

БЕТАТРОННЫЙ ТОМОГРАФ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ДИАМЕТРОМ ДО 1000 ММ

© 2019 г. В.П. Карих^{1,*}, А.В. Кодолов¹, А.А. Охотников¹, А.А. Скоков¹

¹Федеральный научно-производственный центр «Алтай», Россия 659322 Бийск, Алтайский край,
ул. Социалистическая, 1
E-mail: *kar@frps.secna.ru

Поступила в редакцию 13.11.2018; после доработки 22.01.2019;
принята к публикации 01.02.2019

Представлены результаты разработки и испытаний томографа на основе бетатрона с энергией излучения до 10 МэВ. Томограф позволяет исследовать объекты с просвечиваемой толщиной до 250 мм по стали. В отличие от зарубежных аналогов применено горизонтальное расположение изделия, при котором условия выявления таких дефектов, как трещины и расслоения, наиболее благоприятны, поскольку в таком положении изделие подвергается небольшим деформациям под действием гравитационных сил. Предложенная схема сканирования обладает свойствами томографа третьего поколения, сохраняет качество томограммы и время ее получения при сокращенном количестве детекторов и габаритов томографа. Приведены результаты оценки чувствительности томографа на тестовом образце и результаты контроля изделий, содержащих дефекты.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, бетатронный томограф, компьютерная томография, высокоэнергетические материалы.

DOI:10.1134/S0130308219040080

ВВЕДЕНИЕ

Развитие ракетно-космической техники РФ тесно связано с применением изделий из высокоэнергетических материалов, однако существующая технология их изготовления недостаточно совершенна, поэтому в них могут возникнуть различные дефекты (рис. 1).

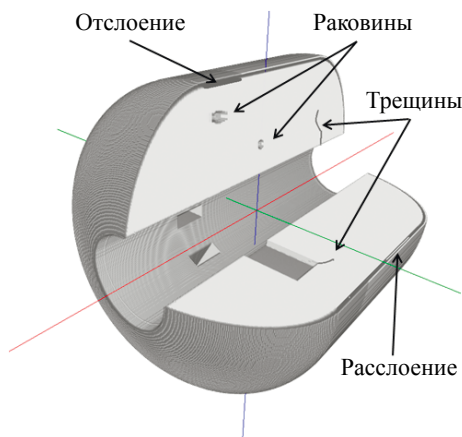


Рис. 1. Возможные дефекты в изделии.

Наличие дефектов может привести к непредсказуемым последствиям в процессе эксплуатации таких изделий. По этой причине в РФ на заводах отрасли в настоящее время применяются три основных метода неразрушающего контроля (НК): радиометрический, радиографический и ультразвуковой. Использование перечисленных методов регламентируется отраслевыми стандартами и обусловлено тем, что каждый метод позволяет исследовать лишь отдельные свойства и характеристики материалов и изделий, имеет различную чувствительность к дефектам определенного вида.

Для контроля сплошности наполнителя используется радиометрический метод, позволяющий обнаруживать раковины объемом 1—10 см³, но не выявляет отслоения и произвольно ориентированные трещины. С помощью ультразвукового контроля обнаруживаются отслоения наполнителя от корпуса площадью 3—9 см², но не выявляются дефекты в зонах под корпусными расслоениями. Возможности радиографического метода ограничены малой производительностью и невысокой чув-

ствительностью (выявляются отслоения от 0,5 мм по раскрытию при известной ориентации плоскости дефекта).

Известно, что томографические методы позволяют значительно повысить чувствительность к дефектам и упростить расшифровку результатов контроля. Упоминания о современных томографах, предназначенных для контроля крупногабаритных объектов, немногочисленны. В [1] представлены результаты использования компьютерного томографа на основе линейного ускорителя электронов фирмы LINAC, имеющего энергию рентгеновского излучения 4,6—9 МэВ и позволяющего контролировать объекты толщиной до 200 мм по стали. В [2] описан инспекционно-досмотровый комплекс на основе бетатрона с энергией излучения 4—9 МэВ и мощностью дозы до 13 Р/мин-м. В известных из литературных источников томографах применяются типовые схемы сканирования второго или третьего поколения. В данной работе рассмотрены технические свойства промышленного томографа третьего поколения с половинным полем облучения сечения крупногабаритного объекта.

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТАННОГО ТОМОГРАФА

В известных зарубежных томографах подобное изделие закрепляется вертикально на поворотном столе, источник и линейка детекторов устанавливаются на определенной высоте [3]. При разработке отечественного томографа предпочтение было отдано горизонтальному сканеру, на котором изделие располагается на вращающихся валках. При горизонтальном расположении изделия дефекты в верхней части имеют тенденцию к раскрытию под действием гравитационных сил (рис. 2), что увеличивает вероятность их выявления.

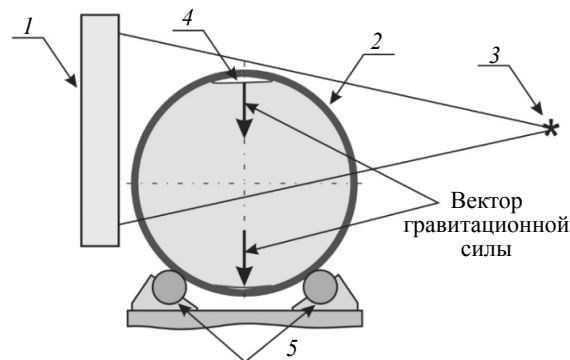


Рис. 2. Влияние гравитационных сил на раскрытие дефекта в верхней части изделия:

1 — приемник излучения; 2 — изделие; 3 — источник излучения; 4 — дефект (отслоение); 5 — вращающиеся валки.

В рентгеновской компьютерной томографии рассматривают пять поколений томографов, каждое из которых определяется своей схемой сканирования [4]. В промышленной томографии в основном применяются томографы второго [3, 5] и третьего поколений. Томографы первого поколения не используются из-за слишком низкой производительности. Томографы второго поколения более производительны, но сложны механически по сравнению с томографами третьего поколения, поскольку требуют вращения и поступательного перемещения при сканировании одного слоя. Для сравнения следует отметить, что в медицинском томографе первого поколения изображения одного среза получали за 4 мин, второго поколения — за 20 с, третьего — за 5 с.

В томографах третьего поколения веерный пучок излучения перекрывает все сечение контролируемого объекта. Процесс сканирования заключается лишь во вращении системы источник — детекторы относительно объекта контроля, что равносильно вращению объекта при неподвижных детекторах и источнике. Схема сканирования такого томографа представлена на рис. 3. В данном варианте в поле облучения попадают вращающиеся валки, на которых расположен объект контроля.

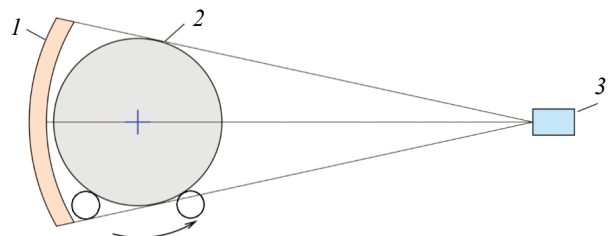


Рис. 3. Схема сканирования томографа третьего поколения:
1 — приемник излучения; 2 — объект контроля; 3 — источник излучения.

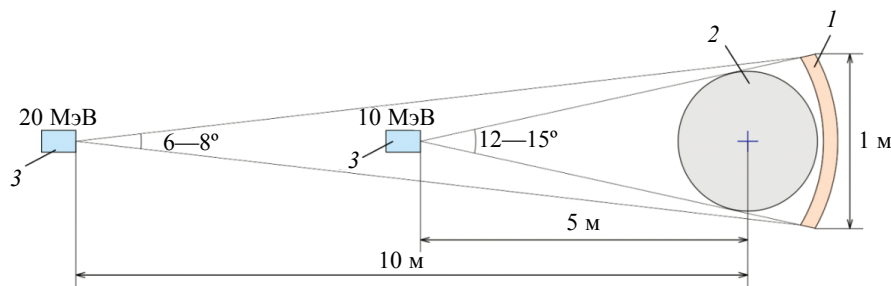


Рис. 4. Зависимость фокусного расстояния от энергии электронного ускорителя:
1 — приемник излучения; 2 — объект контроля; 3 — источник излучения.

При томографии крупногабаритных объектов применяют источники жесткого тормозного излучения – ускорители электронов с энергией до 10–20 МэВ. Основная часть пучка излучения сосредоточена в конусе, раствор угла которого уменьшается с увеличением энергии электронов [6]. Таким образом, чем больше энергия источника тормозного излучения, тем дальше от объекта он должен располагаться (рис. 4).

Томограф третьего поколения с жестким тормозным излучением представляется достаточно громоздким в связи с большим удалением источника.

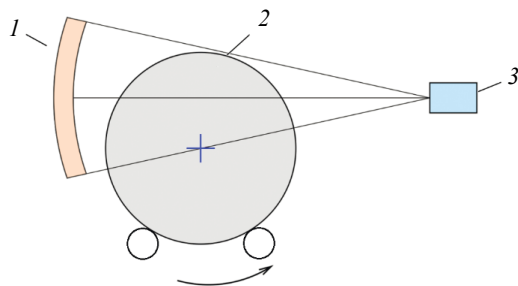


Рис. 5. Схема сканирования томографа третьего поколения с половинным полем облучения:
1 — линейка детекторов; 2 — объект контроля;
3 — источник излучения.

Рассмотрим томограф, в котором веерный пучок перекрывает не все сечение объекта, а лишь половину (рис. 5).

Сканирование производится поворотом объекта на 360°. Очевидно, что за один оборот получается полный набор данных для реконструкции томограммы. При такой схеме сканирования вдвое уменьшается количество детекторов при том же разрешении и вдвое сокращается расстояние от источника до центра объекта. Кроме того, вращающиеся валки не влияют на регистрируемый поток излучения. Приближение источника позволяет увеличить скорость сканирования, поскольку возрастает интенсивность излучения. В результате уменьшаются габариты томографа и его стоимость. Новое сканирование повлекло разработку

соответствующего алгоритма реконструкции томограмм. Элементы новизны предлагаемого томографа изложены в патенте [7].

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОМОГРАФА

На сегодняшний день изготовлены и эксплуатируются два бетатронных томографа (на ФКП «Комбинат «Каменский» и в АО «ФНПЦ «Алтай»), предназначенных для контроля изделий из высокоэнергетических материалов диаметром до 1000 мм. Конструкция томографа представлена на рис. 6.

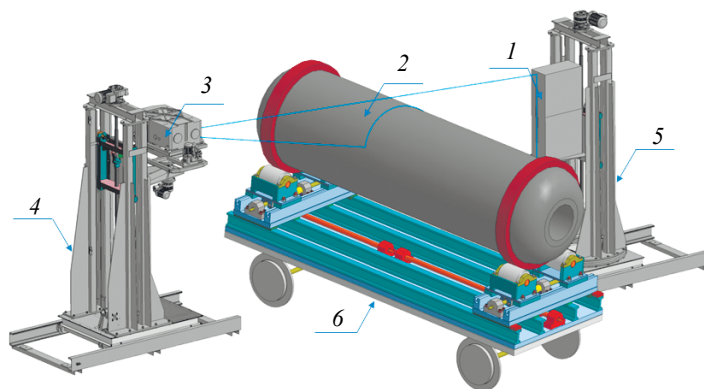


Рис. 6. Конструкция бетатронного томографа:

1 — детекторная линейка; 2 — изделие; 3 — излучатель бетатрона; 4 — устройство ориентации бетатрона; 5 — устройство ориентации детекторной линейки; 6 — платформа-сканер на шаговых двигателях.

Источником излучения является бетатрон МИБ-10 с энергией тормозного излучения до 10 МэВ и мощностью дозы до 25 Р/мин-м, что позволяет просвечивать изделия до 1000 мм (при $\rho \approx 1,8 \text{ г/см}^3$). Бетатрон имеет малые размеры фокусного пятна ($0,3 \times 3,0 \text{ мм}$) по сравнению с линейными ускорителями (в Linatron L-6000 размер фокусного пятна $3,0 \times 3,0 \text{ мм}$), что дает хорошую резкость изображения.

В качестве приемника излучения используется детекторная линейка, содержащая 256 детекторов. Каждый детектор представляет собой сборку «сцинтиллятор-фотодиод», размеры сцинтиллятора — $4 \times 6 \times 30 \text{ мм}$, материал сцинтиллятора — вольфрамат кадмия (CdWO_4). Используемые кремниевые фотодиоды обладают высокими чувствительностью, быстродействием и низкими темновыми токами.

Для позиционирования и сканирования изделия используется прецизионная платформа-сканер на шаговых двигателях с точностью позиционирования до 0,25 мм. Скорость сканирования (вращения) изделия — 25—35 мм/с.

Сканирование сечения обычно занимает 2—5 мин, разрешение томограммы — 512×512 пикселей, используемые алгоритмы реконструкции — метод обратного проецирования с фильтрацией двойным дифференцированием (ОПФДД) [8] и метод обратного проецирования на основе фильтра Шеппа — Логана [9] с предварительной «переупаковкой» половинных веерных проекций в параллельные.

Предельная чувствительность томографа для максимальной просвечиваемой толщины 1000 мм составляет:

к раковинам — 64 мм^3 ($0,064 \text{ см}^3$);

к трещинам и отслоениям — 0,4 мм по раскрытию.

При уменьшении просвечиваемой толщины чувствительность увеличивается.

Разработанные средства томографии могут быть применены для НК:

твердотопливных ракетных двигателей;

жидкостных ракетных двигателей;

самолетных конструкций.

РЕЗУЛЬТАТЫ КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ

На рис. 7 представлена томограмма тестового образца (помещенного в канал макетного изделия), показывающая чувствительность томографа к различным дефектам.

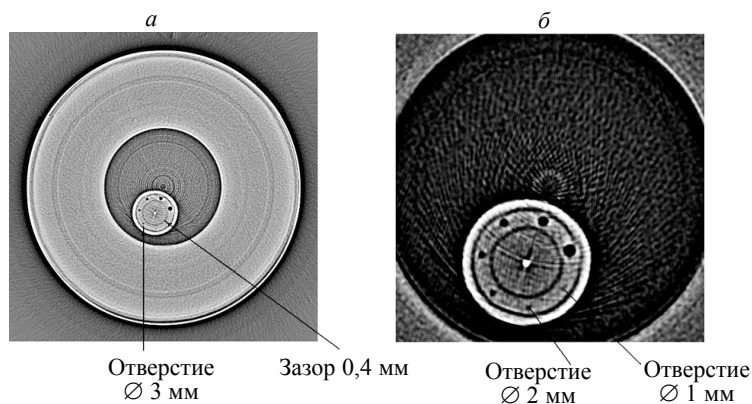


Рис. 7. Томограмма тестового образца (а) и увеличенный фрагмент (б).

На рис. 8 представлены томограммы изделия с дефектами, которые образовались при попадании воздуха при литье.

На рис. 9 представлены томограммы изделия с дефектами, образовавшимися из-за недостаточного заполнения при формовании.

В первом случае отчетливо прорисовываются границы различных элементов в плоскости сечения (конструктива, дефектов и т.п.) за счет увеличения контраста на границах перепада плотности объекта, что повышает надежность обнаружения дефектов и точность контроля геометрических характеристик объекта. Во втором случае определяются плотности материалов внутри контролируемого объекта — чем светлее цвет материала на томограмме, тем больше его плотность, например, черное — воздух, белое — сталь.

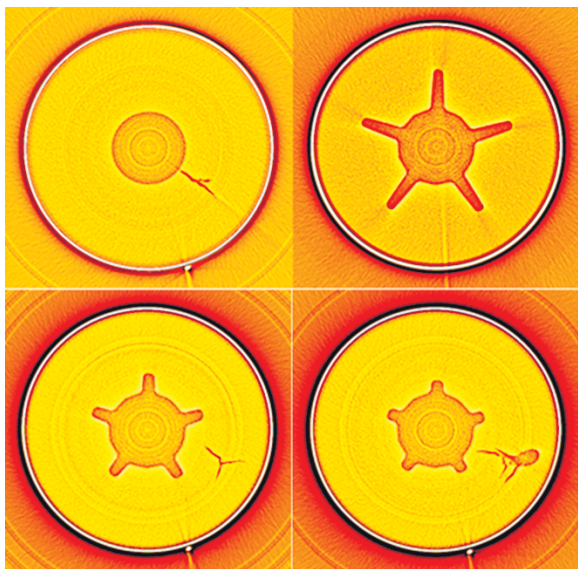


Рис. 8. Томограммы изделия, содержащего дефекты различной формы.

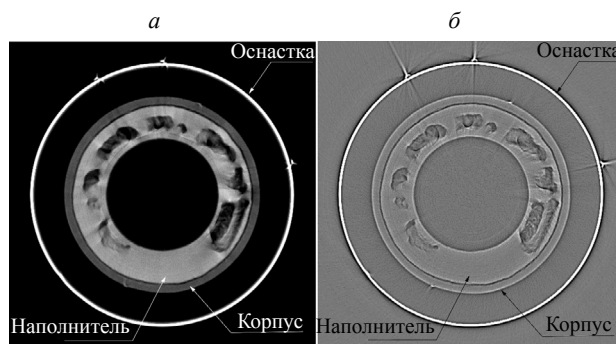


Рис. 9. Томограммы изделия с обнаруженными дефектами, полученные с использованием метода ОПФДД (а) и фильтра Шеппа — Логана (б).

ВЫВОДЫ

На предприятии АО «ФНПЦ «Алтай» разработан и изготовлен бетатронный томограф для контроля ответственных изделий диаметром до 1000 мм. Томограф предназначен для контроля конструктивно сложных и ответственных участков изделий в целях обнаружения дефектов монолитности наполнителя и дефектов сплошности границ скрепления наполнителя с корпусом, а также конкретизации дефектов сложной формы, выявленных другими методами.

Применение средств и методов томографического контроля изделий позволяет исключить неконтролируемые зоны в изделиях и обнаруживать ряд опасных дефектов, для которых возможно определение размеров, конфигурации и расположения в плоскости сечения, а также оценка протяженности в пространстве (по набору томограмм). Кроме того, томографический контроль позволяет проводить оценку взаимного расположения конструктивных элементов в изделиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reims N., Schoen T., Boehnel M., Sukowski F., Firsching M. Strategies for efficient scanning and reconstruction methods on very large objects with high-energy x-ray computed tomography / SPIE Optical Engineering + Applications. International Society for Optics and Photonics, 2014. P. 921209—921209.
2. Борилов В.Н., Чахлов С.В., Рычков М.М., Штейн А.М., Смолянский В.А. Промышленная томография крупногабаритных объектов / XXI Всероссийская конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике. Сборн. тр. Москва, 28 февраля — 2 марта 2017 г. М.: Изд. дом «Спектр», 2017. С. 358—361.
3. Lerner E. CAT scanner probes MX's vital organs // Aerosp. Amer. 1986. V. 24. No 3. P. 24.
4. Календер В. Компьютерная томография. М.: Техносфера, 2006. 343 с.
5. Ключев В.В., Вайнберг Э.И. Рентгеновская вычислительная томография в промышленной диагностике // Приборы и системы управления. 1989. № 5. С. 10—12.
6. Ковалев В.П. Вторичное излучение ускорителей. М.: Атомиздат, 1979. 307 с.
7. Промышленный томограф. Пат. 2431825 Рос. Федерация. МПК G01N 23/04 / В.П. Карих; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Федеральный научно-производственный центр «Алтай», № 2010121804/28; заявл. 28.05.2010; опубл. 20.10.2011. Бюл. № 29. 7 с.: ил.
8. Вайнберг Э.И., Казак И.А., Файнгойд М.Л. Рентгеновская вычислительная томография по методу обратного проецирования с фильтрацией двойным дифференцированием // Дефектоскопия. 1985. № 2. С. 31—39.
9. Shepp L.A., Logan B.F. The Fourier reconstruction of a head section // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1974. V. 21. No.3. P. 21—43.