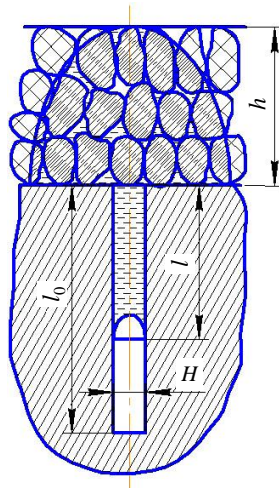


Рис. 1. Начальная стадия извлечения проникающей жидкости слоем порошкового проявителя толщиной h из плоскопараллельной несплошности глубиной l_0 и шириной H ; l – глубина заполнения несплошности проникающей жидкостью (сечение изделия перпендикулярно стенкам плоскопараллельной трещины)

Далее проникающая жидкость распространяется вдоль поверхности пока полностью или частично не перейдет из несплошности в проявитель и не окрасит его, образуя след несплошности шириной W (рис. 2).

При последующем извлечении проникающей жидкости из несплошности давление газа может быть ниже атмосферного давления P_a . В результате возникает разрежение, препятствующее извлечению проникающей жидкости из несплошности. Тогда возникает процесс диффузионного извлечения. Он характеризуется растворением в проникающей жидкости уже не запертого в канале несплошности воздуха, а атмосферного воздуха. Это способствует извлечению проявителем большего объема проникающей жидкости. Растворение и диффузия воздуха в проникающей жидкости на стадии проявления, соответствующей условию $P_{сж} < P_a$, протекает с меньшей скоростью, чем скорость капиллярной пропитки.

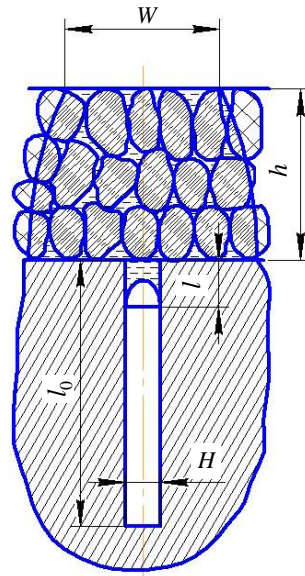


Рис. 2. Проявление плоскопараллельной несплошности глубиной l_0 и шириной H слоем порошкового проявителя толщиной h при распространении фронта пропитки вдоль контролируемой поверхности; W – ширина следа (окрашенной части проявителя)

Окончательная стадия проявления наступает тогда, когда проникающая жидкость почти вся извлечена порошком из несплошности и окрасила ее, образовав след шириной W , хорошо видимый на контролируемой поверхности (рис. 3).

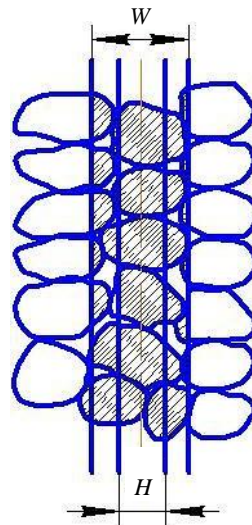


Рис. 3. Вид сверху на след шириной W плоскопараллельной несплошности раскрытием (шириной) H

В научно-техническом литературном источнике описываются процессы образования индикаторного рисунка с использованием порошковых проявителей для цилиндрического тупикового капилляра [10].

Условие для полного извлечения проникающей жидкости порошковым проявителем имеет следующий вид:

$$P_k + P_a \leq P_k^{np} + P_{сж}, \quad (1)$$

где P_k – капиллярное давление; P_a – атмосферное давление; $P_{сж}$ – давление сжатого в полости капилляра воздуха на стадии капиллярной пропитки; $P_k^{пр}$ – капиллярное давление в проявителе (усредненная величина сил поверхностного натяжения в порошковом проявителе, приходящаяся на единицу площади фронта пропитки), равное

$$P_k^{пр} = \frac{2\sigma}{R_3}, R_3 = \frac{R_{ср}}{\cos\theta_{пр}}, \quad (2)$$

где R_3 – эффективный радиус пор проявителя; $R_{ср}$ – средний радиус пор проявителя; $\theta_{пр}$ – краевой угол смачивания проникающей жидкостью частиц проявителя.

С учетом выражения (2) неравенство (1) примет следующий вид:

$$\frac{2\sigma\cos\theta}{R} + P_a \leq \frac{2\sigma}{R_3} + P_{сж}, \quad (3)$$

где σ – поверхностное натяжение проникающей жидкости; θ – краевой угол смачивания стенки капилляра; R – радиус капилляра.

Из представленной зависимости (3) видно, что на процесс выявления дефектов порошковым проявителем оказывают влияние его пористость и способность смачиваться проникающей жидкостью.

В отраслевом стандарте ОСТ1 90243–83 [11], устанавливающем общие требования к дефектоскопическим материалам, приводятся целевые наборы, в составе которых в качестве проявителей используются различные мелкодисперсные порошки из таких материалов, как оксид магния, тальк, Аэросил марки А-300, обладающих необходимой адсорбционной способностью, позволяющей формировать яркий и контрастный индикаторный рисунок над поверхностью дефекта. В большинстве случаев нанесение порошковых проявителей осуществляется вручную методом погружения контролируемой детали в толщу проявителя либо методом посыпания, при этом качество нанесения во многом зависит от субъективных факторов. При массовом контроле из-за повышенной запыленности вредными химическими веществами воздуха рабочей зоны создаются неудовлетворительные условия труда для дефектоскопистов.

Для устранения перечисленных недостатков, а также повышения качества и технического уровня контроля изделий необходимо применение современного оборудования и технологий, обеспечивающих повышение производительности и чувствительности капиллярного контроля [12–14].

В настоящее время на предприятиях авиационной отрасли внедряется относительно новый, прогрессивный и эффективный метод нанесения дефектоскопических материалов в электрическом поле высокого напряжения, при котором заряженные частицы материала перемещаются и осаждаются на контролируемой поверхности. Попав на поверхность контролируемого объекта, частицы материала отдают ему свой заряд и образуют равномерное покрытие на его поверхности (рис. 4, а). При применении данного метода значительно уменьшается туманообразование, что способствует улучшению санитарно-гигиенических условий труда. При электростатическом способе распыления отсутствует необходимость периодического контроля чистоты порошкового проявителя (в отличие от погружного метода). Одновременно следует отметить, что при нанесении проявителя на детали сложной геометрической формы невозможно полностью покрыть всю поверхность, так как силовые линии быстрее концентрируются по краям выемок и выступающих участков и не проникают дальше внутрь (рис. 4, б). Это результат воздействия электростатических и аэродинамических сил (эффект контура Фарадея).

Для устранения этого эффекта предусматривается нанесение проявителя в труднодоступные места вручную методом воздушного распыления.

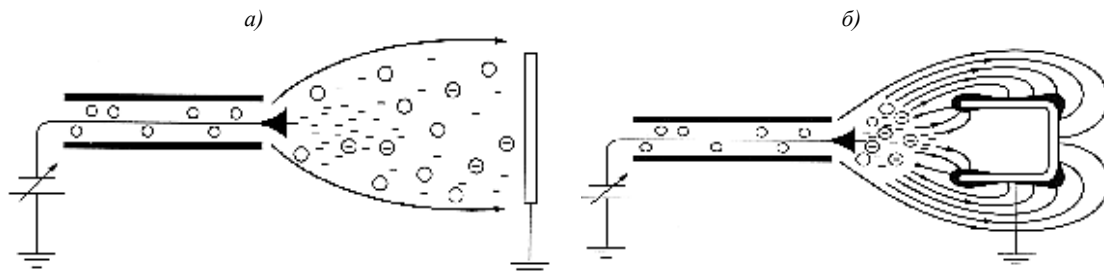


Рис. 4. Электростатическое напыление (зарядка коронным разрядом)

Наряду с электростатическим методом нанесения применяется и трибостатический. В данном методе при распылении отсутствует ток высокого напряжения. Порошок заряжается в процессе трения, при этом не создается сильного электростатического поля, поэтому отсутствует эффект контура Фарадея (рис. 5, а). Заряженные частицы могут проникать в глубокие выемки и равномерно прокрашивать изделия сложной конфигурации (рис. 5, б).

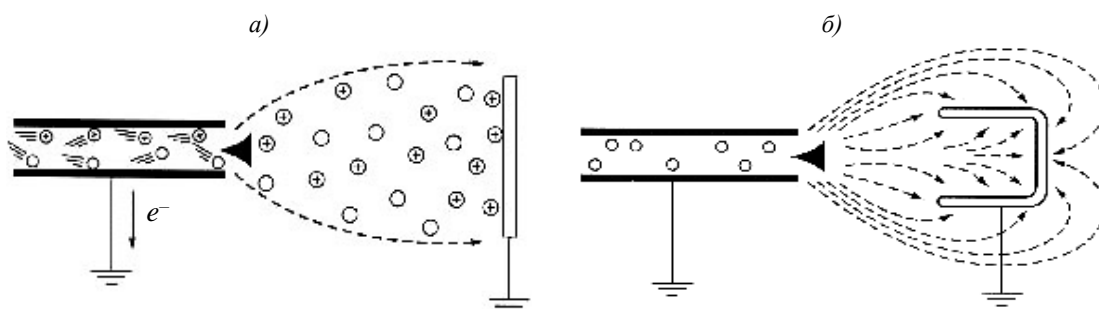


Рис. 5. Трибостатическое напыление (зарядка трением)

На предприятиях также внедряется установка (шторм-камера), в которой формируется воздушный вихрь внутри камеры, способствующий созданию взвеси порошкового проявителя. После отключения установки происходит оседание порошка на поверхность детали, находящейся в камере. Данный способ нанесения позволяет обеспечить на поверхности детали тонкий равномерный слой, с помощью которого уверенно вытягивается индикаторная жидкость (пенетрант) из дефектов и образуется индикаторный рисунок дефекта.

Для экспериментальных исследований с целью определения эффективности электростатического и вихревого методов нанесения порошковых проявителей при проведении автоматизированного капиллярного контроля, в качестве образца выбран Аэросил марки А-300 (высокодисперсный, высокоактивный аморфный, пирогенный диоксид кремния с размером частиц от 5 до 40 нм), входящий в состав люминесцентного набора дефектоскопических материалов с I классом чувствительности (особо высоким) по ГОСТ 18442–80 [15].

Чувствительность набора подтверждалась на контрольном образце № 1 по ГОСТ Р ИСО 3452-3–2009, представляющем собой металлическую пластину с заданной шероховатостью поверхности и нанесенным на нее искусственным дефектом глубиной 10 мкм и шириной раскрытия 0,5 мкм [16].

Эффективность различных способов нанесения порошковых проявителей оценивали по результатам сравнительных испытаний. Экспериментальные исследования проводили на образцах из жаропрочного сплава с трещинами малоциклового усталости (МЦУ) различного размера в два этапа: нанесение порошкового проявителя Аэросил марки А-300 при помощи электростатического распыления и нанесение методом создания воздушной взвеси (вихревой метод). Данный тип дефектов является наиболее трудно выявляемым при проведении капиллярного контроля и поэтому выбран для экспериментальных исследований. Испытания проводили при одинаковых условиях и в соответствии с требованиями ОСТ1 90282–79 [17, 18]. Работа также выполнялась с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Технологическую операцию подготовки образцов к контролю (обезжиривание) проводили в 4%-ном водном моющем растворе Неонола АФ 9-12 с интенсификацией процесса в ультразвуковой ванне, с последующей промывкой и прогревом в печи.

Проникающую жидкость наносили на образцы, охлажденные до температуры окружающей среды, иммерсионным методом. Избыток проникающей жидкости удаляли промывкой образцов проточной водой, затем проводили эмульгирование при помощи поверхностно-активных веществ, входящих в состав очищающей жидкости. Следы эмульгатора также удаляли промывкой образцов проточной водой. Полноту удаления индикаторной жидкости определяли визуально – путем осмотра мокрых объектов контроля в ультрафиолетовом свете. Преимущество такого вида очистки заключается в обеспечении наивысшей чувствительности к мелким несплошностям. Далее образцы просушивали в конвективном потоке воздуха.

Для исключения подсыхания проникающей жидкости, оставшейся в полости несплошности, нанесение Аэросила марки А-300 производили в кратчайший срок после окончания сушки.

На первом этапе испытаний Аэросил марки А-300 наносили на контролируемую поверхность при помощи установки электростатического распыления. Для создания электростатического поля на распылитель подавали высоковольтный потенциал относительно покрываемой поверхности. Распыляемый порошковый проявитель по системе трубопроводов под минимальным давлением поступал в распылитель, имеющий специальную форму для обеспечения контактной зарядки подаваемого порошка, который под действием электростатического поля высокого напряжения транспортировался к покрываемой поверхности, находящейся под нулевым потенциалом. При регулировании на пульте управления количества подаваемого порошка и его электростатического заряда проявитель ложился тонким равномерным слоем и выполнялось необходимое условие процесса проявления. Толстый слой может маскировать дефект, так как проникающей жидкости может быть не достаточно, чтобы окрасить толстый слой проявителя, достигнуть поверхностного слоя и окрасить его с образованием следа. Осмотр контролируемой поверхности осуществляли под ультрафиолетовым светом при интенсивности излучения 2900 мкВт/см^2 через 10 мин после нанесения проявителя, определяя характер первого рисунка и через 60 мин наблюдая его динамику. Обнаруженные следы дефектов регистрировали путем фотографирования под ультрафиолетовым светом при интенсивности излучения 2900 мкВт/см^2 .

На втором этапе испытаний нанесение порошкового проявителя Аэросил марки А-300 осуществляли в автоматической установке (шторм-камере) с формированием воздушного вихря и одновременным распылением порошкового проявителя с дальнейшим оседанием взвеси на объекте контроля. Осмотр контролируемой

поверхности осуществляли под ультрафиолетовым светом при интенсивности излучения 2900 мкВт/см^2 через 10 и 60 мин после нанесения проявителя, а по истечении полного времени проявления производили фотографирование контролируемой поверхности.

Результаты и обсуждение





Эффективность автоматизированных способов нанесения порошкового проявителя Аэросил марки А-300 методом электростатического распыления и с помощью воздушной взвеси в шторм-камере определяли по качеству полученного индикаторного рисунка, выраженного полнотой выявления и контрастностью.

В табл. 1 показаны результаты сравнительных испытаний образцов из жаропрочного сплава с трещинами МЦУ различного размера с помощью капиллярного контроля при использовании люминесцентного набора дефектоскопических материалов с I классом чувствительности по ГОСТ 18442–80 [15] с применением различных способов нанесения порошкового проявителя Аэросил марки А-300:

- испытание № 1 – стандартная технология с использованием метода электростатического нанесения порошкового проявителя Аэросил марки А-300;
- испытание № 2 – стандартная технология с использованием метода нанесения порошкового проявителя Аэросил марки А-300 воздушной взвесью в автоматической установке (шторм-камере).

Таблица 1

Результаты сравнительных испытаний с помощью капиллярного контроля

Условный номер образца	Испытание № 1	Испытание № 2
1		
2		

Из представленных результатов видно, что при проведении капиллярного контроля с использованием метода электростатического нанесения порошкового проявителя Аэросил марки А-300 при помощи установки на образцах 1 и 2 выявлены все три дефекта в полном объеме. Индикаторные рисунки над дефектами выражены ярким, контрастным свечением. Полученные результаты свидетельствуют о наилучших показателях адсорбционных свойств проявителя.

При проведении капиллярного контроля с использованием метода нанесения порошкового проявителя Аэросил марки А-300 воздушной взвесью в автоматической установке (шторм-камере) на контрольных образцах выявилось только два дефекта. Индикаторные следы от дефектов выражены с меньшим контрастом.

Для сравнения методов также использовали статистический подход вероятностной оценки обнаружения дефектов. Данную оценку для капиллярного контроля проводят по результатам экспериментальных исследований с использованием в том числе образцов с искусственными дефектами определенных типа и размера. Результатами оценки являются график зависимости вероятности обнаружения дефекта (P) от его размера, характеризующий конкретную технологию контроля, и полученные из зависимостей параметры вероятности обнаружения дефектов с заданной доверительной вероятностью $a_{50/50}$, $a_{90/50}$, $a_{90/95}$ (рис. 6) [18–20].

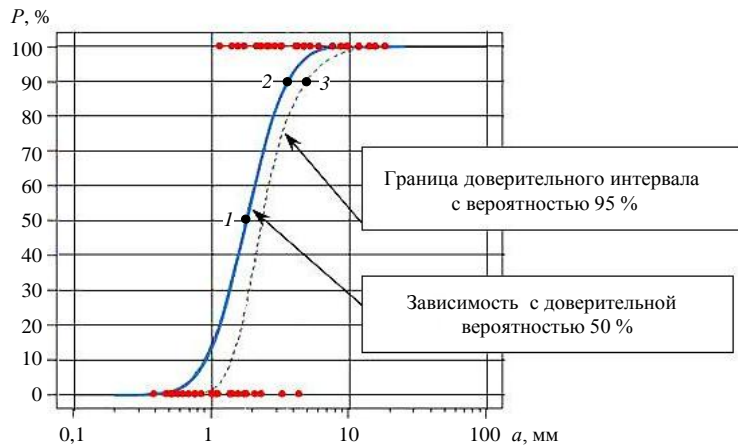


Рис. 6. Пример зависимости вероятности обнаружения дефекта (P) от его размера (a)

По результатам контроля образцов (в соответствии с ОСТ1 90282–79) по двум технологиям проведены расчеты, построены зависимости вероятности обнаружения трещин МЦУ от их размера. Из данных зависимостей получены параметры вероятности обнаружения трещин МЦУ с вероятностью 50 и 90 % при доверительной вероятности 50 % и с вероятностью 90 % при доверительной вероятности 95%, которые приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры вероятности обнаружения трещин, возникающих при малоциклового усталости

Вероятность обнаружения трещины (%) / при доверительной вероятности (%)	Условный номер точки на рис. 6	Длина трещины, мм, при испытании	
		№ 1	№ 2
50/50	1	1,43	1,61
90/50	2	2,63	3,29
90/95	3	3,54	4,68

По результатам количественной оценки видно, что технология капиллярного люминесцентного контроля с использованием электростатического способа нанесения порошкового типа проявителя позволяет гарантированно выявлять дефекты с меньшим размером, чем при использовании технологии с вихревой камерой.

Заключения

В результате проведенной работы экспериментально подтверждено, что внедрение в автоматизированный процесс капиллярного контроля технологий с использованием способа нанесения порошкового проявителя в электрическом поле высокого напряжения (электростатический метод) и воздушной взвесью в шторм-камере (вихревой метод) позволит повысить не только чувствительность контроля за счет усиления яркости, контрастности и полноты выявления индикаторного рисунка, но и вероятность обнаружения дефектов, не выявляемых при использовании стандартной технологии (нанесение порошкового проявителя методом посыпания).

На основании проведенного сравнительного анализа и расчетов по вероятностной оценке обнаружения дефектов сделаны выводы, что наиболее эффективным является электростатический метод нанесения порошкового проявителя для обнаружения как производственных, так и эксплуатационных дефектов.

За счет получаемого высоковольтного отрицательного заряда и направленного движения по силовым полям электрического поля частиц порошкового проявителя происходит равномерное распределение проявителя по всей контролируемой поверхности, при этом повышаются адсорбционные и адгезионные взаимодействия на межфазных границах «пенетрант–проявитель» и «проявитель–контролируемая поверхность». Проявитель прочно удерживается на поверхности с образованием валика над местом расположения дефектов, показывая высокие дефектоскопические свойства яркостью и контрастностью индикаторных рисунков. Преимуществами данного способа также являются быстрота, экономное расходование дефектоскопического материала и возможность регулирования толщины покрытия.

Отдельно следует отметить, что в замкнутом токопроводящем контуре напряженность электростатического поля равна нулю, поэтому если контролируемое изделие имеет углубления в виде карманов, глубокие впадины и т. д., то частицы проявителя не смогут попасть внутрь, поскольку там электрическое поле не существует, и будут оседать на других частях этого изделия. Для того чтобы порошковый проявитель покрывал подобные труднодоступные места (именуемые также контуром Фарадея), рекомендуется отключить подачу электрического тока, тем самым на время превратив электростатический краскораспылитель в традиционный пневматический или безвоздушный.

Таким образом, по результатам проведенных комплексных исследований установлено, что выбранный метод имеет перспективу использования при проведении автоматизированного капиллярного контроля как в условиях массового и серийного производства, так и при мелкосерийном и единичном изготовлении изделий. Уменьшить габариты применяемых линий контроля, снизить расход используемого материала и, следовательно, стоимость контроля, а также повысить его производительность позволяет применение электростатического способа нанесения (распыление в электрическом поле).

Список источников

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. Подживотов Н.Ю. Минимальные объемы выборок для оценки начальных моментов распределения предела прочности при растяжении образцов металлических конструкционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 2 (63). Ст. 11. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 04.07.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-103-114.
4. Клюев 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. 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.
7. 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.
8. Rummel W.D., Matzkanin G.A. *Nondestructive evaluation (NDE) capabilities data book*. Third ed. Austin: TRI Austin, 1997. 598 p.

9. Rental V.K., Mylavaram Ph., Gautam J., Kumar V. NDE Reliability using Laboratory Induced Natural Fatigue Cracks // 7th European-American Workshop on Reliability of NDE. Potsdam, 2017. P. 1–8. URL: <https://www.ndt.net/search/docs.php3?showForm=off&id=21793> (дата обращения: 04.09.2022).
10. Мигун Н.П., Гнусин А.Б. Тепловые воздействия при капиллярном неразрушающем контроле. Минск: Беларус. навука, 2011. 131 с.
11. ОСТ1 90243–83. Капиллярные методы неразрушающего контроля. Маркировка. М.: ВИАМ, 1983. 38 с.
12. 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.pp052-057.
13. 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.
14. Мубаракшин Р.М. Оптимизация технологии и оборудования для производства дисков газотурбинных двигателей и установок // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 4 (53). С. 11–18. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-11-18.
15. ГОСТ 18442–80. Неразрушающий контроль. Капиллярные методы. М.: Изд-во стандартов, 1987. 24 с.
16. ГОСТ Р ИСО 3452-3–2009. Контроль неразрушающий. Проникающий контроль. Часть 3. Испытательные образцы. М.: Стандартинформ, 2011. 12 с.
17. ОСТ1 90282–79. Качество продукции. Неразрушающий контроль. Капиллярные методы. М.: ВИАМ, 1979. 50 с.
18. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Кудинов И.И., Головков А.Н., Генералов А.С., Князев А.В. Оценка вероятности выявления эксплуатационных дефектов в деталях авиационной техники из жаропрочных сплавов с использованием дефектоскопических жидкостей отечественного и зарубежного производства // Дефектоскопия. 2021. № 1. С. 64–71. DOI: 10.31857/SO130308221010073.
19. 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 (52). С. 65–79. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-65-79.
20. Краснов И.С., Ложкова Д.С., Далин М.А. Оценка дефектности заготовок из титановых сплавов для вероятностного расчета риска разрушения дисков газотурбинных двигателей в эксплуатации // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 2 (63). Ст. 12. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 04.07.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-115-122.

References

1. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Kablov E.N. Modern materials – the basis of innovative modernization of Russia. *Metally Evrazii*, 2012, no. 3, pp. 10–15.
3. Podzhivotov N.Yu. The minimum samples amounts for an assessment of the initial moments of distribution of tensile ultimate strength for the samples of structural metallic materials. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 11. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 4, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-103-114.
4. Klyuev V.V., Evlampiev A.I., Popov E.D. et al. *Non-destructive control and diagnostics: a reference book*. Moscow: Mashinostroenie, 2003, 656 p.
5. Beda P.I., Vybornov B.I., Glazkov Yu.N. et al. *Non-destructive control of metals and products*. Moscow: Mashinostroenie, 1976, 456 p.
6. 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, pp. 186–195.

7. Lively J.A. Fluorescent penetrant inspection probability of detection demonstrations performed for space propulsion. *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2003, vol. 22, pp. 1891–1898.
8. Rummel W.D., Matzkanin G.A. *Nondestructive evaluation (NDE) capabilities data book*. Third ed. Austin: TRI Austin, 1997, 598 p.
9. Rentala V.K., Mylavarapu Ph., Gautam J., Kumar V. NDE Reliability using Laboratory Induced Natural Fatigue Cracks. *7th European-American Workshop on Reliability of NDE*. Potsdam, 2017, pp. 1–8. Available at: <https://www.ndt.net/search/docs.php3?showForm=off&id=21793> (accessed: September 4, 2022).
10. Migun N.P., Gnusin A.B. *Thermal effects in capillary non-destructive testing*. Minsk: Belarus Navuka, 2011, 131 p.
11. Industry Standard 1 90243–83. *Capillary methods of non-destructive testing. Marking*. Moscow: VIAM, 1983, 38 p.
12. Kulichkova S.I., Golovkov A.N., Kudinov I.I., Laptev A.S. Modern flaw detection materials, equipment and automation of the process of capillary non-destructive testing. *Kontrol. Diagnostika*, 2019, no. 2, pp. 52–57. DOI: 10.14489/td.2019.02.pp052-057.
13. Kudinov I.I., Golovkov A.N., Kulichkova S.I., Skorobogatko D.S. Evaluation of the effectiveness of the application of various methods of intensifying the process of capillary control using a domestic set of flaw detection materials. *Defektoskopiya*, 2019, no. 11, pp. 59–66. DOI: 10.1134/S0130308219110071.
14. Mubarakshin R.M. Optimization of technology and equipment for producing disks of gas turbine engines and units. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 4 (53), pp. 11–18. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-11-18.
15. State Standard 18442–80. *Unbrakable control. capillary methods*. Moscow: Publishing house of standards, 1987, 24 p.
16. State Standard R ISO 3452-3-2009. *The control is non-destructive. Penetrating control. Part 3: Test specimens*. Moscow: Standartinform, 2011, 12 p.
17. IndustryStandard1 90282–79. *Product quality. Unbrakable control. capillary methods*. Moscow: VIAM, 1979, 50 p.
18. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Kudinov I.I., Golovkov A.N., Generalov A.S., Knyazev A.V. Estimation of the probability of detecting operational defects in aircraft parts made of heat-resistant alloys using domestic and foreign flaw detection liquids. *Defektoskopiya*, 2021, no. 1, pp. 64–71. DOI: 10.31857/SO130308221010073.
19. Chertishchev V.Yu. The estimation of the probability of defects detection by the acoustic methods, depending on their size in constructions from PCM for output control data in the form of binary. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 3, pp. 65–79. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-65-79.
20. Krasnov I.S., Lozhkova D.S., Dalin M.A. Evaluation of deficiency of titanium alloy forgings for probabilistic calculation of gas turbine engine disks fracture risk. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 12. Available at: <https://journal.viam.ru> (accessed: July 4, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-115-122.

Информация об авторах

Куличкова Светлана Ивановна, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Головков Алексей Николаевич, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Кудинов Илья Игоревич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Скоробогатько Дмитрий Сергеевич, ведущий инженер, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Svetlana I. Kulichkova, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexey N. Golovkov, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Ilya I. Kudinov, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Dmitry S. Skorobogatko, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 11.07.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 14.07.2022.
The article was submitted 11.07.2022; approved and accepted for publication after reviewing 14.07.2022.