

Научная статья

УДК 621.763

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-4-128-136

## КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ДЕФЕКТОСКОПИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В КАПИЛЛЯРНОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ (обзор)

Д.С. Скоробогатько<sup>1</sup>, А.Н. Головков<sup>1</sup>, И.И. Кудинов<sup>1</sup>, С.И. Куличкова<sup>1</sup>

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

**Аннотация.** Проведен обзор физико-химических свойств дефектоскопических материалов, влияющих на результаты капиллярного контроля. Представлено обоснование необходимости определения и проверки каждого параметра набора дефектоскопических материалов. Рассмотрены свойства компонентов наборов, не указанные в паспортах качества и сертификатах производителей. Установлено, что для оценки качества дефектоскопических материалов указанных в технической документации производителя характеристик и свойств недостаточно. Предложены параметры для оценки качества, которые позволяют выбрать наиболее технологичные современные наборы дефектоскопических материалов.

**Ключевые слова:** неразрушающий контроль, капиллярный контроль, качество дефектоскопических материалов, технология капиллярного контроля, выявляющая способность

**Для цитирования:** Скоробогатько Д.С., Головков А.Н., Кудинов И.И., Куличкова С.И. Критерии оценки качества дефектоскопических материалов в капиллярной дефектоскопии (обзор) // Труды ВИАМ. 2023. № 4 (122). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-4-128-136.

Scientific article

## CRITERIA FOR EVALUATING THE QUALITY OF DEFECTOSCOPIC MATERIALS IN PENETRANT TESTING (review)

D.S. Skorobogatko<sup>1</sup>, A.N. Golovkov<sup>1</sup>, I.I. Kudinov<sup>1</sup>, S.I. Kulichkova<sup>1</sup>

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

**Abstract.** A review of the physicochemical properties of defectoscopic materials that affect the results of penetrant testing has been carried out. The rationale for the need to determine and verify each parameter of a set of defectoscopic materials is presented. The properties of the components of the kits that are not specified in the quality certificates and manufacturer's certificates are considered. It has been established that the characteristics and properties specified in the technical documentation of the manufacturer are not enough to assess the quality of defectoscopic materials. Parameters for quality assessment are proposed, which will allow choosing the most technologically advanced modern sets of defectoscopic materials.

**Keywords:** non-destructive testing, penetrant testing, quality of defectoscopic materials, penetrant testing technology, reveal ability

**For citation:** Skorobogatko D.S., Golovkov A.N., Kudinov I.I., Kulichkova S.I. Criteria for evaluating the quality of defectoscopic materials in penetrant testing (review). *Trudy VIAM*, 2023, no. 4 (122), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-4-128-136.

## Введение

Основными показателями конкурентоспособности авиационной продукции являются ее качество, надежность и рабочий ресурс. Неразрушающий контроль – один из основных инструментов оценки качества выпускаемой продукции. Массовое использование авиационной техники в производстве требует постоянного контроля качества деталей [1–4]. Капиллярная дефектоскопия является широко применяемым и самым чувствительным методом неразрушающего контроля для выявления поверхностных дефектов. Высокая чувствительность метода дает возможность находить дефекты с шириной раскрытия у выхода на поверхность не менее 0,001 мм, глубиной от 0,01 мм и длиной >0,1 мм. Достоинством капиллярной дефектоскопии является то, что она точно фиксирует расположение поверхностного дефекта и его геометрические размеры. В основе данного метода лежит явление заполнения капилляра пенетрантом, обладающим высокой проникающей способностью, с последующей регистрацией образующихся индикаторных рисунков в месте расположения дефекта [5–7].

Основной параметр эффективности капиллярного метода – его высокая чувствительность. При этом важно учитывать, что данный условный параметр контроля напрямую связан со степенью заполнения полости поверхностного дефекта пенетрантом, что, в свою очередь, зависит от физико-химических свойств используемого набора дефектоскопических материалов – плотности, вязкости, поверхностного натяжения и т. д. [8]. Чувствительность капиллярного метода зависит также от условий проведения контроля и качества используемых материалов (пенетранта, очистителя, проявителя).

При внедрении на различные предприятия новых современных дефектоскопических материалов, соответствующих требованиям отечественных и зарубежных стандартов, в паспортах качества и сертификатах необходимо обеспечить наличие расширенного списка исследуемых физико-химических параметров, а потребителю для наиболее достоверной оценки качества материала выбрать оптимальный набор методов его исследования с целью контроля выбранных параметров.

## Материалы и методы

Современные дефектоскопические материалы представляют собой смеси органических растворителей, красителей, поверхностно-активных веществ и т. д., относятся к 3–4 классу опасности (в соответствии с ГОСТ 12.1.007–76) и имеют температуру вспышки не менее 93 °С.

При анализе научно-технической литературы установлено, что работы по исследованию свойств дефектоскопических материалов можно разделить на следующие направления:

– моделирование физических процессов, происходящих при капиллярном контроле, с целью получения основных физических параметров материалов, оказывающих влияние на процесс контроля. Так, например, в статье [9] рассмотрено моделирование процесса заполнения пенетрантом капилляров, определены его основные параметры – вязкость и плотность, влияющие на заполнение полости капилляра жидкостью. В работе [10] представлены результаты моделирования процесса проникновения пенетранта в полимерные пористые материалы, имитирующие поверхностные дефекты. Основные параметры моделирования – поверхностное натяжение и угол смачивания. В работе [11] проведено математическое моделирование процесса экстракции порошковым проявителем пенетранта из полости поверхностного дефекта, определены значения минимальной ширины дефекта для оптимизации процесса экстракции и продолжительность данного процесса, рассмотрено влияние характеристик порошкового материала (гранулометрического состава) и начального количества пенетранта в полости дефекта на процесс экстракции;

– изучение капиллярных свойств пенетрантов. Наибольший интерес в этом направлении представляет работа [12], где отмечается, что вязкость полярных жидкостей в капиллярах и на межфазной поверхности «жидкость–твердое тело» значительно увеличивается. Считается, что в капилляре полярная жидкость находится в особом фазовом состоянии, так как молекулы жидкости существуют в более упорядоченном состоянии, чем в объеме жидкой фазы, причем степень упорядоченности полярной жидкости снижается с увеличением расстояния от межфазной границы. В работе сравниваются наборы ЛЮМ-9 (водная основа), АЭРО-12А (основа – этанол) и ЛЮМ-1 (основа – трет-бутиловый спирт). Для набора ЛЮМ-9, содержащего воду, эффективная вязкость в капилляре значительно увеличивается с уменьшением диаметра капилляра, в отличие от наборов с другими проникающими жидкостями. Получаемые данные позволяют определять время, необходимое для заполнения капилляра проникающей жидкостью. В работе [13] рассмотрена взаимосвязь между параметрами процесса адсорбции и свойствами пенетранта (капиллярный эффект, краевой угол смачивания), поскольку известно, что капиллярный эффект зависит от вязкости жидкой фазы и поверхностного натяжения.

Таким образом, из данных, представленных в научно-технической литературе, можно сделать вывод, что необходимо контролировать значение таких физико-химических параметров дефектоскопических материалов, как плотность, вязкость, краевой угол смачиваемости, растекаемость и гранулометрический состав. Отклонение этих параметров от значений, указанных производителем, может значительно снизить чувствительность капиллярного контроля.

### Результаты и обсуждение

Изменение физико-химических свойств дефектоскопических материалов, влияющих на выявляющую способность, может возникать на всех этапах их «жизненного» цикла: при производстве, транспортировке, хранении, применении. Возможны воздействия пониженных и повышенных температур, прямого солнечного и ультрафиолетового излучения. При изготовлении дефектоскопических материалов наблюдаются случаи применения некачественных реактивов. Поэтому оценку качества материалов следует проводить постоянно – как при использовании их новой партии, так и при проверке качества при хранении. В настоящее время оценка качества (производительности) дефектоскопических материалов производится с использованием контрольных образцов с искусственно выращенными дефектами [14], определяется соответствие выбранного набора физико-химических параметров тем значениям, которые представлены в ТУ/паспорте качества производителя материалов. Данный набор параметров, однако, у каждого производителя может быть свой. Дополнительная причина оценки качества дефектоскопических материалов – отследить изменение физико-химических и технологических свойств с течением времени, поскольку данные свойства могут оказывать влияние на чувствительность капиллярного контроля и на его выявляющую способность [15–17].

Для определения качества и работоспособности различных дефектоскопических материалов существует две группы методик [6]: по отдельным физико-химическим свойствам и по суммарному эффекту выявляемости дефектов (класс чувствительности в составе набора таких материалов).

Методики первого направления просты, их критерии (цвет, яркость люминесценции, интенсивность окрашивания, смачивающая способность, вязкость, плотность, температура кипения, токсичность и т. д.) более понятны и удобны для исследования в связи с широким использованием физико-химических методов.

Второе направление – сложнее, однако отражает конечный результат капиллярного контроля. Это направление охватывает оптические и геометрические характеристики получаемых индикаторных рисунков и технологичность всего процесса контроля.

На качество дефектоскопических материалов и их работоспособность влияют температура, вязкость, химический состав и структура смачиваемой поверхности и ее термодинамические характеристики [18–20].

На пенетрант, очиститель и проявитель накладываются еще условия их применимости, к которым относятся: температура вспышки, токсичность, степень взаимодействия с контролируемыми материалами (коррозионная агрессивность, содержание серы и галогенов), температура применения и стабильность при низких и высоких температурах. Из физико-химических параметров и условий применимости пенетранта, очистителя и проявителя складывается чувствительность всего набора дефектоскопических материалов, а из чувствительности и технологических параметров – комплектность и экономическая эффективность. При этом следует отметить, что существующий набор физико-химических параметров, приводимых в паспортах качества продукции различных производителей, обусловлен необходимостью обеспечения контроля состава готовой продукции и не позволяет определить требуемые технологические параметры, такие как стабильность свойств и работоспособность в процессе использования.

С целью стандартизации процедуры исследования качества дефектоскопических материалов за рубежом и в России разработаны соответствующие стандарты, среди которых ASTM E165, ISO 3452-2, ГОСТ Р ИСО 3452-2–2009 «Контроль неразрушающий. Часть 2. Испытания пенетрантов», а также различные стандарты предприятий, занимающихся производством таких материалов [21].

В данной статье представлены сведения о физико-химических свойствах дефектоскопических материалов (и обоснование для их выбора), контроль за которыми необходим для определения качества и соответствия действующим нормативно-техническим документам (см. таблицу). Часть рассматриваемых параметров не указывается производителями данных материалов и не определяется на предприятиях при проведении входного контроля, в процессе их использования и при внедрении новых наборов.

**Набор физико-химических параметров,  
определяющих работоспособность дефектоскопических материалов (ДМ)**

Параметры	Компонент ДМ		
	Пенетрант	Очиститель	Проявитель
Внешний вид	+	+	+
Плотность	+	+	+
Вязкость	+	+	+
Класс чувствительности в составе набора ДМ	+	+	+
Температура вспышки	+	+	+
Устойчивость пенетранта к воде*	+	–	–
Коррозионная агрессивность по отношению к металлическим материалам	+	+	+
Содержание серы и галогенов	+	+	+
Устойчивость очистителя к пенетранту*	–	+	–
Устойчивость очистителя к воде*	–	+	–
Содержание воды в пенетранте и очистителе*	+	+	–
Стабильность при низких и высоких температурах	+	–	–
Люминесцентная яркость пенетранта	+	–	–
Стойкость пенетранта к ультрафиолетовому излучению*	+	–	–
Теплостойкость пенетранта*	+	–	–
Гранулометрический состав проявителей*	–	–	+

\* Параметры, не представленные в нормативной документации производителей ДМ.

*Внешний вид* позволяет определить наличие примесей в дефектоскопических материалах. Основные факторы, на которые следует обратить внимание, – это цвет, прозрачность и наличие осадка.

*Плотность и вязкость* позволяют оценить соответствие компонентного состава рецептуре приготовления, установленной производителем, а также отследить изменение свойств материалов со временем.

*Класс чувствительности* – основной параметр эффективности капиллярного контроля, определяющий качество готовой продукции и устанавливаемый в технических требованиях на нее.

*Температура вспышки* позволяет оценить эксплуатационные и технологические свойства, в том числе определяет возможность использования в автоматизированных линиях капиллярного контроля, а также условия хранения проявителей. Значение температуры вспышки проявителя оценивается на соответствие параметрам, приведенным в технических условиях или паспорте на проявитель. При температуре вспышки  $<66$  °С в открытом тигле и  $<61$  °С в закрытом тигле материал относят к классу легковоспламеняющихся жидкостей.

*Устойчивость очистителя/пенетранта к воде.* На автоматических линиях и при потоковом контроле есть большая вероятность попадания воды на контролируемые детали (конденсат после сушки и т. д.), вследствие чего вода попадает в пенетрант и очиститель. Для оценки влияния воды на их свойства и работоспособность необходимо количественно определить содержание воды в пенетранте и очистителе, которое не ухудшает их рабочие свойства, особенно для липофильных дефектоскопических материалов. Наличие воды влияет на смачивающую/проникающую способность пенетранта и эмульгирующую способность очистителя, что значительно отражается на надежности и качестве капиллярного контроля. Причем для каждого материала существует индивидуальное критическое содержание воды, оказывающее действие на его свойства. Таким образом, важной задачей является определение критического содержания воды для дефектоскопических материалов. Однако данный параметр производители таких материалов не приводят в паспортах качества и рекомендациях по их использованию.

*Устойчивость очистителя к пенетранту.* Добавление пенетранта в очиститель может приводить к увеличению фоновой индикации при установленных технологических параметрах контроля. Однако данный параметр производители дефектоскопических материалов не приводят в паспортах качества.

*Коррозионная агрессивность пенетранта (очистителя, проявителя) по отношению к металлическим материалам.* Оценку следует проводить с целью установления соответствия требованиям ГОСТ 18442–80 в части отсутствия влияния дефектоскопических материалов на материал контролируемого изделия. Ее определяют по отношению к типовым сплавам, подвергаемым контролю капиллярным методом: алюминиевому и никелевому сплавам, стали, а также к титановым сплавам с различной стойкостью к коррозии.

*Содержание ионов серы и галогенов.* Общее содержание массовой доли ионов серы определяет коррозионную агрессивность дефектоскопических материалов по отношению как к материалам контролируемого изделия в процессе проведения контроля, так и к его остаткам в процессе эксплуатации детали.

*Стабильность пенетранта при низких и высоких температурах.* При хранении и проведении контроля дефектоскопические материалы могут подвергаться воздействию высоких и низких температур. При осуществлении капиллярного контроля используют конвективную сушку контролируемой детали на этапе удаления избытка очистителя с поверхности при нагреве детали до температуры 70 °С в течение до

30 мин. Вследствие этого возможно ухудшение оптических свойств люминесцентного красителя пенетранта. Деграцией материала считают любое ухудшение выявляющей способности или качества индикаций.

*Люминесцентная яркость пенетранта* оказывает влияние на «видимость» индикаторного рисунка. Уменьшение люминесцентной яркости может стать причиной пропуска дефекта.

*Стойкость пенетранта к ультрафиолетовому излучению.* Под действием ультрафиолетового излучения часто можно наблюдать фотодеструкцию люминесцентного красителя, что способствует уменьшению люминесцентной яркости пенетранта. Данный параметр производители дефектоскопических материалов не приводят в паспортах качества.

*Гранулометрический состав проявителей.* Важной характеристикой проявителей для использования их в капиллярной дефектоскопии являются адсорбционные свойства, которые определяются химическим составом, геометрической формой частиц и величиной удельной поверхности. Для более полного извлечения пенетранта из полостей дефектов необходимо достижение максимально возможного химического сродства поверхности адсорбента к пенетранту, превышающего его сродство к поверхности контролируемой детали. Процесс выявления дефектов проявителем зависит от его пористости и способности смачиваться пенетрантом. Пористость порошкового проявителя может быть описана как плотность заполнения поверхности его частицами, зависит от гранулометрического состава проявителя и должна учитываться при выборе новых адсорбентов для капиллярной дефектоскопии [22, 23].

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

### Заключения

По результатам проведенного обзора научно-технической литературы, документов о качестве дефектоскопических материалов различных производителей и действующих стандартов в области капиллярного контроля определен набор физико-химических параметров, определяющих качество данных материалов для контроля проникающими веществами. Отмечено, что существующий набор физико-химических параметров, приводимых в паспортах качества продукции для различных производителей, обусловлен необходимостью обеспечения контроля состава готовой продукции и не позволяет определить требуемые технологические параметры, такие как стабильность свойств и работоспособность в процессе использования.

Показано, что существующие методики исследования, традиционно применяемые при оценке качества компонентов набора дефектоскопических материалов, направлены на определение параметров (цвет, яркость люминесценции, интенсивность окрашивания, смачивающая способность, вязкость, плотность, температура кипения, токсичность и т. д.), входящих в зависимости, описывающие различные физические процессы межфазного взаимодействия. Однако они не учитывают технологические параметры, как и методики, направленные на определение суммарного эффекта выявляемости дефектов – класс чувствительности в составе набора дефектоскопических материалов. При этом отмечено, что на качество таких материалов и их работоспособность влияют температура, вязкость, химический состав и структура смачиваемой поверхности и ее термодинамические характеристики.

Показано, что такие параметры дефектоскопических материалов, как устойчивость пенетранта к воде, очистителя к пенетранту, очистителя к воде, а также стойкость пенетранта к ультрафиолетовому излучению, его теплостойкость и гранулометрический состав проявителей, могут влиять на чувствительность капиллярного контроля и требуют дополнительных исследований по степени влияния и разработки методик их оценки.

**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. Каблов Е.Н. Россия на рынке интеллектуальных ресурсов // *Эксперт*. 2015. № 28 (951). С. 48–51.
4. Скоробогатько Д.С., Головкин А.Н., Кудинов И.И., Куличкова С.И. К вопросу об экологичности и эффективности различных классов промышленных неионогенных ПАВ, используемых при очистке металлических поверхностей в процессе капиллярного контроля деталей авиационной техники (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 4 (65). Ст. 11. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 17.05.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-98-106.
5. Клюев В.В., Евлампиев А.И., Попов Е.Д. и др. *Неразрушающий контроль и диагностика: справочник*. М.: Машиностроение, 2003. 656 с.
6. Карякин А.В., Боровиков А.С. *Люминесцентная и цветная дефектоскопия*. М.: Машиностроение, 1972. 240 с.
7. ГОСТ 18442–80. *Неразрушающий контроль. Капиллярные методы*. М.: Изд-во стандартов, 1987. 24 с.
8. Prokhorenko P., Migun N., Dezhkunov N. Development of penetrant test theory based on new physical effects // *Proceedings of the 13<sup>th</sup> World Conference of Non-Destructive Testing (Sao Paulo, Brazil, October 18–23, 1992)*. 1992. P. 538–542. DOI: 10.1016/B978-0-444-89791-6/50116-5.
9. Prokhorenko P., Migun N. Quantitative model of liquid penetrant hydrodynamics // *AIP Conference Proceedings*. 2000. Vol. 509. Is. 1. P. 1865. DOI: 10.1063/1.1306257.
10. Gulak Y., Braid D. Capillary models of solvent diffusion // *Chemical Engineering Science*. 2013. Vol. 101. Is. 20. P. 515–522. DOI: 10.1016/j.ces.2013.07.016.
11. Prokhorenko P., Migoun N. Calculation of Penetrant Testing Sensibility for Powder Developer // *Proceeding of the 4<sup>th</sup> European Conference (London, UK, September 13–17, 1987)*. 1987. P. 2774–2782. DOI: 10.1016/B978-0-08-036221-2.50071-1.
12. Prokhorenko P., Migun N., Grebenshchikov S. Experimental studies of polar indicator liquids used in capillary penetrant testing // *International Journal of Engineering Science*. 1987. Vol. 25. Is. 7. P. 769–773.
13. Beril A. Capillarity effect analysis for alternative liquid penetrant chemicals // *NDT & E International*. 1997. Vol. 30. Is. 1. P. 19–23. DOI: 10.1016/S0963-8695(96)00044-8.
14. 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: 11.11.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-115-122.
15. Lobanova I., Kalinichenko A. Investigation of the Liquid Flow on Rough Surfaces to Solve the Problems of Liquid Penetrant Testing // *Progress in Material Science and Engineering*. Springer International Publishing Switzerland, 2021. P. 89–99. DOI: 10.1007/978-3-030-68103-6-9.
16. Prokhorenko P., Migun N. Film-flow mechanism of flaw development in penetrant-dye test // *Russian Journal of Nondestructive testing*. 2002. Vol. 38. P. 704–708.
17. Deutsch S. A Preliminary Study of the Fluid Mechanics of Liquid Penetrant Testing // *Journal of Research of the National Bureau of Standards*. 1977. Vol. 84. Is. 4. P. 287–292. DOI: 10.6028/jres.084.012.
18. Migoun N., Prokhorenko P., Gnusin A. et al. On the reliability of quantitative evaluation of penetrant systems quality // *AIP Conference Proceedings*. 2002. Vol. 615. P. 1991–1996. DOI: 10.1063/1.1473037.

19. Prokhorenko P., Migoun N., Stadthaus S. Quantitative model of liquid penetrant hydrodynamics // AIP Conference Proceedings. 2000. Vol. 509. P. 1865. DOI: 10.1063/1.1306257.
20. Zolfaghari A., Kolahan F. Reliability and sensitivity of visible liquid penetrant NDT for inspection of welded components // Material Testing. 2017. Vol. 59. Is. 3. P. 290–294. DOI: 10.3139/120.111000.
21. 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.
22. Лощинин Ю.В., Пахомкин С.И., Размахов М.Г. Температуры фазовых превращений и калориметрический анализ порошковых композиций жаропрочных никелевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 79–85. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-79-85.
23. Евгенов А.Г., Шуртаков С.В., Прагер С.М., Малинин Р.Ю. К вопросу о разработке универсальной расчетной методики оценки деградации оборотных металлических порошковых материалов в зависимости от цикличности использования в процессе селективного лазерного сплавления // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 4 (61). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-3-11.

### 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. Kablov E.N. Russia in the market of intellectual resources. *Ekspert*, 2015, no. 28 (951), pp. 48–51.
4. Skorobogatko D.S., Golovkov A.N., Kudinov I.I., Kulichkova S.I. Revisiting the ecotoxicity and efficiency of different classes of industrial nonionic surfaces used for cleaning metal surfaces in the process of capillary control of details of the aviation technology (review). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 11. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 17, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-98-106.
5. Klyuev V.V., Evlampiev A.I., Popov E.D. et al. *Non-destructive control and diagnostics: a reference book*. Moscow: Mashinostroenie, 2003, 656 p..
6. Karyakin A.V., Borovikov A.S. *Luminescent and color flaw detection*. Moscow: Mashinostroenie, 1972, 240 p.
7. State Standard 18442-80. *Unbrakable control. capillary methods*. Moscow: Publishing house of standards, 1987, 24 p.
8. Prokhorenko P., Migun N., Dezhkunov N. Development of penetrant test theory based on new physical effects. *Proceedings of the 13<sup>th</sup> World Conference of Non-Destructive Testing* (Sao Paulo, Brazil, October 18–23, 1992), 1992, pp. 538–542. DOI: 10.1016/B978-0-444-89791-6/50116-5.
9. Prokhorenko P., Migun N. Quantitative model of liquid penetrant hydrodynamics. *AIP Conference Proceedings*, 2000, vol. 509, is. 1, pp. 1865. DOI: 10.1063/1.1306257.
10. Gulak Y., Braid D. Capillary models of solvent diffusion. *Chemical Engineering Science*, 2013, vol. 101, is. 20, pp. 515–522. DOI: 10.1016/j.ces.2013.07.016.
11. Prokhorenko P., Migoun N. Calculation of Penetrant Testing Sensibility for Powder Developer. *Proceeding of the 4<sup>th</sup> European Conference* (London, UK, September 13–17, 1987), 1992, pp. 2774–2782. DOI: 10.1016/B978-0-08-036221-2.50071-1.
12. Prokhorenko P., Migun N., Grebenshchikov S. Experimental studies of polar indicator liquids used in capillary penetrant testing. *International Journal of Engineering Science*, 1987, vol. 25, is. 7, pp. 769–773.
13. Beril A. Capillarity effect analysis for alternative liquid penetrant chemicals. *NDT & E International*, 1997, vol. 30, is. 1, pp. 19–23. DOI: 10.1016/S0963-8695(96)00044-8.
14. 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: November 11, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-115-122.

15. Lobanova I., Kalinichenko A. Investigation of the Liquid Flow on Rough Surfaces to Solve the Problems of Liquid Penetrant Testing. *Progress in Material Science and Engineering*. Springer International Publishing Switzerland, 2021, pp. 89–99. DOI: 10.1007/978-3-030-68103-6-9.
16. Prokhorenko P., Migun N. Film-flow mechanism of flaw development in penetrant-dye test. *Russian Journal of Nondestructive testing*, 2002, vol. 38, pp. 704–708.
17. Deutsch S. A Preliminary Study of the Fluid Mechanics of Liquid Penetrant Testing. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 1977, vol. 84, is. 4, pp. 287–292. DOI: 10.6028/jres.084.012.
18. Migoun N., Prokhorenko P., Gnusin A. et al. On the reliability of quantitative evaluation of penetrant systems quality. *AIP Conference Proceedings*, 2002, vol. 615, pp. 1991–1996. DOI: 10.1063/1.1473037.
19. Prokhorenko P., Migoun N., Stadthaus S. Quantitative model of liquid penetrant hydrodynamics. *AIP Conference Proceedings*, 2000, vol. 509, pp. 1865. DOI: 10.1063/1.1306257.
20. Zolfaghari A., Kolahan F. Reliability and sensitivity of visible liquid penetrant NDT for inspection of welded components. *Material Testing*, 2017, vol. 59, is. 3, pp. 290–294. DOI: 10.3139/120.111000.
21. 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.pp 052-057.
22. Loshchinin Yu.V., Pakhomkin S.I., Razmakhov M.G. Phase transformation temperatures and calorimetric analysis of powder compositions of nickel-based superalloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 79–85. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-79-85.
23. Evgenov A.G., Shurtakov S.V., Prager S.M., Malinin R.Yu. On the development of a universal calculation method for assessing the degradation of recycled metal powder materials, depending on the cyclicity of use in the selective laser melting process. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-3-11.

**Информация об авторах**

**Скоробогатко Дмитрий Сергеевич**, ведущий инженер, к.х.н., 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

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

**Information about the authors**

**Dmitriy S. Skorobogatko**, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Chem.), 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

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

Статья поступила в редакцию 22.11.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 28.11.2022.

The article was submitted 22.11.2022; approved and accepted for publication after reviewing 28.11.2022.