

Внедрение цифровой радиографии в производство головных элементов конструкций летательных аппаратов

© А.В. Терехин, А.А. Филатов, В.Ф. Атрощенко, Д.И. Чулков

ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина, Обнинск, 249031, Российская Федерация

При изготовлении головных элементов конструкций летательных аппаратов для соединения оболочки из керамического или полимерного композиционного материала с металлическим шпангоутом широко применяются клеевые соединения. В процессе выполнения таких соединений существует риск образования дефектов типа непроклей, значительно снижающих прочностные характеристики узла клеевого соединения и надежность летательного аппарата в целом. В связи с этим необходимо проведение неразрушающего контроля узла клеевого соединения в процессе сборки. Представлены результаты модернизации существующей системы неразрушающего контроля головных элементов в конструкциях летательных аппаратов радиационными методами взамен используемых ранее методов рентгенографии и рентгеноскопии с применением рентгеновских электронно-оптических преобразователей. Внедрение методов и технических средств цифровой радиографии с применением плоскпанельных детекторов позволило повысить достоверность и точность контроля. Проведена сравнительная оценка качества получаемых рентгеновских снимков узла клеевого соединения в элементе конструкции летательного аппарата и оценка эффекта от внедрения в серийное производство.

Ключевые слова: летательный аппарат, клеевое соединение, непроклей, цифровая радиография, плоскпанельный детектор

Введение. В конструкциях головных элементов современных летательных аппаратов (ЛА) широко применяются неметаллические материалы: конструкционная керамика (кварцевая и стеклокерамика) и термостойкие стеклопластики [1, 2]. При производстве данных конструкций одной из сложнейших задач является соединение неметаллического элемента конструкции ЛА с металлическим шпангоутом. Сложность задачи обусловлена специфическими свойствами применяемых керамических и стеклопластиковых материалов (высокая чувствительность к концентраторам механических напряжений, хрупкий характер разрушения и др.), ограничивающими возможность применения традиционных способов соединения деталей (заклепочный, пайка, резьбовой, сварка, прессование, вальцевание) или делающими их применение невозможным.

Многолетний опыт производства головных элементов конструкций ЛА различного класса показывает, что наиболее перспективным, а зачастую и единственно возможным, способом соединения керамических или композитных элементов конструкции ЛА оболочечного

типа с металлическим шпангоутом, обеспечивающим требуемую несущую способность и герметичность узла соединения, является клеевое соединение с использованием эластомерных клеев-герметиков в качестве адгезива (рис. 1). Благодаря клею-герметику в образованном узле соединения равномерно распределяются напряжения по всей площади склеиваемых поверхностей, компенсируются различия в коэффициентах линейного теплового расширения соединяемых разнородных материалов, а также обеспечивается герметичность внутренней полости конструкции ЛА в процессе эксплуатации [3, 4].

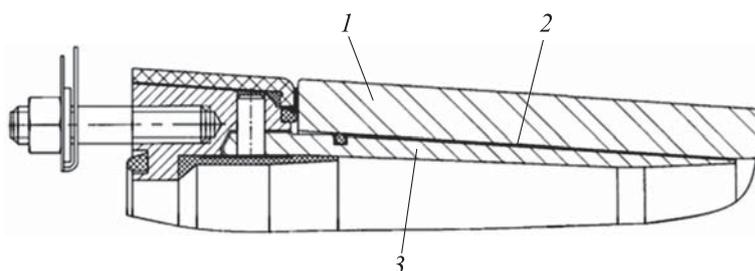


Рис. 1. Пример конструкции узла клеевого соединения металлического шпангоута и керамического элемента ЛА:

1 — керамический элемент конструкции ЛА (оболочка); 2 — клеевой слой;
3 — металлический шпангоут

От качества выполнения образующегося клеевого соединения во многом зависит работоспособность всей конструкции головного элемента. В процессе эксплуатации ЛА наиболее жесткие тепловые, силовые, вибродинамические и иные виды внешних воздействий приходятся именно на узел клеевого соединения [3–5].

Процесс сборки (склейки) керамической или полимерной композитной оболочки с металлическим шпангоутом представляет собой сложную технологическую операцию, включающую подготовку склеиваемых поверхностей и адгезива (клея-герметика), нанесение адгезива, монтаж оболочки с выдержкой геометрических размеров толщины образующегося клеевого слоя с последующей его полимеризацией с соблюдением определенного режима. Сложность применяемой технологии приводит к риску образования дефектов клеевого соединения (непроклея), существенно снижающих прочностные характеристики и герметичность узла соединения. Для обеспечения высокого качества и надежности головных элементов конструкций ЛА в процессе их изготовления необходимо проведение неразрушающего контроля (НК) узла соединения. До настоящего времени контроль проводился одним из следующих радиационных методов НК:

– рентгенографическим — с применением рентгенографических пленок для регистрации проникающего рентгеновского излучения [6, 7];

– рентгеноскопическим — с применением специальных рентгенотелевизионных комплексов, в состав которых входят рентгеновские электронно-оптические преобразователи (РЭОП), преобразующие входное рентгеновское излучение в оптическое изображение на выходном люминесцентном экране. Система визуализации переносит изображение на высокочувствительную ПЗС-матрицу, потенциальный рельеф с которой считывается в память компьютера и анализируется оператором на мониторе (рис. 2).

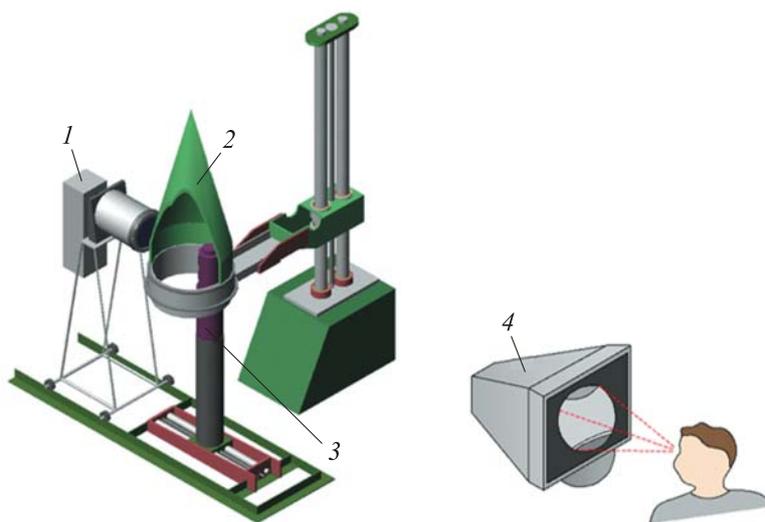


Рис. 2. Схема рентгеноскопического контроля узла соединения оболочки-шпангоут:

1 — РЭОП; 2 — объект контроля; 3 — источник рентгеновского излучения (рентгеновская трубка); 4 — монитор с контролем в режиме телевидения (наблюдение и идентификация непроклея органолептическим методом)

Оба перечисленных выше метода радиационного контроля предполагают достаточно длительную и трудоемкую процедуру обработки получаемых рентгеновских снимков в ручном режиме, что в условиях увеличения объемов производства приводит к существенным экономическим и временным затратам. Применение дорогостоящих серебросодержащих радиографических пленок и последующая их химическая обработка увеличивают экономические затраты на проведение контроля.

Применяемые при этом системы визуализации на основе РЭОП не всегда обеспечивают требуемую высокую достоверность контроля ввиду значительного геометрического искажения изображения контролируемого объекта на рентгеновских снимках. Искажения обусловлены особенностью конструкции электронно-оптической системы РЭОП, фокусирующей поток фотоэлектронов с фотокатода входного экрана

сферической формы на выходном люминесцентном слое плоской формы. В результате такой фокусировки на рентгеновском изображении происходит увеличение и искривление формы дефекта пропорционально его удалению от середины входного экрана.

По результатам обзора опубликованных работ [8–13] установлено, что одним из перспективных способов повышения достоверности и точности радиационного контроля в узлах соединения головных элементов конструкций ЛА с одновременным решением задачи по сокращению трудоемкости и длительности контроля является внедрение в производственный процесс методов и технических средств цифровой радиографии, активно развивающихся в последнее время в различных отраслях науки и техники.

Цель данной работы — проведение исследований по внедрению цифровой радиографии в серийное производство головных элементов конструкций ЛА.

Цифровая радиография. Методы цифровой радиографии включают в себя технологии радиографического контроля, при которых полученное рентгеновское изображение объекта контроля формируется и хранится в цифровом виде [8, 11]. В настоящее время при проведении цифровой радиографии для регистрации рентгеновского излучения широкое применение получили плоскопанельные детекторы (ППД) непрямого преобразования.

Принцип работы ППД непрямого преобразования заключается в преобразовании слоем сцинтиллятора рентгеновского излучения в световую энергию (рис. 3). Полученный видимый свет падает на матрицу полупроводниковых фотоэлементов, где преобразуется в серию электрических сигналов (электронов), которые затем оцифровываются маломощной считывающей электроникой.

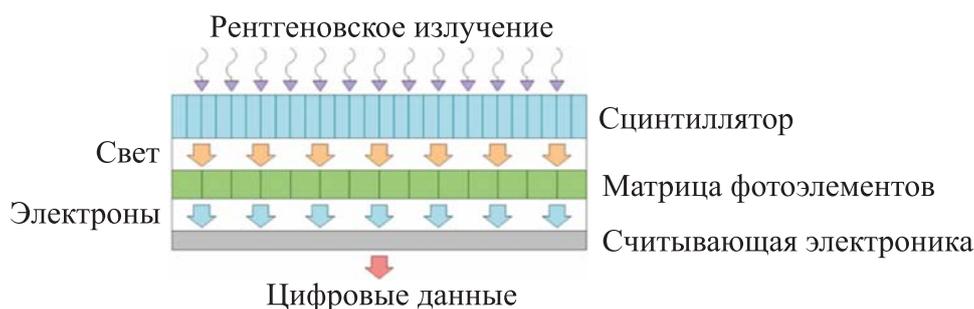


Рис. 3. Принцип работы плоскопанельного детектора непрямого преобразования

Для повышения точности и достоверности контроля клеевого соединения в конструкции головного элемента ЛА методом цифровой радиографии улучшают качество рентгеновского снимка (ГОСТ ISO 17636-2–2017). Для этого необходимо:

- уменьшить контрастную чувствительность K , представляющую собой минимально различимый лучевой (в направлении просвечивания) размер эталонного дефекта;
- повысить нормализованное отношение сигнал/шум SNR_N ;
- уменьшить базовое пространственное разрешение (нерезкость) изображения SR_b^{image} , характеризующее наименьший размер объекта, который может быть разрешен (отображен) на цифровом изображении.

В настоящей работе контрастная чувствительность, определяемая в соответствии с ГОСТ 7512–82 по канавочному эталону («Спрут» модификация 21 с глубиной канавок от 0,1 до 0,6 мм с шагом 0,1), установленному на поверхности контролируемого объекта со стороны источника излучения, равна наименьшей глубине выявляемой на снимке канавки. Базовое пространственное разрешение SR_b^{image} определялось по дуплексному индикатору качества изображения (ИКИ) согласно ГОСТ ISO 17636-2–2017.

Для проведения достоверного НК несплошностей в клеевом соединении конструкции головного элемента ЛА необходимо обеспечить контрастную чувствительность радиографического контроля не менее 0,5 мм (толщина клеевого слоя $0,4 \pm 0,2$ мм). Для достижения требуемой чувствительности контроля подобраны ППД с увеличенным динамическим диапазоном (16 бит) по сравнению с применяемыми до настоящего времени РЭОП (10 бит), а также с небольшим размером активного элемента (пикселя) — 124 мкм и 75 мкм, что позволило получить рентгеновские снимки более высокого качества.

Для сравнения на рис. 4 приведены рентгеновские снимки калибровочной мишени из оргстекла, полученные с помощью РЭОП и ППД. На снимках, полученных с помощью ППД, не наблюдается искривление изображения от центра к периферии, что характерно для снимков, полученных с помощью РЭОП (обусловленное неравномерным

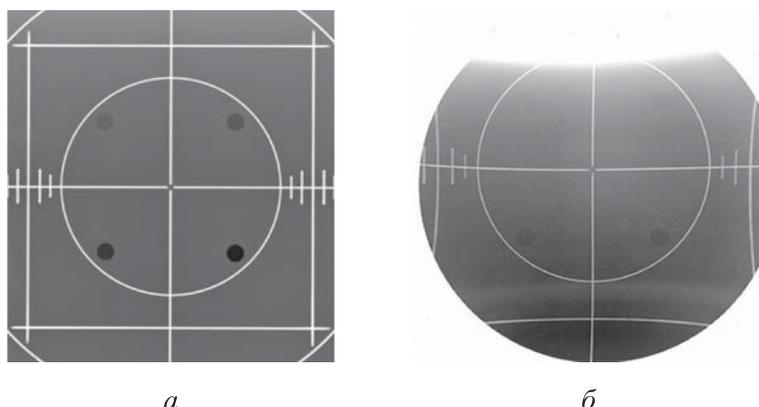


Рис. 4. Рентгеновские изображения калибровочной мишени, полученные с помощью ППД (а) и РЭОП (б)

увеличением оптической системой). В результате применения ППД достоверность контроля и точность оценки размеров выявляемых дефектов, удаленных от центральной области снимка, повышаются.

Рентгеновские изображения одного и того же фрагмента клеевого соединения элемента конструкции ЛА с дефектом в виде несплошности (непроклея) клеевого слоя, полученные методом рентгеноскопии с использованием РЭОП и цифровой радиографии с применением подобранных ППД, представлены на рис. 5 и 6 соответственно.

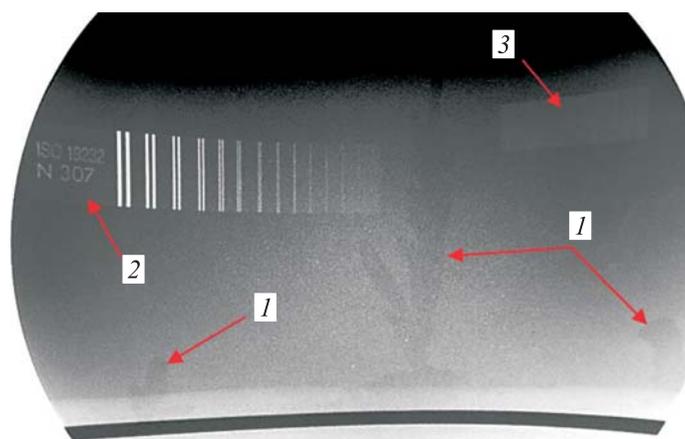


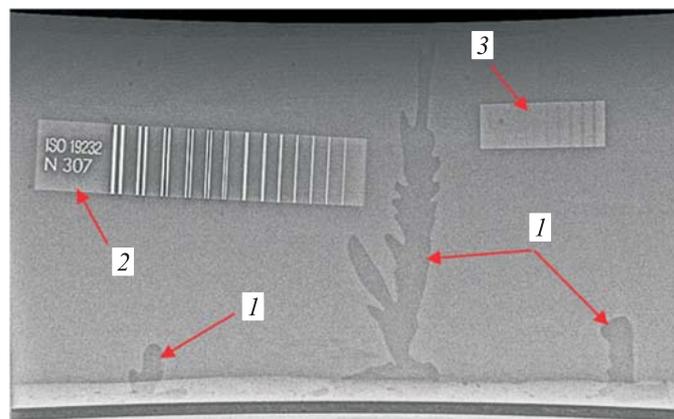
Рис. 5. Рентгеновские снимки фрагмента клеевого соединения, полученные с помощью РЭОП:

1 — несклеи; 2 — дуплексный ИКИ; 3 — канавочный эталон

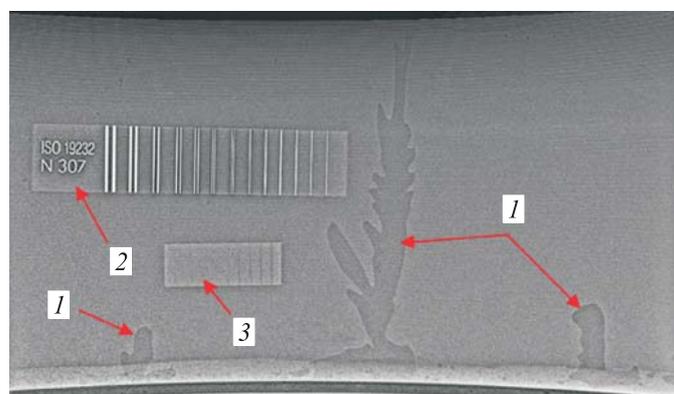
Анализ полученных рентгеновских снимков (см. рис. 5 и 6) показывает, что наибольшей четкостью и контрастностью обладает изображение, полученное с помощью ППД 2. Характеристики устройств регистрации и показатели качества полученных изображений представлены в таблице.

Применение подобранных ППД позволило в 2 раза повысить контрастную чувствительность и на 20...50 % уменьшить нерезкость получаемых изображений (в зависимости от конфигурации обнаруженного дефекта).

Динамический диапазон применяемых ранее РЭОП (диапазон радиационных толщин объекта контроля, доступных анализу на одном и том же изображении) составляет всего 10 бит, что не позволяло получать за одну экспозицию рентгеновское изображение клеевого соединения, имеющего переменную толщину соединяемых элементов (переменную радиационную толщину). Поэтому контроль клеевого соединения проводился за две экспозиции при разных режимах просвечивания, что увеличивало длительность и трудоемкость контроля на 20...25 %. Динамический диапазон подобранных ППД позволяет проводить контроль зоны переменной радиационной толщины за одну экспозицию, что существенно снижает длительность контроля.



а



б

Рис. 6. Рентгеновские снимки фрагмента клеевого соединения, полученные с помощью ППД 1 (а) и ППД 2 (б):

1 — непроклеи; 2 — дуплексный ИКИ; 3 — канавочный эталон

Характеристики устройств регистрации и показатели качества рентгеновских снимков узла клеевого соединения элемента конструкции ЛА

Характеристика	Устройство регистрации		
	РЭОП	ППД 1	ППД 2
Тип детектора	–	Фотодиод с TFT	IGZO TFT
Сцинтиллятор	–	Gadox	Оксисульфид гадолия
Размер пикселя, мкм	–	124	75
Динамический диапазон, бит	10	16	16
Контрастная чувствительность K , мм	0,4	0,2	0,2
Нормализованное отношение сигнал/шум SNR_N	–	110	160
Базовое пространственное разрешение SR_b^{image}	250	200	130

На основании полученных результатов разработана схема радиационного неразрушающего контроля головных элементов конструкций ЛА методом цифровой радиографии с применением ППД (рис. 7).

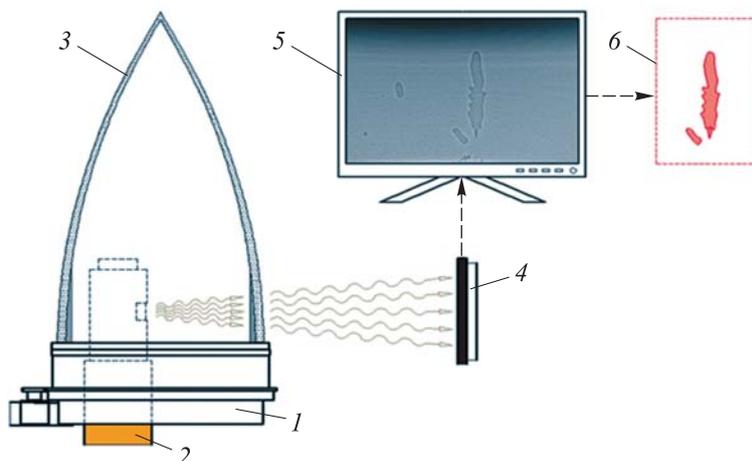


Рис. 7. Схема радиационного неразрушающего контроля узла соединения оболочка-шпангоут элемента конструкции ЛА методом цифровой радиографии:
1 — манипулятор; 2 — рентгеновская трубка; 3 — объект контроля; 4 — ППД; 5 — ПК с программным обеспечением для визуализации и обработки цифрового рентгеновского снимка; 6 — результаты программного определения размеров дефекта

Ввиду конструктивных особенностей объекта контроля и ППД применяется такая схема контроля, когда источник излучения располагается внутри объекта контроля, а ППД — снаружи. В случае применение этой схемы контроля можно использовать способ геометрического увеличения с увеличенным расстоянием между объектом контроля и детектором, тем самым повышая нормализованное отношение сигнал/шум SNR_N .

Оцифрованное изображение объекта контроля поступает на экран монитора, где с помощью специализированного программного обеспечения (ПО) происходят обработка, хранение и архивирование изображения в защищенном цифровом формате.

Программное обеспечение современных ППД имеет широкий функционал, обеспечивающий не только обработку полученного изображения, но и управление комплексом применяемого оборудования в целом. С помощью ПО ППД проводится автоматизация процесса выбора режима контроля для изделий конкретного типа, выполняется сканирование выбранного изделия и оформляется заключение по шаблону пользователя. Измерительный блок может оперативно и с высокой точностью провести измерения линейных размеров обнаруженных дефектов, расстояния между ними, а также

вычисление площади области, указанной на изображении. Благодаря современным ППД длительность и трудоемкость контроля изделия в целом сокращаются на 35...40 %.

Заключение. В результате проведенных работ усовершенствована методология неразрушающего контроля головных элементов конструкций ЛА путем внедрения методов и технических средств цифровой радиографии в процесс серийного производства. Подобраны ППД, разработана, опробована и внедрена схема контроля. Внедрение цифровой радиографии повышает достоверность и точность, а также сокращает длительность и трудоемкость контроля на 25 и 40 % соответственно, что в условиях увеличивающихся объемов серийного производства дает существенный экономический эффект.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Русин М.Ю. *Проектирование головных обтекателей ракет из керамических и композиционных материалов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005, 64 с.
- [2] Харитонов Д.В., Тычинская М.С., Анашкина А.А., Макаров Н.А., Лемешев Д.О. *Керамические материалы для авиации и космоса*. Москва, РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2022, 120 с.
- [3] Пивинский Ю.Е., Суздальцев Е.И. *Кварцевая керамика и огнеупоры. Том 1. Теоретические основы и технологические процессы: Справочное издание*; Ю.Е. Пивинский, ред. Москва, Теплоэнергетик, 2008, 672 с.
- [4] Терехин А.В. *Разработка методов и совершенствование технических средств оценки работоспособности эластомерных клеевых соединений конструкций летательных аппаратов. Дис. ... канд. техн. наук*. Москва, 2016, 212 с.
- [5] Думанский А.М. *Проблемы материаловедения в машиностроении*. Москва, Ижевск, Институт компьютерных исследований, 2015, 51 с.
- [6] Соснин Ф.Р. Радиационный контроль. В кн.: *Неразрушающий контроль: справочник в 8 т. Т. 1*. В.В. Клюев, общ. ред. 2-е изд., испр. Москва, Машиностроение, 2006, 560 с.
- [7] Добромислов В.А. *Радиационные методы неразрушающего контроля*. Москва, Машиностроение, 1999, 104 с.
- [8] Косарина Е.И., Крупнина О.А., Демидов А.А., Турбин Е.М. Цифровая радиография в неразрушающем контроле авиационной техники. *Авиационные материалы и технологии*, 2017, №S, с. 562–574.
- [9] Осипов С.П., Клименов В.А., Батрагин А.В., Штейн А.М., Прищепа И.А. Применение цифровой радиографии и рентгеновской вычислительной томографии при исследовании строительных конструкций и в строительном материаловедении. *Вестник ТГАСУ*, 2015, № 6 (53), с. 116–127.
- [10] Смирнов А.В., Косарина Е.И., Суворов П.В. Оценка качества отливок из алюминиевых и магниевых сплавов методом цифровой радиографии взамен традиционной пленочной технологии. *Материалы XIII Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат» (г. Москва, 12 февраля 2021 г.)*. Москва, ВИАМ, 2021, с. 133–143.
- [11] Цибульский А.В., Уланов В.В. Цифровая радиография: подход к повышению эффективности неразрушающего контроля сварных соединений магистральных газопроводов. *Деловой журнал Neftegaz.RU*. 2024, № 1, с. 90–92.

URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/tsifrovizatsiya/812679-tsifrovaya-radiografiya-podkhody-k-povysheniyu-effektivnosti-nerazrushayushchego-kontrolya-svarnykh-/> (дата обращения: 27.08.2024).

- [12] Майоров А.А. Цифровые технологии в неразрушающем контроле. *Сфера Нефтегаз*, 2009, № 9, с. 26–37.
- [13] Троицкий В.А., Михайлов С.Р., Пастовенский Р.А., Шило Д.С. Современные системы радиационного неразрушающего контроля. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2015, № 1, с. 23–35.

Статья поступила в редакцию 28.08.2024

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Терехин А.В., Филатов А.А., Атрощенко В.Ф., Чулков Д.И. Внедрение цифровой радиологии в производство головных элементов конструкций летательных аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2024, вып. 11. EDN ENWLLN

Терехин Александр Васильевич — канд. техн. наук, начальник научно-исследовательской лаборатории ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина.
e-mail: info@technologiya.ru

Филатов Анатолий Анатольевич — инженер второй категории научно-исследовательской лаборатории ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина.
e-mail: info@technologiya.ru

Атрощенко Виктор Федорович — ведущий инженер научно-исследовательской лаборатории ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина. e-mail: info@technologiya.ru

Чулков Дмитрий Игоревич — инженер первой категории научно-исследовательской лаборатории ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина.
e-mail: info@technologiya.ru

Introducing digital radiography in production of aircraft structures head elements

© A.V. Terekhin, A.A. Filatov, V.F. Atroshchenko, D.I. Chulkov

Obninsk Research and Production Enterprise *Technologiya* named after A.G. Romashin
JSC, Obninsk, 249031, Russian Federation

In the manufacture of head structural elements of aircraft, adhesive joints are widely used to connect the shell made of ceramic or polymer-composite material with a metal frame. During the process of implementation, there is a risk of forming defects of the “non-glued” type, which significantly reduce the strength characteristics of the adhesive joint unit and the reliability of the aircraft as a whole. In this regard, it is necessary to carry out non-destructive testing of the adhesive joint unit in assembly. The paper presents results of upgrading the existing non-destructive testing system of aircraft head structural elements by radiation methods and introducing digital radiography methods and technical means using flat-panel detectors instead of the previously used methods of radiography and fluoroscopy with the X-ray electron-optical converters. Quality of the obtained X-ray images of the adhesive joint unit of the aircraft structural element is comparatively assessed, as well as the effect of their introduction in the serial production.

Keywords: aircraft, glue connection, non-glued, digital radiography, flat-panel detector

REFERENCES

- [1] Rusin M.Yu. *Proektirovanie golovnykh obtekateley raket iz keramicheskikh i kompozitsionnykh materialov* [Design of the rocket head fairing from ceramic and composite materials]. Moscow, BMSTU Publ., 2005, 64 p.
- [2] Kharitonov D.V., Tychinskaya M.S., Anashkina A.A., Makarov N.A., Lemeshev D.O. *Keramicheskie materialy dlya aviatsii i kosmosa* [Ceramic materials for aircraft and space]. Moscow, RKhTU im. D.I. Mendeleev Publ., 2022, 120 p.
- [3] Pivinsky Yu.E., Suzdaltsev E.I. *Kvartsevaya keramika i ognepupory. Tom 1. Teoreticheskie osnovy i tekhnologicheskie protsessy: Spravochnoe izdanie* [Quartz ceramics and refractory materials. Volume 1. Theoretical bases and technological processes: Reference book]. Yu.E. Pivinsky, ed. Moscow, Teploenergetik Publ., 2008, 672 p.
- [4] Terekhin A.V. *Razrabotka metodov i sovershenstvovanie tekhnicheskikh sredstv otsenki rabotosposobnosti elastomernykh kleevykh soedineniy konstruktivnykh letatelnykh apparatov. Dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development of methods and improvement of hardware components in assessing operability of the elastomeric glued joints of the aircraft constructions. Diss. ... Cand. Sc. (Eng.)]. Moscow, 2016, 212 p.
- [5] Dumansky A.M. *Problemy materialovedeniya v mashinostroenii* [Material science problems in mechanical engineering]. Moscow, Izhevsk, Institut Kompiternykh Issledovaniy Publ., 2015, 51 p.
- [6] Sosnin F.R. *Radiatsionnyi kontrol* [Radiation control]. In: *Nerazrushayushchiy kontrol: spravochnik v 8 t.* [Non-destructive control: reference book in 8 vols.]. Vol. 1. V.V. Klyuev, ed. 2nd ed., rev. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006, 560 p.
- [7] Dobromyslov V.A. *Radiatsionnye metody nerazrushayushchego kontrolya* [Radiation methods of nondestructive control]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1999, 104 p.

- [8] Kosarina E.I., Krupnina O.A., Demidov A.A., Turbines E.M. Tsifrovaya radiografiya v nerazrushayushchem kontrole aviatsionnoy tekhnike [Digital radiography in nondestructive testing of aerostructures]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii — Aviation Materials and Technologies*, 2017, no. S, pp. 562–574.
- [9] Osipov S.P., Klimenov V.A., Batranin A.V., Shteyn A.M., Prishchepa I.A. Primenenie tsifrovoy radiografii i rentgenovskoy vychislitelnoy tomografii pri issledovanii stroitelnykh konstruksiy i v stroitelnom materialovedenii [Digital radiography and x-ray computerized tomography in building construction and construction materials science]. *Vestnik TGASU — Journal of Construction and Architecture*, 2015, no. 6 (53), pp. 116–127.
- [10] Smirnov A.V., Kosarina E.I., Suvorov P.V. Otsenka kachestva otlivok iz aluminievyykh i magnievyykh splavov metodom tsifrovoy radiografii vzamen traditsionnoy plenochnoy tekhnologii [Quality evaluation of castings from aluminum and magnesium alloys by the digital radiography method instead of the traditional film technology]. In: *Materialy XIII Vserossiyskoy konferentsii po ispytaniyam i issledovaniyam svoystv materialov “TestMat” (Moskva, 12 fevralya 2021 g.)* [Materials of the XIII All-Russian conference on tests and research in material properties “TestMat” (Moscow, February 12, 2021)]. Moscow, VIAM Publ., 2021, pp. 133–143.
- [11] Tsibulsky A.V., Ulanov V.V. Tsifrovaya radiografiya: podkhod k povysheniyu effektivnosti nerazrushayushchego kontrolya svarnykh soedineniy magistralnykh truboprovodov [Digital radiography: approach to increase efficiency of nondestructive control in welded connections of the main gas pipelines]. *Delovoy zhurnal Neftegaz.RU — Neftegaz RU*, 2024, no. 1, pp. 90–92. Available at: <https://magazine.neftgaz.ru/articles/tsifrovizatsiya/812679-tsifrovaya-radiografiya-podkhody-k-povysheniyu-effektivnosti-nerazrushayushchego-kontrolya-svarnykh-/> (accessed August 27, 2024).
- [12] Mayorov A.A. Tsifrovyte tekhnologii v nerazrushayushchem kontrole [Digital technologies in nondestructive control]. *Sfera Neftegaz — Sphere. Oil and Gas*, 2009, no. 9, pp. 26–37.
- [13] Troitskiy V.A., Mikhaylov S.R., Pastovensky R.A., Shilo D.S. Sovremennyye sistemy radiatsionnogo nerazrushayushchego kontrolya [Modern systems of radiation nondestructive control]. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy kontrol — Technical Diagnostics and Nondestructive Control*, 2015, no. 1, pp. 23–35.

Terekhin A.V., Cand. Sc. (Eng.), Head of the Research Laboratory, Obninsk Research and Production Enterprise Tekhnologiya named after A.G. Romashin JSC.
e-mail: info@tehnologiya.ru

Filatov A.A., Engineer of the Second Category, Research Laboratory, Obninsk Research and Production Enterprise Tekhnologiya named after A.G. Romashin JSC.
e-mail: info@tehnologiya.ru

Atroshchenko V.F., Leading engineer, Research Laboratory, Obninsk Research and Production Enterprise Tekhnologiya named after A.G. Romashin JSC.
e-mail: info@tehnologiya.ru

Chulkov D.I., Engineer of the First Category, Research Laboratory, Obninsk Research and Production Enterprise Tekhnologiya named after A.G. Romashin JSC.
e-mail: info@tehnologiya.ru