

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТОСКОПИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ КАПИЛЛЯРНОГО КОНТРОЛЯ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

© 2020 г. О.Г. Оспенникова<sup>1,\*</sup>, И.И. Кудинов<sup>1</sup>, А.Н. Головков<sup>1</sup>, С.И. Куличкова<sup>1</sup>,  
Д.С. Скоробогатько<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное 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.ru

Поступила в редакцию 15.01.2020; после доработки 04.02.2020

Принята к публикации 04.02.2020

Проведена работа по оценке дефектоскопических свойств различных составов порошковых композиций для определения возможности использования их в составе современного российского набора дефектоскопических материалов для капиллярного люминесцентного контроля, обеспечивающего выявление несплошностей по 1-му классу чувствительности в соответствии с ГОСТ 18442. С целью повышения эффективности и надежности выявления дефектов в труднодоступных местах деталей сложной конфигурации подобраны составы, позволяющие повысить яркость, контрастность и устойчивость индикаторного рисунка к механическому воздействию, за счет высоких показателей адсорбционного и адгезионного взаимодействий с используемой проникающей жидкостью и поверхностью контролируемой детали.

*Ключевые слова:* неразрушающий контроль, капиллярный контроль, дефектоскопические материалы, индикаторный след, проявитель, адсорбция.

DOI: 10.31857/S0130308220030094

### ВВЕДЕНИЕ

В процессе изготовления и эксплуатации деталей различного назначения дефекты могут возникать в зонах, являющихся возможными концентраторами напряжений, например в таких местах, как отверстия, галтели, пазы, канавки, буртики и др. Стратегическим направлением развития современной продукции является проектирование изделий с учетом направленного контроля качества данных зон с использованием, в том числе, различных методов неразрушающего контроля (НК) в ручном, механизированном или автоматизированном способе исполнения [1—5]. Одним из наиболее известных и распространенных методов НК является метод капиллярного контроля, позволяющий обнаружить несплошности на поверхностях деталей различной конфигурации. Для производственного контроля данный метод обладает очень ценными качествами, такими как наглядность результатов контроля, относительная простота технологического процесса, наивысшая чувствительность и высокая производительность при контроле 100 % поверхности любых деталей, как простой конфигурации, так и сложной [6, 7]. Но, несмотря на все эти достоинства, контроль в зонах конструктивных особенностей различных изделий, может быть затруднен из-за невозможности нанесения дефектоскопических материалов в объеме, достаточном для формирования индикаторного рисунка над несплошностями материала различного размера и недоступности осмотра оператором данных участков при освещении с необходимой интенсивностью излучения [8].

Самым чувствительным методом капиллярного контроля является люминесцентный, позволяющий обнаружить поверхностные трещины как производственного, так и эксплуатационного происхождения в УФ свете с минимальной величиной раскрытия 1 мкм и менее. Люминесцентный набор состоит из следующих дефектоскопических материалов: индикаторная жидкость (пенетрант), очищающие материалы (очиститель) и проявитель. Взаимо обусловленные сочетания этих материалов составляют комплекты различного назначения. Исторически люминесцентный метод развивался в виде двух вариантов: с использованием порошкового проявителя и беспорошкового проявителя. Первый вариант основан на использовании в качестве проявителей порошков, образующих индикаторный рисунок за счет сорбционных процессов, протекающих в тонких слоях проявителя. Второй вариант основан на использовании в качестве проявителей красок и суспензий, образующих индикаторный рисунок несплошностей за счет диффузионных и диффузионно-сорбционных процессов.

В технологическом процессе одним из основных требований для формирования индикаторного рисунка над поверхностью дефекта является качественное нанесение тонкого и равномерного слоя проявителя. Однако при контроле деталей, имеющих труднодоступные зоны, такие как отверстия, канавки, внутренние полости, обеспечить выполнение данного требования не всегда представляется возможным. Поэтому, для наилучшего выявления дефектов, выбор типа проявителя должен осуществляться с учетом геометрии контролируемой детали.

Рассматривая основные достоинства и недостатки различных видов проявителей для контроля деталей, имеющих труднодоступные зоны, мировой опыт контроля в двигателестроительной области при производстве и эксплуатации показал, что оптимальной является технология с использованием порошкового проявителя. При нанесении порошковых проявителей с использованием вихревой камеры обеспечивается наиболее качественное их нанесение в самые труднодоступные места сложных по конфигурации деталей.

При этом, выбирая данную технологию, стоит понимать, что ее существенным недостатком является значительно меньшая устойчивость порошкового покрытия к механическому воздействию (по сравнению с суспензионным проявителем, имеющим в своем составе пленкообразующие компоненты), и образовавшийся над дефектом индикаторный рисунок может быть удален в процессе осмотра и разбраковки деталей.

В данной статье представлены результаты работ по подбору и опробованию различных порошковых проявителей в составе отечественного набора дефектоскопических материалов с первым классом чувствительности [9], обеспечивающих высокие дефектоскопические качества пары жидкость — сорбент.

### ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ

Важной характеристикой порошков для использования их в капиллярной дефектоскопии являются адсорбционные свойства, которые определяются природой твердого тела, химическим составом, геометрией частиц и величиной удельной поверхности. Для более полного извлечения пенетранта из полостей дефектов необходимо достижение максимально возможного химического сродства поверхности адсорбента к пенетранту, превышающее его сродство к поверхности контролируемой детали. Желательно, чтобы молекула пенетранта взаимодействовала с поверхностью детали по гидрофобному механизму, при этом порошок адсорбента не должен слёживаться. Процесс взаимодействия пенетранта с проявителем состоит из несколько стадий: адсорбция проявителя на поверхности контролируемой детали, смачивание поверхности адсорбента пенетрантом, заполнение пор сорбента пенетрантом, адсорбция красителя на активных центрах поверхности сорбента.

В литературе предлагаются модели для цилиндрического тупикового капилляра, описывающие процессы образования индикаторного рисунка с использованием порошковых проявителей [10].

Авторами показано, что условие для случая полного извлечения пенетранта 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;  $P_k^{np}$  — капиллярное давление в проявителе (усредненная величина сил поверхностного натяжения в порошковом проявителе, приходящаяся на единицу площади фронта пропитки), равное

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

где  $R_3$  — эффективный радиус пор проявителя;  $R_{cp}$  — средний радиус пор проявителя;  $\theta_{np}$  — краевой угол смачивания пенетрантом частиц проявителя.

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

где  $\sigma$  — поверхностное натяжение пенетранта;  $\theta$  — краевой угол смачивания стенки капилляра;  $R$  — радиус капилляра.

Анализируя представленную авторами зависимость, видно, что в предложенной модели на процесс выявления дефектов с точки зрения вида используемого проявителя оказывает его пористость и способность смачиваться пенетрантом.

Пористость порошкового проявителя может быть описана как плотность заполнения поверхности его частицами. Наиболее близким параметром, используемым для порошковых материалов и описывающим полноту заполнения объема его частицами, является его насыпная плотность, которая должна быть учтена при выборе новых адсорбентов для капиллярной дефектоскопии.

Для современных отечественных и зарубежных наборов дефектоскопических материалов используются различные порошки, обеспечивающие различную чувствительность контроля. Наиболее распространенные — окись магния, тальк, мел, карбонат кальция, кремнеземы, диатомовая земля и смеси этих веществ обладают необходимой адсорбционной способностью, позволяющей формировать яркий и контрастный индикаторный рисунок над поверхностью дефекта.

В зарубежных стандартах [11—16] предлагаются порошковые проявители для люминесцентного капиллярного контроля деталей из металла, пластика, керамики на основе оксидов алюминия, кремния, магния, титана, диатомита, талька и пентаэритрита (2,2-бис (гидроксиметил) пропан-1,3-диол), окиси цинка. Описана их эффективность при формировании индикаторного рисунка. В других американских охранных документах отмечается, что некоторые проявители могут давать дополнительное голубое свечение при облучении ультрафиолетовым излучением, что снижает контрастность индикаторного рисунка. А также описаны основные требования к ним, такие как стабильность их физико-химических свойств, мелкодисперсность, хорошая адгезия к поверхности, отсутствие слипшихся частиц и коррозионной активности.

Отмечается, что использование оксида кремния в составе проявителей позволяет придать свойства рассыпчатости и препятствует комкованию порошковой композиции. Использование диоксида титана в качестве компонента проявителя для капиллярной дефектоскопии позволяет предотвратить люминесценцию любых других неорганических соединений, присутствующих в его составе.

В отечественных охранных документах в настоящее время отсутствуют порошковые проявители. Однако в различных отраслях применяются целевые наборы, в составе которых в качестве проявителей применяются готовые материалы, такие как оксиды магния, кремния и др.

В качестве образцов для исследования были выбраны следующие выпускаемые промышленно порошки: окись магния, окись цинка, окись титана, различные оксиды алюминия, поливинилпирролидон (ПВП), полисорб, опробованы смеси поливинилпирролидона с окисью цинка и магния, а также образец зарубежного проявителя.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Признаками высоких дефектоскопических свойств порошковых композиций является высокая яркость и контрастность выявленных индикаторных рисунков над дефектами, которая достигается за счет высокой (позволяющей извлечь из полости несплошности достаточное для обеспечения люминесценции количества индикаторного пенетранта) степени адсорбционного взаимодействия на межфазной границе «пенетрант—проявитель» и оптимального (позволяющего удалить избыток проявителя в процессе контроля, сохранив при этом достаточный его слой для регистрации индикаторного рисунка) адгезионного взаимодействия с поверхностью контролируемой детали.

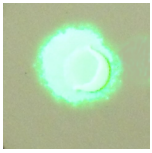
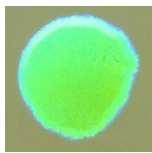
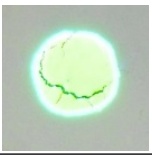
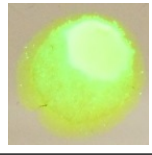
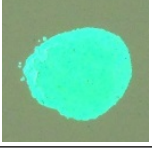
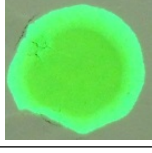

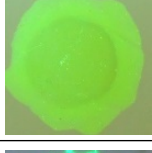

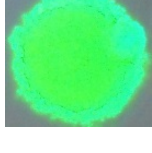
1. *Оценка адсорбционных свойств исследуемых порошков.* Для качественной оценки адсорбционных свойств образцов порошковых проявителей в сочетании с компонентами отечественного люминесцентного набора дефектоскопических материалов ЛЮМ33-ОВ были проведены экспериментальные исследования по изучению смачиваемости выбранных образцов индикаторной жидкостью ЛЖ-18НВ.

Суть эксперимента заключалась в следующем: на предварительно сформированные «таблетки» исследуемых порошков толщиной 0,12 мм наносилась капля с одинаковым объемом пенетранта ЛЖ-18НВ с использованием дозатора жидкости. Степень адсорбционного взаимодействия определялась путем сравнения диаметров образованных пятен в УФ-свете. Результаты эксперимента в виде значений диаметра пятна пенетранта, растекшегося по поверхности «таблетки» за промежуток времени 5 мин, указаны в табл. 1.

Из представленных результатов видно, что наибольшая растекаемость индикаторного пенетранта обеспечивается на поверхности образцов: электрокорунда марки 24А, оксида цинка, образца зарубежного проявителя, оксида цинка+ПВП, оксида магния, оксида магния+ПВП. Наименьшее значение получено для ПВП, что возможно связано с тем, что ПВП представляет собой полимер и

Таблица 1

## Оценка адсорбционных свойств исследуемых порошков

№ образца для испытаний	Состав образца для испытаний	Вид пятна в УФ освещении	Макс. диаметр свечения, мм	№ образца для испытаний	Состав образца для испытаний	Вид пятна в УФ освещении	Макс. диаметр свечения, мм
1	ПВП		8,3	6	Оксид магния		12,7
2	Аэросил А-300		9,5	7	Оксид цинка с ПВП		14,1
3	Электрокорунд 25А		11,2	8	Образец зарубежного проявителя		14,3
4	Оксид титана		11,9	9	Оксид цинка		15,0
5	Оксид магния с ПВП		12,0	10	Электрокорунд 24А		15,2

пропитка «таблетки» проходит через стадию набухания и образования геля, а не протекания через пористые каналы (капилляры). Следует отметить, что у пятен есть характерные «ореолы», что говорит о протекании активных процессов сорбции-десорбции и свидетельствует об оптимальном сорбционном взаимодействии между пенетрантом и проявителем.

Для дальнейших испытаний по выявлению дефектов были выбраны тест-образцы типа 1 по ГОСТ Р ИСО 3452—3 с шириной раскрытия трещины 0,5 мкм, подробно описанные в [17], соответствующие первому классу чувствительности по ГОСТ 18442, а также четвертому классу чувствительности по зарубежным стандартам, были выбраны порошки, диаметр свечения которых превышал 12,0 мм, вместе со стандартным проявителем, используемым в комплекте ЛЮМ33-ОВ Аэросил А-300.

2. *Адгезия образцов порошковых проявителей к поверхности.* Оценка адгезионных свойств исследуемых образцов порошковых проявителей к поверхности образца с трещиной проводилась путем визуального сравнения степени налипания после удаления их избытка в процессе контроля, как над искусственными дефектами, так и на бездефектных участках тест-образца. Результаты исследования адгезионных свойств приведены на рис. 1.

Наилучшие показатели адсорбционных свойств по результатам исследования имели порошки № 5, 6 и 7. Образцы прочно удерживаются на поверхности с образованием «валика» проявителя над поверхностью дефектов, ложатся равномерно, образуя тонкий белый однородный фон.

Образцы порошков № 8, 9 и 10 прочно удерживаются на поверхности пластины, образуя «валик» проявителя над поверхностью дефекта, однако наблюдается избыток порошка на бездефектной области тест-образца после этапа удаления избытка в процессе контроля.

3. *Оценка чувствительности исследуемых образцов порошкового проявителя.* Оценка чувствительности выбранных составов порошковых проявителей в составе набора дефектоскопических материалов ЛЮМ33-ОВ проводилась по методике, описанной в технических условиях на люми-

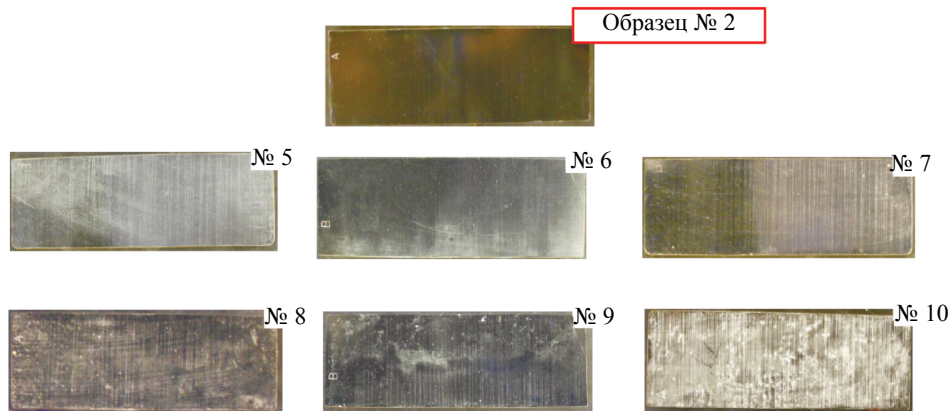


Рис. 1. Результаты исследования адгезионных свойств образцов порошковых проявителей с поверхностью тест-образца, имеющего трещины с шириной раскрытия 0,5 мкм.

несцентный пенетрант ЛЖ-18НВ ТУ 2662-010-73057924 с использованием тест-образцов типа 1, шириной раскрытия дефекта 0,5 мкм [18].

Полнота выявления и качество индикаторного рисунка сравнивались с результатами, полученными по стандартной технологии с использованием порошкового проявителя Аэросил А-300. Эффективность образца порошка определялась по качеству полученного индикаторного рисунка. Этап осмотра и регистрация результатов проводились через 30 мин. Результаты контроля на различных тест-образцах с трещинами, шириной раскрытия 0,5 мкм, показаны на рис. 2.

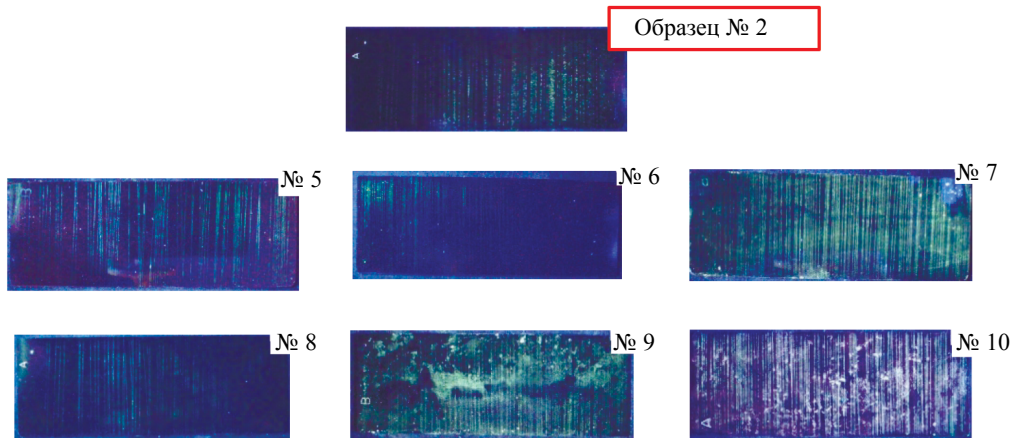


Рис. 2. Результаты контроля в УФ освещении тест-образцов типа 1, с шириной раскрытия дефекта 0,5 мкм.

Наиболее яркий, контрастный и полный индикаторный рисунок над дефектом был получен при использовании образцов порошковых проявителей № 2, 5 и 7. Таким образом, установлено, что чувствительность набора дефектоскопических материалов ЛЮМ33-ОВ при использовании в качестве проявителя порошков Аэросил марки А-300, оксидов магния и цинка с ПВП соответствует первому классу по ГОСТ 18442.

При использовании в качестве проявителя образцов № 6, 8, 9, 10 чувствительность набора дефектоскопических материалов ЛЮМ33-ОВ соответствует второму классу чувствительности по ГОСТ 18442, что установлено на тест-образцах с дефектами с шириной раскрытия дефекта 2,5 мкм [18]. Результаты контроля показаны на рис. 3.

4. *Устойчивость индикаторного рисунка к механическому воздействию.* Устойчивость индикаторного рисунка к механическому воздействию определяли путем обдува поверхности проконтролированного образца сжатым воздухом давлением 4 атм. на расстоянии 50 мм, а также непосредствен-

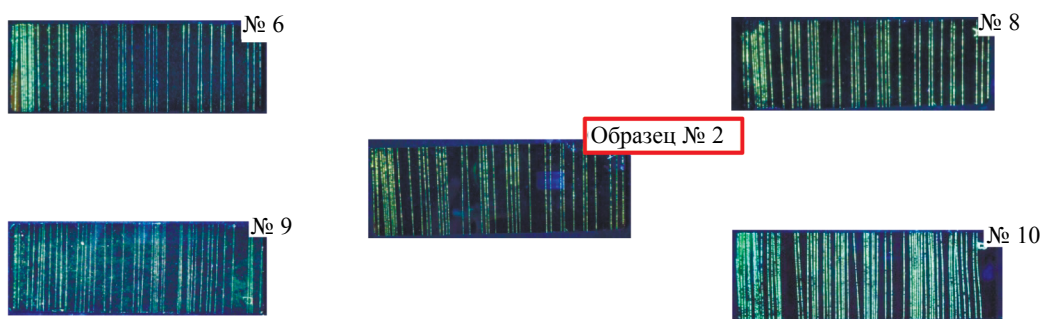


Рис. 3. Результаты контроля в УФ освещении тест-образцов типа 1 с шириной раскрытия дефекта 2,5 мкм.

ным механическим стиранием с нормированным прилагаемым усилием. Результаты исследований к механическому воздействию образцов порошковых проявителей № 2, 5, 7 и 8, обеспечивающих выявление дефектов по первому и № 10 по второму классу чувствительности, показаны на рис. 4.

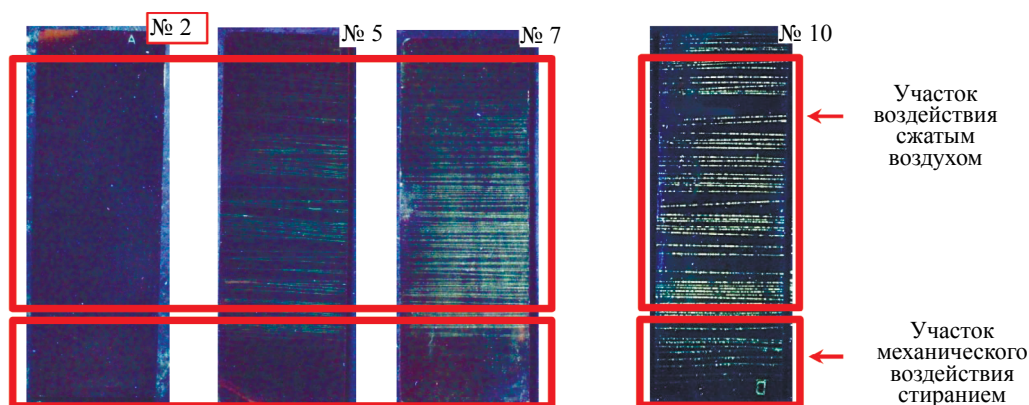


Рис. 4. Результаты исследования адгезионных свойств образцов порошковых проявителей с поверхностью тест-образца, имеющего трещины с шириной раскрытия 0,5 и 2,5 мкм.

По результатам проведенных исследований установлено, что под воздействием потока воздуха давлением 4 атм. на расстоянии 50 мм образцы порошковых проявителей № 5, 7 и 10 сохраняют индикаторный рисунок от дефектов в полном объеме, при этом его яркость и контрастность снижается. После механического воздействия стиранием индикаторные рисунки для всех образцов (кроме № 10) порошковых проявителей были удалены.

Полученные данные свидетельствуют о более высоком адгезионном взаимодействии выбранных образцов порошковых проявителей с поверхностью тест-образца по сравнению с применяемым в настоящее время проявителем Аэросил марки А300.

Таким образом, по результатам проведенных комплексных исследований установлено:

образцы порошкового проявителя: оксид магния, оксид цинка, электрокорунд марки 24А и образец зарубежного проявителя в составе набора дефектоскопических материалов ЛЮМ33-ОВ обеспечивают второй класс чувствительности. Индикаторный рисунок над дефектом обладает высокой яркостью и контрастностью при отсутствии фона на контролируемой поверхности и имеет более высокую устойчивость к механическому воздействию по сравнению с Аэросил А-300. При этом высокая адгезионная способность образцов порошков оксида цинка, электрокорунда марки 24А не позволяет создать на поверхности тонкое равномерное покрытие проявителя, что делает их непригодными для использования в составе данного набора при проведении контроля;

образцы порошкового проявителя, представляющие собой смеси оксида магния с поливинилпирролидоном и цинка с поливинилпирролидоном, обладают высокими сорбционными характеристиками, формируют валик проявителя над поверхностью дефектов, обеспечивающий выявление несплошностей по первому классу чувствительности. Получаемый слой проявителя тонкий и однородный, не создает фоновой люминесценции под действием ультрафиолетового света, образует яркий и контрастный рисунок.

## ВЫВОДЫ

Показано влияние адсорбционного и адгезионного взаимодействий на межфазных границах «пенетрант—проявитель» и «проявитель—контролируемая поверхность» на дефектоскопические свойства порошковых композиций.

Установлено, что смеси оксида магния с ПВП и цинка с ПВП обладают высокой степенью адсорбционного взаимодействия на межфазной границе «пенетрант—проявитель», обеспечивая при этом оптимальные показатели адгезионного взаимодействия с поверхностью контролируемой детали, позволяя повысить эффективность и надежность капиллярного контроля.

Выбранные порошковые композиции имеют перспективу использования в качестве порошкового проявителя в составе набора ЛЮМЗЗ-ОВ при контроле деталей, имеющих конструктивные особенности, такие как отверстия, галтельные переходы, пазы, канавки, буртики и др., позволяя повысить яркость, контрастность и устойчивость индикаторного рисунка к механическому воздействию.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. 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. Куличкова С.И., Головков А.Н., Кудинов И.И., Лантев 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
5. 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
6. Калашиников 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
7. Луценко А.Н., Перов Н.С., Чабина Е.Б. Новые этапы развития Испытательного центра // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 460—468. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-460-468
8. ОСТ 1 90282-79. Качество продукции. Неразрушающий контроль. Капиллярные методы. М.: ФГУП «ВИАМ», 1979. 50 с.
9. ГОСТ 18442—80 «Неразрушающий контроль. Капиллярные методы». Издательство стандартов. 1987. 24 с.
10. Мизун Н.П. Гнусин А.Б. Тепловые воздействия при капиллярном неразрушающем контроле / Минск: Беларус. навука, 2011. 131 с. ISBN 978-985-08-1341-1.
11. US 3803051 A «Developer composition for penetrant inspection» / Orlando G. Molina (Air Products and Chemicals, Inc.) 27.12.1971.
12. US 3944828 A “Hydrophobic powdered developer for fluorescent penetrant inspection” / A. Mlotfijalkowski (Magnaflux Corporation) 30.09.1974.
13. US 4295362 «Pentaerythritol in dry developer» / Michael L. White (Magnaflux Corporation) 22.02.1980.
14. US 2806959 «Method of detecting surface discontinuities» / Taber de Forest, Donald W. Parker (Switzer Brothers, Inc.) 26.07.1954.
15. US 2848421 «Indicating powder composition» / Taber. De Forest (Magnaflux Corporation) 19.08.1958.
16. US 2920203 «Fluorescent penetrant inspection materials and methods» / Joseph L. Switzer, Gates Mills (Switzer Brothers, Inc.) 21.09.1955.
17. 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 23.12.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-95-103
18. ГОСТ Р ИСО 3452—3—2009. Контроль неразрушающий. Проникающий контроль. Часть 3. Испытательные образцы. Стандартиформ, 2011, 12 с.