

Научная статья

УДК 620.179.1

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-158-167

ОСОБЕННОСТИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ОТЛИВОК ИЗ СИЛУМИНА МЕТОДОМ РЕНТГЕНОВСКОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

А.А. Демидов¹, А.В. Трапезников¹, Е.И. Косарина¹, Н.В. Осияненко¹

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

Аннотация. Особенность неразрушающего контроля методом рентгеновской компьютерной томографии (РКТ) среднегабаритных заготовок корпусов из алюминиевого сплава заключается в том, что получение томограммы происходит одновременно для двух заготовок, а для расшифровки томографических изображений и разбраковки объектов контроля в указанные изображения внедряли САD-модели заготовок после механической обработки. По координатам дефектов относительно чистового контура определяли их допустимость. Оценку балла пористости ввиду невозможности осуществления ее методом РКТ проводят выборочно традиционным рентгенографическим методом.

Ключевые слова: алюминиевый сплав АК4ч, рентгеновская компьютерная томография, САD-модель, рентгеновская шкала пористости

Для цитирования: Демидов А.А., Трапезников А.В., Косарина Е.И., Осияненко Н.В. Особенности неразрушающего контроля отливок из силумина методом рентгеновской компьютерной томографии // Труды ВИАМ. 2026. № 4 (158). С. 158–167. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-158-167.

Scientific article

FEATURES OF NON-DESTRUCTIVE TESTING OF SILUMIN CASTINGS BY X-RAY COMPUTED TOMOGRAPHY

A.A. Demidov¹, A.V. Trapeznikov¹, E.I. Kosarina¹, N.V. Osiyanenko¹

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

Abstract. A special feature of non-destructive testing using X-ray computed tomography (XCT) of medium-sized aluminum alloy housing parts is that a tomogram is obtained simultaneously for two parts, CAD models of products were embedded in images for decoding tomographic images and sorting out control objects. Defect coordinates relative to the clean outline of the CAD model were used to determine their acceptability. Since X-ray computed tomography (XCT) is not feasible, porosity score assessment is selectively performed using traditional X-ray methods.

Keywords: aluminum alloy AK4ch, X-ray computed tomography, CAD model, X-ray porosity scale

For citation: Demidov A.A., Trapeznikov A.V., Kosarina E.I., Osiyanenko N.V. Features of non-destructive testing of silumin castings by X-ray computed tomography. *Trudy VIAM*, 2026, no. 4 (158), pp. 158–167. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-158-167.

Введение

Экстремальные условия работы авиационной техники: переход к сверхзвуковой скорости и большой высоте полета самолета, его надежность с учетом условий работы при низких и высоких температурах – все это вызывает повышенные требования к неразрушающему контролю узлов и деталей, выполненных из алюминиевых сплавов [1, 2]. Алюминиевые сплавы благодаря своим уникальным свойствам широко используются практически во всех отраслях народного хозяйства – особенно в производстве летательных аппаратов. В современной авиационной технике применяется широкий спектр алюминиевых сплавов – например, из литейных сплавов системы «алюминий–кремний» (силуминов) изготавливают сложные фасонные отливки деталей двигателя, шасси и топливных баков, а также крепежные устройства и многое другое.

Основным видом неразрушающего контроля отливок, в том числе из сплавов на основе алюминия, является радиографический контроль с регистрацией результатов на радиографическую пленку. Это дорогостоящий и трудоемкий процесс, связанный с использованием расходного серебросодержащего материала, с фотообработкой, вносящей в процесс определенную долю нестабильности, а также с расшифровкой рентгенографических изображений и невозможностью автоматизации процесса контроля.

Материалы и методы

В отливках из алюминиевых сплавов могут присутствовать дефекты, характерные для данного технологического процесса: усадочные и газовые раковины; рыхлоты; засоры; шлаковые, неметаллические и металлические включения, которые при соблюдении технологии рентгеновского контроля, регламентированной соответствующими нормативными документами, могут быть обнаружены с высокой чувствительностью [3]. Помимо этого, для литейных алюминиевых сплавов характерна газовая пористость – местное или рассредоточенное по всему объему изделия скопление мелких газовых раковин. Этот вид дефекта присущ практически всем отливкам из алюминиевых литейных сплавов типа силумин. Газовая пористость возникает в результате выделения газа из расплавленного металла и из сырых земляных форм. Она может также образоваться, когда относительно высокая температура устанавливается во всей или в отдельной части формы на длительный период времени либо при медленном теплоотводе [4].

Посредством металлографии интенсивность пористости различают по баллам, обозначенным в ГОСТ 1583–93, который регламентирует установление балла пористости по специально изготовленному шлифу (табл. 1) [5].

Таблица 1

Баллы пористости, определяемые на шлифах

Балл пористости	Классификация пористости	Диаметр пор, мм	Количество пор на 1 см ² , шт.
I	Мелкая	До 0,1	До 5
II	Пониженная	До 0,1/до 0,2	До 8/до 2
III	Средняя	До 0,3/до 0,5	До 12/до 2
IV	Повышенная	До 0,5/до 1,0	До 14/до 6
V	Высокая	До 0,5/до 1,0/свыше 1,0	До 15/до 8/до 2

Металлография – это разрушающий контроль, который невозможно провести при стопроцентной проверке каждого изделия. При проведении рентгеновского неразрушающего контроля оценка годности отливок происходит путем визуального сравнения рентгенографического изображения отливки с изображением эталонной рентгенограммы из «Альбома унифицированной рентгеновской шкалы газовой пористости отливок из литейных алюминиевых сплавов системы Al–Si». В данном альбоме приведена

информация о связи между баллом пористости и прочностными свойствами сплава, которая используется для того, чтобы определить, какой балл пористости следует считать браком [6].

Отливки из алюминиевого сплава АК9ч представляют собой среднегабаритные объекты сложной конфигурации (рис. 1), получаемые путем заливки в формы из холоднотвердеющих смесей по альфа-сет процессу. Перед разливкой сплав обрабатывали фтороцирконатом калия, являющегося модифицирующе-рафинирующей добавкой. Для снижения газовой пористости на внешнем боковом ребре в форму устанавливали холодильники. Температуру заливки варьировали в диапазоне от 640 до 700 °С.



Рис. 1. Отливка заготовки корпуса из алюминиевого сплава АК9ч

Рентгенографический контроль одного отлитого корпуса обеспечен экспонированием не менее десяти участков, однако стопроцентный контроль невозможен из-за недоступности отдельных зон. Высокая трудоемкость пленочной радиографии обусловлена следующими причинами. Во-первых, контроль каждого участка сопровождается установкой отлитого корпуса в положение экспонирования по определенной схеме, когда ось пучка излучения падает перпендикулярно на середину поверхности контролируемого участка. Для выполнения этого условия требуется наличие соответствующих приспособлений. Во-вторых, необходим двухсторонний доступ к контролируемому участку, для того чтобы с противоположной от источника излучения стороны разместить кассету с радиографической пленкой и защитным экраном. В-третьих, на поверхности контролируемого участка, обращенной к источнику излучения, следует разместить эталон чувствительности (индикатор качества изображения), ограничительные метки, номера участка контроля и объекта контроля. При расчете трудоемкости этот процесс называется подготовительным, и его продолжительность $t_{\text{подг}}$ кратна от четырех до шести раз продолжительности экспонирования $t_{\text{экс}}$: $t_{\text{подг}} = (4\div 6)t_{\text{экс}}$. Продолжительность экспонирования должна быть обозначена в технологической карте контроля вместе с анодным напряжением, током трубки и другими параметрами контроля. Фотообработка экспонированной радиографической пленки требует значительных временных затрат: даже при наличии автоматической обработки получение рентгеновского снимка осуществляется за 8 мин. По нормам контроля на расшифровку каждого рентгеновского снимка с выдачей заключения требуется 20 мин. Таким образом, рентгенографический контроль одного отлитого корпуса занимает не менее 3–4 ч, что недопустимо при массовом контроле деталей. Поэтому поставили задачу – оптимизировать процесс контроля без снижения его качества.

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

Результаты и обсуждение

Применение рентгеновской компьютерной томографии (РКТ) для контроля заготовок корпусов из сплава АК9ч (АЛ4) в целях его оптимизации

Первый этап исследования методом РКТ заключался в получении проекционных изображений, которое осуществлялось при непрерывном вращении на поворотном столе томографа одновременно пары отливок [7, 8]. Проекционное изображение пары отливок показано на рис. 2. Эти меры позволили сократить время сканирования одной пары отливок до 25 мин. Второй этап заключался в реконструкции проекционного изображения отливок и получении томограммы, изображение которой представлено на рис. 3. Размер вокселя томограммы составляет 155 мкм. Затем в рабочую область программного обеспечения томографа для анализа томограмм погружали САD-модель чистового контура отливки и проводили взаимное выравнивание томограммы и модели. (Примечание. САD-модель (Computer Aided Design Model) – это цифровая модель объекта, созданная с помощью компьютерных технологий, которая представляет собой трехмерное (или двухмерное) изображение объекта.)



Рис. 2. Проекционное изображение пары отливок

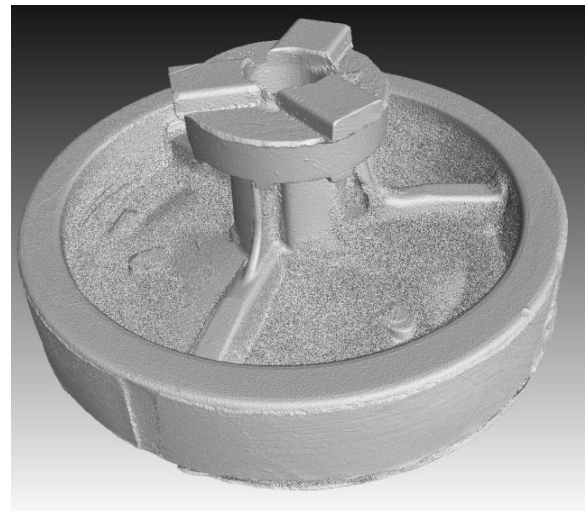


Рис. 3. Томографическое изображение отливки

Совместное изображение томограммы и САD-модели необходимо для проведения их взаимного выравнивания [9]. Для этого выбирали поверхности отливки, которые не подвергаются механической обработке и поэтому совпадают с соответствующими поверхностями модели. Для точного взаимного расположения можно использовать программное обеспечение для анализа томограмм. Однако слишком грубая поверхность отливки не позволила добиться лучших результатов, по сравнению с расположением вручную. Результат совмещения отливки и модели показан на рис. 4.

Далее проводили визуальный анализ дефектов отливки на предмет их попадания в чистовой контур будущей детали. Если в границы чистового контура попадает изображение дефекта, недопустимого по своему типу и размерам, то заготовку отправляют в ремонт или бракуют. Если координаты изображения дефекта находятся вне чистового контура САD-модели, то заготовка проходит контроль с положительным результатом, поскольку дефект будет удален в результате последующей механической обработки изделия [10–12].

На рис. 5 приведены изображения литейных дефектов, обнаруженных в сечениях томограммы и попадающих в чистовой контур САD-модели.

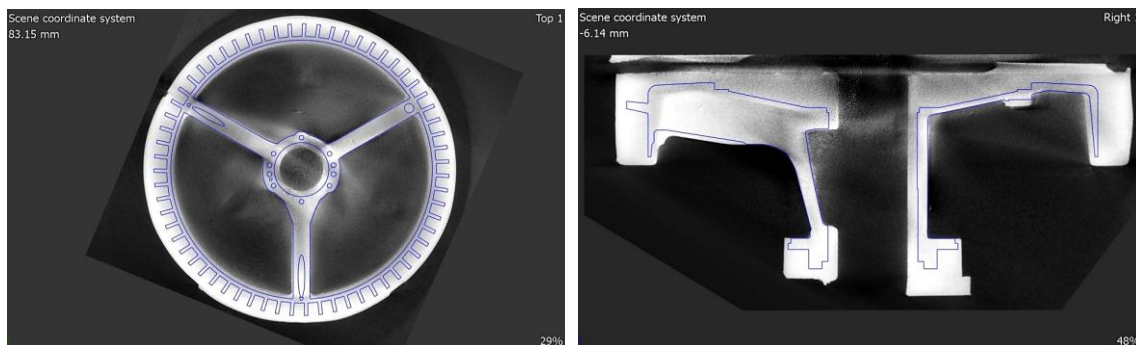


Рис. 4. Результат совмещения CAD-модели чистового контура и томограммы отливки

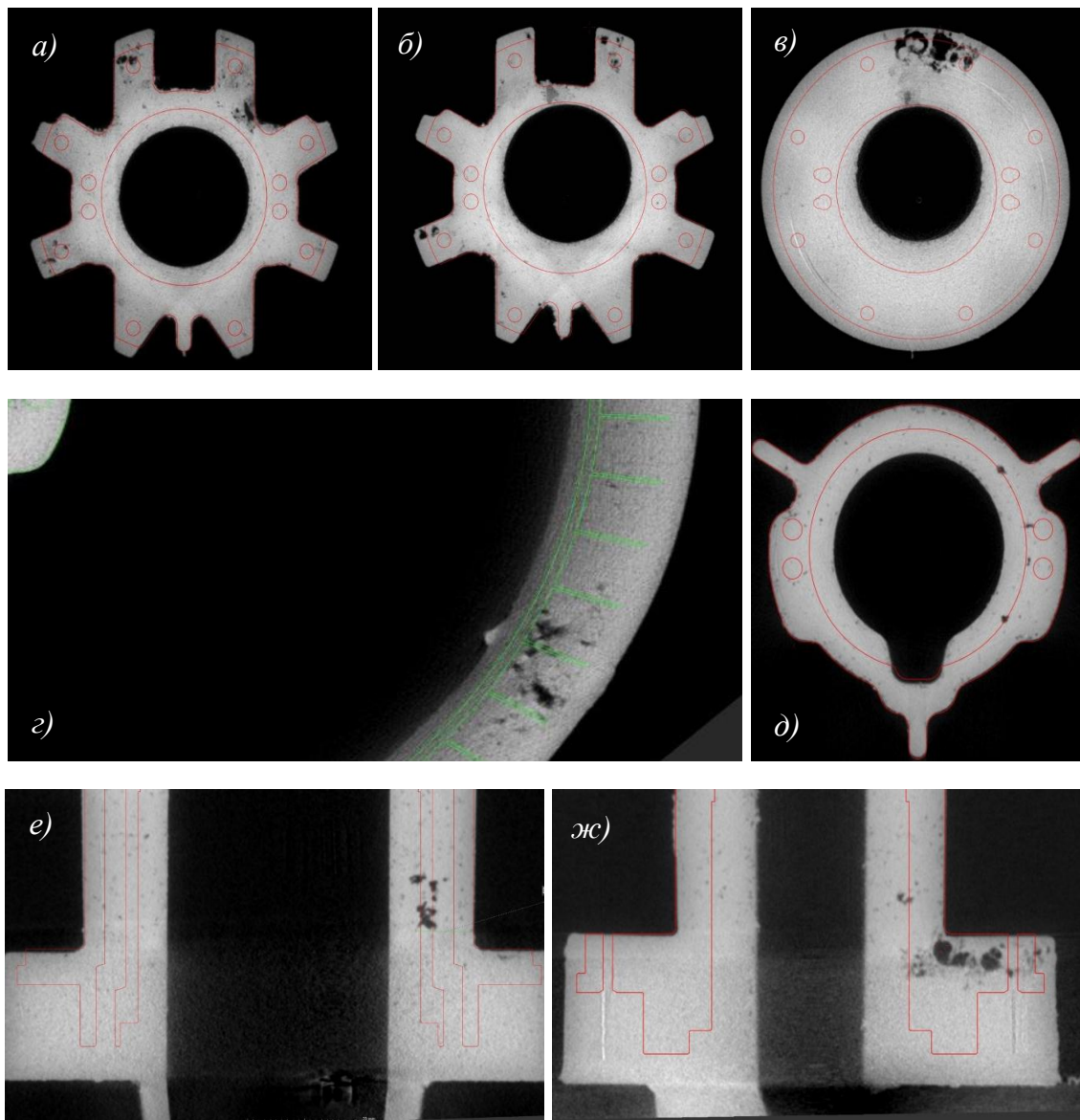


Рис. 5. Томографические изображения фрагментов сечений заготовки корпуса, содержащих дефекты литья в чистовом контуре CAD-модели

На рис. 5, а–г недопустимые усадочные раковины, вызванные проникновением воздуха при заливке отливки, попадают в чистовой контур CAD-модели, поэтому эти заготовки являются безусловно браком. На рис. 5, д показаны мелкие усадочные

раковины, которые сами по себе не являются браковочным признаком. Однако при механической обработке часть этих раковин окажется на чистой поверхности, что приведет к отбраковке заготовки и, следовательно, к бесполезной трате времени на механическую обработку. На рис. 5, *е, ж* усадочные раковины оказались непосредственно в чистовом контуре, следовательно, это брак [10, 13, 14].

Эффективность контроля методом РКТ состоит в том, что значительно сокращается его продолжительность без потери чувствительности. Процесс получения томограммы пары заготовок состоит в сканировании и реконструкции и в среднем составляет 45–50 мин, продолжительность совмещения САД-модели с томограммой 10 мин. Практически мгновенно можно получить изображение любого сечения томограммы, и, поскольку томограф позволяет получить информацию о количестве дефектов и их размерах, анализ изображений занимает значительно меньше времени, чем расшифровка рентгенограмм. Преимуществом данного метода также является возможность точной локализации дефекта для дальнейшего исправления. Однако существует проблема оценки пористости, неизбежно присутствующей в алюминиевых отливках.

Определение балла пористости

Методом РКТ невозможно определить балл пористости, содержащейся в отливке. Рассмотрим причины этого обстоятельства на примере пористости третьего балла. Именно по третьему баллу пористости в основном происходит разбраковка отливок деталей авиационной техники. Согласно ГОСТ 1583–93, на шлифе площадью 1 см^2 должно быть до 12 пор диаметром до 0,3 мм и до двух пор диаметром до 0,5 мм. С помощью РКТ можно получить изображение любого сечения отливки, выполненное под любым углом. Плоскость сечения на томографическом изображении реально имеет конечную толщину, которая равна размеру пикселя (вокселя). На рис. 6 условно представлен фрагмент отливки с третьим баллом пористости и с выделенным сечением толщиной $h = 0,2 \text{ мм}$.

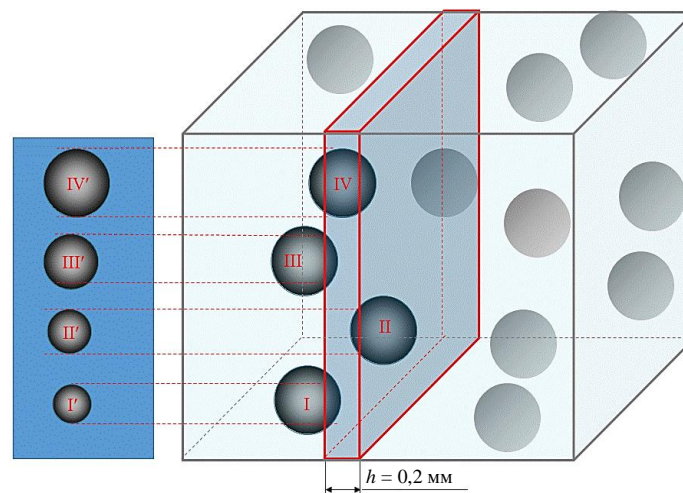


Рис. 6. Возможные варианты взаимного расположения пор (I, II, III, IV) и выбранного при томографии сечения h , а также томографические изображения пор (I', II', III', IV') на мониторе томографа

Поры диаметром 0,3 мм в 1,5 раза больше, чем толщина плоскости сечения h . При произвольной ориентации плоскости по отношению к поре в ее пространство пора попадет не полностью, а лишь ее сечение. На рис. 6 показаны четыре возможных варианта

ориентации пор I, II, III, IV и плоскости их сечения. Для пор I', II', III' на мониторе представлено томографическое изображение их сечений, размеры которых намного меньше реального диаметра пор. Только пора IV' имеет томографическое изображение размером, соответствующим диаметру самой поры. Таким образом, изображения пор на шлифах и в произвольном сечении томографического изображения не совпадают.

Аналогично недопустима оценка пористости посредством «Альбома унифицированной рентгеновской шкалы газовой пористости отливок из литейных алюминиевых сплавов системы Al-Si», так как томографическое изображение сечения отливки толщиной h и рентгенографического снимка эталонного образца, представляющего изображение его проекции, не соответствуют друг другу. На рентгенограмме присутствуют проекции всех пор, имеющихся в отливке.

Поэтому для оценки величины пористости используют традиционный рентгенографический контроль с использованием радиографической пленки классов С3 и С4 [6, 15]. Заготовку корпуса, содержащую пористость (рис. 7), ставили в положение экспонирования под окном рентгеновского аппарата (независимо от того, какова интенсивность пористости на томограмме) и проводили экспонирование в соответствии с действующими нормативными документами. Полученную рентгенограмму расшифровывали.



Рис. 7. Сечение фрагмента заготовки корпуса с изображением пористости

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработаны рентгеновские шкалы пористости для литейных алюминиевых сплавов системы «алюминий–кремний» (силумин): АК12 (АЛ2), АК9ч (АЛ4), АК5М (АЛ5), АК7ч (АЛ9), АК7пч (АЛ9-1), АК8М (АЛ32), АК8л (АЛ34). Этот процесс сопровождался многократным получением отливок, их металлографическими, рентгенографическими и механическими исследованиями, в результате которых установлена однозначная связь между результатами металлографии, изображениями на рентгенограмме и прочностными свойствами, характерными для каждого балла пористости. Шкалы пористости, регламентированные российскими стандартами, содержат зависимости механических свойств сплавов от балла пористости и толщины отливки (табл. 2, рис. 8).

Для оценки балла пористости дефектоскопист использует эталонную рентгеновскую шкалу пористости, которая устанавливает пятибалльную градацию газовой пористости деталей из литейных алюминиевых сплавов. Руководствуясь нормативным документом, оператор дает заключение о балле пористости объекта контроля [5]. Если на контролируемом участке отливки балл пористости превышает предельно допустимый уровень, то отливка считается браком.

Таблица 2

**Зависимость механических свойств сплавов типа силумин
от балла пористости и толщины отливки**

Толщина отливки, мм	Балл пористости									
	I		II		III		IV		V	
	σ_B , МПа	δ , %	σ_B , МПа	δ , %	σ_B , МПа	δ , %	σ_B , МПа	δ , %	σ_B , МПа	δ , %
От 3 до 8	300	3,4	290	2,5	280	2,5	270	2,0	250	0,8
От 8 до 13	290	5,5	280	4,5	270	3,5	260	3,0	240	1,5
От 13 до 18	280	4,4	270	3,5	260	3,0	240	2,5	230	1,5
От 18 до 23	260	3,4	250	3,0	230	2,5	210	2,0	200	1,0
От 23 до 50	250	3,3	230	2,5	200	2,0	180	2,0	160	0,7



Рис. 8. Рентгенограмма эталонных образцов толщиной 5 мм из сплава АК7пч (АЛ9-1) с газовой пористостью с I по V балл

Продолжительность контроля методом РКТ (с учетом подготовки к реконструкции и разделения отливок в программном обеспечении для анализа томограмм) в расчете на одну отливку составляет ~1 ч. Таким образом, продолжительность контроля методом РКТ в 3–5 раз меньше по сравнению с аналогичным показателем для пленочной радиографии. При этом качество контроля выше, так как для РКТ доступны все участки сложной отливки, поскольку возможна визуализация любого сечения объекта контроля.

Заключения

Разработан технологический прием неразрушающего контроля методом РКТ среднегабаритных отливок сложной формы из сплава АК9ч, особенность которого заключается в совместном сканировании пары отливок. Совмещение САД-модели чистового контура отливки и томограммы позволило определить точные координаты дефектов и исключить при разбраковке те, которые находятся вне чистового контура САД-модели.

Установлена невозможность оценки балла пористости методом РКТ, поскольку сравнение проекционного изображения и сечения томограммы некорректно. Толщина сечения томографического изображения соответствует толщине вокселя. Поры, попадающие в сечение, имеют размеры, превышающие его толщину, поэтому их изображение может иметь диаметр, значительно меньше реального.

Проведен расчет и сравнение продолжительности контроля методом РКТ и рентгенографическим методом и показаны преимущества РКТ.

Проведен контроль методами РКТ и пленочной радиографии более 150 заготовок, положительные результаты которых обеспечили практическое подтверждение расчетов.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Белов Е.В., Трапезников А.В., Леонов А.А., Зайцев Д.В. Особенности упрочнения и кинетика старения литейного алюминиевого высокопрочного сплава на основе системы Al–Si–Cu–Mg // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 2 (63). С. 24–34. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 21.08.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-24-34.
2. Горбовец М.А., Николаев Е.В., Старцев В.О. Климатические испытания материалов для Арктики. Часть 1. Требования к материалам // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 4 (77). С. 180–188. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 14.08.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-180-188.
3. Решетников Ю.В., Трапезников А.В., Власова К.А., Леонов А.А. Влияние различных факторов на технологические свойства холоднотвердеющих смесей на фенолформальдегидном связующем. Часть 1 // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 1 (74). С. 63–77. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 14.08.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-63-77.
4. Оглодков М.С., Романенко В.А., Кожекин А.Е. Направления развития технологий плавки и литья алюминий-литиевых сплавов (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 2 (71). С. 51–62. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.08.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-51-62.
5. ГОСТ 1583–93. Сплавы алюминиевые литейные. Технические условия. Минск: Изд-во стандартов, 1993. 30 с.
6. Казанцев С.П., Фурман Е.Л. Дефекты в отливках при литье по выплавляемым моделям. Екатеринбург: УрФУ, 2019. 110 с. URL: https://study.urfu.ru/Aid/Publication/13842/1/1229_Казанцев.pdf (дата обращения: 14.08.2025).
7. Ободовский А.В., Клонов В.В., Ларионов И.А., Потрахов Н.Н. О модернизации рентгенодиагностической установки для проведения томографических исследований // Докл. V Всерос. науч.-практ. конф. производителей рентгеновской техники. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018. С. 60–62.
8. Кротова У.В., Савченко О.А., Митрайкин В.И., Зайцева Т.А., Закиров Р.Х. Применение рентгеновской компьютерной томографии для диагностики композитных конструкций в энергетике // *Проблемы энергетики*. 2024. Т. 26. № 2. С. 15–31.
9. Becker V., Rumyantsev S. Программное обеспечение для визуализации и анализа данных компьютерной томографии // Тез. докл. 4-й Междунар. конф. «Новейшие технологии контроля». М.: Остек-СМТ, 2016. С. 7–9.
10. Косушкин П.А. Передовые технологии для контроля качества // *Вектор высоких технологий*. 2016. № 5 (26). С. 38–42.
11. Van Aarle W., Palenstijn W.J., Cant J. et al. Fast and flexible X-ray tomography using the ASTRA toolbox // *Optic Express*. 2016. Vol. 24. No. 22. P. 25129–25147.
12. Зубова А.В., Пихур О.Л., Бессонов В.Б. и др. Случай хирургического удаления нижних третьих моляров в краниологической серии из крепости Пукара-де-Тилкара (провинция Жужуй, Аргентина) // *Археология, этнография и антропология Евразии*. 2020. Т. 48. № 2. С. 149–156.
13. Сергиенко И.В., Амирова Л.А., Крымова М.А., Тангатаров Р.Р. Цифровые инструменты в профессиональной деятельности специалиста: учеб. пособие для вузов. СПб.: Лань, 2025. 204 с.
14. Бердникова А.А., Верзун Н.А., Колбанев М.О. Архитектура и модели доступа в информационных и коммуникационных системах: учеб. пособие для вузов. СПб.: Лань, 2024. 96 с.
15. Ингачева А.С., Шешкус А.В., Чернов Т.С. и др. Рентгеновский компьютерный томограф – новый инструмент в распознавании // *Труды ИСА РАН*. 2018. Спецвыпуск. С. 90–95.

References

1. Kablov E.N., Belov E.V., Trapeznikov A.V., Leonov A.A., Zaitsev D.V. Strengthening features and aging kinetics of high-strength cast aluminum alloy AL4MS based on Al–Si–Cu–Mg system. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), pp. 24–34. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 21, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-24-34.
2. Gorbovets M.A., Nikolaev E.V., Startsev V.O. Climate testing of Arctic materials. Part 1. Requirements for materials. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 4 (77), pp. 180–188. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 14, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-180-188.

3. Reshetnikov Yu.V., Trapeznikov A.V., Vlasova K.A., Leonov A.A. Different factors influence on technological properties of self-hardening phenol formaldehyde resin sands. Part 1. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 1 (74), pp. 63–77. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 14, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-63-77.
4. Oglodkov M.S., Romanenko V.A., Kozhekin A.E. Directions of development melting and casting technologies of aluminum-lithium alloys (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), pp. 51–62. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 15, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-51-62.
5. State Standard 1583–93. *Aluminum Casting Alloys. Specifications*. Minsk: Publ. House of Standards, 1993, 30 p.
6. Kazantsev S.P., Furman E.L. *Defects in Investment Castings*. Ekaterinburg: UrFU, 2019, 110 p. Available at: https://study.urfu.ru/Aid/Publication/13842/1/1229_Казанцев.pdf (accessed: August 14, 2025)
7. Obodovsky A.V., Klonov V.V., Larionov I.A., Potrakhov N.N. On the Modernization of an X-ray Diagnostic Unit for Tomographic Studies. *Reports of 5th All-Rus. Sci. and Pract. Conf. of X-ray Equipment Manufacturers*. St. Petersburg: ETU «LETI» Publ. House, 2018, pp. 60–62.
8. Krotova U.V., Savchenko O.A., Mitryaikin V.I., Zaitseva T.A., Zakirov R.Kh. Application of X-ray computed tomography for diagnostics of composite structures in the power industry. *Problemy energetiki*, 2024, vol. 26, no. 2, pp. 15–31.
9. Becker B., Rumyantsev S. Software for visualization and analysis of computed tomography data. *Reports of the 4th International Conf. «The Newest Control Technologies»*. Moscow: Ostek-SMT, 2016, pp. 7–9.
10. Kosushkin P.A. Advanced technologies for quality control. *Vektor vysokikh tekhnologiy*, 2016, no. 5 (26), pp. 38–42.
11. Van Aarle W., Palenstijn W.J., Cant J. et al. Fast and flexible X-ray tomography using the ASTRA toolbox. *Optic Express*, 2016, vol. 24, no. 22, pp. 25129–25147.
12. Zubova A.V., Pikhur O.L., Bessonov V.B. et al. A case of surgical removal of lower third molars in a craniological series from the Pucara de Tilcara fortress (Jujuy Province, Argentina). *Arheologiya, etnografiya i antropologiya Evrazii*, 2020, vol. 48, no. 2, pp. 149–156.
13. Sergienko I.V., Amirova L.A., Krymova M.A., Tangatarov R.R. *Digital tools in the professional activities of a specialist: a textbook for universities*. St. Petersburg: Lan, 2025, 204 p.
14. Berdnikova A.A., Verzun N.A., Kolbanov M.O. *Architecture and access models in information and communication systems: a textbook for universities*. St. Petersburg: Lan, 2024, 96 p.
15. Ingacheva A.S., Sheshkus A.V., Chernov T.S. et al. X-ray computed tomography – a new tool in recognition. *Trudy ISA RAN*, 2018, Special issue, pp. 90–95.

Информация об авторах

Демидов Александр Александрович, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Трапезников Андрей Владимирович, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Косарина Екатерина Ивановна, главный научный сотрудник, д.т.н., профессор, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Осияненко Наталья Викторовна, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Alexander A. Demidov, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Andrey V. Trapeznikov, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Ekaterina I. Kosarina, Chief Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), Professor, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Nataliya V. Osiyanenko, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 03.10.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 21.10.2025.

The article was submitted 03.10.2025; approved and accepted for publication after reviewing 21.10.2025