

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-10-48-53>

РАДИАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ЗАГотовок, ВЫПОЛНЕННЫХ ПО АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ, МЕТОДОМ ЦИФРОВОЙ РАДИОГРАФИИ

© Наталья Александровна Михайлова*, Екатерина Ивановна Косарина, Александр Александрович Демидов, Павел Владимирович Суворов

НИИ Курчатовский институт — ВИАМ, Россия, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17; *e-mail: admin@viam.ru

*Статья поступила 23 мая 2022 г. Поступила после доработки 11 июля 2022 г.
Принята к публикации 16 августа 2022 г.*

При производстве изделий ответственного назначения часто используют аддитивные технологии, а именно селективное лазерное сплавление (СЛС). Вместе с тем процесс СЛС может сопровождаться появлением в изделии специфических дефектов. В работе представлены результаты радиационного контроля авиационных заготовок, выполненных по аддитивной технологии, методом цифровой радиографии. В качестве преобразователя рентгеновского излучения использовали цифровую детекторную систему. Показано, что традиционно применяемые для контроля методы пленочной рентгенографии в случае объектов авиационной техники не всегда эффективны. Метод цифровой радиографии, напротив, наиболее адекватен. Сравнение результатов цифровой радиографии с традиционной рентгенографией выявило, что временные затраты на радиационный контроль при использовании автоматизированного манипулятора существенно снижаются, при этом производительность контроля резко возрастает. Полученные результаты могут быть использованы при совершенствовании методики радиационного контроля объектов авиационной техники, изготовленных с помощью аддитивных технологий.

Ключевые слова: аддитивные технологии; селективное лазерное сплавление; радиационный неразрушающий контроль; цифровая радиография.

RADIATION CONTROL OF BLANKS MANUFACTURED USING ADDITIVE TECHNOLOGY BY DIGITAL RADIOGRAPHY

© Natalya A. Mikhaylova*, Ekaterina I. Kosarina, Aleksandr A. Demidov, Pavel V. Suvorov

NRC “Kurchatov Institute” — VIAM, 17, ul. Radio, Moscow, 105005, Russia; e-mail: admin@viam.ru

Received May 23, 2022. Revised July 11, 2022. Accepted August 16, 2022.

Additive technologies, namely selective laser melting (SLM), are often used in manufacturing products of critical duty. At the same time, the SLM process may be accompanied by the appearance of specific defects in the product. We present the results of radiation monitoring of aviation blanks manufactures using additive technology by digital radiography. A digital detector system was used as an X-ray converter. It is shown that the methods of film radiography traditionally used for control in the case of aircraft objects are not always effective. The method of digital radiography, on the contrary, is the most adequate. Comparison of the results of digital radiography with data of traditional radiography revealed that the time spent on radiation monitoring when using an automated manipulator is significantly reduced, while the monitoring performance increases dramatically. The results obtained can be used to improve the methods of radiation monitoring of aircraft objects manufactured using additive technologies.

Keywords: additive technologies; selection laser melting; radiation non-destructive testing; digital radiography.

Введение

Одна из актуальных задач в производстве изделий ответственного назначения, в частности авиационной техники, — внедрение цифровых технологий как при создании собственно изде-

лий, так и при проведении неразрушающего контроля их качества [1, 2].

При производстве таких изделий часто используют аддитивные технологии, например, селективное лазерное сплавление (СЛС). В процес-

се СЛС в особой камере тонкие слои распыленного мелкого металлического порошка с помощью механического устройства распределяются на пластину подложки, перемещающуюся в вертикальном направлении. В горизонтальной плоскости лазерный луч расплавляет нанесенный на подложку слой порошка. Так формируется слой за слоем, пока деталь не будет готова [3].

Методом СЛС, использующим мощные лазеры для создания трехмерных объектов, можно получать конструкции переменной толщины и сложной внутренней геометрии [4 – 6]. При этом СЛС-технология практически не требует технологической оснастки [7, 8] и отличается следующими достоинствами:

выход годного достигает 100 %;

продолжительность изготовления существенно сокращается;

значительно повышается коэффициент использования материала.

Отметим, что процесс плавления порошкообразной среды концентрированным лазером может приводить к микроструктурным дефектам, негативно влияющим на общую функциональность и прочность изготавливаемой детали.

Традиционно на производстве применяют радиационный неразрушающий контроль заготовок, особенно его рентгенографический метод с применением радиографической пленки. При рентгенографическом контроле (РК) информация формируется сначала в виде радиационного изображения, затем преобразуется в оптическое изображение — радиографический снимок (в обоих случаях изображения — аналоговый сигнал). Вместе с тем использование цифровых технологий в РК характеризуется рядом преимуществ: передача и сохранение информации без искажения, исключение дорогостоящей радиографической пленки из процесса контроля.

Для деталей аддитивного производства характерны специфические дефекты материала, отличающиеся от тех, что появляются при производстве изделий по традиционным технологиям [2, 9]. По этой причине метод пленочной радиографии, обычно применяемый при контроле отливок сложной формы, неэффективен.

Цель работы — контроль деталей со сложной внутренней структурой, изготовленных с помощью аддитивных технологий, методом цифровой радиографии.

Материалы, методика, оборудование

РК с применением пленочных систем детерминирован на всех его этапах: от выбора схемы, режимов и параметров до ожидаемых результатов. Каждый этап регламентирован нормативными документами. Отсутствие нормативно-тех-

нической документации в случае неразрушающего контроля методом цифровой радиографии требует разработки технологии, обеспечивающей гарантированное обнаружение недопустимых дефектов.

В заготовках, выполненных методом СЛС, могут возникать дефекты в виде пористости (микропористости) [6, 8]. Пористость может формироваться вследствие усадки и/или газовыделения при кристаллизации, неоптимальных параметров синтеза, влажности или загрязнения металлопорошковой композиции или технологической среды. Как правило, поры имеют объемный характер, их размеры находятся в пределах от тысячных долей миллиметра до единиц миллиметров.

Образование таких дефектов, как трещины, обусловлено термодеоформационными и физико-химическими процессами при синтезе. Трещины, возникающие при СЛС, например, сталей системы Fe – Cr – Ni, зачастую носят межзеренный характер и могут располагаться как на поверхности, так и внутри металла. Обычно раскрытие трещин при сварке (синтезе) и термообработке происходит в плоскости, перпендикулярной линии сплавления.

Нарушения или отклонения параметров синтеза от оптимальных могут приводить к образованию несплавов (плоскостных и объемных). Кроме того, нарушения технологии СЛС и некорректная работа оборудования могут также вызывать дефекты поверхности различной морфологии (шероховатость, смещение слоев и др.).

Металлические и неметаллические включения возникают из-за попадания в зону сплавления частиц инструмента (выравнивающего ножа и др.), спеченного порошка (оставшегося в металлопорошковой композиции при ее плохом просеивании) и металлопорошковой композиции другого состава (сохранившейся в полостях и частях установки для синтеза). Включения имеют объемный характер.

Термодеоформационные процессы при кристаллизации, неоптимальное расположение заготовки на плите построения, недостаточное количество или отсутствие поддерживающих структур, нарушение технологии СЛС могут приводить к искажению конфигурации детали с нарушением ее геометрических размеров.

Засорение внутренних полостей детали заготовки несплавленным, спеченным порошком, посторонними предметами, например, стружкой или проволокой, может возникать при нарушении технологии очистки внутренних полостей перед термообработкой или при несоблюдении



Рис. 1. Детектор Varex XRD 1621 ANES

Fig. 1. A Varex XRD 1621 ANES detector

рекомендаций по удалению поддержек и пост-обработке заготовки.

Заметим, что трещины при СЛС формируются в плоскости, перпендикулярной линии сплавления. Следовательно, ориентация оси пучка излучения перпендикулярно плоскости объекта контроля (ОК) будет способствовать их обнаружению. При недопустимости в ОК трещин целесообразно применять радиационный неразрушающий контроль.

В процессе лазерного сплавления плоская часть ОК плавно меняет толщину (от $\sim 1,0$ до $0,4$ мм). При этом поверхность в результате сплавления порошка неровная, ее случайные колебания составляют от тысячных до десятых долей миллиметра, т.е. исследуемый ОК имеет

высокий уровень собственного шума. Если в таком объекте содержится дефект и его размеры соизмеримы с колебаниями поверхности, то он не может быть обнаружен традиционным рентгенографическим способом, несмотря на высокую разрешающую способность и высокий градиент используемой радиографической пленки.

Рентгеновский контроль заготовок проводили методом цифровой радиографии с использованием цифровой детекторной системы (ЦДС) Varex XRD 1621 ANES. С помощью цифровой радиографии получали увеличенное изображение ОК, анализ которого позволял разделить два случайных сигнала: дефект и собственный шум ОК.

Цифровой матричный детектор рентгеновского излучения (рис. 1), построенный на базе 16-дюймового сенсора из аморфного кремния, работал как двумерный фотодиодный массив. Цифровая панель детектора (размер $409,6 \times 409,6$ мм) содержала 2048×2048 пикселей (размер пикселя — 200 мкм) [9]. В качестве источника излучения использовали микрофокусный рентгеновский аппарат FXE-225.48.

Естественно, использовать цифровую радиографию вместо традиционной можно только в случае, если качество цифрового изображения не уступает качеству рентгенографического (ASTM E2737-10).

На рис. 2 показано расположение ОК на радиографической пленке для четырех (I – IV) режимов экспонирования в соответствии с действующими нормативами (схема контроля при I и II экспозициях одна и та же, при контроле цилиндрической части (экспозиция IV) ОК поворачивают на 90°).

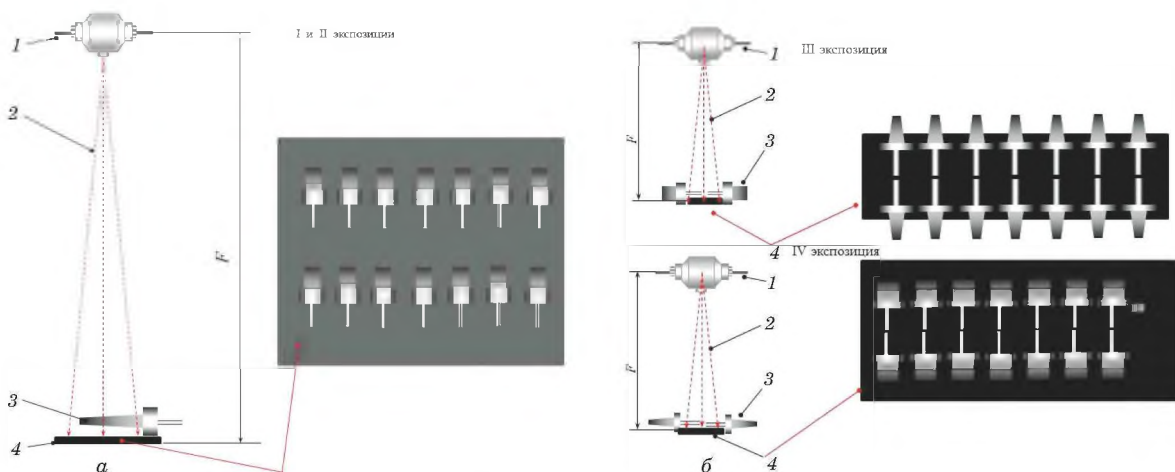


Рис. 2. Контроль плоской (а) и цилиндрической (б) частей ОК: 1 — источник излучения; 2 — рентгеновское излучение; 3 — ОК; 4 — кассета с радиографической пленкой (слева — схема контроля, справа — укладка ОК на кассету с радиографической пленкой)

Fig. 2. Control of plane and cylindrical (b) parts of object of control: 1 — radiation source; 2 — X-ray emission; 3 — object of control; 4 — cartridge with a radiographic film (left — control scheme, right — laying OK on the cartridge with a radiographic film)

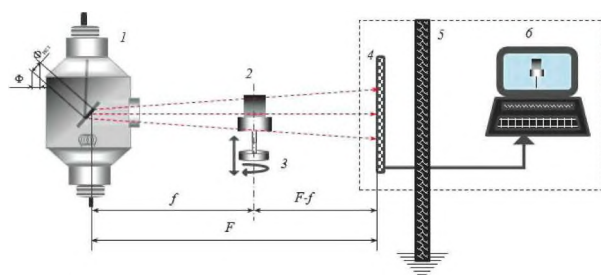


Рис. 3. Схема контроля методом цифровой радиографии: 1 — источник излучения; 2 — ОК; 3 — поворотный столик; 4 — детектор; 5 — экран; 6 — монитор с изображением ОК

Fig. 3. Scheme of control by the method of digital radiography: 1 — radiation source; 2 — object of control; 3 — rotary little table; 4 — detector; 5 — screen; 6 — monitor with the image of an object of control

Обсуждение результатов

Корректный выбор режимов и параметров цифровой радиографии необходим для достижения требуемых значений геометрической нерезкости, контрастной чувствительности и нормализованного отношения сигнал – шум [11, 21]. Качество цифрового изображения ОК определяется оптимальным подбором типа источника излучения и детектора, а также геометрических параметров (ГОСТ ISO 17636-2-2017), т.е. зависит от схемы контроля (размера фокусного пятна Φ , расстояний источник — детектор F и источник — объект f), величины анодного напряжения, тока трубки, аппаратного усиления ЦДС, времени накопления кадра, количества кадров усреднения/продолжительности экспозиции для одного изображения, толщины фильтра рентгеновского излучения.

ОК устанавливали так, чтобы центральный луч проецировался на середину контролируемого участка ОК и рабочей зоны детектора. Размер контролируемого участка определялся достижением необходимых значений параметров цифрового изображения.

На рис. 3 приведена схема контроля методом цифровой радиографии. Отметим, что отношение расстояний F и f определяет коэффициент увеличения получаемого цифрового изображения: $M = F/f$.

Ток трубки определяли экспериментально. Увеличение тока, с одной стороны, приводит к повышению уровня сигнала, а с другой — к росту размера фокусного пятна и нерезкости изображения. В экспериментальных исследованиях ток не превышал 300 мкА.

Уровень сигнала должен лежать в диапазоне 10 – 90 % от полного диапазона детектора. С помощью гистограммы изображения ОК (рис. 4) фиксировали, чтобы уровень фона при выбран-

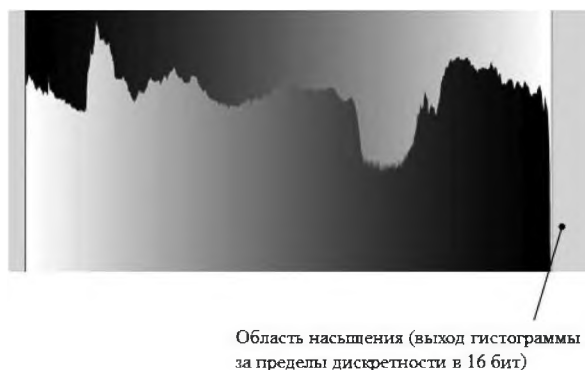


Рис. 4. Гистограмма изображения ОК

Fig. 4. The OK image histogram

ных настройках детектора, значениях фокусного расстояния, напряжения и тока не уходил в область насыщения.

Предварительную коррекцию ЦДС для выбранных параметров контроля проводили, выполняя следующие калибровки: 1) на наличие неисправных (битых) пикселей; 2) по темновому току (без излучения); 3) по усилению (излучение без ОК). Уровень сигнала от ОК и фона после коррекции должен находиться в требуемом диапазоне.

Необходимо учитывать, что калибровочный набор формируется в зависимости от тех или иных рабочих параметров детектора или источника. При изменении хотя бы одного параметра калибровочный набор необходимо корректировать.

Заметим, что если уровень сигнала на детекторе, соответствующий ОК, лежит в требуемом диапазоне, а уровень фона ушел в область насыщения, то следует применять фильтр рентгеновского излучения. Для уменьшения уровня фона можно увеличить фокусное расстояние или изменить настройки детектора (аппаратное усиление или время накопления кадра).

Схема контроля, которая для каждого ОК выбирается индивидуально, должна обеспечивать минимальную нерезкость цифрового изображения. Если известна величина предельно допустимого дефекта $\delta_{\text{доп}}$, то допустимая нерезкость изображения должна составлять не более $\delta_{\text{доп}}/4$.

Для коэффициента увеличения при контроле изделий с радиационной толщиной $\leq 1,5$ мм должно выполняться условие:

$$M \geq 5SR_6^{\text{дет}} / \delta_{\text{доп}},$$

где $SR_6^{\text{дет}}$ — базовое пространственное разрешение цифрового детектора.

Нерезкость цифрового изображения определяли по дуплексному индикатору качества изображения (ИКИ) (ГОСТ ИСО 17636-2). ИКИ

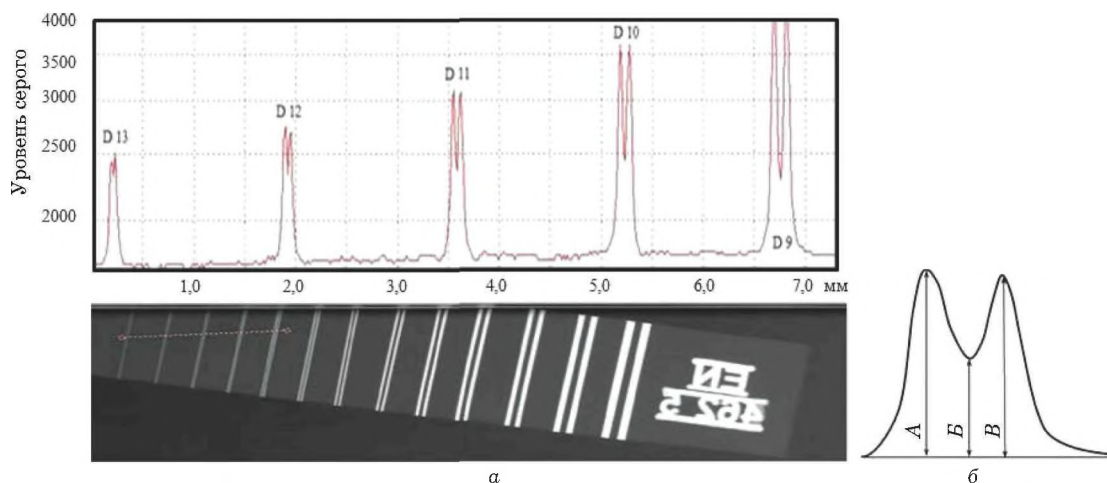


Рис. 5. Профиль изображения проволок дуплексного ИКИ (а) и схема определения *dip* (б)

Fig. 5. Image profile of duplex IQI Wires (a) and scheme of *dip* determination (b)

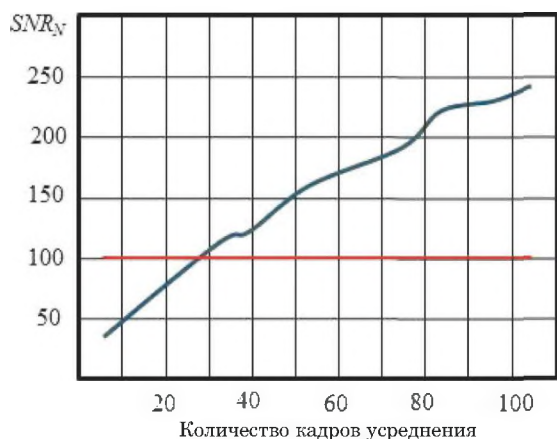


Рис. 6. Зависимость SNR_N от количества кадров усреднения

Fig. 6. SNR_N dependence on the number of averaging frames

закрепляли на ОК со стороны источника излучения на границе контролируемой области.

Составляющие пару проволоки, по которым определяли нерезкость, на изображении должны быть видны раздельно. Пара, у которой отношение глубины впадины к пикам на профиле распределения значений серого (*dip*) составляло не более 20 %, считалась неразличимой (на изображении две проволоки воспринимались как одна). Достигнутая величина нерезкости определялась крайним номером элемента дуплексного ИКИ, у которого *dip* более 20 % (в этом случае видны две проволоки раздельно). Для расчета *dip* использовали формулу: $dip = (A + B - 2B)/(A + B) \cdot 100 \%$. Профиль изображения проволок дуплексного ИКИ, схема определения *dip* и параметров A, B, B представлены на рис. 5.

Если в результате изменения коэффициента увеличения не удастся достичь требуемой нерезкости изображения, то следует либо уменьшить размер фокусного пятна, либо увеличить фокусное расстояние.

Поскольку для рассматриваемых ОК отсутствовали требования к величине $\delta_{\text{доп}}$, получили следующую зависимость радиационной толщины, мм, и максимально допустимой геометрической нерезкости изображения, мм: $\leq 1,5 - 0,08$; $1,5 - 4 - 0,1$; $4 - 8 - 0,125$; $8 - 12 - 0,16$; $12 - 40 - 0,2$; $40 - 120 - 0,26$.

Нормализованное отношение сигнал – шум SNR_N измеряли на изображении пластин из сплава, по химическому составу близкому к сплаву ОК, и такой же толщины (ASTM E2737-10). Отметим, что SNR_N зависит от количества кадров усреднения, так как с ростом числа кадров сигнал растет быстрее, чем шум.

В случае недостижения требуемого значения SNR_N увеличивали энергию излучения и/или количество кадров усреднения. Зависимость SNR_N от количества кадров усреднения приведена на рис. 6.

Заметим, что, повышая энергию излучения, необходимо следить за тем, чтобы сигналы от ОК и фона не ушли в насыщение, а также проверять геометрическую нерезкость, которая растет с увеличением размера фокусного пятна.

Абсолютную контрастную чувствительность определяли по проволочному ИКИ (10FE ISO, 13FE ISO). Ее величина равна диаметру наименьшей видимой проволоки. Отметим, что средства, используемые для достижения требуемой чувствительности, те же, что и для увеличения SNR_N .

Заключение

Применение СЛС при изготовлении сложных объектов обусловлено более высокой производительностью и экономичностью метода. Вместе с тем СЛС сопровождается возникновением специфических дефектов. При исследовании причин возникновения и характера этих дефектов установлено, что необходимы новые методы неразрушающего контроля. РК с применением цифровой радиографии показал, что это наиболее адекватный вариант замены радиографической пленки. Бурное развитие ЦДС в ближайшем будущем позволит практически полностью заменить пленочную радиографию на цифровую.

Финансирование, благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (соглашение № 075-11-2021-085) с использованием ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» — ВИАМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Косарина Е. И., Михайлова Н. А., Демидов А. А., Смирнов А. В. Теоретические аспекты при создании электронных эталонных рентгеновских снимков, содержащих количественную информацию / *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 4. С. 87 – 94. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-87-94
2. Косарина Е. И., Крупнина О. А., Демидов А. А., Михайлова Н. А. Цифровое оптическое изображение и его зависимость от радиационного изображения при неразрушающем контроле методом цифровой рентгенографии / *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 1. С. 37 – 42. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-37-42
3. Сироткин О. С. Современное состояние и перспективы развития аддитивных технологий / *Авиационная промышленность*. 2015. № 2. С. 22 – 25.
4. Каблов Е. Н., Кондрашов С. В., Мельников А. А., Щур П. А. Применение функциональных и адаптивных материалов, полученных способом 3D-печати (обзор) / *Труды ВИАМ*. 2022. № 2. Ст. 03. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-32-51
5. Зеленко М. А., Попович А. А., Мутылина И. М. Аддитивные технологии в машиностроении. — СПб.: СПбПУ, 2013. — 222 с.
6. Каблов Е. Н., Евгенов А. Г., Бакрадзе М. М. и др. Материалы нового поколения и цифровые аддитивные технологии производства ресурсных деталей ФГУП «ВИАМ». Ч. 1. Материалы и технологии синтеза / *Электromеталлургия*. 2022. № 1. С. 2 – 12. DOI: 10.31044/1684-5781-2022-0-1-2-12
7. Каблов Е. Н., Евгенов А. Г., Бакрадзе М. М. и др. Материалы нового поколения и цифровые аддитивные технологии производства ресурсных деталей ФГУП «ВИАМ». Ч. 2. Компенсация и контроль отклонений, ГИП и термическая обработка / *Электromеталлургия*. 2022. № 2. С. 2 – 12. DOI: 10.31044/1684-5781-2022-0-2-2-12
8. Богачев И. А., Сухов Д. И., Ходырев Н. А., Куркин С. Э. Исследование режимов синтеза поддерживающих структур деталей, получаемых методом селективного лазерного сплавления из металлопорошковой композиции сплава системы Co – Cr – Ni – W – Ta / *Труды ВИАМ*. 2022. № 1. С. 3 – 13. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-3-13
9. Багаев К. А. Цифровая радиография, обзор технологий и зарубежных стандартов / *Экспозиция. Нефть. Газ*. 2013. № 1. С. 11 – 13.
10. Villarraga-Gómez H., Lee C., Smith S. Dimensional metrology with X-ray CT: A comparison with CMM measurements on internal features and compliant structures / *Precision Engineering*. 2018. Vol. 51. P. 291 – 307.
11. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. — М.: Техносфера, 2019. — 1104 с.
12. Грузман И. С., Киричук В. С., Косых В. П. и др. Цифровая обработка изображений в информационных системах. — Новосибирск: НГТУ, 2002. — 352 с.

REFERENCES

1. Kosarina E. I., Mikhaylova N. A., Demidov A. A., Smirnov A. V. Theoretical aspects in the creation of electronic reference X-ray images containing quantitative information / *Aviats. Mater. Tekhnol.* 2019. N 4. P. 87 – 94 [in Russian]. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-87-94
2. Kosarina E. I., Krupnina O. A., Demidov A. A., Mikhaylova N. A. Digital optical image and its dependence on radiation image during non-destructive testing by digital radiography / *Aviats. Mater. Tekhnol.* 2019. N 1. P. 37 – 42 [in Russian]. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-37-42
3. Sirotkin O. S. The current state and prospects for the development of additive technologies / *Aviats. Promyshl.* 2015. N 2. P. 22 – 25 [in Russian].
4. Kablov E. N., Kondrashov S. V., Melnikov A. A., Shchur P. A. Application of functional and adaptive materials obtained by 3-D printing (review) / *Tr. VIAM*. 2022. N 2. Art. 03 [in Russian]. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-32-51
5. Zelenko M. A., Popovich A. A., Mutylina I. M. Additive technologies in mechanical engineering. — St. Petersburg: Izd. SPbPU, 2013. — 222 p. [in Russian].
6. Kablov E. N., Evgenov A. G., Bakradze M. M., et al. New generation materials and digital additive technologies for the production of resource parts of FSUE VIAM. Part 1. Materials and synthesis technologies / *Élektrometallurgiya*. 2022. N 1. P. 2 – 12 [in Russian]. DOI: 10.31044/1684-5781-2022-0-1-2-12
7. Kablov E. N., Evgenov A. G., Bakradze M. M., et al. New generation materials and digital additive technologies for the production of resource parts of FSUE VIAM. Part 2. Compensation and control of HIP deviations and heat treatment / *Élektrometallurgiya*. 2022. N 2. P. 2 – 12 [in Russian]. DOI: 10.31044/1684-5781-2022-0-2-2-12
8. Bogachev I. A., Sukhov D. I., Hodyrev N. A., Kurkin S. E. Investigation of synthesis modes of supporting structures of parts obtained by selective laser fusion from a metal-powder composition of an alloy of the Co – Cr – Ni – W – Ta system / *Tr. VIAM*. 2022. N 1. P. 3 – 13 [in Russian]. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-3-13
9. Bagaev K. A. Digital radiography, review of technologies and foreign standards / *Ékspozitsiya. Neft. Gaz*. 2013. N 1. P. 11 – 13 [in Russian].
10. Villarraga-Gómez H., Lee C., Smith S. Dimensional metrology with X-ray CT: A comparison with CMM measurements on internal features and compliant structures / *Precision Engineering*. 2018. Vol. 51. P. 291 – 307.
11. Gonsales R., Vuds R. Digital image processing in information systems: a textbook. — Moscow: Tekhnosfera, 2019. — 1104 p.
12. Gruzman I. S., Kirichuk V. S., Kosikh V. P., et al. Digital image processing in information systems. — Novosibirsk: Izd. NGTU, 2002. — 352 p. [in Russian].